ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Ing.

PAR
Sébastien BÉRUBÉ

USINAGE EN DÉTOURAGE DE LAMINÉS COMPOSITES CARBONE/ÉPOXY

MONTRÉAL, LE 5 JUILLET 2012

©Tous droits réservés, Sébastien Bérubé, 2012

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

M. Victor Songmené, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

M. Simon Joncas, président du jury
Département en génie de production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Anh Dung Ngô, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 5 AVRIL 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens premièrement à remercier mes directeurs de recherche; monsieur Victor Songmené et monsieur Jean-François Chatelain, d'avoir cru à mon potentiel dès le début de la recherche et de m'avoir donné de judicieux conseils tout au long de ce travail. En plus, je tiens à les remercier de m'avoir supporté durant les moments les plus sombres de la maitrise et d'avoir été de bonne écoute à mon égard, tant un point de vue personnel que professionnel.

Je tiens à remercier Monsieur Imed Zaghbani pour ses facultés et aptitudes à la recherche, à son sens du dévouement et à son ouverture d'esprit.

Je veux remercier mes collègues de projet : messieurs Kaml Hasni, Louis-Alexandre Généreux et Justin Lance pour avoir été soudés et unis tout au long du projet.

Je tiens à remercier le consortium de recherche et d'innovation aérospatiale du Québec (CRIAQ) le MITACS pour avoir gracieusement financé mes recherches tout au long de cette maitrise.

Je tiens à remercier le personnel de l'atelier de fabrication mécanique de l'ÉTS pour leur soutien inconditionnel: M. Alexandre Vigneault, M. Youri Juteau, M. Anthony Remington, M. Hugo Landry et M. Stéphane Hébert.

Je tiens à remercier le personnel rattaché au projet de recherche tant chez Bombardier Aéronautique que chez Minicut international. :

M. Abdelatif Atarsia
M. Alphonso Minicozzi
M.Patrick Cloutier
M. Mathieu Langevin
M. Patrick Leprohon

Et le personnel technique qui m'a permis la fabrication de mes plaques de tests ainsi que la fabrication des outils de coupe.

À mon fils adoré Félix et à ma famille qui m'a toujours supporté!

Longue vie à vous tous!

USINAGE EN DÉTOURAGE DE LAMINÉS COMPOSITES CARBONE/ÉPOXY

Sébastien BÉRUBÉ

RÉSUMÉ

L'usinage des matériaux composites dédiés aux pièces structurales devient de plus en plus courant. Le but de ce travail est de définir la performance d'outils existants afin d'effectuer une sélection d'outils et de définir les plages opérationnelles des outils. Le travail consiste à évaluer les efforts de coupe, la qualité de surface générée et de poser une méthode systémique d'évaluation de la performance. Ce travail comporte une expérimentation visant à cerner les paramètres géométriques influents dans la performance de la coupe dans l'objectif de concevoir des outils de coupe plus performants. La méthodologie de recherche utilisée consiste à l'élaboration de plans d'expériences classiques à multiples facteurs. Les facteurs traités sont les paramètres de coupe, les épaisseurs de laminés composites carbone/époxy quasi isotropes et les différents types de matériaux d'outils de coupe. L'acquisition des données se fait à l'aide d'une table dynamométrique de l'ÉTS, d'un rugosimètre d'états de surface ainsi que de l'utilisation de plusieurs microscopes.

Il est montré que les efforts de coupe dans la direction de l'avance sont proportionnels à la vitesse d'avance, les efforts de coupe dans la direction axiale et normale à la surface usinée sont proportionnels à la vitesse de coupe et à la vitesse d'avance. Selon les quatre outils analysés, l'outil C4 possédant des plaquettes en PCD est l'outil le plus performant selon la méthode de pondération des facteurs de l'équation de l'indice de performance. Dans le cadre de ce travail, une analyse exhaustive de la rugosité a été faite et les principaux résultats obtenus montrent que la rugosité est dépendante des paramètres de coupe et de l'orientation des fibres. Les fibres orientées à 0 degré présentent le meilleur état de surface que ceux aux fibres à -45 degrés possèdent le pire état de surface pour les mêmes paramètres de coupe et pour un même outil. Un angle d'attaque de l'arrête tranchante devrait être de 8 à 10 degrés positifs et posséder un revêtement apte à supporter l'abrasivité des fibres de carbone.

Plusieurs recommandations sont faites dans le cadre de ce travail afin de cerner la coupe par détourage de laminés composites carbone époxy. L'auteur recommande d'effectuer des tests d'usure avec les outils de coupe testés, d'effectuer des tests de résistance des matériaux et de fatigue des matériaux en fonction de l'usure de l'outil, d'effectuer l'analyse de fabrication et la fabrication du prototype d'outil proposé et d'effectuer des tests de coupe et des tests d'usure de l'outil prototype afin de comparer l'outil conçu par l'auteur et les autres outils testés dans le cadre de ce travail.

Mots-Clés : Usinage, matériaux composites, détourage, rugosité, efforts de coupe, indice de performance.

MACHINING OF COMPOSITE LAMINATES CARBON/EPOXY BY TRIMMING

Sébastien BÉRUBÉ

ABSTRACT

The post manufacturing by machining of composites parts is becoming much more usual. The aim of this study is to define the performance of existing cutting tools for composites, in order to suggest the best choices and the optimal cutting conditions for the trimming process of carbon fibres reinforced plastics (CFRP). The evaluation is based on the cutting forces and the surface quality produced through the trimming process. A systemic approach, using weighting factors, is proposed to help the end user for the performance evaluation of the cutters based on its production environment. This work also describes a design of experiments to determine the geometrical parameters which influence the performance of the cut with the objective to design more efficient cutting tools.

For both aspects, the research method used includes the development of a classic design of experiments with multiple factors. The factors discussed are the cutting parameters, the thickness of quasi-isotropic laminated carbon / epoxy material and the different types of cutting tool materials. The data acquisition is done using a dynamometric table for the force evaluation, a profilometer for the surface roughness evaluation as well as optical microscopes for the surface integrity estimation. It is found that the **c**utting forces in the direction of feed is proportional to the feed rate, while cutting forces in the axial direction and normal to the machined surface are proportional to the cutting speed and feed rate. Of the four tool types analyzed, the tool C4 with inserts of PCD is the best performing tool evaluated by the method of weighting factors in the equation of the performance index. As part of this work, a comprehensive analysis of the roughness was made and the main results obtained show that the roughness is dependent on cutting parameters and fiber orientation. Composites with fibers oriented at 0 degree have the best surface roughness and those fiber with a -45 degrees orientation have the worst surface roughness for the same cutting parameters and the same tool.

The cutting tools should have positive rake angle for their cutting edges with a value ranging between 8 to 10 degrees and have a coating able to withstand the abrasiveness of carbon fibers.

Two recommendations are made in the context of this work for the continuity of this research. The first recommendation is to evaluate the tool wearing due to the trimming process with the best cutting tools proposed in order to determine the cost per length of machining for each of these. This performance index has to be evaluated since it is directly related to the final choice of a best cutting tool. The second recommendation is to manufacture new cutting tools based on the optimal geometric parameters proposed in this study and evaluate their performance as compared to the other tools tested in this work.

Keywords: Machining, composite materials, trimming, roughness, cutting force , performance index.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....3

1.1 Modèle de coupe orthogonale de laminés composite carbone époxy.....3
1.1.1 Coupe orthogonale des laminés unidirectionnels 4
1.1.2 Modèle analytique de coupe orthogonale 7
1.1.3 Modèle expérimental de prédiction des efforts en fraisage 13
1.2 Effet de la géométrie des outils de coupe sur les forces d'usinage.....17
1.2.1 Effet de l'angle de coupe ou d'attaque 17
1.2.2 Effet de l'angle de dépouille 19
1.2.3 Effet du rayon de bec 22
1.2.4 Effet de l'angle d'hélice..... 25
1.3 Effet des matériaux et des types de revêtement des outils de coupe orientés dans le détourage des laminés composites 27
1.3.1 Acier rapide..... 28
1.3.2 Meule abrasive 29
1.3.3 Carbure..... 31
1.3.4 Revêtements CVD et PVD pour les carbures 34
1.3.5 Diamant poly cristallin (PCD) 36
1.4 Usure, durée de vie et détérioration de l'outillage de coupe orienté dans le détourage de laminés composites carbone/époxy.....39
1.5 Impact de l'état de surface sur les propriétés mécaniques.....41
1.6 Critique d'expérimentation et limitation des études. 45

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE D'EXPÉRIMENTATION.....47

2.1 Introduction.....47
2.2 Méthodologie d'expérimentation pour l'évaluation de la performance des outils de coupe 47
2.2.1 Description de la machine, du système d'aspiration et du gabarit d'usinage..... 48
2.2.2 Descriptions des échantillons..... 51
2.2.3 Description de l'outillage..... 56
2.2.3.1 Description de l'outil C1..... 57
2.2.3.2 Description de l'outil C2..... 60
2.2.3.3 Description de l'outil C3..... 60
2.2.3.4 Description de l'outil C4..... 61
2.2.4 Description et choix des opérations de coupe..... 61
2.2.5 Système de Mesures et d'observation visuel 64
2.2.5.1 Système d'acquisition des forces 64
2.2.5.2 Système de mesure de la rugosité 65

2.2.5.3 Observation de la délamination 69
2.2.6 Acquisition sonore et visuelle des coupes pour l'identification des zones de stabilités dynamique. 69
2.2.7 Déroulement du programme machine et nomenclature des échantillons 70
2.2.8 Effet du plan d'expérimentation pour le détourage des laminés carbone/époxy. 73
2.3 Méthodologie d'expérimentation pour l'évaluation de l'influence des paramètres géométriques des outils de coupe sur le détourage des laminés composites 73
2.3.1 Plan d'expérience pour évaluer l'influence des paramètres géométriques des outils de coupe sur le détourage des laminés composites. 73
2.3.2 Description de l'outillage et des échantillons 74
2.3.2.1 Outillage de coupe 74
2.3.2.2 Outillage de montage et de serrage 77
2.3.3 Description et choix des opérations de coupe 78
2.3.4 Systèmes de mesure. 79

CHAPITRE 3 TRAITEMENT DES RÉSULTATS 81

3.1 Performance des outils de coupe 81
3.1.1 Forces 81
3.1.1.1 Forces de coupe pour l'outil C1 82
3.1.1.2 Forces de coupe pour l'outil C2 88
3.1.1.3 Forces de coupe pour l'outil C3 92
3.1.1.4 Forces de coupe pour l'outil C4 96
3.1.1.5 Comparaison des efforts des différents outils 100
3.1.2 Observation de l'usure des outils après la phase d'essais de coupe. 102
3.1.3 Effet du plan d'expérimentation sur les efforts de coupe 106
3.1.4 Finis de surface 107
3.1.4.1 Comparaison viso-tactile. 108
3.1.4.2 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C1 109
3.1.4.3 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C2 110
3.1.4.4 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C3 111
3.1.4.5 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C4 112
3.1.4.6 Résultats des mesures de rugosité 112
3.1.4.7 Résultats des clichés des surfaces au microscope électronique à balayage 115
3.1.4.8 Résultats de rugosité pli par pli pour l'outil C4 118
3.1.5 Génération des défauts lors de l'usinage 122

3.1.5.1 Analyses non destructives avant la coupe 122
3.1.5.2 Rebords ébréchés et fibres non coupées 126
3.1.5.3 Analyses non destructives après la coupe 128
3.2 Résultats de l'expérimentation sur l'effet des paramètres géométriques sur le détourage des laminés composites. 129
3.2.1 Forces de coupe..... 129
3.2.2 Défauts de surface..... 133
3.2.3 Observation de l'usure de l'outillage..... 135

CHAPITRE 4 ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION 138

4.1 Identification de la performance de l'outillage de coupe.....138
4.1.1 Paramètres influents et équations de prédiction des efforts de coupe 138
4.1.1.1 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C1 138
4.1.1.2 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C2 143
4.1.1.3 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C3 147
4.1.1.4 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C4 150
4.1.2 Prédiction de l'état de surface..... 153
4.1.3 Équation d'identification de l'indice de performance 156
4.1.4 Attribution de la pondération des facteurs de l'équation de l'indice de performance 157
4.1.5 Comparaison de l'outillage..... 159
4.2 Identification des paramètres géométriques influant lors du détourage de laminés carbone/époxy 162
4.2.1 Analyse des efforts de coupe et objectif d'optimisation..... 162
4.2.2 Paramètres de coupe et géométriques ayant générés la meilleure qualité de surface. 165
4.2.3 Conception de prototype et analyse structurale 166
4.2.3.1 Conception préliminaire du prototype. 166
4.2.3.2 Analyse structurale du prototype 169

CONCLUSION 173

RECOMMANDATIONS 176

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....184

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 Propriétés mécano-thermo-électrique des quatre grades de PCD de Diamond Innovation (GE, 2007) 37

Tableau 1.2 Forme des bruts de PCD de Diamond Innovation (GE, 2007) 38

Tableau 1.3 Résultats de la rugosité pour les différentes orientations de fibres pour les trois procédés testés Tirée de Arola et Ramulu (1994) 43

Tableau 2.1 Paramètres machine de la K2X10 de Huron 49

Tableau 2.2 Rosette d'orientation et liste du séquencement des fibres pour les laminés testés 54

Tableau 2.4 Propriétés mécaniques pour les laminés cuits (Courtoisie de Bombardier Aéronautique) 55

Tableau 2.5 Résumé des paramètres géométriques de l'outil C1 à C4 59

Tableau 2.6 Résumé des paramètres du plan d'expérience 63

Tableau 2.7 Résumé des plages d'amplitude de force de la table KISTLER 9255B 64

Tableau 2.8 Paramètres d'utilisation du profilomètre Mitutoyo SJ-400 66

Tableau 3.1 Grille d'évaluation viso-tactile 108

Tableau 3.2 Réponses viso-tactiles de l'état de surface produit avec l'outil C1 pour les trois plaques 109

Tableau 3.3 Réponses viso-tactiles de l'état de surface produit avec l'outil C2 pour les trois plaques 110

Tableau 3.4 Réponses viso-tactiles de l'état de surface de l'outil C3 produit pour les deux plaques 111

Tableau 3.5 Réponses viso-tactiles de l'état de surface de l'outil C4 pour les trois plaques 112

Tableau 3.6 Traitement des forces moyennes en direction des X d'un outil avec une hélice neutre (0 degré) avec un angle d'attaque variant de 0 à 15 degrés. 132

Tableau 3.7 Traitement des amplitudes de forces en direction des X d'un outil avec une hélice neutre (0 degré) avec un angle d'attaque variant de 0 à 15 degrés. 132

Tableau 3.8 Récapitulatif des essais de coupe ayant générés une coupe sans défaut.....135

Tableau 4.1 ANOVA sur FX pour l'outil C1 R2=98.003 modèle du second degré.....139

Tableau 4.2 ANOVA sur FX pour l'outil C1 R2=92.48 modèle du premier degré 139

Tableau 4.3 ANOVA sur FY pour l'outil C1 R2= 58.5 modèle du second degré.....139

Tableau 4.4 ANOVA sur FY pour l'outil C1 R2=40.70 modèle du premier degré 139

Tableau 4.5 ANOVA sur FZ pour l'outil C1 R2 =51.84 modèle du second degré 140

Tableau 4.6 ANOVA sur FZ pour l'outil C1 R2=38.42 modèle du premier degré.....140

Tableau 4.7 ANOVA sur FC pour l'outil C1 R2= 72.53 modèle du second degré.....140

Tableau 4.8 ANOVA sur FC pour l'outil C1 R2=64.63 modèle du premier degré 140

Tableau 4.9 Résultats des coefficients de régression pour les deux modèles pour l'outil C2 146

Tableau 4.10 Résultat des coefficients de régression pour les deux modèles pour l'outil C3 149

Tableau 4.11 Résultats des coefficients de régression pour les deux modèles pour l'outil C4 153

Tableau 4.12 Critère vt pour les échantillons mesurés des essais avec l'outil C4.....155

Tableau 4.13 Pondération des facteurs de l'équation de l'indice de performance.....158

Tableau 4.14 Plages opératoires des outils testés pour une plaque de 32 plis.....159

Tableau 4.15 Valeurs des paramètres des outils testés pour une plaque de 32 plis.....160

Tableau 4.16 Paramètres optimum pour maximiser Fz moyen 162

Tableau 4.17 Paramètres optimum pour minimiser l'amplitude de Fz.....162

Tableau 4.18 Paramètres optimum pour minimiser Fx moyen.....163

Tableau 4.19 Paramètres optimum pour minimiser l'amplitude de Fx 163

Tableau 4.20 Désirabilité et objectif d'optimisation à réponses multiples.....163

Tableau 4.21 Paramètres optimum d'optimisation à réponse multiple 164

Tableau 4.22 Valeur des réponses aux facteurs optimums.....164

Tableau 4.23 Paramètres des facteurs analysés selon leur mode statistique 165

Tableau 4.24 Valeurs des facteurs analysés et d'optimization pour réduire les défauts en maximisant le taux d'enlèvement de matière.....166

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Schématisation de la coupe orthogonale sous le modèle de Merchant Tirée de Altintas (2006, p. 170) 3

Figure 1.2 Schématisation de l'orientation de la fibre durant la coupe orthogonale Tirée de Bhatnagar *et al.* (1995) 5

Figure 1.3 Schématisation de l'orientation de la fibre durant la coupe orthogonale Tirée de Wang, Ramulu et Arola, (1995) 5

Figure 1.4 Schématisation des modes de coupe en fonction de l'orientation de la fibre Tirée de Wang, Ramulu et Arola (1995) 6

Figure 1.5 Définition des variables , des zones de déformation pour une angularité de fibre de 0 à 90 degrés Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001) 7

Figure 1.6 Zone 1 : Le copeau Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001) 7

Figure 1.7 Zone 2 : La pression du rayon Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001) 7

Figure 1.8 Zone 3 :Efforts de retour élastique Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001) 7

Figure 1.9 Schématisation des variables de coupe Tirée de Kalla *et al.* (2005) 14

Figure 1.10 Angle des laminés étudiés Tirée de Kalla *et al* (2005) 14

Figure 1.11 Repère orthogonale des forces Tirée de Kalla *et al.* (2005) 14

Figure 1.12 Schématisation des angles dans le modèle 15

Figure 1.13 Variation des coefficients de coupe expérimentaux et prédit en fonction de l'orientation des fibres et l'épaisseur de copeau en fraisage par opposition 16

Figure 1.14 Schématisation des variables angulaires Tirée de Wang et Zhang (2003) 17

Figure 1.15 Mode de rupture selon l'angle d'attaque 18

Figure 1.16 Effet de l'angle de coupe sur les efforts de poussé (a) et les efforts d'avance (b) Tirée de Wang et Zhang (2003) 18

Figure 1.17 Effet de l'angle de coupe sur la qualité de surface d'une coupe à 0.01mm (a) et 0.05mm (b) d'épaisseur Tirée de Wang et Zhang (2003) 18

Figure 1.18 Effet de l'angle de dépouille sur les efforts résultants et l'orientation de la force de coupe résultante Tirée de Wang, Ramulu et Arola (1995a).....19

Figure 1.19 Surface de réponse des forces de coupe en fonction de l'angle de coupe (γ) et de l'angle de dépouille (α) de l'outil Tirée de Ramulu (1997).....21

Figure 1.20 Surface de réponse des forces d'avance en fonction de L'angle de coupe (γ) et de l'angle de dépouille (α) de l'outil l'outil Tirée de Ramulu (1997).....21

Figure 1.21 Mode de rupture en fonction d'un rayon de bec petit et grand Tirée de Girot (2009) 22

Figure 1.22 Schématisation de la coupe d'un laminé à 90 degrés avec un outil coupant et moins coupant Tirée de Girot (2009) 23

Figure 1.23 Microstructure de la zone coupée d'un laminé à 90 degrés Tirée de Wang et Zhang (2003) 23

Figure 1.24 Microstructure de la zone coupée d'un laminé à 135 degrés d'orientation Tirée de Rao, Mahajan et Bhatnagar (2008) 25

Figure 1.25 Schématisation de la coupe d'un laminé à -45 degrés avec un outil coupant et moins coupant Tirée de Girot (2009) 25

Figure 1.26 Géométrie typique d'une fraise à hélices Tirée de Altintas (2006).....26

Figure 1.27 Schématisation de l'ouverture d'une fissure en mode 1 Tirée de Kim et Dharan (1989) 26

Figure 1.28 Fraise à détourer par IMCO 27

Figure 1.29 Fraise à hélice neutre par IMCO 27

Figure 1.30 Graphique du taux de variation de dureté en fonction de la température Tirée de Bayer (2002b) 29

Figure 1.31 Échelle des dureté Knoop des cristaux abrasifs Tirée de William (2002).....30

Figure 1.32 Propriétés mécaniques des carbures lié au du Cobalt Tirée de Santhanam (2002a) 31

Figure 1.33 Carbure submicro grain 6% Co.....32

Figure 1.34 Carbure grain moyen 3% Co.....32

Figure 1.35 Carbure grain grossier 15% de Co 32

Figure 1.36 Graphiques de la dureté, résistance à l'usure et à la résistance aux impacts en fonction du % de cobalt (gracieuseté de Sandvik Coromant) 33

Figure 1.37 Vue de coupe d'un outil de coupe revête de diamant par la méthode CVD. Tirée de Karner *et al.* (1996) 35

Figure 1.38 Test de résistance à la rupture transverse sur un carbure non revêtue et revêtue par la méthode de flexion par trois points sur un carbure à 73WC-19(Ti,Ta,Nb)-8Co 36

Figure 1.39 Schématisation de l'usure en flanc selon la norme ISO 8688-2 39

Figure 1.40 Tests d'usure en flanc de différent outils et différents revêtement Tirée de Ferreira, Coppini et Miranda (1999) 41

Figure 1.41 Spécimen de test de flexion à quatre points Tirée de Arola et Ramulu (1994) 42

Figure 1.42 Courbes typiques du chargement/déflexion pour les spécimens de l'essai de flexion Tirée de Arola et Ramulu (1994) 44

Figure 2.1 Modèle de la structure de la machine HURON K2X10 49

Figure 2.2 Système d'aspiration à buses fixes et mobile 50

Figure 2.3 Vue explosée du montage d'usinage 51

Figure 2.4 Rampe d'application de température et de pression en fonction du temps pour la matière unidirectionnel. Tirée de BAPS 532-027 52

Figure 2.5 Coupe transversale des constituants pour la fabrication de laminés composites Tirée de BAPS 532-027 52

Figure 2.6 Étapes des processus des plaques de tests 56

Figure 2.7 Pas de l'outil C1 57

Figure 2.8 Hélice de l'outil C1 57

Figure 2.9 Lèvre de coupe de l'outil C1 57

Figure 2.10 Pas de l'outil C2 57

Figure 2.11 Hélices de l'outil C2 57

Figure 2.12 Lèvre de coupe de l'outil C2 57

Figure 2.13 Pas de l'outil C3 58

Figure 2.14 Hélice de l'outil C3 58

Figure 2.15 Hélice de l'outil C4 58

Figure 2.16 Lèvre de coupe de l'outil C4 58

Figure 2.17 Graphique des coûts des outils en fonction de la quantité (en date du 20 novembre 2010) 60

Figure 2.18 Schéma du mode de coupe d'un outil en détourage (Courtoisie de MAPAL) 63

Figure 2.19 Détail des dimensions de la table dynamométrique....65

Figure 2.20 Vue isométrique de l'assemblage table dynamométrique plaque-gabarit d'interface....65

Figure 2.21 Système du profilomètre Mitutoyo SJ-400 (Mitutoyo, 2000) 66

Figure 2.22 Illustration de l'impact d'un cutoff large et petit (courtoisie de http://www.digitalmetrology.com)....67

Figure 2.23 Table de positionnement micrométrique pour mesure de rugosité Tirée de Mitutoyo(2000)....68

Figure 2.24 Plaquette d'échantillons viso-tactile....68

Figure 2.25 Appareil photo/caméra numérique Fujifilm FinePix S5200....70

Figure 2.26 Déroulement d'usinage de l'expérimentation dans la direction des Y négatif Machine....71

Figure 2.27 Dessin explicatif de la nomenclature des échantillons archivés 72

Figure 2.28 Dessin de détail générique de l'outillage de tests....75

Figure 2.29 Résultat des outils machinés 76

Figure 2.30 Projection de contrôle de la qualité d'une arrête tranchante de l'outil 76

Figure 2.31 Gabarit expérimental de coupe 77

Figure 2.32 Identification des zones de l'outil utilisé lors de la coupe....78

Figure 3.1 Signaux des efforts de coupe de 2 rotations d'un outil à huit dents 82

Figure 3.2 Signaux des efforts de coupe de 4 rotations d'un outil à deux dents....82

Figure 3.3 Schéma de la direction des forces d'avance 83

Figure 3.4 Schéma de la direction des forces normales 83

Figure 3.5 Schéma de la direction des forces axiales.....83

Figure 3.6 Graphique des efforts d'avances de l'outil C1 dans un laminé 24 plis.....83

Figure 3.7 Graphique des efforts normaux de l'outil C1 dans un laminé 24 plis 83

Figure 3.8 Graphique des efforts axiaux de l'outil C1 dans un laminé 24 plis.....84

Figure 3.9 Graphique des efforts d'avances de l'outil C1 dans un laminé 32 plis.....84

Figure 3.10 Graphique des efforts normaux de l'outil C1 dans un laminé 32 plis 84

Figure 3.11 Graphique des efforts axiaux de l'outil C1 dans un laminé 32 plis.....85

Figure 3.12 Graphique des efforts d'avance de l'outil C1 dans un laminé 40 plis.....85

Figure 3.13 Graphique des efforts normaux de l'outil C1 dans un laminé 40 plis 85

Figure 3.14 Graphique des efforts axiaux de l'outil C1 dans un laminé 40 plis.....86

Figure 3.15 Graphique des forces normales de coupe selon la vitesse de coupe dans un laminé de 24 plis pour l'outil C1 87

Figure 3.16 Graphique des forces normales de coupe selon la vitesse de coupe dans un laminé de 32 plis pour l'outil C1 87

Figure 3.17 Graphique des forces normales de coupe selon la vitesse de coupe dans un laminé de 40 plis pour l'outil C1 87

Figure 3.18 Graphique des efforts d'avance de l'outil C2 dans un laminé 24 plis.....89

Figure 3.19 Graphique des efforts normaux de l'outil C2 dans un laminé 24 plis 89

Figure 3.20 Graphique des efforts axiaux de l'outil C2 dans un laminé 24 plis.....89

Figure 3.21 Graphique des efforts d'avance de l'outil C2 dans un laminé 32 plis.....90

Figure 3.22 Graphique des efforts normaux de l'outil C2 dans un laminé 32 plis 90

Figure 3.23 Graphique des efforts axiaux de l'outil C2 dans un laminé 32 plis.....90

Figure 3.24 Graphique des efforts d'avance de l'outil C2 dans un laminé 40 plis.....91

Figure 3.25 Graphique des efforts normaux de l'outil C2 dans un laminé 40 plis 91

Figure 3.26 Graphique des efforts axiaux de l'outil C2 dans un laminé 40 plis.....91
Figure 3.27 Graphique des efforts d'avance de l'outil C3 dans un laminé 24 plis.....92
Figure 3.28 Graphique des efforts axiaux de l'outil C3 dans un laminé 24 plis.....92
Figure 3.29 Graphique des efforts d'avance de l'outil C3 dans un laminé 32 plis.....93
Figure 3.30 Graphique des efforts normaux de l'outil C3 dans un laminé 32 plis.....93
Figure 3.31 Graphique des efforts axiaux de l'outil C3 dans un laminé 32 plis.....93
Figure 3.32 Graphique des efforts d'avance de l'outil C3 dans un laminé 40 plis.....94
Figure 3.33 Graphique des efforts normaux de l'outil C3 dans un laminé 40 plis.....94
Figure 3.34 Graphique des efforts axiaux de l'outil C3 dans un laminé 40 plis.....94
Figure 3.35 Graphique des efforts d'avance de l'outil C4 dans un laminé 24 plis.....96
Figure 3.36 Graphique des efforts normaux de l'outil C4 dans un laminé 24 plis.....96
Figure 3.37 Graphique des efforts axiaux de l'outil C4 dans un laminé 24 plis.....97
Figure 3.38 Graphique des efforts d'avance de l'outil C4 dans un laminé 32 plis.....97
Figure 3.39 Graphique des efforts normaux de l'outil C4 dans un laminé 32 plis.....97
Figure 3.40 Graphique des efforts axiaux de l'outil C4 dans un laminé 32 plis.....98
Figure 3.41 Graphique des efforts d'avance de l'outil C4 dans un laminé 40 plis.....98
Figure 3.42 Graphique des efforts normaux de l'outil C4 dans un laminé 40 plis.....99
Figure 3.43 Graphique des efforts axiaux de l'outil C4 dans un laminé 40 plis.....99
Figure 3.44 Comparaison des efforts d'avance des technologies d'outils testées.....101
Figure 3.45 Comparaison des efforts normales des technologies d'outils testées.....101
Figure 3.46 Comparaison des efforts axiales des technologies d'outils testées 101
Figure 3.47 Observations de l'usure de l'outil C1 après la coupe(X10).....102
Figure 3.48 Agrandissement de l'usure sur une lèvre de coupe de C1 (X50) 102
Figure 3.49 Observations de l'usure de l'outil C2 après la coupe (X10).....103

Figure 3.50 Observations de l'usure de l'outil C3 après la coupe (X10) 104

Figure 3.51 Agrandissement de l'usure sur deux lèvres de coupe de C3 (X50).....104

Figure 3.52 lèvre de coupe de l'outil C4(X10) 105

Figure 3.53 Agrandissement de l'arrête tranchante de l'outil C4 (X50) 105

Figure 3.54 Comparaison des efforts moyens d'avance de l'expérimentation inversée 107

Figure 3.55 Comparaison des efforts moyens d'avance de l'expérimentation inversée à Vc 4 107

Figure 3.56 Résultats de la rugosité transverse en Ra pour C1 113

Figure 3.57 Résultats de la rugosité transverse en Rt pour C1.....113

Figure 3.58 Résultats de la rugosité transverse en Ra pour C3 114

Figure 3.59 Résultats de la rugosité transverse en Rt pour C3.....114

Figure 3.60 Résultats de la rugosité longitudinale en Ra pour C1 115

Figure 3.61 Résultats de la rugosité longitudinale en Rt pour C1.....115

Figure 3.62 Agrandissement des surfaces usinées en opposition avec l'outil C1 et la vitesse de coupe 2 116

Figure 3.63 Agrandissement à 30 X de la surface machinée par l'outil C1 à la vitesse de coupe 2 pour l'avance 1 117

Figure 3.64 Agrandissement de deux plis coupés à VC2, av1 pour une orientation de fibre de 0 et -45 degrés (X 250) 118

Figure 3.65 Échantillons sélectionnés pour l'évaluation pli par pli de la rugosité 119

Figure 3.66 Profils de rugosité Rt et Rv pour des conditions de coupes différentes.....120

Figure 3.67 Évolution de la rugosité Ra en fonction de l'avance 121

Figure 3.68 Évolution de la rugosité Rt en fonction de l'avance.....121

Figure 3.69 Évolution de la rugosité Rt en fonction de l'avance pour différente orientations de fibres.....122

Figure 3.70 Évolution de la rugosité Ra en fonction de l'avance pour différente orientations de fibres.....122

Figure 3.71 Image compilée du C-scan de la plaque 1 123

Figure 3.72 Agrandissement de la plaque 1 analysée 123

Figure 3.73 Image compilée du C-scan de la plaque 2 123

Figure 3.74 Agrandissement de la plaque 2 analysée 123

Figure 3.75 Image compilée du C-scan de la plaque 3 124

Figure 3.76 Agrandissement de la plaque 3 analysée 124

Figure 3.77 Image compilée du C-scan de la plaque 4 124

Figure 3.78 Agrandissement de la plaque 4 analysée 124

Figure 3.79 Image compilée du C-scan de la plaque 5 125

Figure 3.80 Agrandissement de la plaque 5 analysée 125

Figure 3.81 Image compilée du C-scan de la plaque 6 125

Figure 3.82 Agrandissement de la plaque 6 analysée 125

Figure 3.83 Délamination à la couche supérieure du laminé 127

Figure 3.84 Fibres non coupées à la sortie de la coupe. 127

Figure 3.85 Arrachement des la couche externe du laminé 128

Figure 3.86 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK1 possédant un angle d'attaque de 0 degré et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev.....130

Figure 3.87 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK2 possédant un angle d'attaque de 5 degrés et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev.....130

Figure 3.88 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK3 possédant un angle d'attaque de 10 degrés et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev.....131

Figure 3.89 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK4 possédant un angle d'attaque de 15 degrés et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev.....131

Figure 3.90 Graphique de la surface de réponse à une vitesse de coupe de 112.5 m/min avec une avance 0.075mm/revolution 133

Figure 3.91 Fibres de carbone non tranchées vues de l'intérieur de la face coupée 134

Figure 3.92 Fibres de carbone non tranchées vues de l'extérieur de la face coupée.....134

Figure 3.93 Arête tranchante usée après les deux répétitions (X25).....136

Figure 3.94 Agrandissement de la jonction de l'arête tranchante usée et la portion de l'outil non utilisée (X50).....136

Figure 4.1 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre.....142

Figure 4.2 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre 142

Figure 4.3 Surface de réponse de FY pour le modèle du second ordre.....142

Figure 4.4 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre 142

Figure 4.5 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre 142

Figure 4.6 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre.....142

Figure 4.7 Surface de réponse de FC pour le modèle du second ordre.....143

Figure 4.8 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre.....143

Figure 4.9 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre.....145

Figure 4.10 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre 145

Figure 4.11 Surface de réponse de FY pour le modèle du second ordre.....145

Figure 4.12 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre 145

Figure 4.13 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre 145

Figure 4.14 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre.....145

Figure 4.15 Surface de réponse de FC pour le modèle du second ordre.....146

Figure 4.16 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre.....146

Figure 4.17 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre.....148

Figure 4.18 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre 148

Figure 4.19 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre 148

Figure 4.20 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre.....148

Figure 4.21 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre.....148

Figure 4.22 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre.....149

Figure 4.23 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre.....151

Figure 4.24 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre 151

Figure 4.25 Surface de réponse de FY pour le modèle du second ordre.....151

Figure 4.26 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre 151

Figure 4.27 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre 152

Figure 4.28 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre.....152

Figure 4.29 Surface de réponse de FC pour le modèle du second ordre.....152

Figure 4.30 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre.....152

Figure 4.31 Graphiques de la rugosité moyenne Rt et Ra en fonction du critère viso-tactile.....155

Figure 4.32 Histogramme de l'indice de performance des différents outils testés.....161

Figure 4.33 Dessin de détails de l'outil prototype par serrage d'un insert de carbure avec des plaquettes de PCD brasées. 168

Figure 4.34 Conditions frontières du modèle d'analyse structurale de l'outil prototype 169

Figure 4.35 Résultat de l'analyse structurale du porte plaquette 170

Figure 4.36 Résultat de l'analyse structurale de l'insert de carbure 170

Figure 4.37 Contrainte de cisaillement au joint de brasage 171

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CFRP	Carbon Fibres reinforced plastic (Fibres de carbone renforcées de plastique)
C1	outil de coupe numéro 1
C2	outil de coupe numéro 2
C3	outil de coupe numéro 3
C4	outil de coupe numéro 4
PCD	Polycristalin diamond (diamant poly cristallins)
CVD	Chemical vapor deposition (déposition chimique par vapeur)
PVD	Physical vapor deposition (Déposition physique par vapeur)
CBN	Cubic boron nitride (Niture de Bore cubique)
WC	Carbure de Tungstène
Co	Cobalt
H	Hydrogène
C	Carbone
CAO	Conception assistée par ordinateur
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
EDM	Electrical discharge machining (usinage par électro-érosion)
GE	General Electric
ANSI	American National Standards Institute (Institut national américan de normalisation)
ASME	American Society of Manufacturing Engineers (Société américaine des ingénieurs manufacturiés)
DS	Diamond Saw
AWJ	Abrasive waterjet

LOC	Length of cut (longueur de coupe)
$ USD	US devise (devise monétaire américaine)
$ CAD	Canadian devise (devise monétaire canadienne)
RPM	Rotation par minute
DOE	Design of experiment (plan d'expérience)
BAPS	Bombardier aeronautic products specifications (Spécifications des produits de Bombardier Aéronautique)
HR-BR	Haut régime de coupe et Bas régime de coupe

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

V	vitesse (m/s)
Vc	vitesse de coupe (m/minute ou pied/minute)
Av	Avance d'outil, avance par dent ou avance par tour (mm/minute, mm/dent, mm/tour ou pouce/minute, pouce/dent ou pouce/tour)
t , h ou a_c	Épaisseur de copeau (mm)
a_e	Largueur de passe radiale (mm)
tc	Épaisseur du copeau comprimé (mm)
Kt	Coefficient de coupe expérimentale selon la direction tangentielle (N/mm^2)
Kc	Coefficient de coupe expérimentale selon la direction radial (N/mm^2)
τ	Résistance ultime en cisaillement (MPa)
FS	Force de cisaillement (N)
FN	Force normale (N)
Fz-Fa	Force axiale (N)
P	Pression (MPa ou N/mm^2)
E	Module d'élasticité (GPa ou N/mm^2)
υ	Coefficient de Poisson
r_e	Rayon de pointe du tranchant (µm)
α	Angle de coupe : attaque (rake) ou dépouille (relief) (degrés)
γ	Angle de coupe : attaque (rake) ou dépouille (relief) (degrés)
φ	Angle de pénétration dans la matière (degrés)
θ	Angle de la fibre (degrés) ou angle de l'arrête tranchante d'un outil de coupe
Ra	Rugosité arithmétique (µm)

Rt	Rugosité Sommet-creux maximale (µm)
Rz	Rugosité Sommet-creux moyen (µm)
Vb	Critère d'usure en flanc d'outil (mm ou µm)
HV	Hardness Vicker (Dureté Vicker)
HRC	Harness Rockwell C (dureté Rockwell selon l'échelle C)
F	Force (N ou lbf)

INTRODUCTION

La venue de nouveaux matériaux possédant une résistance spécifique élevée engendre de grands changements dans la conception d'aéronefs. Ces matériaux aux propriétés anisotropiques induisent une philosophie de conception et de fabrication totalement différente des méthodes établies par le formage ou l'usinage des métaux.

La mise en forme de produits par ajout de matière remplace peu à peu les méthodes par enlèvement de matière grandement implantées dans les industries. Cette modification dans les structures de conception et de fabrication des aéronefs civils et militaires implique une modification des manières de faire à tous les niveaux de la fabrication et de l'assemblage. Ces nouveaux composants sont principalement composées de stratifiés composites à fibres renforcées de polymère. Ces composantes nécessitent encore plusieurs opérations de parachèvement avant d'être installées et assemblées. Ces composantes doivent, comme par le passé, respecter des exigences mécaniques, dimensionnelles, géométriques et d'états de surface.

De nouvelles problématiques propres à l'usinage des laminés à fibres renforcées de plastique se présentent au quotidien. Ces problématiques résident dans la performance des outils de coupe existants, soit la rencontre des exigences dimensionnelles et géométriques imposées, au moindre coût. Ce travail de recherche concerne l'évaluation de la performance de différents outils de coupe dédiés au détourage, ainsi qu'à la définition de paramètres géométriques influents sur les performances des outils en vue de la conception d'outils plus performants pour ce type d'usinage.

Le premier chapitre fera état des travaux de recherche pertinents associés au détourage des laminés composites. La méthode expérimentale utilisée pour l'évaluation de plusieurs modèles d'outils ainsi que les résultats découlant de cette étude seront ensuite présentés. Le plan d'expérience permettant la détermination de paramètres géométriques influents sur la

qualité du détourage ainsi que les résultats et recommandations en vue de la conception d'un nouvel outil feront l'objet du chapitre 4.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature a pour objectif de mieux cerner les problématiques existantes dans le domaine spécifique du détourage des matériaux composites à bases de fibres de carbone et de résine époxyde. Les objectifs poursuivis dans ce travail sont l'évaluation de la performance des outils de coupe, la définition de plage opérationnelle optimum pour les outils évalués et la définition de l'influence des paramètres géométriques sur la qualité de coupe.

Le chapitre 1 exposera quelques modèles de coupe existants, l'influence des paramètres géométriques des outils de coupe, des types de revêtement appropriés pour les outils de coupe ainsi que l'impact de la rugosité sur les propriétés mécaniques d'un laminé.

1.1 Modèle de coupe orthogonale de laminés composite carbone époxy

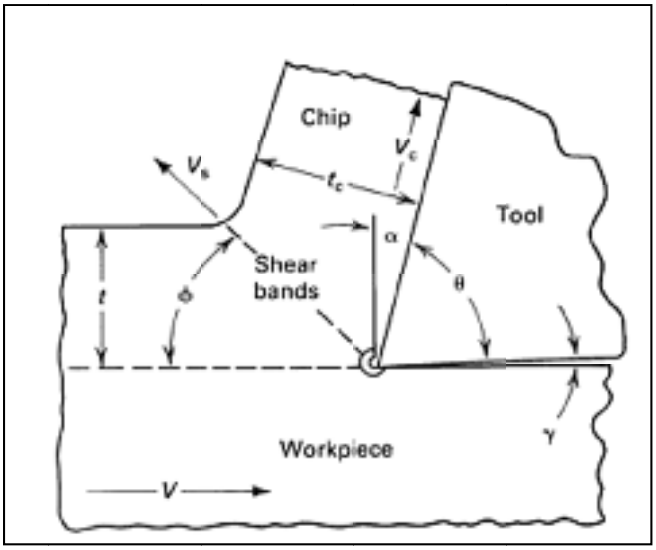


Figure 1.1 Schématisation de la coupe orthogonale sous le modèle de Merchant
Tirée de Altintas (2006, p. 170)

La coupe orthogonale des métaux est bien utilisée de la part des chercheurs et des développeurs d'outils de coupe depuis nombre d'années. En raison des propriétés isotrope de la matière coupée, les systèmes d'équations analytiques corroborent relativement bien les résultats obtenus expérimentalement (Altintas, 2006). La Figure 1.1 illustre les paramètres physiques et géométriques prenant part au phénomène physique de coupe par enlèvement de matière. Elle illustre, l'angle du plan de cisaillement, l'épaisseur de coupe, les vecteurs de vitesse de coupe et d'évacuation du copeau. En plus , la Figure 1.1 , présente les paramètres géométriques de l'outil de coupe par l'angle d'attaque et l'angle de dépouille d'un outil.

La modélisation de la coupe de laminés en composites est très complexe en raison de l'anisotropie du laminé. L'orientation des fibres et l'orientation de la coupe influent grandement sur les caractéristiques de la coupe. Les sections qui suivent illustrent l'influence et les caractéristiques de la coupe de laminés en fonction de l'orientation des fibres et de la géométrie de l'outil.

1.1.1 Coupe orthogonale des laminés unidirectionnels

En premier lieu, il est important de situer l'espace et le repère trigonométrique lorsque nous parlerons de l'orientation des fibres par rapport à la direction du vecteur de la vitesse de coupe. Plusieurs auteurs dans la littérature diffèrent à ce propos.

La référence généralement acceptée adopte la surface usinée comme la référence (Datum). Le vecteur de la vitesse de coupe est toujours parallèle à la surface usinée. Ce qui varie entre les auteurs est le sens positif de l'orientation de la fibre en fonction du vecteur de la vitesse de coupe. Pour Bhatnagar, le sens antihoraire de la fibre constitue le sens positif de l'angularité de la fibre par rapport au vecteur de la vitesse de coupe (Bhatnagar *et al.*, 1995). Pour Wang, l'angularité est plutôt positive en sens horaire en partant de la surface usinée. À titre comparatif, il est important de ne pas confondre les résultats et de bien transformer les informations par rapport à un système d'axe commun. L'angle de coupe est définit par

l'angle formé entre le vecteur normal à la surface usinée et la face de coupe de l'outil. Le sens positif de l'angle de coupe est définit en sens horaire(Wang et Zhang, 2003).

Mentionnons que les recherches citées limitent toujours leur applicabilité en termes de secteur angulaire étudié. Par exemple, un modèle analytique ou expérimental ne peut qu'être valide uniquement dans une zone angulaire de 0 à 90 degrés (Wang et Zhang, 2003) ou encore de -90 à 90 degrés (Bhatnagar *et al.*, 1995).

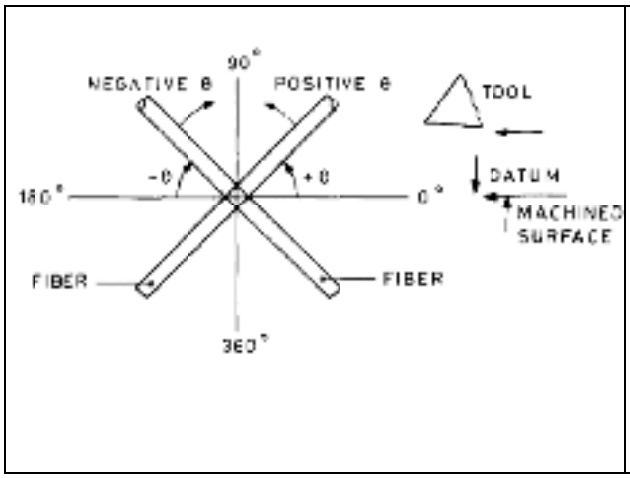


Figure 1.2 Schématisation de l'orientation de la fibre durant la coupe orthogonale
Tirée de Bhatnagar *et al.* (1995)

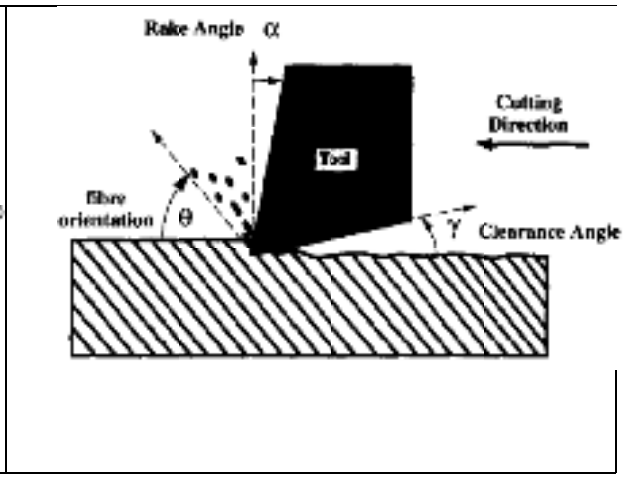


Figure 1.3 Schématisation de l'orientation de la fibre durant la coupe orthogonale
Tirée de Wang, Ramulu et Arola, (1995)

En raison de la variation de l'angularité de la fibre par rapport à la vitesse de coupe, trois modèles de coupe peuvent intervenir dans une coupe entre 0 et 180 degrés (Bhatnagar *et al.*, 1995). La Figure 1.2 illustre la représentation angulaire des fibres en fonction de la direction de l'avance et la surface coupée. La Figure 1.3 présente les paramètres géométriques d'une arête tranchante d'un outil de coupe.

Ces modèles sont explicables en raison des différents modes de rupture de la fibre et de la matrice. Selon Wang, six modes principaux de coupe existent (Wang, Ramulu et Arola, 1995a) en fonction de l'angularité de la fibre en sens antihoraire (figure 1.4):

- à 0 degré : le délaminage ou par le flambage de la fibre;
- à 45 degrés : la coupe de la fibre à angle de coupe positif et un autre à angle de coupe négatif;
- à 90 degrés : une coupe par déformation;
- à -45 degrés : un cisaillement.

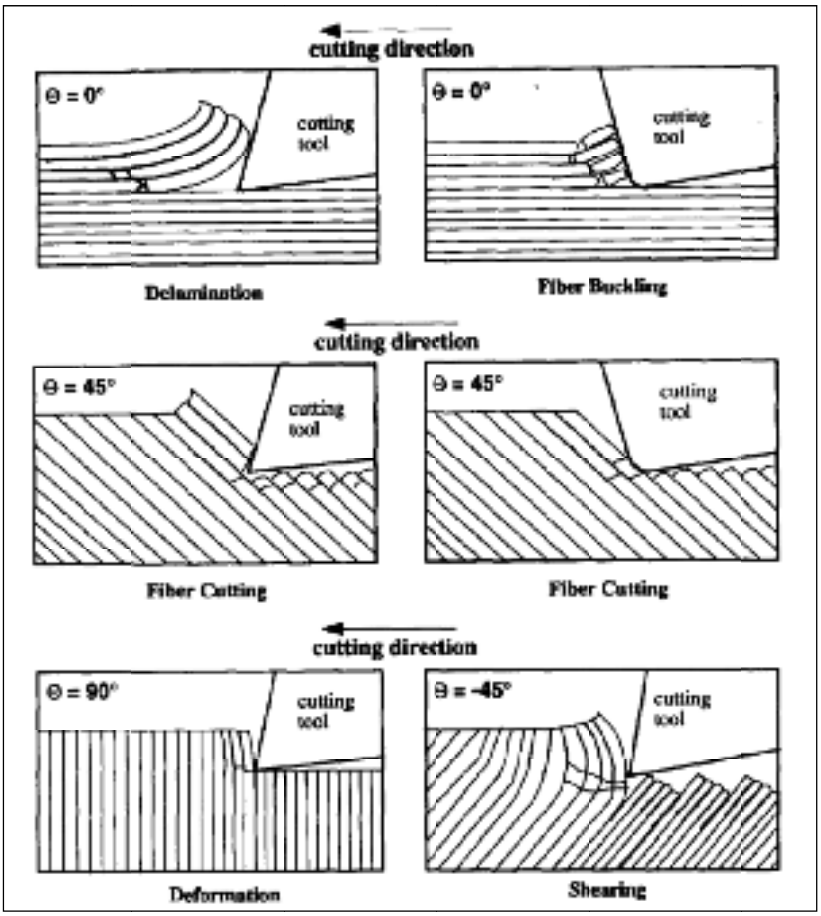


Figure 1.4 Schématisation des modes de coupe en fonction
de l'orientation de la fibre
Tirée de Wang, Ramulu et Arola (1995)

Bhatnagar propose un premier modèle à 0 degré, un deuxième entre 0 et 90 degrés et un troisième modèle de 90 à 180 degrés (sens horaire). Cet auteur présume que pour un angle

négatif, le plan de cisaillement est parallèle au sens de la fibre. La présentation de plusieurs modèles de coupe, tant analytiques qu'expérimentaux suivra cette section.

1.1.2 Modèle analytique de coupe orthogonale

Le modèle qui suit est développé pour une prédiction des forces de coupe pour un laminé unidirectionnel de 0 à 90 degrés dans le sens antihoraire au vecteur de la vitesse de coupe.(Zhang, Zhang et Wang, 2001) . Ce travail fût conduit avec des outils de coupe en carbure de tungstène avec un angle de dépouille de 7 degrés. L'angle de coupe est varié de -20 à 40 degrés.

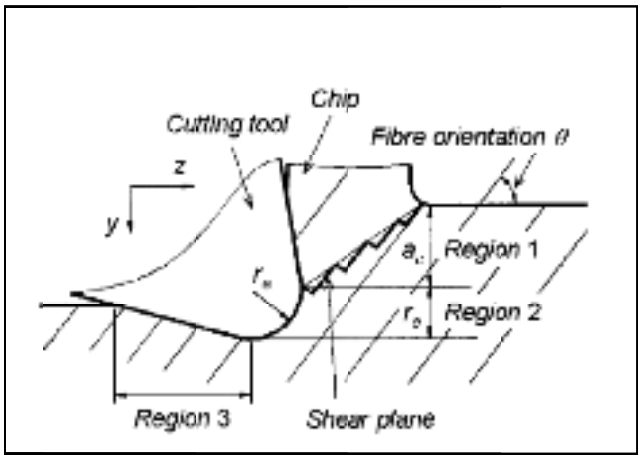


Figure 1.5 Définition des variables , des zones de déformation
pour une angularité de fibre de 0 à 90 degrés
Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001)

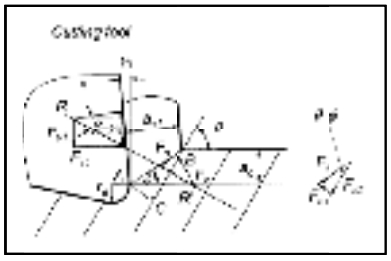


Figure 1.6 Zone 1 : Le copeau
Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001)

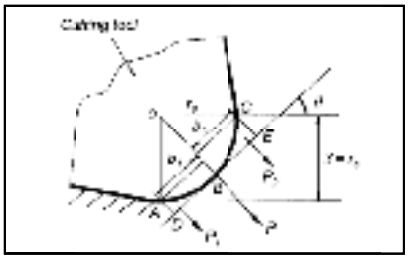


Figure 1.7 Zone 2 : La pression du rayon
Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001)

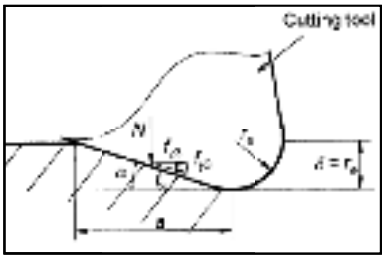


Figure 1.8 Zone 3 :Efforts de retour élastique
Tirée de Zhang, Zhang et Wang (2001)

Dans ce modèle, il y a trois zones de déformation. La somme totale des efforts de coupe est calculée par la méthode de superposition des efforts des trois zones de coupe. Ces trois zones sont les efforts générés par la formation du copeau, les efforts générés par la pression du rayon du tranchant de l'outil et les efforts générés par la friction dû au retour élastique des fibres et de la résine sur la face de dépouille de l'outil.

La Figure 1.6 illustre les différentes variables géométriques ayant un impact sur les forces Fz (force de coupe) et Fy (force d'avance ou Thrust force) dans la zone 1 de la coupe. L'angle ou le plan de cisaillement peut ne pas être parallèle à l'orientation de la fibre. Un triangle est formé en ABC : du point de tangence du rayon de bec (A) à la surface supérieure du laminé (B) formant le plan de cisaillement coupant la fibre selon la droite AC perpendiculaire à l'orientation de la fibre. Les forces de cisaillement sont FS1 (force de cisaillement perpendiculaire à la fibre), FS2 (force de cisaillement parallèle à la fibre) et FS qui est la force de cisaillement résultante. L'équation (1.1) évalue les valeurs de ces efforts selon les paramètres mécaniques de la matière coupée et de l'orientation des fibres.

$$\begin{Bmatrix} Fs1 = Fs * \sin(\theta - \phi) \\ Fs2 = Fs * \cos(\theta - \phi) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Fs1 = \tau_1 * l_{AC} * h \\ Fs2 = \tau_2 * l_{BC} * h \end{Bmatrix} \tag{1.1}$$

Où l_{AC} est la longueur totale de la fracture de la fibre et de la matrice sur AC et l_{BC} est la longueur de la fracture dans la matrice sur BC. L'épaisseur de la matière coupée est illustrée avec le paramètre h. Par la suite, par substitution des équations FS1 et FS2 on peut obtenir un rapport des longueur l_{BC} ,l_{AC} définit par l'équation 1.2 : L'équation présente l'équation de ratio des longueurs en fonction des paramètres mécaniques et géométrique du laminé usiné.

$$\frac{l_{BC}}{l_{AC}} = \frac{\tau_1}{\tau_2 * \tan(\theta - \phi)} \tag{1.2}$$

Par trigonométrie, nous connaissons les longueurs l_{BC} et l_{AC} par rapport à la profondeur de passe a_c.

$$a_c = l_{BC}\sin(\theta) - l_{AC}\cos(\theta) \tag{1.3}$$

Les équations (1.3) et (1.4) donne maintenant une relation entre l_{ac} et a_c.

$$l_{AC} = \frac{ac}{\dfrac{\tau_1 * \sin(\theta)}{\tau_2 * \tan(\theta - \phi)} - \cos(\theta)} \tag{1.4}$$

Par la suite, en utilisant les équations (1.1) et (1.4), il est possible de déduire la force de cisaillement FS pour la région 1 du modèle présenté à l'équation (1.5).

$$Fs = \frac{\tau_1 * h * a_c}{\dfrac{\tau_1}{\tau_2} * \cos(\theta - \phi) * \sin(\theta) - \sin(\theta - \phi) * \cos(\theta)} \tag{1.5}$$

La force normale Fn est trigonométriquement liée à la force de cisaillement Fs par la relation (1.6) suivante :

$$Fn = Fs * \tan(\phi - \beta - \gamma_o) \tag{1.6}$$

Ici l'angle 6 représente l'angle de friction sur la face de l'outil de coupe de l'arête tranchante. Par les équations préalablement illustrées, la force de coupe (Fz) et la force d'avance Fy peuvent être obtenues par la transformation mathématique présentée en (1.7) :

$$\begin{Bmatrix} F_{z1} \\ F_{y1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\phi) & \cos(\phi) \\ \cos(\phi) & -\sin(\phi) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_n \\ F_s \end{Bmatrix} \tag{1.7}$$

Pour utiliser l'équation 1.7, il est nécessaire de déterminer l'angle φ. Une hypothèse est posée à ce moment car en se basant sur la mécanique générale de coupe, l'angle de cisaillement est en relation avec le ratio d'épaisseur de copeau. L'hypothèse de ce modèle

explique qu'en raison de la fragilité du matériau et de la nature des laminés composite on pose que $r_c = 1$.

Suivant le modèle de Merchant (Tirée de Altintas, 2006; Zhang, Zhang et Wang, 2001):

$$\tan(\phi) = \frac{r_c \cos(\gamma_o)}{1 - r_c \sin(\gamma_o)} \Rightarrow r_c = \frac{a_c}{a_{c1}} \tag{1.8}$$

Si on pose $r_c = 1$, on obtient la relation suivante :

$$\phi \approx \tan^{-1}\left(\frac{\cos(\gamma_o)}{1 - \sin(\gamma_o)}\right) \tag{1.9}$$

Même avec la valeur de φ, les efforts Fz1 et Fy1 ne peuvent être évalués. Plusieurs paramètres doivent être obtenus par l'expérimentation. Une description des ces paramètres sera effectuée à la fin de cette section. La prochaine région analysée porte sur les efforts de pression induite par le rayon de bec de l'outil de coupe.

La déformation dans la région 2 est causée par le rayon de bec de l'outil de coupe. Cette zone est traitée comme une déformation sous contact cylindrique. Les pressions exercées sur le bout de l'outil ne sont pas uniformes en raison de l'orientation de la fibre qui varie. Selon la théorie des contacts et de pénétration par surface cylindrique, les efforts peuvent être approximés par les équations suivantes :

$$P_1 = \frac{1}{2}\frac{b_1^2 \pi E^* h}{4 r_e} \tag{1.10}$$

$$P_2 = \frac{1}{2}\frac{b_2^2 \pi E^* h}{4 r_e}$$

Où

$$b_1 = r_e \sin(\theta) \qquad (1.11)$$
$$b_2 = r_e \cos(\theta)$$

Les variables b1 et b2 représentent la largeur de l'arc de contact AB et BC sur la Figure 1.7. La variable E* correspond au module de d'élasticité modifié pointant dans la direction OP exprimé dans l'équation (1.12)

$$E^* = \frac{E}{1-\upsilon^2} \qquad (1.12)$$

La force résultante dans la direction P est obtenue en effectuant la somme de P1 et P2 exprimé en (1.13).

La théorie du contact employé dans les équations d'approximation des efforts ne tiens pas compte des défauts générés par la coupe (micros fissures, bris de la matrice) La force réelle doit être réduite par un facteur K. Ce facteur est fonction de l'angularité des fibres et trouvé expérimentalement.

$$P = P_1 + P_2 \qquad (1.13)$$
$$\mathrm{P}_{\text{réel}} = K_{\exp} P$$

La force de friction est maintenant incorporée au modèle afin d'obtenir les efforts de coupe de la région 2 selon le repère orthogonal employé dans ce modèle Fz et Fy selon les expressions en (1.14).

$$f_{\text{réel}} = \mathrm{P}_{\text{réel}}\, \mu \qquad (1.14)$$
$$F_{y2} = \mathrm{P}_{\text{réel}} (\cos(\theta) - \mu \sin(\theta))$$
$$F_{z2} = \mathrm{P}_{\text{réel}} (\sin(\theta) + \mu \cos(\theta))$$

La dernière région du modèle prend en considération le retour élastique de la zone de coupe qui affecte les efforts de coupe sous l'effet de la friction sur la face de l'angle de dépouille de l'outil de coupe. Une hypothèse est posée sur la grandeur du retour élastique. La profondeur du retour élastique correspond à la valeur du rayon de bec. La longueur d'action des efforts de friction sur la face de dépouille a correspond au coté adjacent du triangle formé par le rayon de bec r_e et l'angle de dépouille de l'outilα exprimé (1.15).

$$a = \frac{r_e}{\tan(\alpha)} \tag{1.15}$$

La force totale normale à la coupe peut être approximée par l'équation suivante (1.16) :

$$N = \frac{aE_3 \tan(\alpha)h}{2} = \frac{r_e E_3 h}{2} \tag{1.16}$$

En incorporant les efforts de frictions on obtient les forces de coupe Fz3 et d'avance Fy3 dans la région 3.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{y3} = \dfrac{r_e E_3 h}{2}(1 - \mu \cos(\alpha)\sin(\alpha)) \\ F_{z3} = \dfrac{r_e E_3 h}{2}\cos^2(\alpha) \end{array} \right\} \tag{1.17}$$

Les forces de chaque régions sont additionnées afin d'obtenir la force totale de coupe et la force totale d'avance.

$$\begin{aligned} F_y &= F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} \\ F_z &= F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} \end{aligned} \tag{1.18}$$

Les paramètres à obtenir expérimentalement sont :

$$\tau_1, \tau_2, \beta, E, \upsilon, \mu, E_3 et K(\theta)$$

Malgré un grand nombre d'hypothèses qui affecte la qualité des résultats prédit en comparaison avec les résultats expérimentaux. Ce modèle prédit avec une certaine efficacité la variation des efforts de coupe en fonction de la variation des paramètres de coupe tels que la profondeur de coupe, l'orientation des fibres et l'angle de coupe du couteau. Ce modèle capture les paramètres fondamentaux de la mécanique de coupe dans les composites. On peut y analyser l'effet de l'angle de coupe dans la première zone, l'effet du rayon de bec dans la deuxième zone et l'effet de l'angle de dépouille dans la troisième zone.

La prochaine section traite des modèles obtenus par validation expérimentale. Plusieurs auteurs ont élaboré leurs propres modèles. Quelques un des ces auteurs seront traités dans cette revue de littérature.

1.1.3 Modèle expérimental de prédiction des efforts en fraisage

Les modèles de prédiction sont des outils très importants dans le développement et l'optimisation de l'outillage de coupe. Même dans une orientation purement comparative, les modèles aident les chercheurs à évaluer l'effet de changement de paramètre dans l'influence de la coupe. Dans cette section, un modèle de prédiction des efforts de coupe sera étudié. Kalla et al. propose un modèle avec des coefficients de pression spécifique variables et non linéaires selon les angles de la fibre. Ce modèle se rapproche de l'évaluation des efforts lors de la coupe élaboré par Altintas (Altintas, 2006). La particularité de ce modèle concerne l'évaluation des efforts de coupe par fraisage de laminés unidirectionnels couvrant des angles de fibres supérieurs à 60 degrés. De plus, son modèle analyse les efforts avec plusieurs largeurs de passes. L'auteur utilise un réseau de neurones artificiel pour prédire les interactions entre les différentes variables du système en action : la coupe. Son expérimentation de coupe est effectuée sur des laminés de fibres de carbone renforcées de résine époxyde. La vitesse de coupe et l'avance par dent sont toujours constantes. L'expérimentation est conduite avec une fraise à une lèvre de 19 mm de diamètre tournant à

380 RPM avec une avance de 217 mm/min. L'angle de coupe est de 15 degrés et l'angle de dépouille est de 20 degrés. La condition de coupe se fait en opposition au laminé. La largeur de passe varie de 0.66 @ 1.8mm, donc de 3.5 % à 9.5% du diamètre de l'outil de coupe. L'épaisseur du laminé est de 2.5 mm.(Kalla *et al.*, 2005)

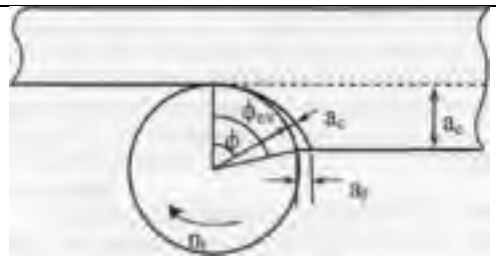


Figure 1.9 Schématisation des variables de coupe
Tirée de Kalla *et al.* (2005)

Figure 1.10 Angle des laminés étudiés
Tirée de Kalla *et al* (2005)

L'évaluation des efforts se fait dans un repère orthogonal où X est perpendiculaire à la surface coupée et Y est parallèle à la direction d'avance.

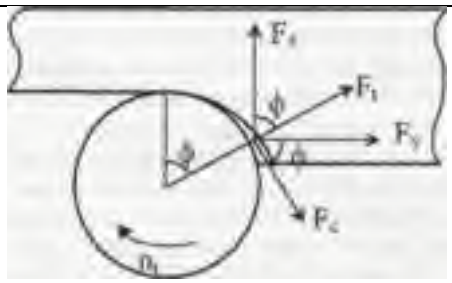


Figure 1.11 Repère orthogonale des forces
Tirée de Kalla *et al.* (2005)

Les forces tangentielles sont décrites par l'indice C et les efforts d'avance par l'indice t.

Les forces sont décrites comme suit dans l'équation :

$$F_c(\phi)=K_c(a_c,\theta)*a_c(\phi)*a_t \qquad (1.19)$$
$$F_t(\phi)=K_t(a_c,\theta)*a_c(\phi)*a_t$$

$$F_x = -F_c \sin(\phi) + F_t \cos(\phi) \qquad (1.20)$$
$$F_y = F_c \cos(\phi) + F_t \sin(\phi)$$

Où les efforts X et Y sont positionnés selon les forces de coupe et d'avance c et t. :

Les coefficients de coupe spécifiques Kt et Kc sont obtenus par régression avec des données expérimentales.

L'Angle theta est obtenu par la différence entre l'angle de la fibre selon la surface usinée et la position angulaire de la lèvre du couteau et est illustré à la Figure 1.12

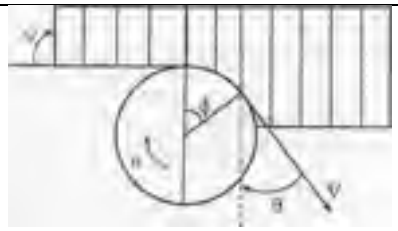


Figure 1.12 Schématisation des angles dans le modèle
Tirée de Kalla *et al.* (2005)

La définition des coefficients de coupe par le modèle de régression est présentée par l'équation (1.21)

$$K_{c,t} = a_c^{\,n}\left[b\sin(\theta) + c\sin^2(\theta) + d\sin^3(\theta) + e\sin^4(\theta) + f\sin^5(\theta)\right] \qquad (1.21)$$

Le modèle développé par Kalla et al. utilisant un réseau de neurone est plus près des efforts expérimentaux que le modèle utilisant la régression. Le réseau de neurones semble lisser la courbe et est moins sensible au bruit des acquisitions expérimentales. Ce modèle peut facilement être extrapolé à une coupe de laminés multi-directionnels en appliquant le principe de superposition des efforts de coupe de l'équation (1.22) les efforts seront calculés par une sommation.

$$F_c(\phi_i)=\sum_{j=1}^{m}\left[K_c(a_c,\theta_i)*a_c(\phi_i)*a_t\right]_j \qquad (1.22)$$

$$F_t(\phi_i)=\sum_{j=1}^{m}\left[K_t(a_c,\theta_i)*a_c(\phi_i)*a_t\right]_j$$

Le modèle de prédiction par réseau de neurones semble suivre avec performance la variation du coefficient de coupe Kt. La figure 1.13 illustre cette tendance. Cette méthode peut aussi s'appliquer à un modèle de coupe avec une fraise à hélice en posant l'hypothèse de l'empilement de lèvres droites. Les coefficients de ce modèle englobent les effets causés par la géométrie du couteau et imbriquent les différents modes de rupture de la fibre. L'intégration des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe et d'avance aurait permis une prédiction plus élaborée du phénomène de la coupe afin d'évaluer la performance des outils et de leurs paramètres géométriques.

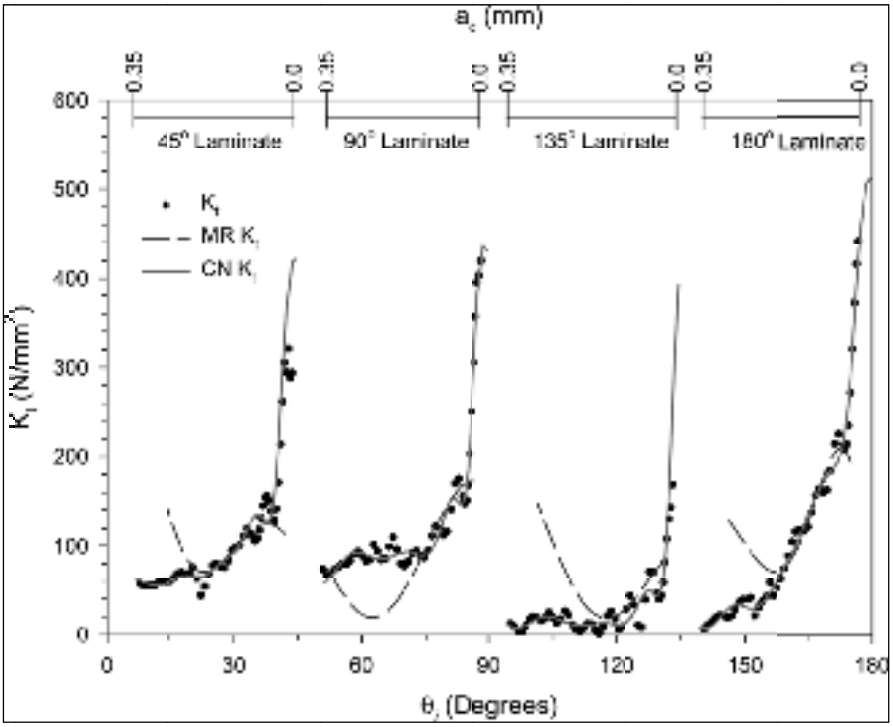


Figure 1.13 Variation des coefficients de coupe expérimentaux et prédit en fonction de l'orientation des fibres et l'épaisseur de copeau en fraisage par opposition
Tirée de Kalla *et al.* (2005)

1.2 Effet de la géométrie des outils de coupe sur les forces d'usinage

La géométrie de l'outil de coupe (angle de coupe, angle de dépouille, angle d'hélice et le rayon de bec) a une très grande influence sur le résultat de la surface usinée. La Figure 1.14 illustre les paramètres et variables angulaires d'un outil.

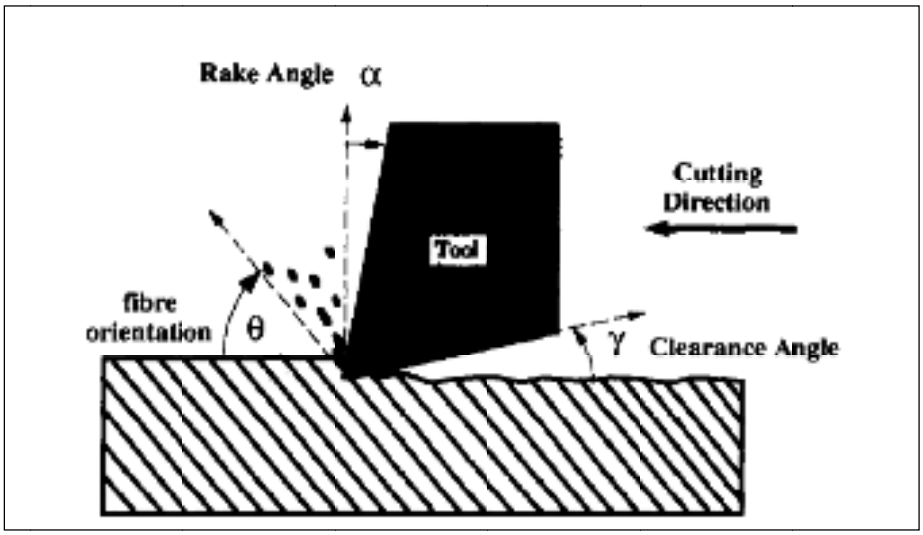


Figure 1.14 Schématisation des variables angulaires
Tirée de Wang et Zhang (2003)

Plusieurs études relatives à l'effet de la géométrie de l'outil sont disponibles (Bhatnagar *et al.*, 1995; Wang, Ramulu et Arola, 1995b). L'impact de la géométrie se fait sentir sur les efforts lors de la coupe. Les études citées dans cet ouvrage portent principalement sur l'expérimentation de la coupe orthogonale de laminés unidirectionnels et multi directionnels.

1.2.1 Effet de l'angle de coupe ou d'attaque

Lors de la coupe d'un laminé unidirectionnel avec des fibres à 0 degré, le mode de rupture de la fibre est directement relié à l'angle d'attaque (Figure 1.15)

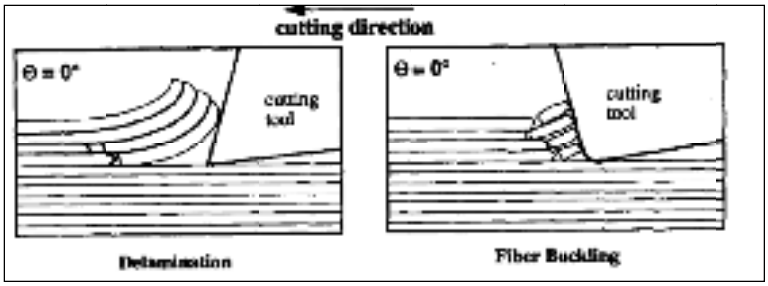


Figure 1.15 Mode de rupture selon l'angle d'attaque
Tirée de Wang, Ramulu et Arola (1995)

Lorsque l'angle de coupe est positif, les fibres ont tendance à se détacher et propager la fissure afin que le copeau glisse sur la face de l'outil de coupe. Lorsque l'angle d'attaque est négatif le mode de rupture tend par flambage de la fibre. La différence entre ces deux modes de rupture affecte les efforts de coupe en poussée et a un impact sur la qualité de la surface. La Figure 1.16 et la Figure 1.17 illustrent l'impact de l'angle de coupe sur les efforts de coupe et la qualité de surface en fonction de l'angle de coupe et l'orientation de la fibre.

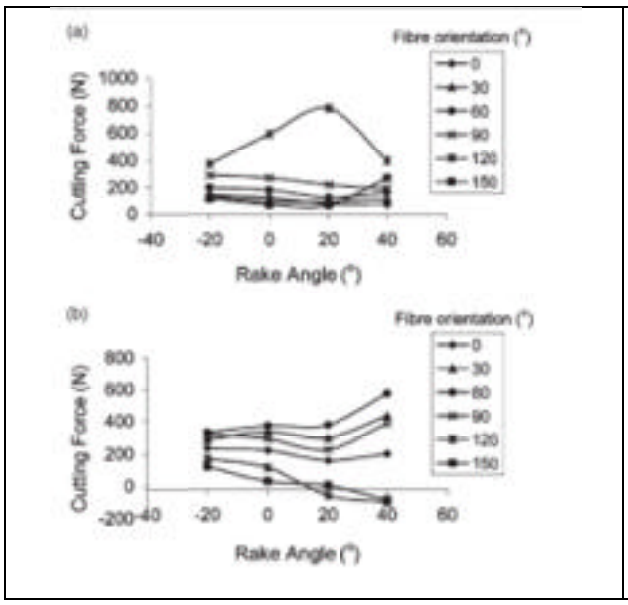


Figure 1.16 Effet de l'angle de coupe sur les efforts de poussé (a) et les efforts d'avance (b)
Tirée de Wang et Zhang (2003)

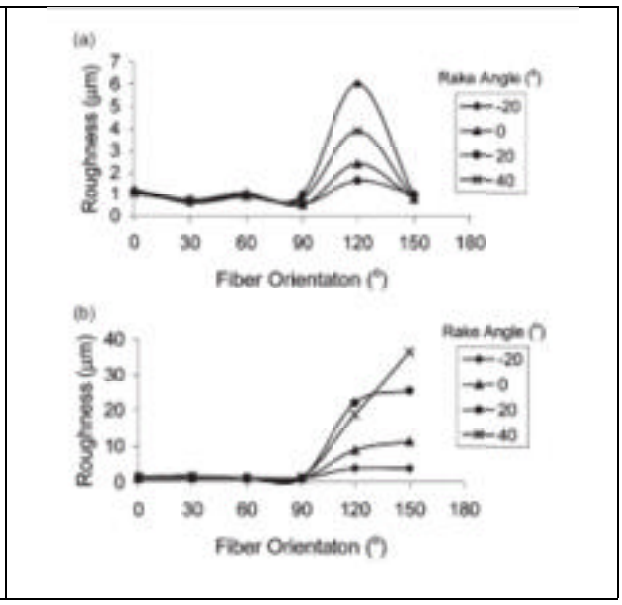


Figure 1.17 Effet de l'angle de coupe sur la qualité de surface d'une coupe à 0.01mm (a) et 0.05mm (b) d'épaisseur
Tirée de Wang et Zhang (2003)

Il est à noter que les efforts de coupe principaux décroissent lorsque l'angle de coupe augmente (Wang, Ramulu et Arola, 1995a). Par contre, les efforts résultant ne suivent pas directement cette tendance. Un point de transition semble apparaître lorsque l'angle de coupe tend vers 20 degrés (Figure 1.17). Les efforts horizontaux, selon la direction d'avance, sont réduits dans la coupe, mais génère des efforts verticaux plus élevé en raison de l'angle trop prononcé de l'arête tranchante (Wang, Ramulu et Arola, 1995a). Selon Wang et al., un angle de coupe de 6-7 degrés représente la meilleure géométrie d'angle de coupe (Wang, Ramulu et Arola, 1995b). Selon Koplev, un angle de 10 degrés est un choix viable(Koplev, Lystrup et Vorm, 1983).

1.2.2 Effet de l'angle de dépouille

Les efforts de coupe verticaux ou d'avance sont plus élevés que les efforts de coupe horizontaux (Koplev, Lystrup et Vorm, 1983; Wang, Ramulu et Arola, 1995a). Les efforts verticaux sont attribuables à l'avance dans la matière, à la friction de la fibre sur la face de dépouille et à l'usure de l'outil (Koplev, Lystrup et Vorm, 1983). Selon la zone 3 du modèle analytique de Wang, présenté dans la section1.1.2 l'influence de l'angle de dépouille sur la surface de contact générant de la friction.

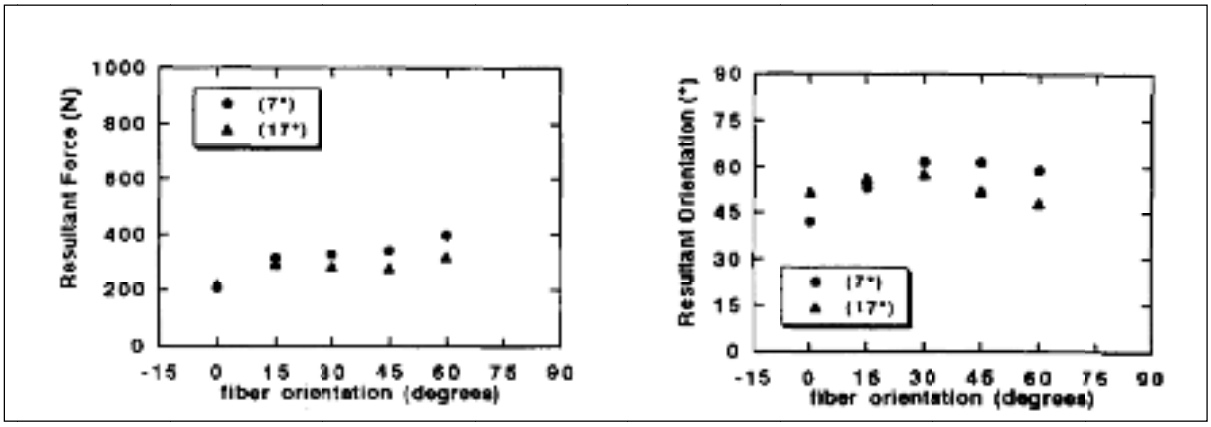


Figure 1.18 Effet de l'angle de dépouille sur les efforts résultants et l'orientation de la force de coupe résultante
Tirée de Wang, Ramulu et Arola (1995a)

Les graphiques de la Figure 1.18 illustrent l'effet de l'angle de dépouille plus élevé sur la force résultante de coupe. L'angle de coupe est de 5 degrés. Selon Koplev et al. , l'angle de dépouille a peu d'effet sur les efforts de coupe (horizontaux) mais un impact significatif sur les efforts verticaux (Koplev, Lystrup et Vorm, 1983). Koplev, recommande un angle de dépouille de 15 degrés, tandis que pour Wang, Ramulu et Arola, un angle de dépouille de 17 degrés est recommandé.

L'angle de dépouille ne peut être indéfiniment augmenté car il aurait un impact négatif sur la résistance du couteau sous le chargement des efforts de coupe élevés. La Figure 1.19 et la Figure 1.20 illustre la surface de réponse des efforts de coupe et d'avance en fonction des angles de dépouille et de coupe. Selon ces graphiques, un optimum se situe à 6 degrés pour l'angle de coupe et à 16 degrés pour l'angle de dépouille. En plus des paramètres angulaires de la géométrie de l'outil, le rayon de bec de l'outil affecte la qualité et les performances de l'outil de coupe.

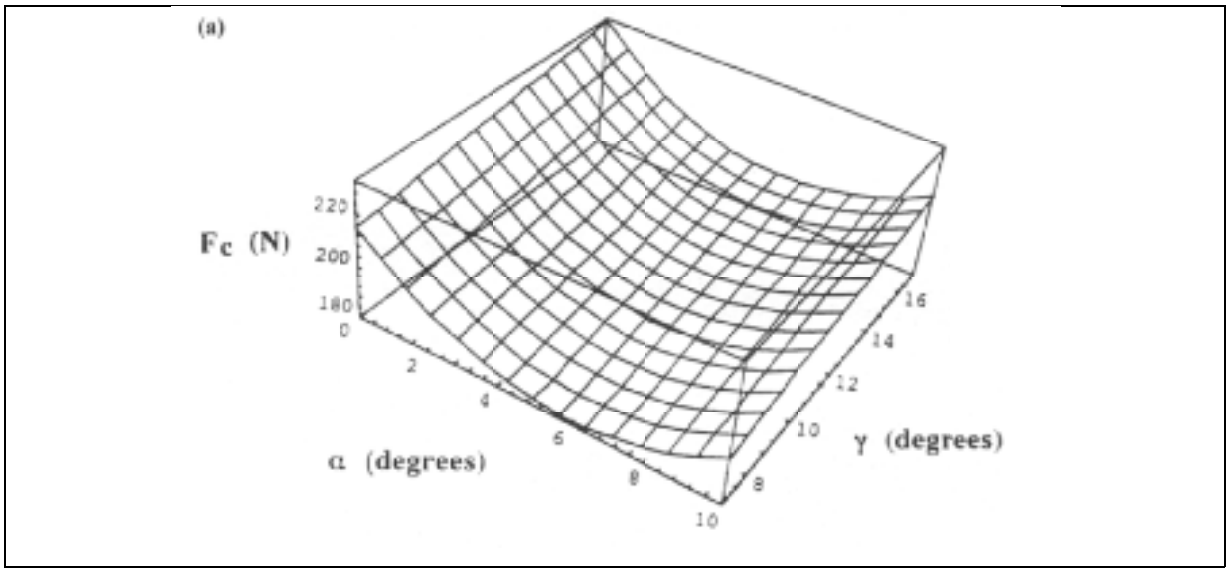


Figure 1.19 Surface de réponse des forces de coupe en fonction de l'angle de coupe (γ) et de l'angle de dépouille (α) de l'outil
Tirée de Ramulu (1997)

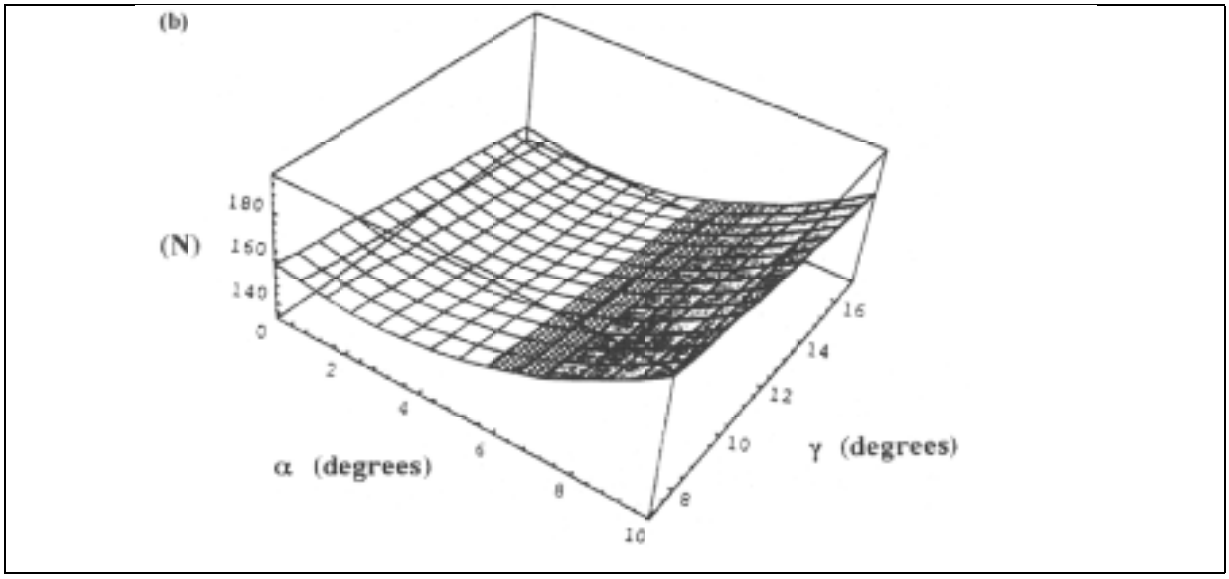


Figure 1.20 Surface de réponse des forces d'avance en fonction de l'angle de coupe (γ) et de l'angle de dépouille (α) de l'outil l'outil
Tirée de Ramulu (1997)

1.2.3 Effet du rayon de bec

Le rayon de bec de l'outil de coupe affecte la qualité de la coupe en agissant comme générateur de fissure (Iliescu *et al.*, 2010). Lorsque le rayon de bec de l'outil fait de une à deux fois le rayon de la fibre, il nécessite moins d'effort pour initier une fissure selon la direction de coupe. Selon l'auteur, pour un laminé à 0 degré, avec la même géométrie de coupe, un petit rayon de bec favorisera le mode de rupture 1 (ouverture de fissure) tandis qu'un rayon plus grand induira un mode de rupture par flambage. La Figure 1.21 illustre bien le mode de rupture généré par un outil avec un rayon de bec petit et grand.

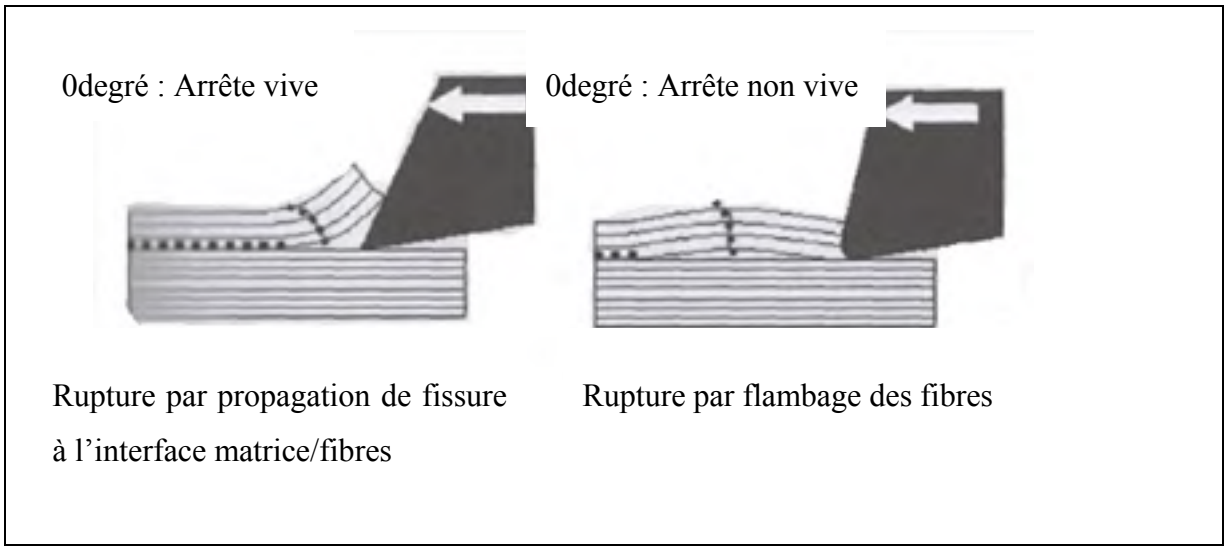


Figure 1.21 Mode de rupture en fonction d'un rayon de bec petit et grand
Tirée de Girot (2009)

Si on applique à un laminé de 90 degrés le même chargement de coupe, avec un outil très coupant et un autre moins coupant, le mode de rupture sera différent. Le premier outil effectuera une coupe précise sans induire de défaut à la surface sous la coupe. La coupe sera nette et par cisaillement pur. Par contre, un outil avec un rayon de bec élevé, donc moins coupant, propagera une fissure de 0.1 à 0.3 mm de profondeur (Koplev, Lystrup et Vorm, 1983) avec un mode de coupe par cisaillement et flexion. Cette fissure détériore la qualité de la surface et induit une faiblesse structurale dans le laminé. La Figure 1.22 illustre le type de défaut généré par une coupe des fibres à 90 degrés. Ces défauts sont principalement une

délamination dans le sens de la fibre à l'interface matrice/fibre, suivi d'une flexion des fibres à la surface coupée si l'arête tranchante n'est pas vive. La Figure 1.23 illustre une microstructure de la zone coupée du laminé montrant les déplacements des fibres à l'intérieur du laminé sous l'effort de coupe.

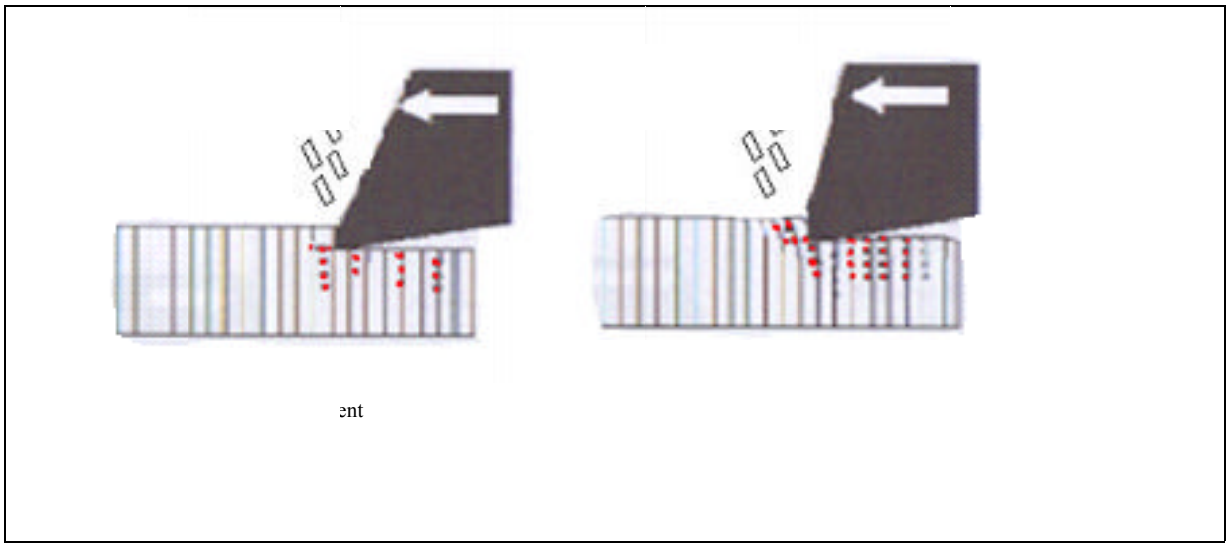


Figure 1.22 Schématisation de la coupe d'un laminé à 90 degrés
avec un outil coupant et moins coupant
Tirée de Girot (2009)

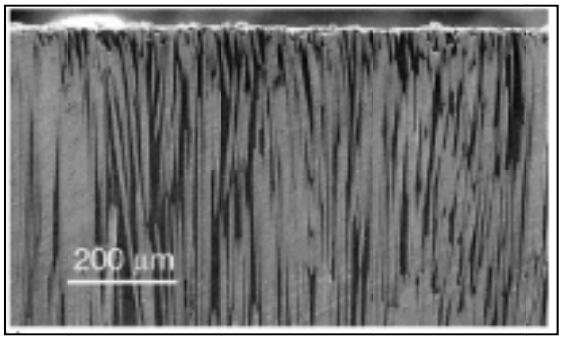


Figure 1.23 Microstructure de la zone coupée d'un laminé à 90 degrés
Tirée de Wang et Zhang (2003)

Pour un laminé orienté à 45 degrés, le mode de coupe est assez similaire pour un rayon de bec fin et grossier. Par contre, le rayon de bec fin génère moins de propagation de fissure à

l'intérieur du laminé. Un effet de retour élastique se fait voir sur la surface finie. La coupe à 45 degrés consiste à déformer la fibre en tension puis par la suite cisailler les brins perpendiculairement à la fibre.

La condition de rupture pour un laminé à 135 degrés ou à -45 degrés passe par une compression suivie d'une flexion générant le cisaillement de rupture des fibres. La Figure 1.25, illustre schématiquement la progression de la fissure de coupe. Comme pour les fibres à 45 degrés, un retour élastique se fait voir sur la surface finie. Le fini est en forme d'escalier (fig. 1-24). Le délaminage est très présent dans ce type de coupe. Le rayon de bec affecte la coupe non pas dans le mode de rupture mais dans la quantité de défauts générés.

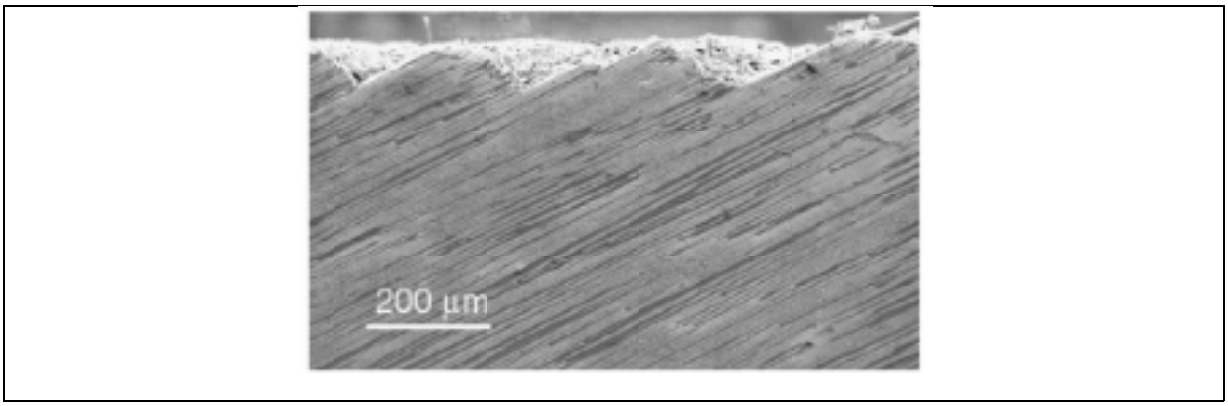


Figure 1.24 Microstructure de la zone coupée d'un laminé à 135 degrés d'orientation
Tirée de Rao, Mahajan et Bhatnagar (2008)

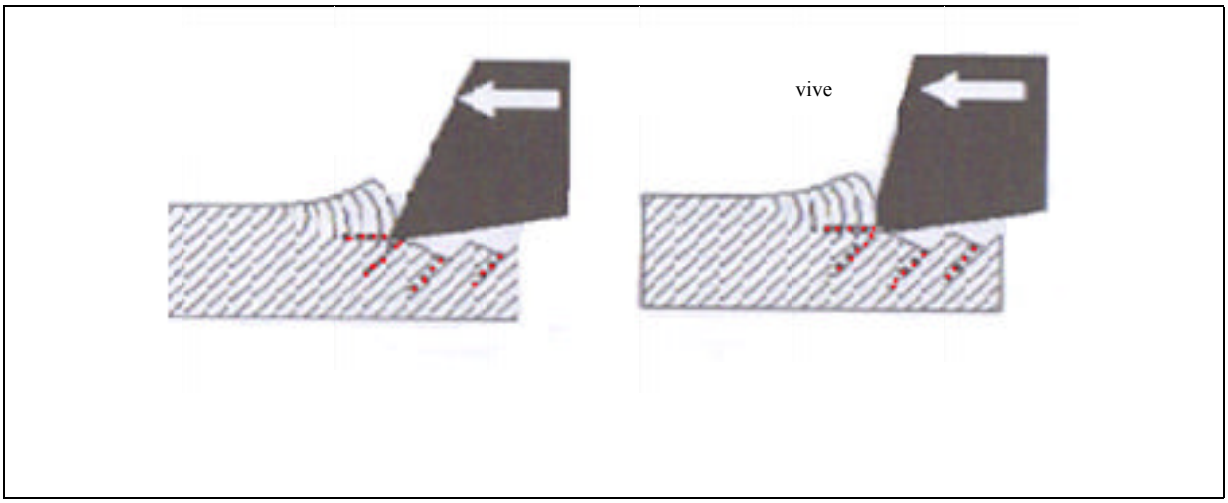


Figure 1.25 Schématisation de la coupe d'un laminé à -45 degrés
avec un outil coupant et moins coupant
Tirée de Girot (2009)

Il ressort de ces travaux de recherche que la qualité de la surface usinée est améliorée avec la réduction de la valeur du rayon de bec de l'outil. Peu de défauts seront générés car la rupture se fera davantage par cisaillement que par flexion des fibres.

1.2.4 Effet de l'angle d'hélice

La fonction première de l'angle d'hélice consiste à appliquer les efforts de coupe de manière graduelle (Altintas, 2006) sur le flanc de coupe. De plus, l'angle d'hélice facilite l'évacuation

de la matière coupée le long de l'hélice pour les matériaux isotropes. Lors de l'usinage des matériaux composites, la matière évacuée est davantage de la poussière que du copeau sous forme continue. L'angle d'hélice induit des efforts axiaux qui peuvent induire des défauts lors de l'usinage des laminés en composite. Le mode de rupture inter laminaire de type 1 est caractérisé par l'ouverture d'une fissure sous des charges purement axiales (Kim et Dharan, 1989). La Figure 1.27 illustre l'ouverture d'une fissure sous une charge purement axiale.

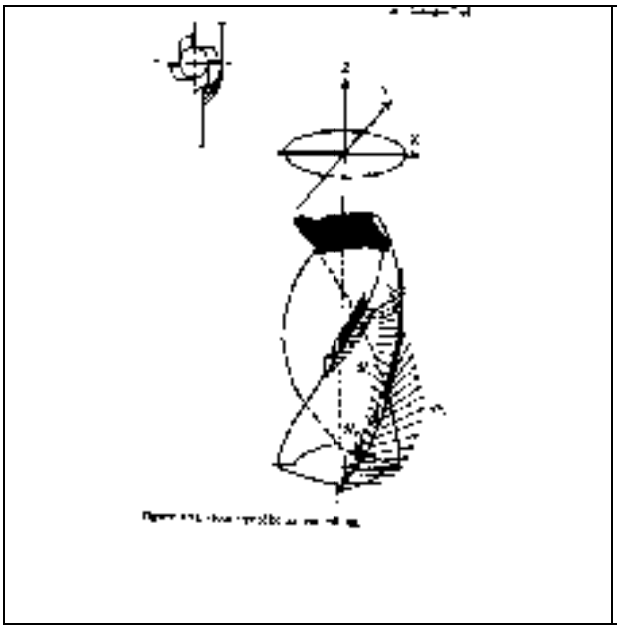


Figure 1.26 Géométrie typique d'une fraise à hélices
Tirée de Altintas (2006)

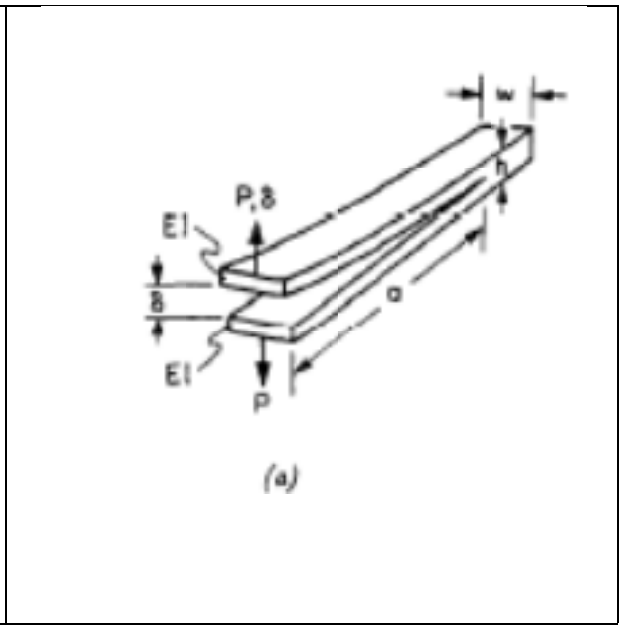


Figure 1.27 Schématisation de l'ouverture d'une fissure en mode 1
Tirée de Kim et Dharan (1989)

La Figure 1.26 schématise les efforts de coupe sur les lèvres d'une fraise en bout. Trois composantes de force agissent sur la lèvre, soit la force tangentielle (δFt), la force radiale (δFr) et la force axiale (δFa).

C'est la force axiale qui, théoriquement, induira les efforts causant le délaminage des fibres dans le plan transverse du laminé. L'effet de l'hélice sur la coupe des laminés composite sera traité dans cette étude.

1.3 Effet des matériaux et des types de revêtement des outils de coupe orientés dans le détourage des laminés composites

Les matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe ont une influence capitale sur leur durée de vie lors des opérations d'usinage. En raison du caractère abrasif des fibres de carbone dans un laminé composite, les outils doivent résister à l'effet destructeur de l'usure. L'usure affecte la qualité tranchante des outils qui se répercute sur la qualité de surface produite et la réponse en force lors de la coupe. Un outil possédant une moindre capacité à couper induira une élévation de température qui générera des défauts à l'interface de la face coupée. Ce défaut est principalement relié à une élévation de la température dans la matrice du composite supérieure à la température de vitrification Tg.

Les géométries conventionnelles sont couramment utilisées telles que :

- les fraises à détourer à lèvres pyramidales (Figure 1.28);
- les fraises en bout à hélice neutre (Figure 1.29).

Figure 1.28 Fraise à détourer par IMCO

Figure 1.29 Fraise à hélice neutre par IMCO

La raison première de l'utilisation de ces outils est principalement le faible coût d'investissement. La fraise à détourer illustrée à la Figure 1.28 peut s'employer lors du détourage manuel des composites. Les sections suivantes présentent une revue des différents matériaux utilisés dans pour la fabrication d'outils de coupe.

1.3.1 Acier rapide

Les outils fabriqués en acier rapide sont grandement répandus et très peu coûteux. Il s'est avéré que l'utilisation des ces outils est vivement déconseillée lors d'opérations d'usinage de structures laminées en carbone/époxy. Les vitesses de coupe sont généralement très basses avec une avance par dent similaire aux autres types d'outil plus performants : 30-45m/min avec une avance de 0.1mm/dent-.5mm/dent. Les aciers rapide sont des aciers hautement alliés avec du tungstène, du chrome, du molybdène et du vanadium. En général, la dureté des aciers rapides varie autour de 64 HRC. Deux classes d'aciers rapides sont largement répandues, la classe M et la classe T. La classe M se distingue par une haute teneur en Molybdène et la classe T par une haute teneur en Tungstène (Bayer, 2002a). La dureté de ce type de matériau décroît rapidement sous l'effet de la température (Bayer, 2002b). La Figure 1.30 illustre la décroissance de la dureté en fonction de la température. Même revêtue avec une couche de matière ultra résistante à l'abrasion, ces outils ne sont plus conseillés pour l'usinage de matériaux haute performance telles que les pièces en composite carbone/époxy.(Girot, 2009)

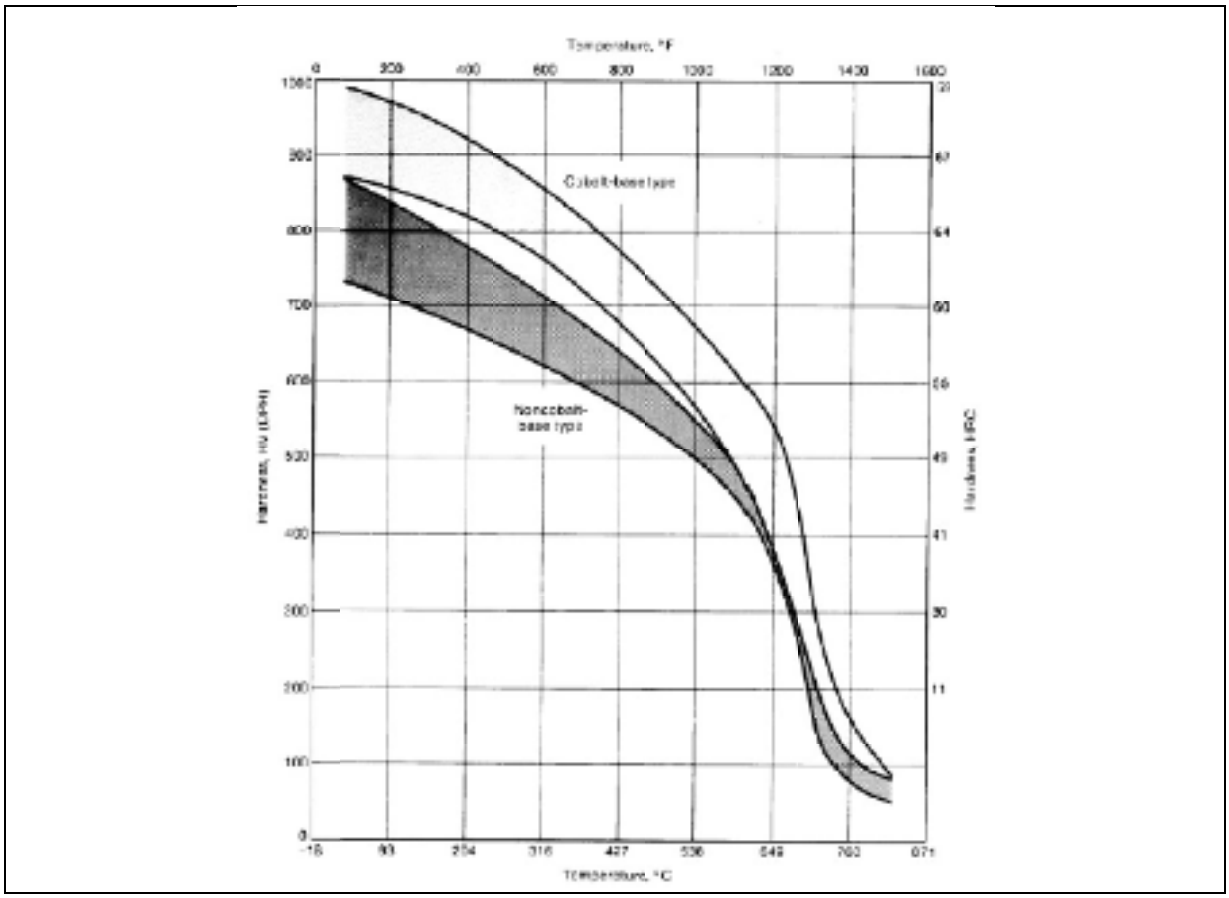


Figure 1.30 Graphique du taux de variation de dureté en fonction de la température
Tirée de Bayer (2002b)

1.3.2 Meule abrasive

Les meules abrasives sont généralement composées d'un minéral très abrasif et d'un liant grandement résiliant. Les grains abrasifs sont généralement constitués d'oxyde ou de cristal ultra résistant. Trois classes d'abrasif sont généralement utilisés : les monocristallins, les multi cristallins et les microcristaux (William, 2002).

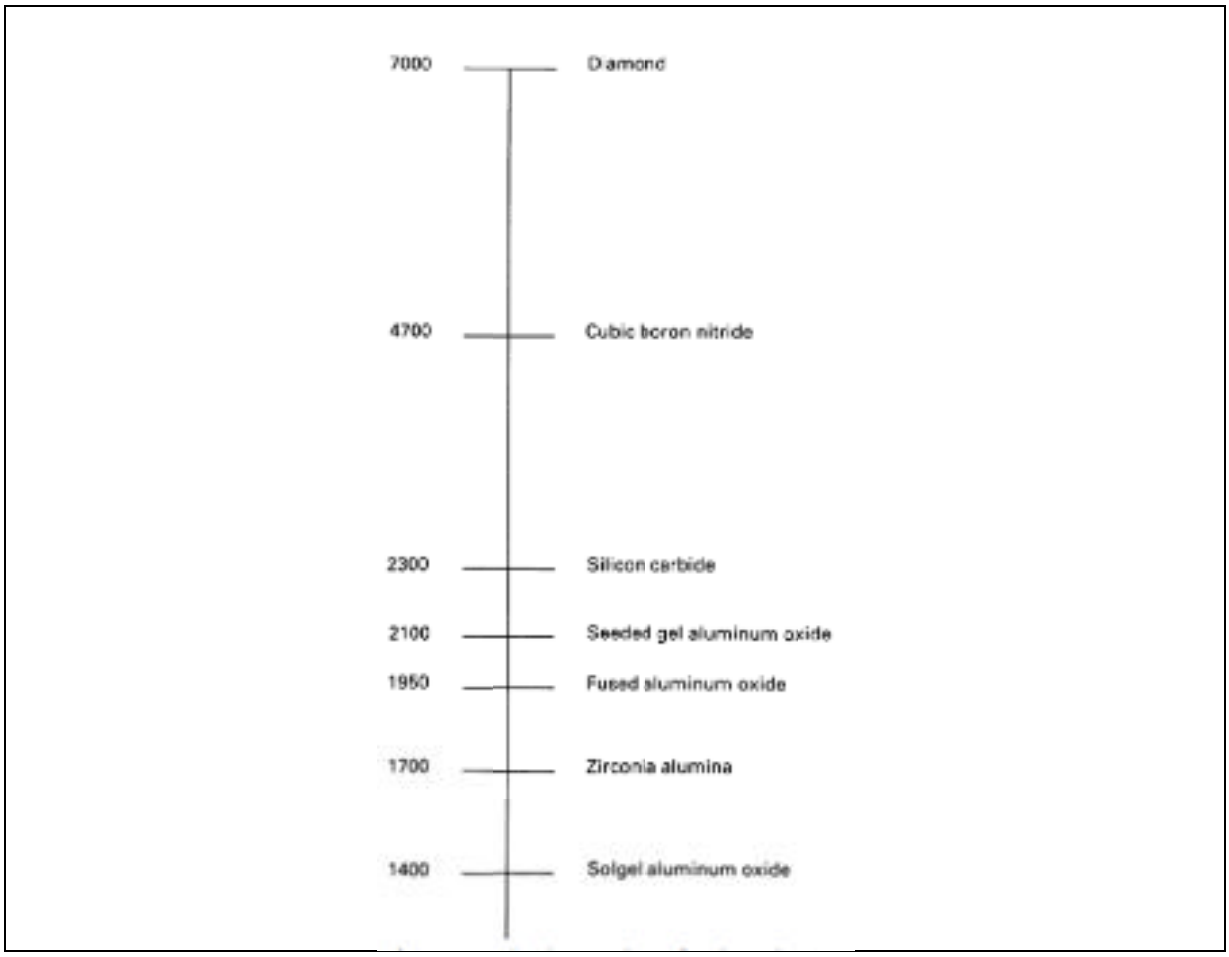


Figure 1.31 Échelle des dureté Knoop des cristaux abrasifs
Tirée de William (2002)

La sélection du type d'abrasif dépend de l'utilisation et du type d'opération de meulage. Pour de lourdes ébauches, une meule avec un abrasif et un liant résistant à l'impact est préconisée. Les meules utilisant des diamants ou des grains de nitrure cubique de bore sont généralement réservées aux matériaux qui ont tendance à fracturer. Les liants des grains abrasifs aussi varient en fonction du type de grain abrasif et du type d'opération de meulage à effectuer. Le liant est généralement l'élément limitant la vitesse de coupe. La Figure 1.31 illustre la l'échelle de la dureté des différents cristaux abrasifs en valeur Knoop. Il n'y rien de comparable dans les vitesses de coupe des meules abrasives et les outils de coupe en fraisage. Les vitesses sont multipliées de l'ordre de 10@100 fois la vitesse de coupe des aciers rapides. Les liants pour les grains supers abrasifs tels le diamant et les CBN, sont constitués

de métaux. Ces métaux peuvent être du nickel, du bronze et même du carbure (Girot, 2009; William, 2002). Lors de l'usinage à sec, les vitesses de coupe élevées génèrent une élévation de la température affectant les propriétés mécaniques de la résine. Les outils faits avec des particules de diamants déposées sur des carbures par placage électrolytique sur du nickel possèdent de meilleures propriétés lorsque le ratio diamant/liant se rapproche de ½ (Girot, 2009). Plus la fraction volumique d'abrasif est élevée, plus l'outillage a une forte résistance à l'usure.

1.3.3 Carbure

L'outillage en carbure est obtenu par la métallurgie des poudres. Les outils en carbures solides sont principalement constitués de carbure de tungstène, de carbure de titane et ou de carbure de tantalium. Comme les meules abrasives, les carbures sont liés entre eux à l'aide d'un liant. Ce liant est principalement du cobalt. La Figure 1.32 tabule les différentes propriétés mécaniques de différents types de carbures largement disponibles sur le marché.

Nominal composition	Grain size	Hardness, HRA	Density		Transverse strength		Compressive strength		Modulus of elasticity		Relative abrasion resistance[a]	Coefficient of thermal expansion, μ m/m · K		Thermal conductivity, W/m · K
			g/cm³	oz/in³	MPa	ksi	MPa	ksi	GPa	psi × 10⁶		at 200 °C (390 °F)	at 1000 °C (1830 °F)	
97WC-3Co	Medium	92.5-93.2	15.3	8.85	1590	230	5860	850	641	93	100	4.0	...	121
94WC-6Co	Fine	92.5-93.1	15.0	8.67	1790	260	5930	860	614	89	100	4.3	5.9	...
	Medium	91.7-92.2	15.0	8.67	2000	290	5450	790	648	94	58	4.3	5.4	100
	Coarse	90.5-91.5	15.0	8.67	2210	320	5170	750	641	93	25	4.3	5.6	121
90WC-10Co	Fine	90.7-91.3	14.6	8.44	3100	450	5170	750	620	90	22	...	...	...
	Coarse	87.4-88.2	14.5	8.38	2760	400	4000	580	552	80	7	5.2	...	112
84WC-16Co	Fine	89	13.9	8.04	3380	490	4070	590	524	76	5	...	...	...
	Coarse	86.0-87.5	13.9	8.04	2900	420	3860	560	524	76	5	5.8	7.0	88
75WC-25Co	Medium	83-85	13.0	7.52	2550	370	3100	450	483	70	3	6.3	...	71
71WC-12.5TiC-12TaC-4.5Co	Medium	92.1-92.8	12.0	6.94	1380	200	5790	840	565	82	11	5.2	6.5	35
72WC-8TiC-11.5TaC-8.5Co	Medium	90.7-91.5	12.6	7.29	1720	250	5170	750	558	81	13	5.8	6.8	50

(a) Based on a value of 100 for the most abrasion-resistant material

Figure 1.32 Propriétés mécaniques des carbures liés au du Cobalt
Tirée de Santhanam (2002a)

Les outils en carbure possèdent une résistance à l'abrasion nettement supérieure à l'outillage constitué d'aciers rapides. Plus la teneur en cobalt est faible, plus l'outil est résistant à l'abrasion. Par contre, si la teneur en cobalt est faible cela indique que la résistance aux impacts est faible. La grosseur des grains de carbure affecte la résistance à l'usure et la résistance aux impacts. Lorsque le grain est fin, la dureté et la résistance à l'usure est grandement augmentée, par contre la résistance aux impacts est considérablement affectée.

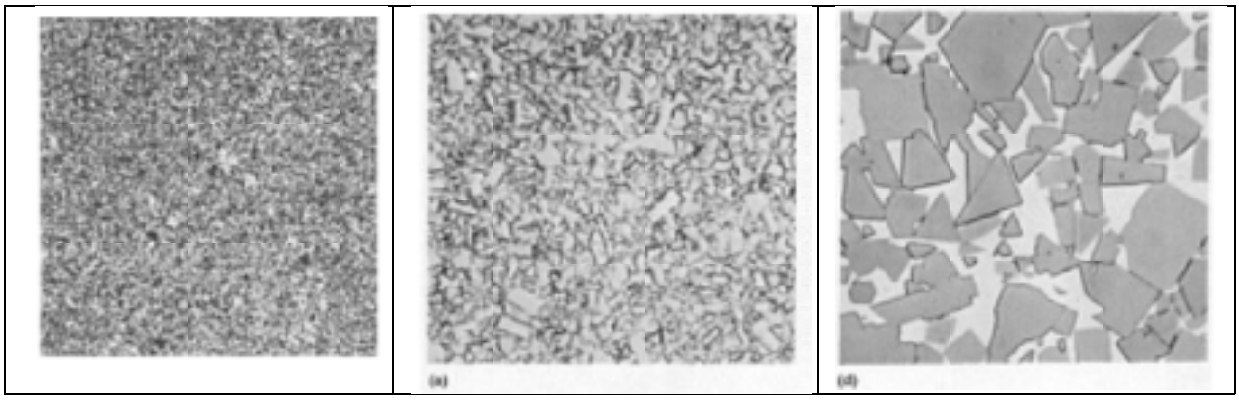


Figure 1.33 Carbure submicro grain 6% Co (gracieuseté de Sandvik Coromant)

Figure 1.34 Carbure grain moyen 3% Co (gracieuseté de Sandvik Coromant)

Figure 1.35 Carbure grain grossier 15% de Co (gracieuseté de Sandvik Coromant)

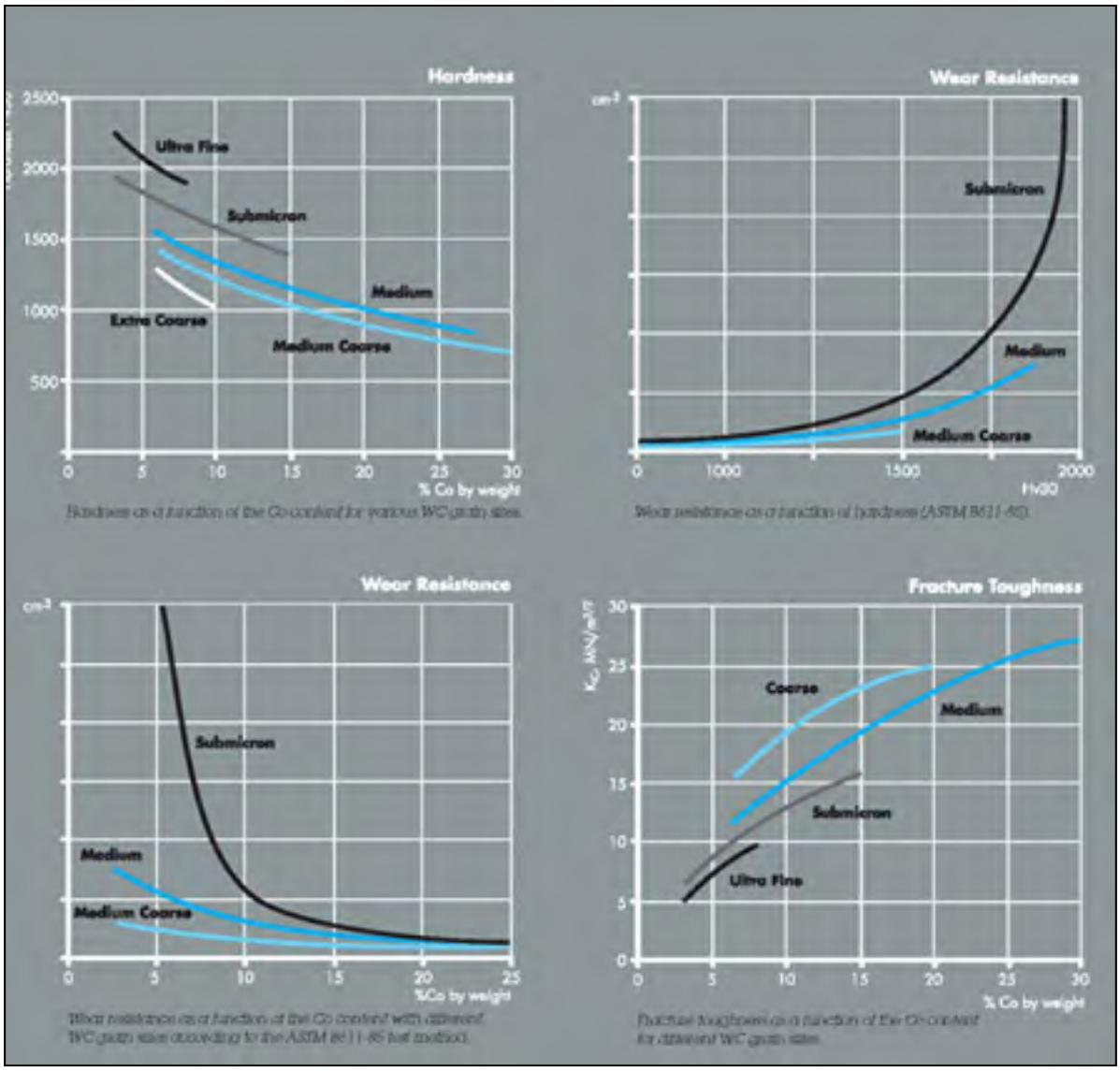


Figure 1.36 Graphiques de la dureté, résistance à l'usure et à la résistance aux impacts en fonction du % de cobalt (gracieuseté de Sandvik Coromant)

La Figure 1.33, la Figure 1.34 et la Figure 1.35 présente la cristallographie de carbure possédant des grosseurs de grain différentes. La Figure 1.36 illustre l'influence de la grosseur du grain ainsi que la teneur volumique de liant de cobalt sur les différents aspects mécaniques reliés à l'outillage : la dureté, l'usure et la résistance aux impacts. Plus le grain est petit et que le pourcentage de cobalt est petit, plus l'outil est résistant à l'usure. Par

contre, la résistance de ce même alliage à la fracturation est amoindrie. Un juste équilibre entre la grosseur des grains et la teneur en cobalt doit être trouvé.

1.3.4 Revêtements CVD et PVD pour les carbures

Les carbures peuvent être largement utilisés dans la coupe par détourage des laminés composites si l'on utilise ces outils avec des revêtements de haute dureté (Girot, 2009). Les revêtements de haute dureté consiste à appliquer par déposition chimique (CVD) une fine couche de diamant (environ 15µm) ou de matière ultra dure et résistante à l'abrasion.

Le procédé de déposition par vapeur chimique consiste à chauffer l'outil à l'intérieur d'un réacteur avec de l'hydrogène (H_2) et ou du méthane (CH_4) à pression atmosphérique avec un agent volatile, qui combiné au gaz, formera une couche sur l'outil du revêtement désiré (Santhanam, 2002b). Le principe est décrit plus en détail dans Karner et al. (1996) et dans Carlsson (1994).

Afin de s'assurer que la structure cristalline sera du diamant, une préparation du substrat doit être faite. La préparation des carbures (seeding) avant la phase de grossissement des grains de diamant est effectuée dans une solution aqueuse de poudre de diamant avec ultrason (Karner *et al.*, 1996). Un nettoyage à l'alcool est effectué sur le substrat et rapidement séché. Par la suite, la réaction de croissance des grains de diamant peut débuter. Il est possible de contrôler le taux de déposition, la grosseur des grains, l'orientation des cristaux. Bref, avoir un certain contrôle de la qualité du produit fini. La déposition de diamant par la méthode CVD est couramment utilisée dans l'outillage de coupe moderne. La figure 1.37 illustre la déposition de diamant sur l'interface de l'outil de coupe.

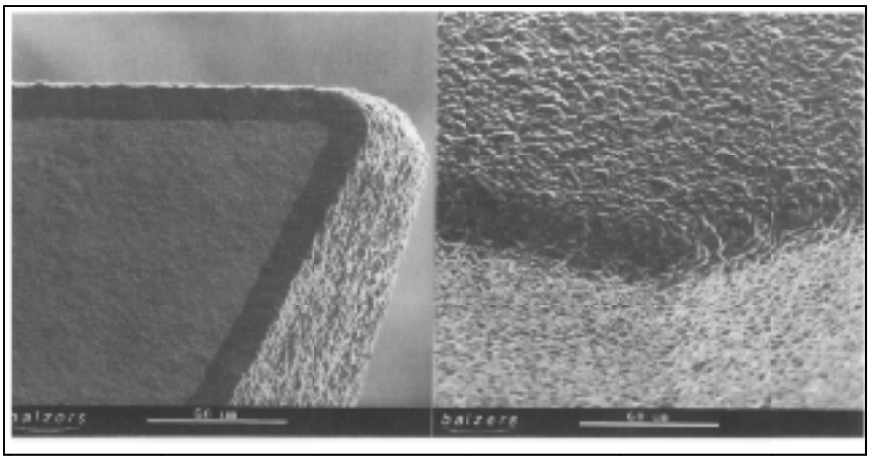


Figure 1.37 Vue de coupe d'un outil de coupe revête de diamant par la méthode CVD.
Tirée de Karner *et al.* (1996)

Lors de tests de tournage, Karner (Karner *et al.*, 1996) valide les performances d'un outil de coupe avec et sans revêtement en diamant par la méthode CVD. Même si les tests n'ont pas été effectués sur des matériaux anisotropes tels que la fibre de carbone renforcée de plastique, le facteur d'échelle y est considérable. Pour le même type d'opération, l'auteur obtient une amélioration de la durée de vie de l'ordre de 20 fois. Donc, pour 7 pièces produites ultérieurement avec l'outil commercialisé, il en produit 140 (Karner *et al.*, 1996; Reineck *et al.*, 1996).

Le procédé de déposition physique (PVD) est effectué à des températures nettement inférieures au procédé CVD (500 degrés C). Ce procédé est intéressant car il n'affecta pas la structure cristalline du carbure et n'implique aucune décarburisation de l'outil. En n'affectant pas l'outil à l'interface du dépôt, la résistance à la rupture transverse est plus élevé que le même revêtement par CVD ou bien avec un carbure sans revêtement (Figure 1.38).

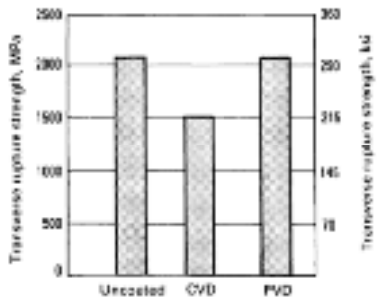


Figure 1.38 Test de résistance à la rupture transverse sur un carbure non revêtue et revêtue par la méthode de flexion par trois points sur un carbure à 73WC-19(Ti,Ta,Nb)-8Co

À la base, le procédé de PVD est différent du procédé CVD par le type de culture des cristaux.

Il existe plusieurs méthodes de déposition physique mais trois méthodes sont largement utilisées :

1. Méthode par évaporation;
2. Méthode de placage ionique;
3. Méthode de pulvérisation cathodique (sputtering).

1.3.5 Diamant poly cristallin (PCD)

Le diamant est le matériau le plus dur connu en ce moment par l'homme. En raison de sa fragilité pour certaines orientations cristallines et de sa complexité de mise en forme, le diamant monocristallin est utilisé principalement pour de l'usinage de haute précision, tel l'usinage de lentille optique ou l'usinage de coupoles de prothèse orthopédique de hanche par exemple. Les plaquettes de diamant poly cristallins (PCD) sont mises en forme par la compaction de diamants de fines tailles avec un liant métallique, généralement du Cobalt. Une découpe au LASER ou par décharge électrique (EDM) permet d'effectuer une semi-finition au brut de PCD. Une rectification à la meule au diamant ainsi qu'un polissage par rodage au diamant effectue la finition de la pointe tranchante. La granulométrie des grains de diamant varie de 2 à 25 microns affectant la qualité de résistance à l'abrasion, la qualité de ténacité et la qualité de résistance aux impacts de la pointe tranchante. Le Tableau 1.1 expose

les propriétés thermo-mécaniques de quatre grades de PCD. Les fournisseurs les plus cités et de grande envergure sont les trois compagnies suivantes :

- Smith MegaDiamond Inc (SchlumBerger Group);
- Element 6 (E6 DeBeer);
- Diamond Innovation (General Electric).

Selon les spécifications des détaillants, en usinage de finition, la granulométrie des diamants doit être d'environ de 4 à 10 microns avec un pourcentage de liant métallique de 7% à 10% (GE, 2007) .

Tableau 1.1 Propriétés mécano-thermo-électrique des quatre grades de PCD de Diamond Innovation (GE, 2007)

Property		Compax Diamond Grade 1600	1300	1500	1800	Effect of increasing particle size
Compressive Strength	(GPa)	7.5	7.5	7.5	7.5	constant
Elastic Modulus	(GPa)	850	950	1100	1150	increases
Transverse Rupture Strength	(GPa)	1.7	1.4	0.85	0.90	decreases
Thermal Conductivity	(W/mk°)	500	525	600	600	increases
Electrical Resistivity	(ohm-mx 10^{-3})	1.5	2.0	4.0	4.5	increases
Density	(g/cc)	4.1	4.0	3.9	4.0	decreases
Knoop Hardness - 3 kg load	(kg/mm²)	4000	4000	4000	4000	constant

Les bruts de PCD peuvent s'obtenir de différentes dimensions en fonction de l'épaisseur disponible. Le Tableau 1.2 présente les différentes configurations disponibles chez Diamond Innovation (GE, 2007).

Tableau 1.2 Forme des bruts de PCD de Diamond Innovation (GE, 2007)

✓ = Standard S = Special

Shape	Dimensions (mm)			Grade			
	Angle (k°) / Shape	Diameter (d)	Thickness (t)	1500	1300	1600	1800
Rounds 360°	360R	8.1	3.2	S	✓	S	S
	360R	58.0	1.6 - 2.0/3.2	✓	✓	✓	✓
	360R	58.0	1.6[1] 0.3 mm PCD Layer[1]	n/a	✓	n/a	n/a
Half Rounds 180°	180P	8.1	1.6	S	✓	✓	S
	180P	9.5	1.6	S	✓	✓	S
	180P	13.2	1.6	✓	✓	✓	S
Partial Rounds 90°	90P	3.9	1.6	S	✓	S	S
	90P	6.5	1.6	✓	✓	✓	S
Triangles	Angle (k°)/Shape	Leg Length (l)	Thickness (t)				
90°	90T	4.0	1.6	✓	✓	S	S
	90T	5.0	1.6	✓	✓	✓	S
	90T	6.5	1.6	✓	✓	S	S
	90T	7.5	1.6	✓	✓	S	S
80°	80T	5.0	1.6	✓	✓	S	S
60°	60T	4.0	1.6	S	✓	S	S
	60T	5.0	1.6	✓	✓	S	S
	60T	7.0	1.6	✓	✓	S	S
55°	55T	5.0	1.6	✓	S	✓	S
35°	35T	7.0	1.6	✓	✓	S	S
Rectangles	Length (l)/Shape	Width (w)	Thickness (t)				
L	6.0L	3.0	1.6	S	S	S	S
	6.0L	4.3	1.6	S	S	S	S
	6.5L	5.5	1.6	S	S	✓	S
	8.0L	5.0	1.6	S	S	S	S
	9.0L	9.0	1.6	S	S	S	S
	10.0L	3.0	1.6	S	S	✓	S
	11.5L	2.5	3.2	✓	S	S	S
	13.0L	3.0	1.6	✓	✓	S	S

1.4 Usure, durée de vie et détérioration de l'outillage de coupe orienté dans le détourage de laminés composites carbone/époxy.

L'usure et la durée de vie sont des paramètres importants et influents dans la sélection d'un outillage ou d'une méthode de coupe. L'usure dans les matériaux isotropes affecte la qualité et l'intégrité des surfaces par l'augmentation de la rugosité. Cette rugosité induit une réduction de la résistance mécanique en fatigue. Les matériaux composites à fibres longues et courtes telles que la fibre de verre ou la fibre de carbone, possèdent un caractère très abrasif (Horman, Collier et Michael, 2008). La détérioration de l'outillage est évaluée par la méthode de Taylor. Cette méthode pose un critère d'évaluation (usure de flanc en micron) et fait varier la vitesse de coupe, pour un même outil, une même avance et une même profondeur de passe.

Le critère de défaillance d'usure est généralement définit selon la norme ISO 3685 et la norme ISO 8688 selon différents aspects et signe d'usure. La figure 1.39 illustre les différents critères d'usure de flanc. Cette même norme demande un minimum de 5 vitesses de coupe différentes pour évaluer la droite d'usure durée de vie-vitesse de coupe (ISO, 1989).

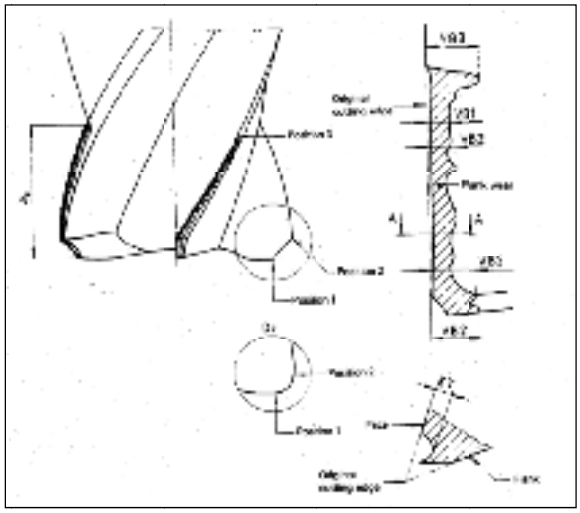


Figure 1.39 Schématisation de l'usure en flanc selon la norme ISO 8688-2

Plusieurs études sont disponibles représentant l'évolution de l'usure en flanc en fonction de la distance de coupe effectuée. Ces études sont principalement disponibles pour le tournage et les distances de coupe représentent la longueur effective coupée.

Le type de matériau d'outil est grandement important dans sa capacité à résister à l'abrasion. La figure 1.40 illustre un test d'usure effectué à une vitesse de coupe de 200m/min avec une avance de 0.05 mm/rev avec une profondeur de passe de 1 mm en tournage pour différentes technologies d'outil de coupe. La consigne de défaillance est fixée à 800 microns sur une usure en flanc. Le temps global du test fût de 7 minutes de coupe au maximum.

La figure 1.40 provient d'une étude d'usure faite par fraisage avec différents outils et différents types de revêtement (Ferreira, Coppini et Miranda, 1999). L'usure observée est principalement causée par abrasion, donc la détérioration n'est pas catastrophique du type écaillage de l'outil. L'abrasion arrondit l'arête de coupe, augmentant les efforts de coupe générant ainsi plus d'usure.

L'usure, en plus d'affecter l'outil de coupe, affecte la qualité de surface de la composante usinée. La section suivante cherche à voir l'impact de l'état de surface en fonction des paramètres mécaniques des pièces.

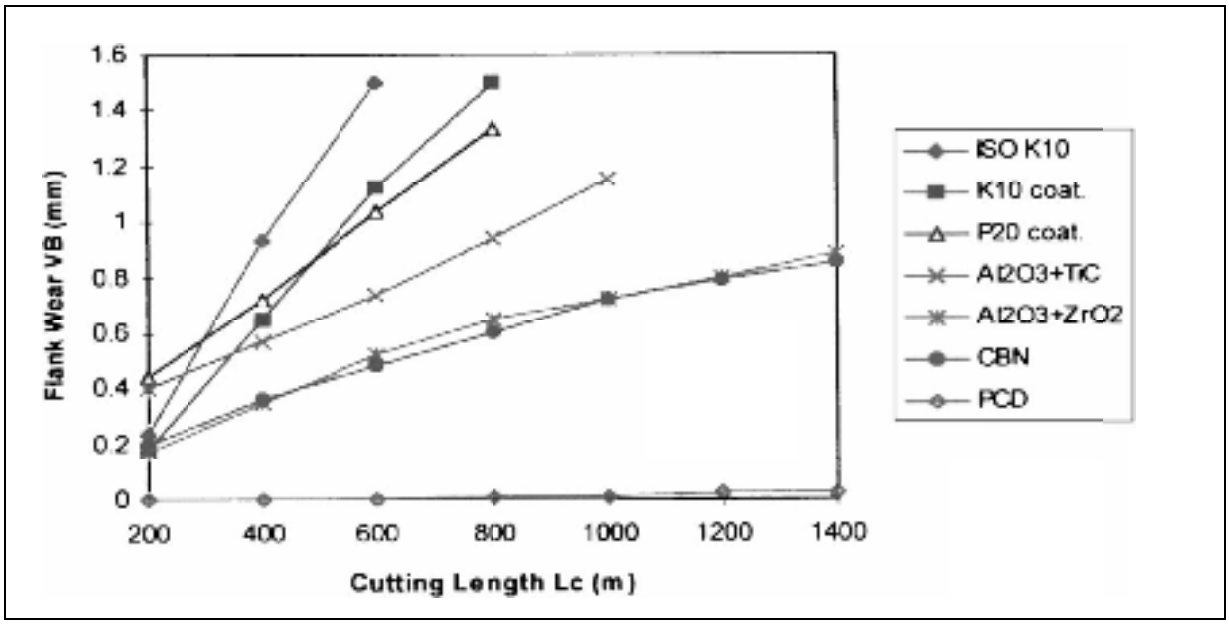


Figure 1.40 Tests d'usure en flanc de différent outils et différents revêtement
Tirée de Ferreira, Coppini et Miranda (1999)

1.5 Impact de l'état de surface sur les propriétés mécaniques

L'état de surface est une valeur quantitative directement liée à la qualité de la coupe. Sous plusieurs critères normalisés, tels que la rugosité arithmétique Ra, la moyenne des sommets Rz, la valeur maximum crête et vallée Rt et Ry, on peut mettre en lumière les défauts causés par la coupe. Ces défauts, dans les matériaux isotropes, induisent une réduction significative de la résistance à la fatigue. Les sections qui suivent tentent de mettre en lumière l'impact de l'état de surface sur la perte de résistance mécanique. La norme en vigueur est la norme ANSI B46-1-1986.

La rugosité des composantes détourées diffère souvent de valeurs obtenues des échantillons de tests mécaniques décrits par la norme D-3039 spécifiant un état de rugosité inférieur à 1.6 Ra, obtenu par sablage et polissage. Plusieurs études ont porté sur l'impact de la rugosité sur la résistance en fatigue des matériaux composites à fibres courtes et à fibres longues (Ramulu *et al.*, 2005). Dans ces études, trois principales méthodes de découpe sont utilisées:

- découpe à la scie aux diamants abrasifs (DS);
- découpe au jet d'eau abrasif (AWJ);
- finition au planeur avec pointe de PCD (PCD).

Les paramètres de finition avec la pointe en PCD sont de 0.13mm (0.005in) en semi-finition avec une passe finale à 0.065mm (0.0025in). La passe de finition correspond à un facteur d'environ 10 fois le diamètre d'une fibre (Arola et Ramulu, 1994)

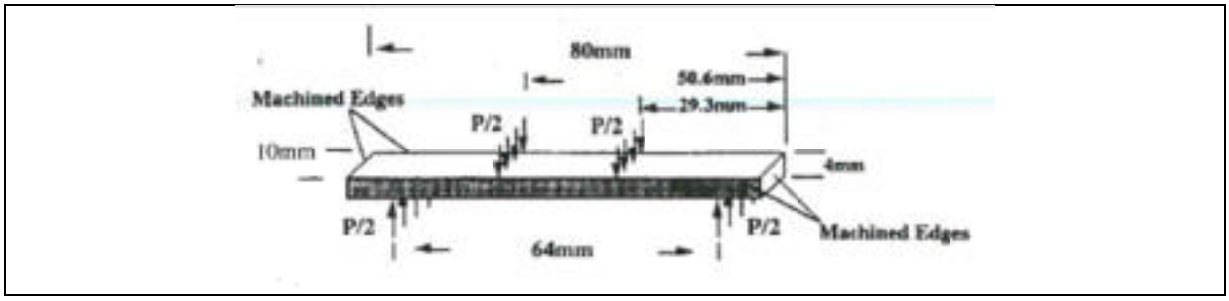


Figure 1.41 Spécimen de test de flexion à quatre points
Tirée de Arola et Ramulu (1994)

Le test consiste à charger le spécimen pour le soumettre à des efforts de flexion sur un montage à quatre points jusqu'à la rupture. La Figure 1.41 illustre la représentation tridimensionnelle de l'échantillon de test en flexion. Les résultats obtenus en état de rugosité sont présentés au tableau 1.3 :

Tableau 1.3 Résultats de la rugosité pour les différentes orientations de fibres pour les trois procédés testés
Tirée de Arola et Ramulu (1994)

Machining method	Measurement depth/fibre angle	Parameter			
		R_a (μm)	R_t (μm)	Skewness	Kurtosis
DS	Longitudinal measurements				
	0.5 mm/−45°	0.3	2.4	−0.98	5.06
	1.0 mm/0°/90°	0.4	3.3	−1.17	6.19
	1.5 mm/45°	0.1	1.2	−3.01	17.69
	2.0 mm/90°	0.2	1.8	−1.67	8.78
	2.5 mm/45°	0.2	2.3	−1.39	7.27
	3.0 mm/90°/0°	0.2	1.6	−1.35	7.38
	3.5 mm/−45°	0.1	1.5	−1.87	11.77
	Transverse measurement	0.5	4.7	−0.60	5.80
PCD	Longitudinal measurements				
	0.5 mm/−45°	11.3	61.3	0.46	3.17
	1.0 mm/0°/90°	1.3	9.2	1.40	4.89
	1.5 mm/45°	0.6	4.1	0.17	3.65
	2.0 mm/90°	0.6	4.6	0.47	4.13
	2.5 mm/45°	0.5	4.4	0.39	5.59
	3.0 mm/90°/0°	0.7	5.2	0.21	5.22
	3.5 mm/−45°	10.1	49.4	0.35	6.19
	Transverse measurement	4.6	31.8	0.80	8.86
AWJ	Longitudinal measurements				
	0.5 mm/−45°	2.1	12.6	−0.08	2.80
	1.0 mm/0°/90°	1.9	10.9	−0.26	3.09
	1.5 mm/45°	1.9	11.4	−0.33	3.77
	2.0 mm/90°	2.0	12.0	−0.34	3.85
	2.5 mm/45°	2.0	10.6	−0.32	3.27
	3.0 mm/90°/0°	1.7	9.5	−0.25	5.02
	3.5 mm/−45°	2.0	12.8	−0.43	3.38
	Transverse measurement	1.7	10.1	−0.93	5.52

Seul l'échantillon coupé par PCD présente des variations considérables d'état de surface. Les fibres à -45 degrés sont celles présentant la plus grande rugosité Ra, soit de 11.3 et de 10.1 (microns) comparativement à la fibre à 90 degrés présentant une rugosité de 0.6 micron. Les spécimens coupés avec un procédé abrasif sont constants au niveau de la rugosité peu importe l'orientation de la fibre. Les résultats de la rupture au chargement pour les trois méthodes de fabrication sont présentés à la Figure 1.42 où la rigidité est identique pour les trois procédés.

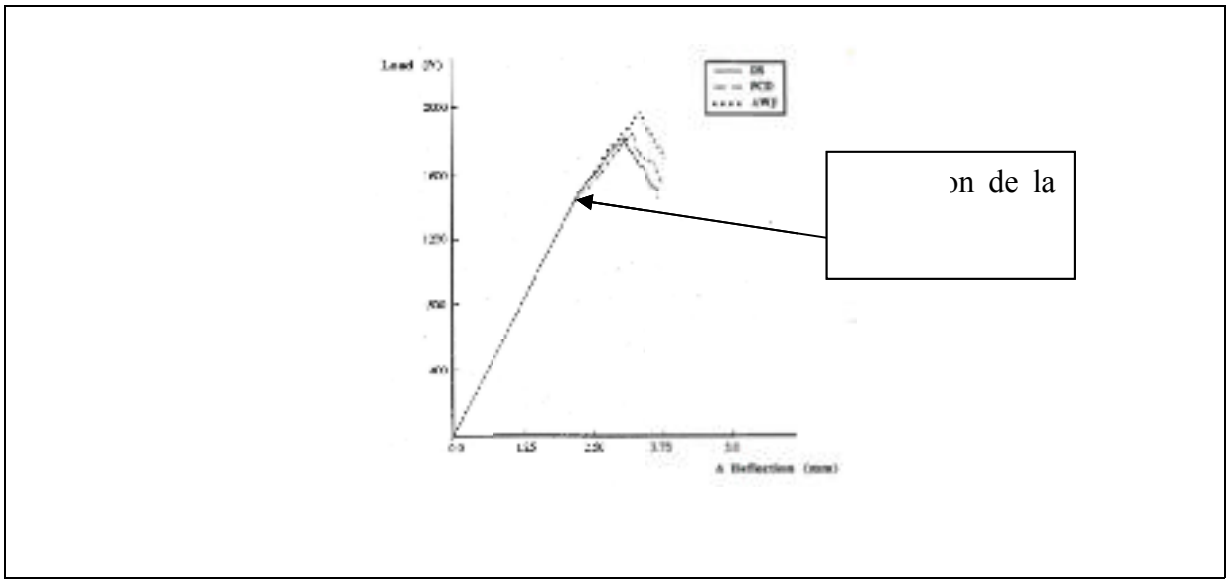


Figure 1.42 Courbes typiques du chargement/déflexion pour
les spécimens de l'essai de flexion
Tirée de Arola et Ramulu (1994)

Typiquement, ce test de flexion n'a pas démontré une perte de rigidité en fonction des procédés de fabrication utilisés. Les modes de rupture associés aux procédés de coupe abrasive et de coupe avec une pointe tranchante sont différents (Arola et Ramulu, 1994). Pour la coupe avec un outil PCD, une fissure à l'orientation de -45 degrés, était la source ou la racine des microfissures causant la déviation de la rigidité observée à la Figure 1.42 ce concentrateur de contrainte accentue la perte de rigidité sur l'échantillon coupé par l'outil en PCD.

Trois études effectuées par Arola et al(1994,1997 et 1998) ont cherché à démontrer l'impact de la rugosité sur la charge ultime en chargement statique et dynamique sur des spécimens de Carbone/Bismaléimide (Arola et Ramulu, 1994; 1997). Dans ces études, une des conclusions est que le procédé de détourage est le facteur dominant dans la réduction de la contrainte ultime (Arola et Ramulu, 1998; Arola et Ramulu, 1997). Une réduction de 20 % de l'énergie d'absorption en chargement dynamique est attribuable au procédé de coupe par arête tranchante (Arola et Ramulu, 1997).

1.6 Critique d'expérimentation et limitation des études

En conclusion, l'utilisation des modèles de prédiction peut être applicable qu'à la coupe orthogonale ou à la coupe de laminés unidirectionnels. Ces modèles ne traitent pas de la liaison inter laminaire des fibres en tenant compte de la cohésion des fibres en fonction du voisinage des fibres dans le sens de l'épaisseur. Dans ce travail, aucune modélisation du détourage ne sera effectuée car il sera difficile d'interpréter la proportion de l'effort attribuable à une fibre à une orientation donnée. Le modèle de Wang n'est valable que dans une plage angulaire de fibre de 0 à 90 degrés. Cette limitation implique qu'en fraisage, l'outil parcours 180 degrés dans la matière si il est en rainurage. Donc, pour une fibre à 0 degré sur la surface fini, l'outil balaye 180 degrés d'angle relatif entre l'arête de l'outil et la fibre. En réalité, l'utilisation d'un laminé unidirectionnel est rare, en avionique, l'utilisation de laminés quasi-isotrope est assez courante, ce qui implique une problématique de cohésion inter laminaire avec beaucoup de fibres à ±45 degrés.

Le rayon de bec du tranchant de l'outil est un paramètre géométrique important dans la qualité de surface de la zone coupée. La problématique associée au rayon de bec est que les fibres de carbone sont abrasives, ce qui émousse l'outil et réduit considérablement l'effet tranchant de l'outil. L'angle d'attaque de l'outil doit être positif, selon les auteurs cités dans ce travail, l'angle d'attaque doit être entre 6 et 10 degrés. L'angle de dépouille affecte les efforts de coupe mais moins considérablement que l'angle d'attaque. Par contre, en fonction de l'angle des fibres, l'effet de retour élastique n'est pas le même pour toutes les orientations. L'angle de dépouille, selon les auteurs cités doit être entre 12 et 17 degrés. Il est important de garder en mémoire qu'un angle d'attaque et un angle de dépouille élevée affaiblissent l'arête tranchante car la section de l'outil est plus faible en fonction de la profondeur de la dent. Selon les études des matériaux et des revêtements, Les outils avec des plaquettes de PCD possèdent une capacité à résister à l'usure abrasive de la fibre de carbone. Les outils de carbure revêtus de diamant sont aussi une solution viable pour contrer l'usure de l'outil.

Il n’est pas évident que le fraisage affecte les propriétés mécaniques des laminés, plusieurs variations sont observables dans les résultats de résistance limite, tant sous le chargement statique que dynamique. À la lumière de ces lectures, le travail de cette recherche devra permettre d’effectuer une sélection systématique d’un outil de coupe permettant d’obtenir une qualité et une productivité désirées. Cette sélection visera à évaluer la performance de plusieurs fournisseurs existants possédant des caractéristiques de résistance à l’usure. Dans un objectif de développement de produits, une expérimentation sera effectuée afin d’évaluer les paramètres géométriques des outils ayant un impact sur la qualité de la coupe.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE D'EXPÉRIMENTATION

2.1 Introduction

L'objectif de ce travail est de proposer des plages opératoires de coupe pour différentes configurations d'outils disponibles sur le marché et de définir les paramètres géométriques optimums d'un outil de coupe pour le détourage. Ces plages opératoires serviront à évaluer la performance des outils afin d'effectuer une sélection raisonnée pour l'utilisation industrielle. Dans l'optique de concevoir un outil de coupe, une expérimentation visant à voir l'impact de l'angle d'hélice et l'angle d'attaque sur la qualité de la coupe est entreprise. Une fois cette expérimentation faite, une conception préliminaire sera proposée.

2.2 Méthodologie d'expérimentation pour l'évaluation de la performance des outils de coupe

Le plan d'expérience proposé pour évaluer la performance des outils de coupe pour le détourage des laminés composite carbone/époxy est principalement un plan de criblage. Le criblage portera sur le balayage des paramètres de coupe « Vitesse de coupe », « avance par rotation » et « l'épaisseur » de laminés coupés. L'objectif premier de ce plan n'est pas d'optimiser un phénomène préalablement étudié, mais d'établir des plages opératoires fiables et constituer une base de donnés comportant un grande nombre de paramètres variés. Les sections suivantes expliqueront le raisonnement qui a mené à la sélection des différents niveaux des facteurs ainsi que des réponses du plan de recherche. Il est certain que dans un but d'optimisation ou de modélisation, des plans d'expériences factoriels génèreraient beaucoup moins d'essais. Dans le cas présent, et face à tous les joueurs du projet, la décision a été de se lancer dans une expérimentation de type classique.

Les facteurs du plan d'expérience sont :

- les outils de coupe (4 types Qualitatif);
- le mode de coupe (2 types Qualitatif);
- les épaisseurs de laminés (mm) (3 types Numérique);
- les vitesses de coupes (m/min) (6 types Numériques);
- les avances par rotation (mm/rev) (6 Types Numériques).

Les réponses du plan d'expérience sont sélectionnées en fonction de la désirabilité ou la pertinence de la lecture de l'observation. Les réponses mesurées dans le plan de recherche en vue de l'évaluation de la performance des outils sont :

- les efforts de coupe (N)(F_{avance}, $F_{normale}$ et F_{axiale});
- la rugosité de surface (µm) (Critères : Ra et Rt);
- le délaminage fibres externes (oui/non) (critère visuel);
- la dynamique de la coupe (oui/non) (Critère Auditif).

La lecture ou l'acquisition fondamentale du plan d'expérience est l'acquisition des efforts de coupe en temps réel. Les sections suivantes expliquent et présentent tous les facteurs et réponses du plan d'expérience en détail.

2.2.1 Description de la machine, du système d'aspiration et du gabarit d'usinage

La machine outil utilisée dans le cadre de cette recherche est une machine 3 axes de fabrication européenne de marque HURON et contrôlée avec un directeur de commande SIEMENS 840D. Cette machine possède un système d'aspiration connexe permettant l'aspiration de poussières, telles les poussières résiduelles de la coupe des composites.

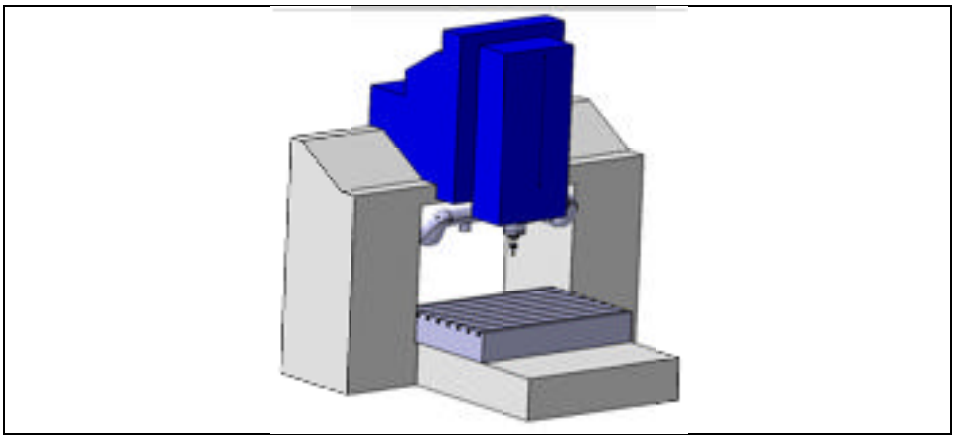


Figure 2.1 Modèle de la structure de la machine HURON K2X10

Tableau 2.1 Paramètres machine de la K2X10 de Huron

HURON K2X10	
Puissance	30 kW
Vitesse broche	100 RPM@28000RPM
Avance Max	60m/min
X	1000 mm
Y	800 mm
Z	500 mm

À cette machine, se greffe un système d'aspiration des résidus de coupe. Ce système est encore en processus de conception. Dans le cadre de cette recherche, une première modélisation et fabrication est utilisée. La figure suivante expose le modèle comportant un système mobile, suivant l'outil, et deux buses fixes à la hauteur de la zone de coupe.

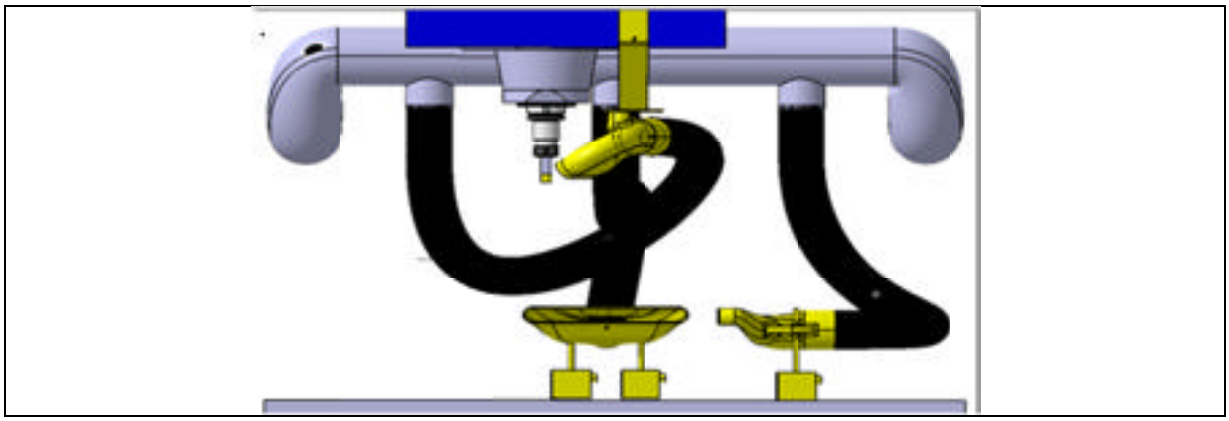


Figure 2.2 Système d'aspiration à buses fixes et mobiles

Un critère fondamental dans la conception de ce système est de respecter la section d'aspiration égale à la section des tuyaux rigides des canaux d'aspiration sur la machine.

Le gabarit d'usinage est lui aussi de conception maison, nécessitant la faculté de se connecter à la table d'acquisition de force et permettant le montage des plaques échantillons. La figure 2.3 illustre une vue explosée de l'assemblage du montage global d'usinage pour le plan d'expérience préalablement énoncé. À l'aide de ce montage, la matière première est maximisée par montage et par outils. La section suivante décrit en détail la matière première utilisée dans cette expérience.

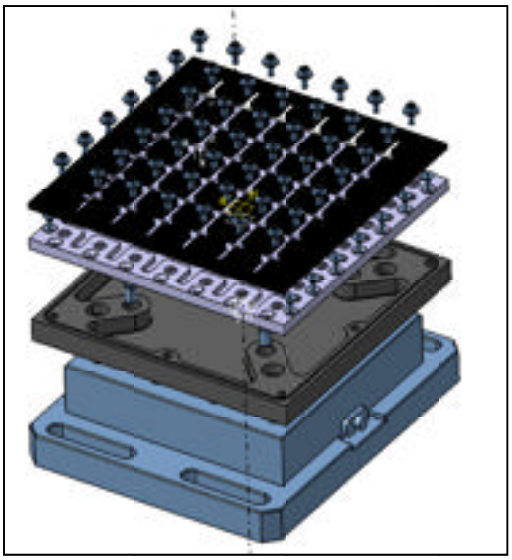


Figure 2.3 Vue explosée du montage d'usinage

2.2.2 Descriptions des échantillons

La matière première utilisée au cours de l'expérimentation visant à sélectionner un outillage en fonction d'un indice de performance, est une fibre de carbone pré imprégnée de résine époxyde. La fibre est de type unidirectionnel. La résine nécessite une cuisson haute température 176 degrés Celsius (350 degrés Fahrenheit) à l'intérieur d'un four autoclave. Une procédure spécifique à la cuisson et à la pression doit être suivie. La spécification provient d'un document interne à un partenaire industriel. La Figure 2.4 illustre la rampe d'élévation de température et l'application de la pression à l'intérieur du four autoclave que nos plaques échantillons doivent subir.

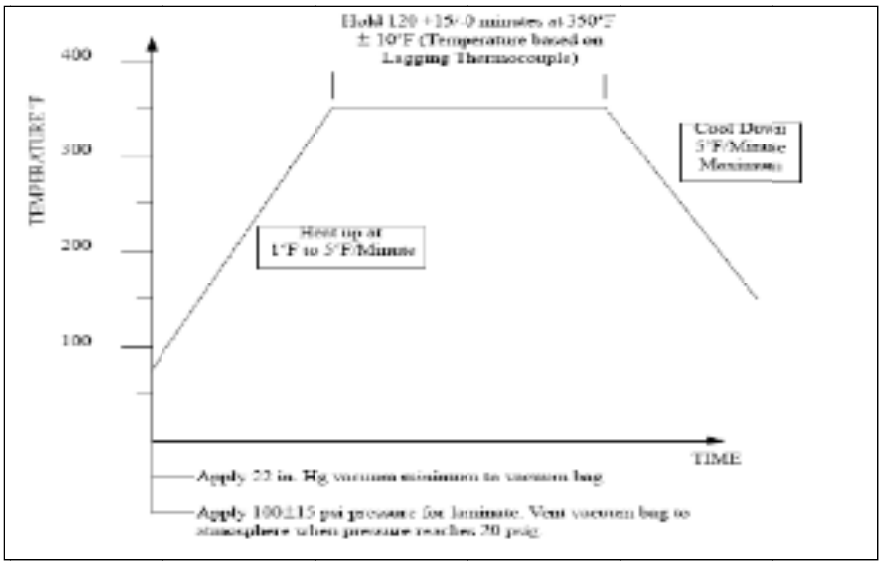


Figure 2.4 Rampe d'application de température et de pression
en fonction du temps pour la matière unidirectionnel.
Tirée de BAPS 532-027

La mise en plis des plaques d'échantillon doit, elle aussi, suivre une procédure décrite par la normalisation du partenaire industriel. La mise en plis des fibres s'effectue sur une plaque d'aluminium préparée avec un agent démoulant ou sur un film de partition possédant des propriétés de démoulages. La Figure 2.5 illustre une coupe de l'agencement des fibres et des autres composants nécessaires à la cuisson des laminés composites.

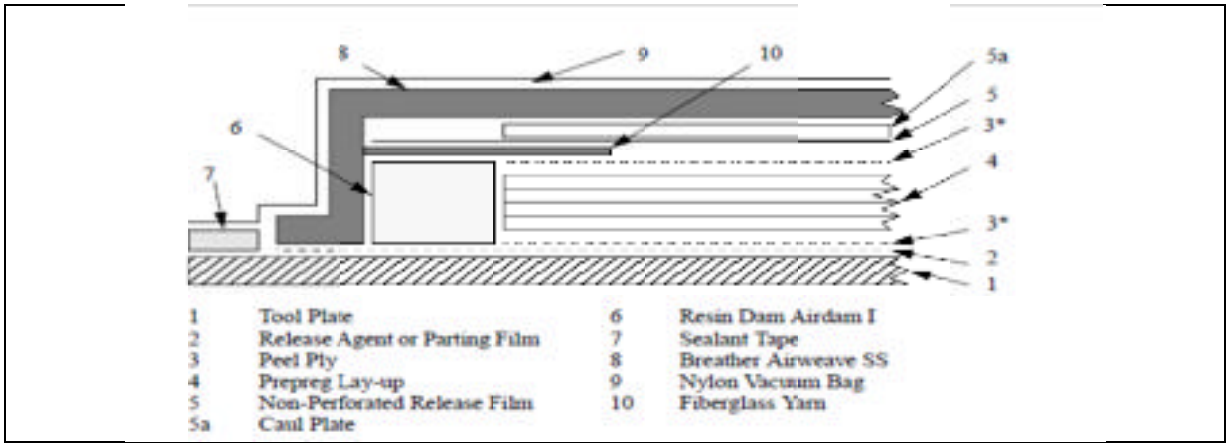
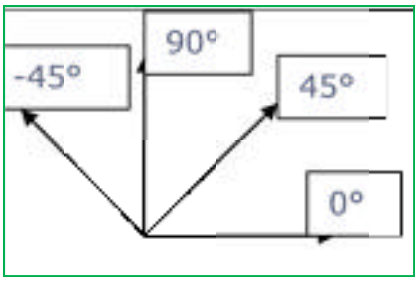


Figure 2.5 Coupe transversale des constituants pour la fabrication de laminés composites
Tirée de BAPS 532-027

La sélection des empilements provient du département de conception mécanique des structures composites et de l'analyse structurale. Trois types de séquence ont été privilégiés afin de répondre aux besoins de détourage pour la cloison de pressurisation et les panneaux de fuselage arrière de l'avion. Les trois séquences sont de type Quasi-isotrope, ce qui veut dire que les déformées dans le plan du laminé sont identiques peu importe l'orientation. Une séquence à 24, 32 et 40 plis fait l'objet de cette recherche. Considérant que l'épaisseur des fibres est d'environ 0.0057 pouce (0.145mm), les épaisseurs à détourer seront donc respectivement égales à 3.48 mm, 4.64mm et 5.8 mm.

Le taux volumique de fibre des laminés est de 56% ±4% avec un pourcentage de vide de 2%. Le Tableau 2.2 illustre la rosette d'orientation pour l'empilement des fibres et les séquences choisies pour l'expérimentation.

Tableau 2.2 Rosette d'orientation et liste du séquencement des fibres pour les laminés testés



	ZONE059	ZONE061	ZONE063
A10	90	90	90
A20	-45	-45	-45
A30	0		
A40	45	45	45
A50	0	0	0
A60	-45		
A70	45	45	45
A80	90		
A90	-45	-45	-45
A100	45		
A110	90	90	
A120	45	45	45
A130	-45	-45	-45
A140	0	0	0
A150	45	45	
A160	-45	-45	-45
A170	0	0	
A180	45	45	45
A190	-45	-45	
A200	90	90	90
A210	90	90	90
A220	-45	-45	
A230	45	45	45
A240	0	0	
A250	-45	-45	-45
A260	45	45	
A270	0	0	0
A280	-45	-45	-45
A290	45	45	45
A300	90	90	
A310	45		
A320	-45	-45	-45
A330	90		
A340	45	45	45
A350	-45		
A360	0	0	0
A370	45	45	45
A380	0		
A390	-45	-45	-45
A400	90	90	90
0°	8	6	4
45°	12	10	8
-45°	12	10	8
90°	8	6	4
Total Ply Count	40	32	24

Les performances mécaniques de la matière première sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau 2.3 Propriétés mécaniques pour les laminés cuits
(Courtoisie de Bombardier Aéronautique)

TABLE 7(A) MECHANICAL PROPERTIES OF CURED UNITAPE LAMINATE

PROPERTY	TEST TEMPERTURE °F (Tolerance: -94 & 73 ± 5 180 ± 10)	REQUIREMENT		TEST METHOD
		MINIMUM AVERAGE	MINIMUM INDIVIDUAL OR RANGE	
Tensile Strength, Ultimate ($x10^3$ psi) Longitudinal (1)	-94	186	142	SRM -4
	+73	255	224	
	+180/Wet	264	243	
Tensile Modulus, ($x10^6$ psi) Longitudinal (1)	-94	-	18.8 – 24	SRM -4
	+73	-	18.6 – 24	
	+180/Wet	-	18.3 - 24	
Tensile Strength, Ultimate ($x10^3$ psi) Transverse	-94	12.0	9.6	SRM -4
	+73	11.6	10.0	
	+180/Wet	6.4	5.6	
Tensile Modulus, ($x10^6$ psi) Transverse	-94	-	1.2 – 1.8	SRM -4
	+73	-	1.0 – 1.5	
	+180/Wet	-	0.7 – 1.4	
Compressive Strength, Ultimate ($x10^3$ psi) Longitudinal (1)	-94	228	216	SRM -1
	+73	207	183	
	+180/Wet	156	132	
Compressive Modulus, ($x10^6$ psi) Longitudinal (1)	-94	-	16.1 – 20.5	SRM -1
	+73	-	16.3 – 20.5	
	+180/Wet	-	17.1 – 21.0	
Compressive Strength, Ultimate ($x10^3$ psi) Transverse	-94	60	55	SRM -1
	+73	35	31	
	+180/Wet	24	23	

PROPERTY	TEST TEMPERTURE °F (Tolerance: -94 & 73 ± 5 180 ± 10)	REQUIREMENT		TEST METHOD
		MINIMUM AVERAGE	MINIMUM INDIVIDUAL OR RANGE	
Compressive Modulus, ($x10^6$ psi) Transverse	-94	-	1.3 – 1.5	SRM -1
	+73	-	0.89 – 1.5	
	+180/Wet	-	0.71 – 1.4	
Short Beam Shear Strength, ($x10^3$ psi) Longitudinal	+73	15.9	15.2	SRM -8
Flexural Strength, Ultimate ($x10^3$ psi) Longitudinal	+73	182	159	ASTM D790
Inplane Shear Strength, Ultimate ($x10^3$ psi)	-94	13.2	11.7	SRM -7
	+73	12.9	11.1	
	+180/Wet	12.5	11.1	
Compression After Impact of 1500 in-lb/in ($x10^3$ psi)	-94	-	23	SRM -2
	+73	-	17	
	+180/Wet	-	12	
Open Hole Tension ($x10^3$ psi)	-94	-	42	SRM -5
	+73	-	44	
	+180/Wet	-	46	
Open Hole Compression ($x10^3$ psi)	-94	-	43	SRM -5
	+73	-	39	
	+180/Wet	-	30	
Bearing Strength ($x10^3$ psi)	-94	-	95	BATS 1451
	+73	-	117	
	+180/Wet	-	74	

1. These properties to be normalized to a cured ply thickness of 5.7 mils.

Les plaques sont par la suite découpées en coupons de 12 pouces par 12 pouces et préparés pour effectuer un serrage sur le gabarit de test tel qu'illustré à la Figure 2.6. La phase initiale de la découpe comporte une étude d'inspection non destructive par ultrason afin d'observer les défauts initiaux. Par la suite, des cavités et des trous de serrage sont effectués afin d'assurer que l'outil entre deux tests ne frotte pas sur une paroi du laminé et les trous de serrage permettent un serrage de grande qualité.

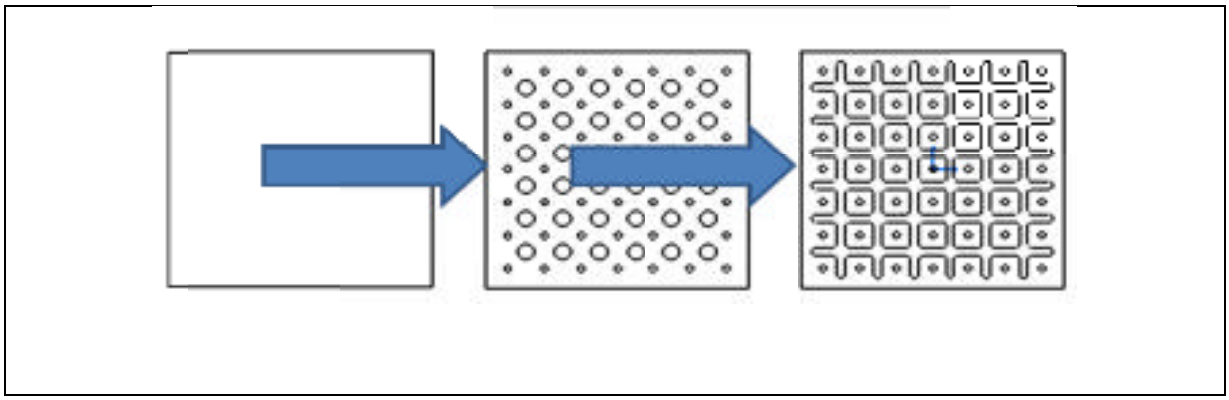


Figure 2.6 Étapes des processus des plaques de tests

2.2.3 Description de l'outillage

L'outillage employé au cours de cette phase de tests provient de fournisseurs présents sur la marché industriel proposant des solutions d'outils dédiés au détourage de laminés composites. Pour la plupart des outils testés, l'industriel et partenaire du projet, a réussi à obtenir des outils. Donc, ce travail s'inscrit dans le cadre d'évaluation technique des solutions proposées à l'industriel. Dans le cadre de ce travail, le nom des fournisseurs est omis. Une appellation anonyme C1, C2, C3 et C4 sera utilisée. Une description de chacun de ces outils est effectuée dans cette section. Les outils sélectionnés possèdent tous une capacité à résister à l'abrasion des fibres de carbone. Selon la littérature, les revêtements de diamant et les plaquettes de diamant poly cristallins sont les plus viables à la fonctionnalité de détourage des laminés composites. Les Figure 2.9 à 2.19 illustrent les outils en question qui font l'objet

de l'expérimentation. Les paramètres géométriques approximés à partir de ces images sont présentés au tableau 2.4 alors que le coût de chacun des outils fait l'objet de la Figure 2.17.

2.2.3.1 Description de l'outil C1

L'outil C1 est un outil en carbure revêtu de diamant formé par dépôt chimique. L'outil possède 8 lèvres de coupe avec des encoches d'évacuation de poussière ou de copeau. Le diamètre nominal de l'outil est de 10 mm. Les figures 2.9 à 2.11 présentent les images qui ont permis d'approximer les paramètres géométriques.

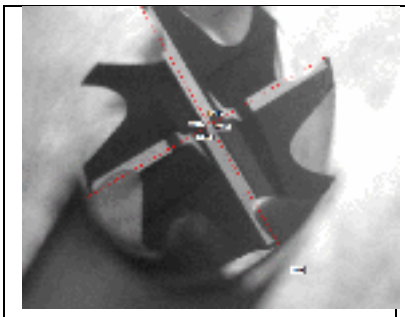


Figure 2.7 Pas de l'outil C1

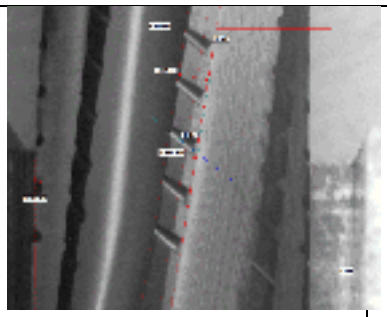


Figure 2.8 Hélice de l'outil C1

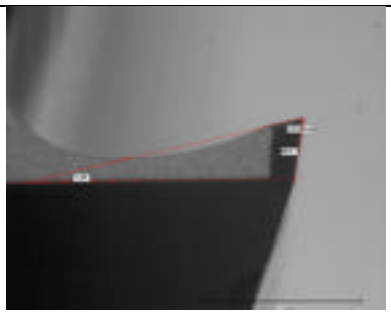


Figure 2.9 Lèvre de coupe de l'outil C1

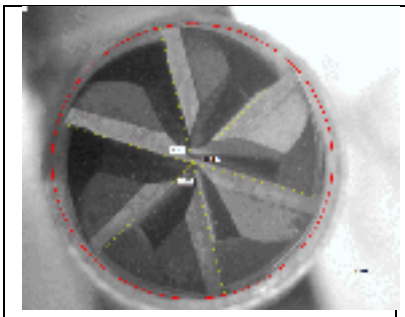


Figure 2.10 Pas de l'outil C2

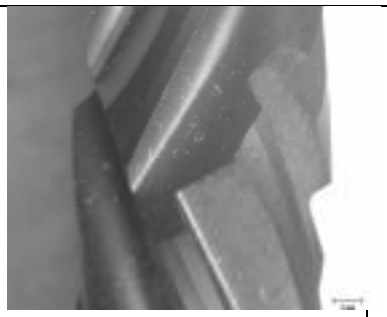


Figure 2.11 Hélices de l'outil C2

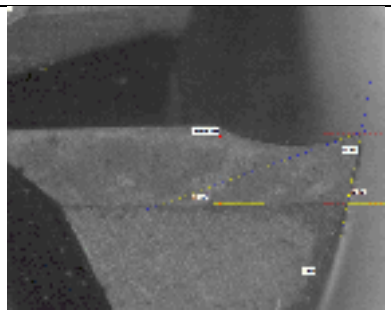


Figure 2.12 Lèvre de coupe de l'outil C2

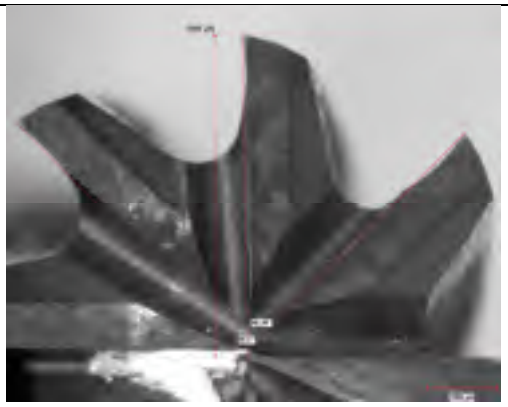


Figure 2.13 Pas de l'outil C3

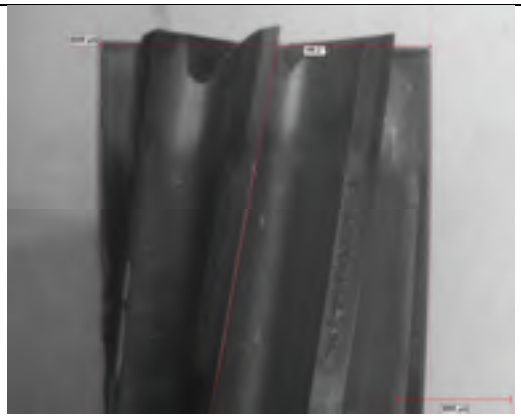


Figure 2.14 Hélice de l'outil C3

Figure 2.15 Hélice de l'outil C4

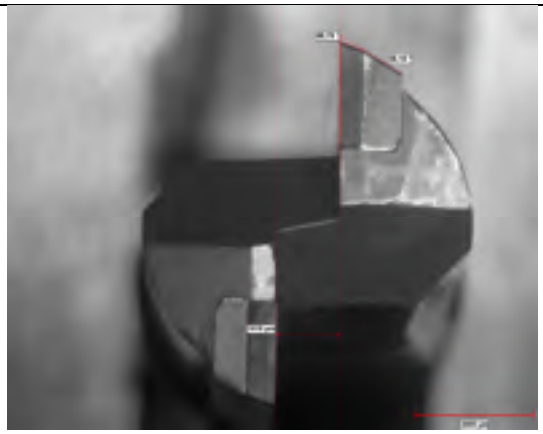


Figure 2.16 Lèvre de coupe de l'outil C4

Tableau 2.4 Résumé des paramètres géométriques de l'outil C1 à C4

Outil	*Diamètre (mm)*	*N dents*	*LOC (mm)*	*Angle d'attaque (degré)*	*Angle de dépouille (degré)*	*Rayon de bec (µm)*	*Angle D'hélice (degré)*	*Plongée dans la matière*	*Matériel et revêtement*
C1	**10**	**8**	**30**	**≈10**	**≈15**	**≈15**	**≈10**	**Oui**	**12µm diamant CVD**
C2	**9.525**	**6**	**25.4**	**≈20**	**≈10**	**≈20**	**≈±30**	**Oui**	**Diamant CVD**
C3	**9.525**	**8**	**25.4**	**≈8**	**≈10**	**≈15**	**≈10**	**Oui**	**Diamant CVD**
C4	**9.525**	**2**	**25.4**	**≈10**	**≈20**	**≈5**	**≈0**	**Oui**	**Diamant PCD**

D'un point de vue vie économique et gestion de la production, il est pertinent d'avoir le prix de l'outil et les délais de livraison. Selon le fournisseur de l'outil C1, le prix pour trois unités ou plus revient à 195$ USD avec un délai d'une à deux semaines de livraison (estimé en date 20 novembre 2010).

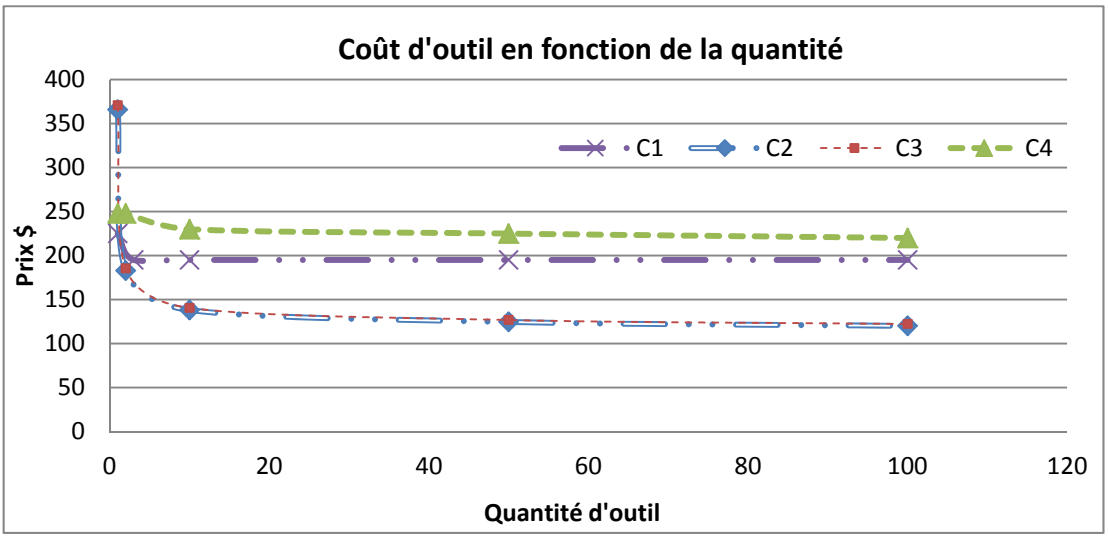


Figure 2.17 Graphique des coûts des outils en fonction de la quantité.
(en date du 20 novembre 2010)

2.2.3.2 Description de l'outil C2

L'outil C2 est un outil de carbure revêtu de diamant par déposition chimique. L'outil possède 6 lèvres de coupe avec une particularité singulière. L'hélice de l'outil est de type chevron permettant, selon le fournisseur, de compresser le laminé en haut et en bas de la pièce. Le diamètre nominal est de .375 pouce (9.525 mm). La Figure 2.10 à la Figure 2.12 présentent des images qui ont permis d'approximer les paramètres géométriques de cet outil. Alors que le tableau 2.4 résume ses paramètres géométriques.

Selon le fournisseur, le coût décroit en fonction de la quantité d'outil demandé (Figure 2.17). Pour une commande de 50 outils, le prix de l'outil revient à 124.58 $ USD avec un délai de une à deux semaines.

2.2.3.3 Description de l'outil C3

L'outil C3 est un outil de carbure revêtu de diamant par déposition chimique. L'outil possède 8 lèvres de coupe sans particularité singulière. Le diamètre nominal est de .375 pouce (9.525

mm). Les Figure 2.13 et la Figure 2.14 présentent des images qui ont permis d'approximer les paramètres géométriques de l'outil.

Selon le fournisseur, le coût décroit en fonction de la quantité d'outil demandé (Figure 2.17). Pour une commande de 50 outils, le prix de l'outil revient à 126.78 $ USD avec une livraison de une à deux semaines.

2.2.3.4 Description de l'outil C4

L'outil C4 est un outil possédant deux lèvres de coupes déportées en diamant poly cristallin. La constitution de ces plaquettes est restée confidentielle tant dans la granulométrie des diamants que dans le pourcentage de liant. Le manchon de l'outil est en carbure et les plaquettes sont brasées sur une face rectifiée du manchon. Les figures suivantes présentent des images qui ont permis d'approximer les paramètres géométriques de l'outil C4 alors que le tableau 2.4 présente les paramètres en question.

Selon le fournisseur, le coût décroit en fonction de la quantité d'outil demandé (Figure 2.17). Pour une commande de 50 outils, le prix de l'outil revient à 225.00 $ USD avec un délai de une à deux semaines.

La section suivante explique le raisonnement qui a mené à la sélection des plages de paramètres de coupe balayés dans le plan d'expérience.

2.2.4 Description et choix des opérations de coupe

Les paramètres de coupe employés dans le cadre de ce plan d'expérience ont fait l'objet d'une sélection basée par les limitations des machines outils employés dans le cadre de cette recherche et de références techniques dans la littérature scientifique. Plusieurs manufacturiers de machine outils ont des limitations de vitesse de broche car leur procédé de lubrification est limité en vitesse de rotation. La machine du partenaire industriel est limitée en vitesse de rotation à 27000 tours par minute alors que le centre d'usinage de l'ÉTS permet une vitesse

de rotation de 28000 tours par minute. En considérant le diamètre de l'outil et la limitation des deux machines, la vitesse de coupe de 800 m/min est atteignable (26734 RPM).

La vitesse de coupe minimale provient de la littérature technique du fournisseur d'outil limitant la vitesse de coupe aux alentours de 200 m/min (6683 Rpm). Les six valeurs des vitesses de coupe et des avances sont présentées au tableau 2.5.

Les avances, dans le cadre de ce plan d'expérience, sont attribuées selon des valeurs obtenues dans la littérature scientifique ainsi que dans la littérature technique de différents fournisseurs d'outils. En raison de la quantité de matière première et du nombre d'outils disponibles pour cette expérimentation, les valeurs maximales ont été réduites à 0.508mm/révolution. Le bris des outils ne devait pas arriver, mais un haut débit d'enlèvement de matière devait être exploré. La vitesse d'avance minimale est de 0.1016 mm/ révolution. Un balayage à 6 niveaux est utilisé dans le programme NC d'exécution du test.

Les modes de coupe d'usinage sont en simultané, à la fois en opposition et en avalant, car les opérations sont des rainures. Donc, l'outil est immergé dans la matière à 180 degrés. La figure 2.18 illustre la particularité du mode de fraisage en avalant (Climbing) et en opposition (Conventionnal). Une analyse particulière sera effectuée sur la qualité de surface des deux modes de coupe.

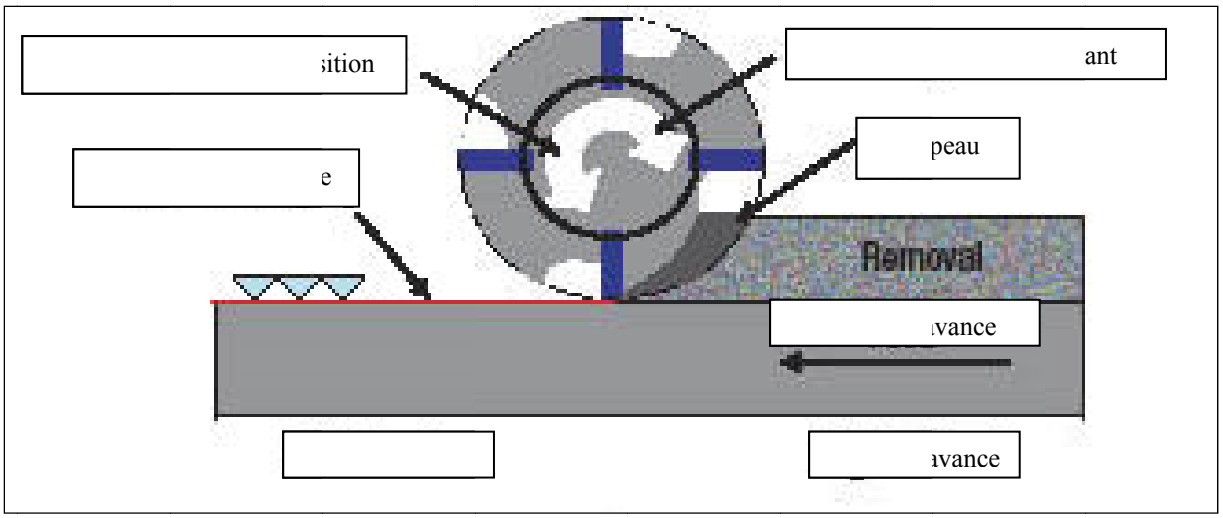


Figure 2.18 Schéma du mode de coupe d'un outil en détourage.
(Courtoisie de MAPAL)

Le tableau qui suit expose un résumé des différents paramètres de coupe du plan d'expérience.

Tableau 2.5 Résumé des paramètres du plan d'expérience

Vitesse de coupe (m/min)	Avance (in/tour)	Laminés (nb plis)	Mode de coupe
200 (6683 rpm)	0.004	24 plis	opposition
300 (10025 rpm)	0.008		
400 (13367 rpm)	0.010	32 plis	
500 (16709 rpm)	0.014		avalant
650 (21721 rpm)	0.016	40 plis	
800 (26734 rpm)	0.020		

2.2.5 Système de Mesures et d'observation visuel

2.2.5.1 Système d'acquisition des forces

Le système d'acquisition de forces est une table dynamométrique provenant de la compagnie KISTLER; le modèle 9255B. Cette table est d'une conception compacte, très robuste avec une plage de force très large dans les deux directions de chacun des axes orthogonaux. La table est spécifiquement conçue pour une utilisation sous chargement dynamique ou quasi-statique dans le cadre d'opérations d'usinage.

Le tableau suivant résume les plages d'acquisition des efforts dans les trois axes de coupe alors que les spécifications techniques complètes de la table sont fournies à l' ANNEXE I.

Tableau 2.6 Résumé des plages d'amplitude de force de la table KISTLER 9255B

KISTLER 9255B		
Forces	Min	Max
Fx	-20 kN	20 kN
Fy	-20 kN	20 kN
Fz	-10 kN	40 kN

Dans le cadre de cette expérimentation, une plaque d'interface a été conçue afin de lier mécaniquement la face supérieure de la table dynamométrique et le laminé de façon rigide et constante. Le dessin de détail de la plaque est présenté à la Figure 2.19.

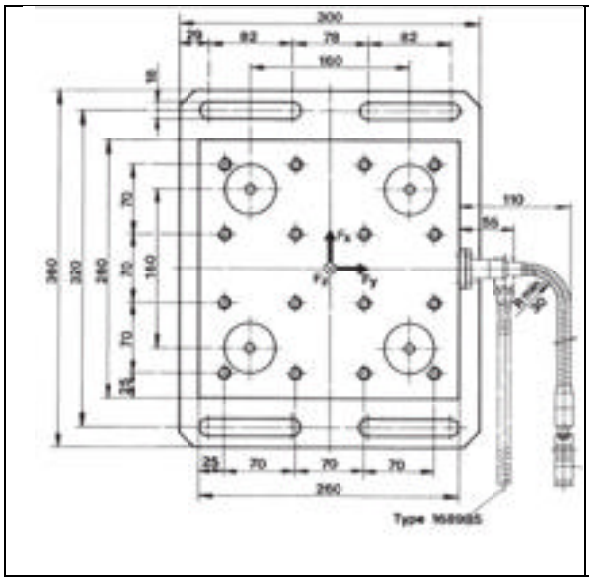


Figure 2.19 Détail des dimensions de la table dynamométrique

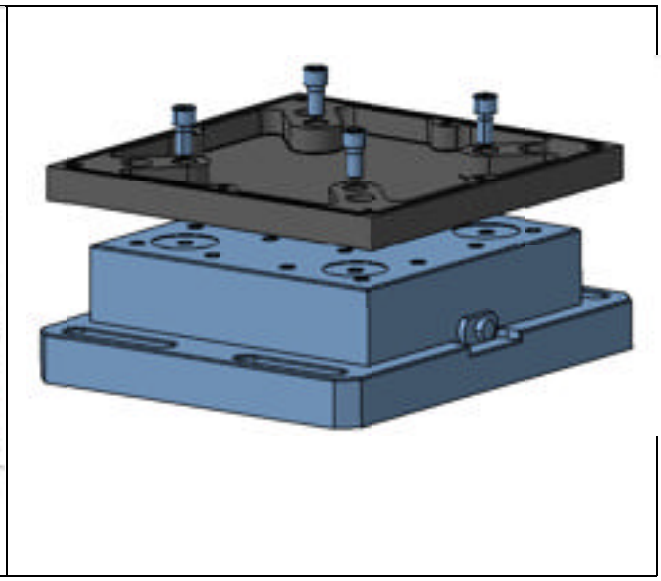


Figure 2.20 Vue isométrique de l'assemblage table dynamométrique plaque-gabarit d'interface

À l'aide du logiciel MATLAB et des fonctions préalablement développées par le laboratoire de recherche, le traitement des données peut s'effectuer assez rapidement. Le taux d'acquisition des données est limité à 48000 Hz pour une durée de 8 à 16 secondes. L'opérateur doit lui-même initialisé les séquences de démarrage du logiciel d'acquisition, par l'ouverture du modèle intégré au logiciel MATLAB. Ce module fut développé pour les besoins spécifiques du laboratoire de recherche.

2.2.5.2 Système de mesure de la rugosité

La rugosité est un paramètre essentiel dans la définition de la qualité de surface. Les moyens industriels largement employés pour la quantifier sont d'utiliser des rugosimètres ou des comparateurs optiques. Dans le cadre de cette recherche, l'utilisation d'un rugosimètre MITUTOYO SJ-400 permet d'observer et de quantifier les états de surface d'un échantillon d'un matériau solide.

Tableau 2.7 Paramètres d'utilisation du profilomètre Mitutoyo SJ-400

Paramètres du profilomètres	
Longueur d'échantillonnage	15 mm
échantillons par mesure	5 échantillons
Valeur de Cutoff (filtre)	0.8 mm (0.5 ≤Ra>2)
Critères de sortie	Ra, Rt, Rz, Rq, Rv (µm)
Profil d'évaluation	Oui (12000 points)

Figure 2.21 Système du profilomètre Mitutoyo SJ-400
(Mitutoyo, 2000)

Cette technologie par contact, utilise un pointeur aiguille (stylet) de 2µm avec une pointe de 60 degrés (Mitutoyo, 2000) présenté à la Figure 2.21 La calibration de cet instrument se fait à l'aide d'une plaque de calibration. La norme utilisée dans le cadre de ces expérimentations est ASME B46-1(Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay).

Deux directions de mesure seront effectués afin d'obtenir une corrélation entre les paramètres de coupe et la rugosité des surfaces. La première est la direction transverse et l'autre longitudinale par rapport à la face finie. Les critères de rugosité mesurés seront la rugosité

arithmétique Ra et la rugosité Rt représentant la valeur maximale entre le creux et la saillie sur le profil d'évaluation de la surface. Le lecteur est invité à prendre connaissance de la norme ASME B46-1 afin d'obtenir plus d'information.

La valeur du filtre Cutoff est aussi basée aussi sur la norme ASME B46-1, qui spécifie que dans une plage de critère de Ra entre 0.5 et 2 µm un filtre Cutoff (λc) doit être de 0.8mm. Plus le cutoff est petit, moins l'effet de l'ondulation se fait sentir, donc on tend vers une rugosité arithmétique de 0. La figure suivante illustre bien l'effet du filtre Cutoff sur le profil d'évaluation.

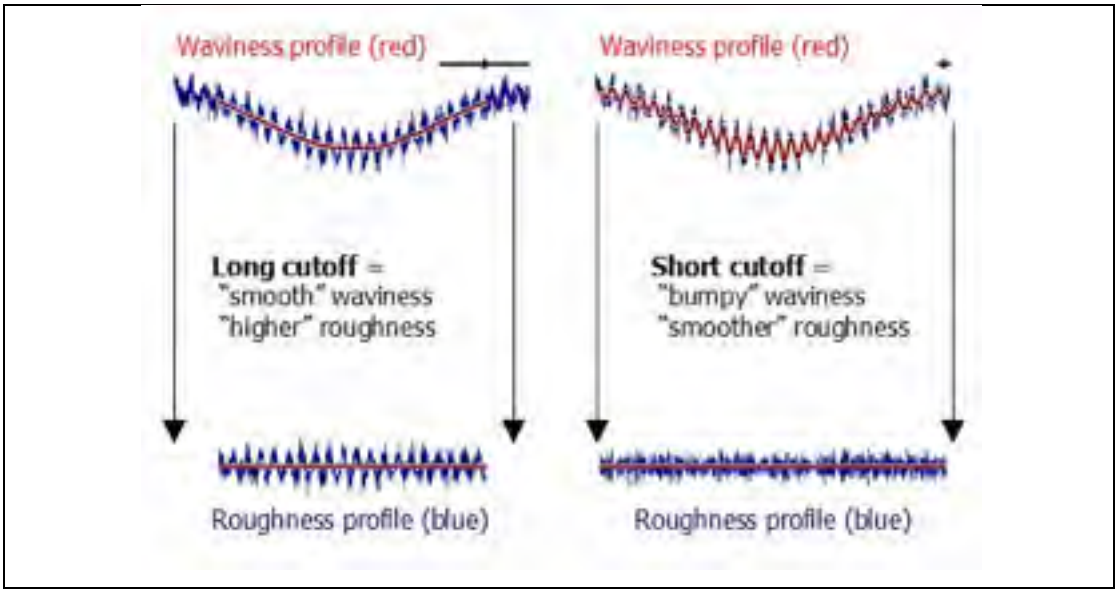


Figure 2.22 Illustration de l'impact d'un cutoff large et petit
(courtoisie de http://www.digitalmetrology.com)

La vitesse de déplacement du stylet sur la surface a été fixée à 1mm/s car aucun impact n'a été observé. Le temps de traitement d'une mesure peut varier de 35 à 45 secondes. Afin de pouvoir se déplacer de façon précise sur la surface, une table micrométrique est installée sur le marbre du profilomètre. Avec cet appareil, il est possible de mesurer la rugosité pli par pli dans le sens longitudinal de la surface coupée. La figure suivante illustre une vue isométrique de la table micrométrique utilisée lors de l'expérimentation.

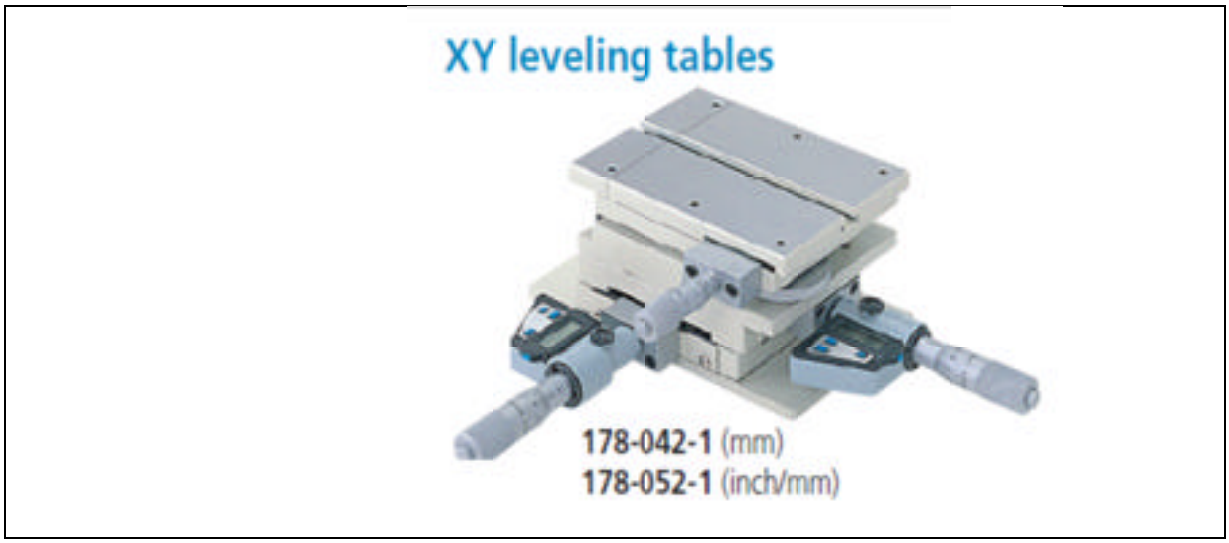


Figure 2.23 Table de positionnement micrométrique pour mesure de rugosité
(Tirée de Mitutoyo, 2000)

Une autre méthode axée sur l'évaluation viso-tactile de la surface peut être réalisée à l'aide de plaquette échantillon similaire à la figure suivante :

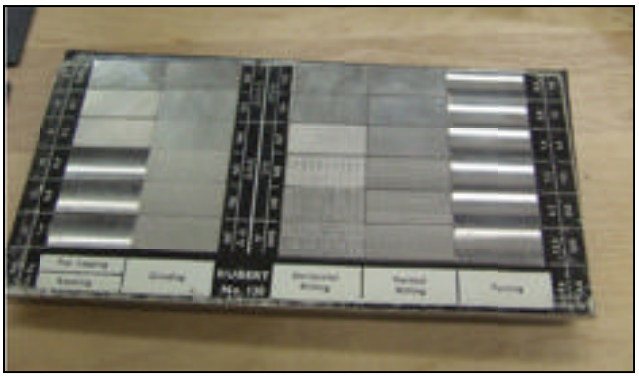


Figure 2.24 Plaquette d'échantillons viso-tactile

À l'aide de cet outil, des valeurs de rugosité arithmétique peuvent être facilement quantifiées par rapport aux méthodes de fabrication. Une des lacunes de ces plaquettes, c'est que les échantillons sont de matériaux métalliques et non des matériaux composites. Pour fin de comparaison, il est possible de quantifier tous les échantillons dans un laps de temps assez

court avec une certaine fiabilité. La séquence d'attribution du critère d'état de surface est la suivante :

1) évaluation tactile des échantillons références;
2) évaluation tactile de l'échantillon coupé;
3) raffinement des plaquettes référence (2 plaquettes de référence sur 6);
4) évaluation tactile de l'échantillon coupé;
5) attribution d'une valeur Ra.

D'un point de vue efficacité de production, la méthode viso-tactile est beaucoup plus rapide que l'évaluation de la rugosité à l'aide d'un profilomètre, cependant le résultat demeure qualitatif. En plus de l'état de surface, le délaminage des couches externes des laminés sont des signes d'une piètre qualité de coupe. La sous-section suivante explique les différents critères d'observation du délaminage.

2.2.5.3 Observation de la délamination

L'observation du délaminage, dans le cadre de ce travail, est fait à l'aide d'un microscope optique et ou d'une loupe. Un des critères dans l'évaluation d'un outil, est que cet outil ne doit pas causer de délaminage aux fibres externes. Une des méthodes les plus simples et efficace est l'emploi d'une loupe de bijoutier d'un grossissement de 10X. L'outil et ses paramètres ne doivent en aucun cas générer de délaminage. Une étude plus approfondie, avec des méthodes d'analyse par essais non destructifs, peut aussi quantifier le délaminage inter laminaire. Dans le cadre de ce travail, seul l'inspection visuelle sera utilisée. Une réponse affirmative ou négative sera utilisée.

2.2.6 Acquisition sonore et visuelle des coupes pour l'identification des zones de stabilités dynamique.

Lors des essais de coupe, une caméra est fixée sur la table de la machine afin de sauvegarder les images et le son pour tous les essais de coupe du plan d'expérience. L'objectif de ce

montage est de pouvoir quantifier de manière auditive la qualité de la coupe et en déduire la stabilité. L'auteur du présent ouvrage se base sur son expérience de machiniste et l'observation visuelle afin d'établir le critère de stabilité. L'instrument audio-visuel utilisé est une caméra portative Fujifilm FinePix s5200 similaire à la Figure 2.25 .

Le positionnement de l'appareil se fait toujours du même côté de la table de force avec une variation de positionnement d'environ ± 25 mm. À l'aide de ces vidéos, un autre étudiant pourra approfondir l'analyse. L'objectif est de définir de manière simple et efficace la plage de stabilité pour les quatre technologies d'outils testés.

Figure 2.25 Appareil photo/caméra numérique Fujifilm FinePix S5200

2.2.7 Déroulement du programme machine et nomenclature des échantillons

Le déroulement de l'exécution des trajectoires d'outils se fait dans l'ordre croissant des vitesses de coupe. Les plaques échantillons sont fixées solidement sur le gabarit et par la suite l'exécution du programme est lancée. Chaque rangée possède 6 échantillons afin de balayer les 6 vitesses d'avance dans la même direction de coupe. À la fin de cette rangée, l'outil effectue un retrait axial en avance rapide ainsi qu'un déplacement à la nouvelle position d'entrée de la rangé adjacente la vitesse de coupe supérieure suivante. La vitesse d'avance est alors réinitialisée à la première vitesse d'avance.

La Figure 2.26 illustre le quadrillage effectué par le premier outil sur une des plaques d'échantillons. Les déplacements représentés par les flèches bleues se font à vitesse d'usinage alors que les flèches rouges représentent les déplacements au plan de retrait d'outil avec une vitesse rapide.

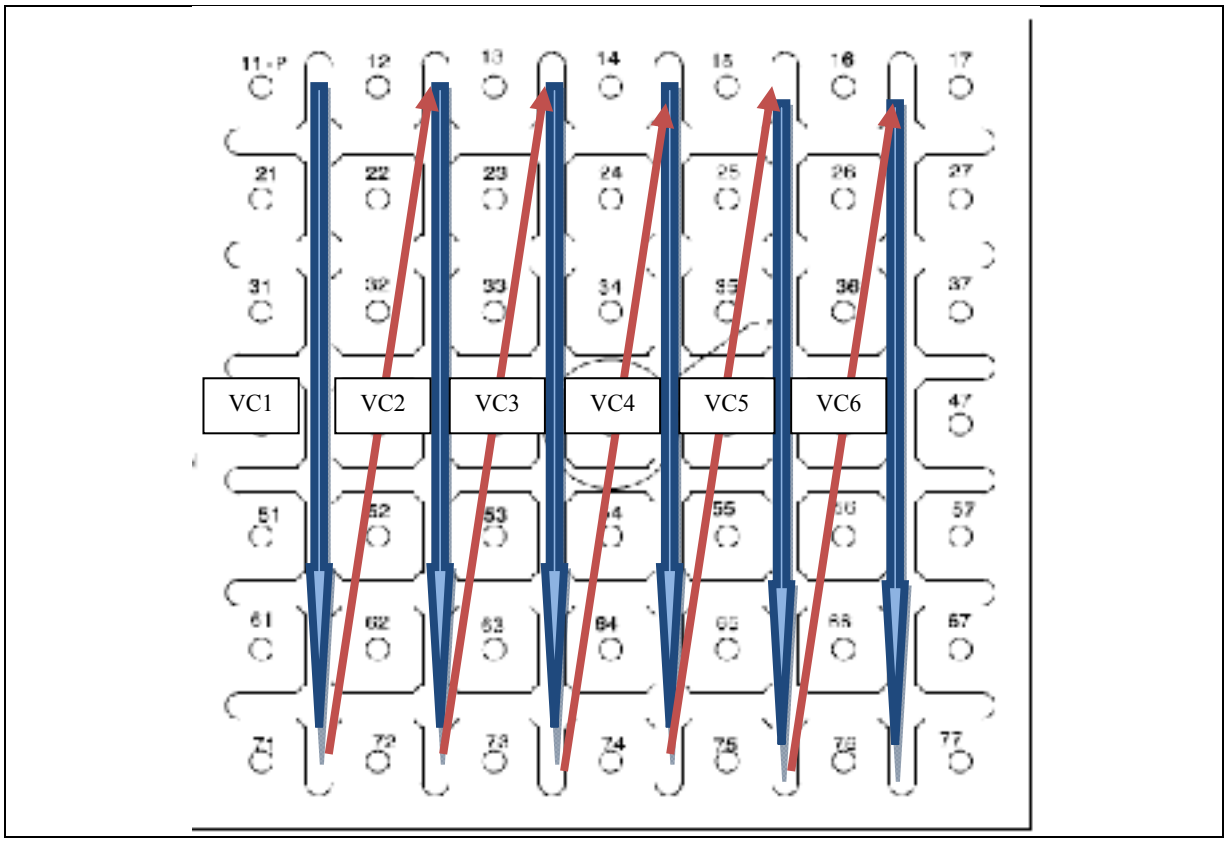


Figure 2.26 Déroulement d'usinage de l'expérimentation dans la direction des Y négatif Machine

Une zone circulaire, préalablement machinée, représente une zone transition pour assurer une sortie d'outil de la matière afin d'effectuer un arrêt sans contact avec un des flancs de la matière. À la fin de la demi-séquence, un changement d'outil est effectué afin d'insérer un nouvel outil pour lancer la seconde phase à 90 degrés de rotation en sens horaire. Dans la première phase du plan d'expérience, les efforts de coupe dans le sens de l'avance sont caractérisés par la direction Y négative. Dans la seconde phase, les efforts de coupe dans la direction de l'avance sont dans la direction X négative selon le référentiel machine.

La nomenclature des échantillons coupés est basée sur un chiffrier matriciel. La figure qui suit illustre la nomenclature d'un échantillon.

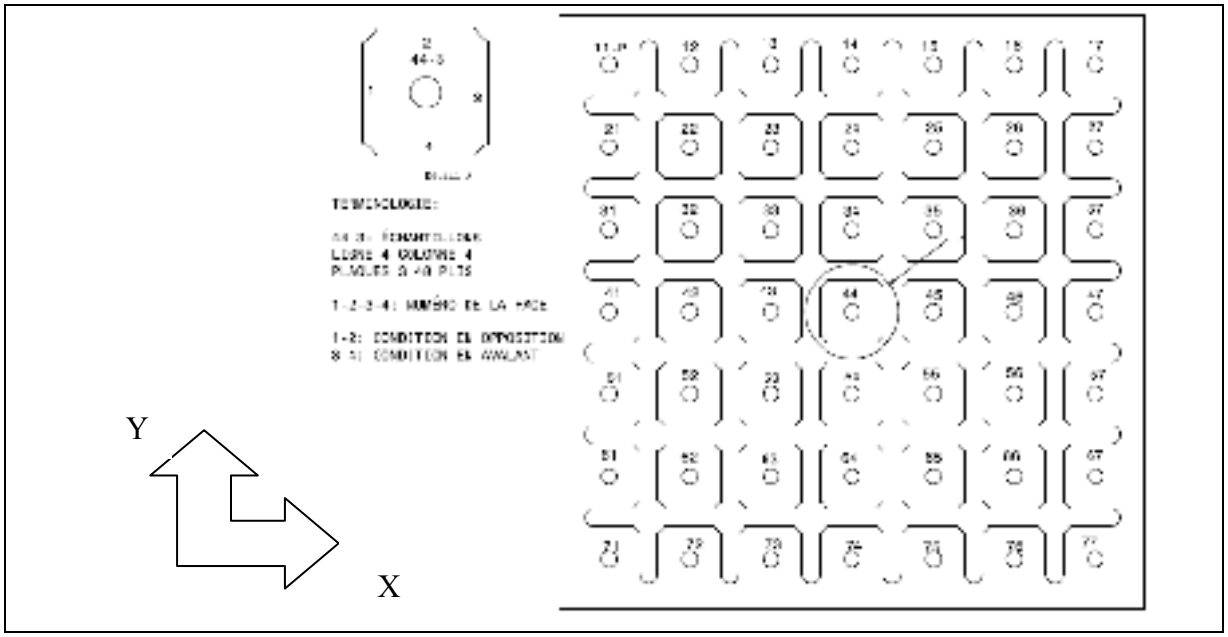


Figure 2.27 Dessin explicatif de la nomenclature des échantillons archivés

L'échantillon 443 représente la position de l'échantillon à l'intérieur de la plaque. Le numéro 44 correspond à la position de la ligne 4 à la colonne 4 et le 3 représente l'épaisseur de la plaque par son numéro, donc la plaque 3 est constituée de 48 plis. Cette position indique aussi les paramètres de coupe qui ont été utilisés pour créer ces faces. Sur les faces de l'échantillon on retrouve un index numérique de 1 à 4, initialisé à gauche avec une incrémentation en sens horaire des faces. Cet index informe le chercheur sur le mode de coupe employé dans la génération de cette face. Par exemple, la face 443-1, représente un test à une vitesse de coupe 3 (400m/min) à la vitesse d'avance 3 (0.01in/rev ou 0.254mm/rev) sur un laminé de 48 plis(épaisseur 3). Le sens de coupe est en opposition. Sur le sac d'archivage de l'échantillon on retrouvera la nomenclature C1-C2 représentant les outils utilisés pour générer les faces de l'échantillon, où C1 est utilisé dans la première phase de la découpe (avance Y négatif) et C2 utilisé dans la deuxième phase (avance X négatif). Des cartables numérotés sont dédiés à l'archivage de tous les échantillons coupés.

2.2.8 Effet du plan d'expérimentation pour le détourage des laminés carbone/époxy.

Afin de s'assurer que l'usure n'affecte pas considérablement les résultats, un programme inverse est programmé. Au lieu d'effectuer le balayage des vitesses de coupe de VC1 vers VC6, Ce programme parcourt les vitesses de coupe de la valeur la plus élevée vers la plus basse. Une comparaison sera alors effectuée. Les outils C1 et C3 sont utilisés dans ce test car une limitation de matière première est à l'origine de ce choix.

2.3 Méthodologie d'expérimentation pour l'évaluation de l'influence des paramètres géométriques des outils de coupe sur le détourage des laminés composites

2.3.1 Plan d'expérience pour évaluer l'influence des paramètres géométriques des outils de coupe sur le détourage des laminés composites.

Dans le cadre de cette recherche, l'auteur est jumelé à un partenaire industriel dont sa spécialisation est la création et la fabrication d'outils de coupe. L'objectif de ce travail est d'obtenir des réponses sur l'impact des paramètres géométriques d'un outil de coupe sur la coupe des composites.

Afin d'évaluer l'influence de la géométrie d'outil sur la coupe, un plan d'expérience par criblage est conçu. Les facteurs géométriques évalués sont l'angle d'attaque de l'arête tranchante et l'angle d'hélice de l'outil de coupe. Selon la littérature technique, scientifique et l'observation des outils existants, l'angle d'attaque doit être positif afin d'obtenir les meilleurs résultats. Les facteurs variés dans le cadre de ce plan d'expérience sont :

- l'angle d'attaque (degré) (4 niveaux de type numérique);
- l'angle d'hélice (degré) (3 niveaux de type numérique);
- la vitesse de coupe (m/min) (2 niveaux de type numérique);
- la vitesse d'avance (mm/rev) (2 niveaux de type numérique).

Une section de ce chapitre portera exclusivement sur les paramètres géométriques des outils de coupe et une autre section sur le choix des paramètres de coupes telles les vitesses de coupe ainsi que les vitesses d'avance.

Les réponses observées dans ce plan d'expérimentation sont :

- les forces d'avance (N);
- les forces axiales (N);
- la qualité globale de l'état de surface.

Dans la cadre de ces tests de coupe, 12 géométries différentes doivent être conçues et fabriquées en 4 exemplaires. Chaque test de coupe est répété à deux reprises afin de maximiser les résultats avec la matière première disponible. 96 tests de coupe seront donc effectués.

L'objectif final de ce plan de recherche est d'être apte à concevoir un outil de coupe afin de proposer une solution technique au détourage et permettre au partenaire industriel de fournir un produit aux autres partenaires du projet de recherche CRIAQ Manu 413.

2.3.2 Description de l'outillage et des échantillons

2.3.2.1 Outillage de coupe

Une série d'outil de coupe de diamètre nominal de 9.525 mm (3/8 pouce), possédant une longueur de coupe de 20 mm, deux lèvres de coupe en carbure solide de type K 44 UF à 12% de Cobalt ont été spécialement fabriqués pour ce plan d'expérience. Vous retrouverez en ANNEXE II les spécifications techniques du carbure utilisé. L'angle d'attaque de l'outil de coupe varie de 0 à 15 degrés par incrément de 5 degrés avec un intervalle de tolérance de 1 degré. L'angle de dépouille primaire pour tous les outils est fixé à 12 degrés et l'angle de

dépouille secondaire est fixé à 25 degrés, les deux angles ont un intervalle de tolérance fixé à 2 degrés balancé au nominal.

La longueur totale des outils est fixée à 3 pouces (75 mm). La figure qui suit illustre le dessin de détail de l'outil générique ayant servi à la fabrication de chacun des outils avec paramètres d'angles variables.

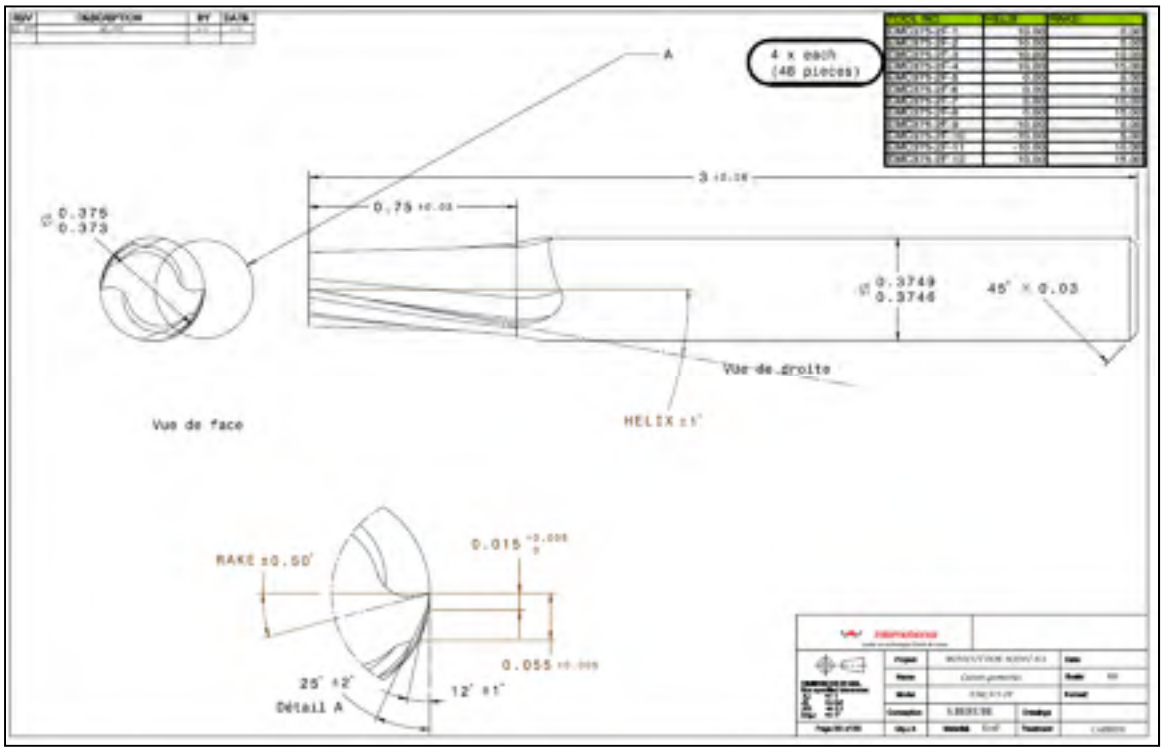


Figure 2.28 Dessin de détail générique de l'outillage de tests

La fabrication des outils s'est fait sur un poste numérique de rectification ANCA. Deux montages machine sont nécessaires à la fabrication de chaque outil. La figure suivante montre les 48 outils fabriqués et prêts au contrôle de la qualité.

Les échantillons utilisés dans ce test correspondent au laminé de 32 plis de fibres de carbone pré-imprégné de résine époxyde utilisé dans le plan d'expérience décrit à la section précédente. Les largeurs des plaques échantillons sont de 138 mm, provenant de la découpe

à la meule au diamant d'une plaque de 12 pouces par 12 pouces en trois plaques de largueur identique afin de maximiser le nombre de tests avec la matière disponible. La figure suivante illustre les dimensions de la plaque avant la coupe.

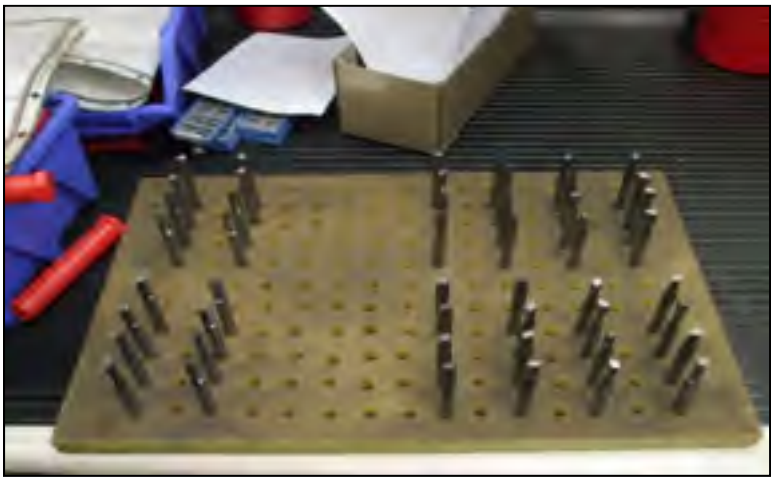


Figure 2.29 Résultat des outils machinés

Le contrôle de la qualité est fait à l'aide d'une machine optique utilisant le réflexion ou la projection de la section de l'outil afin de quantifier les angles de l'outil. La figure suivante expose le contrôle d'un outil possédant un angle d'attaque de 15 degrés.

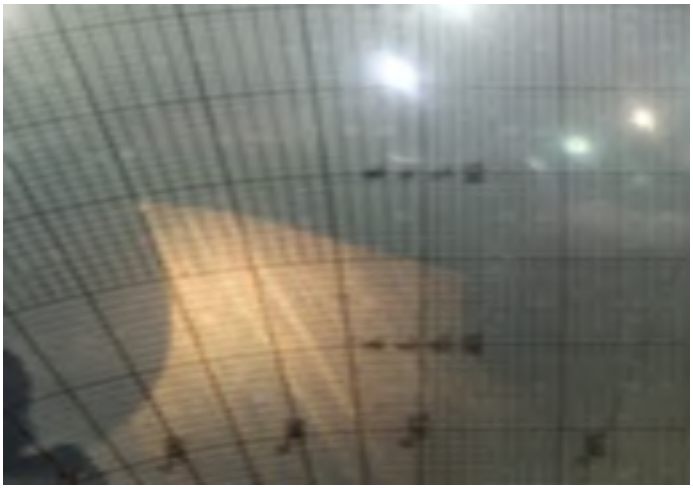


Figure 2.30 Projection de contrôle de la qualité d'une arrête tranchante de l'outil

Selon les résultats obtenus du contrôle de la qualité, l'intervalle de tolérance des angles d'attaque est de 1 degré. Le rayon de tranchant de ces outils n'a pas pu être évalué à l'aide des instruments employés. Cependant, tous les outils ont été fabriqués par le même opérateur utilisant la même meule et la même machine, en appliquant les compensations d'usure au fur et à mesure de la fabrication. Nous faisons donc l'hypothèse que tous les outils ont le même rayon tranchant.

2.3.2.2 Outillage de montage et de serrage

L'outillage de montage et de serrage est un gabarit fait sur mesure pour les tests de coupe de ce plan d'expérience. L'utilisation de cinq leviers de serrage par pression permet le serrage de la plaque échantillon et de l'échantillon coupé. Une base en aluminium avec une rainure de passage des outils sert d'appui pour la plaque échantillon.

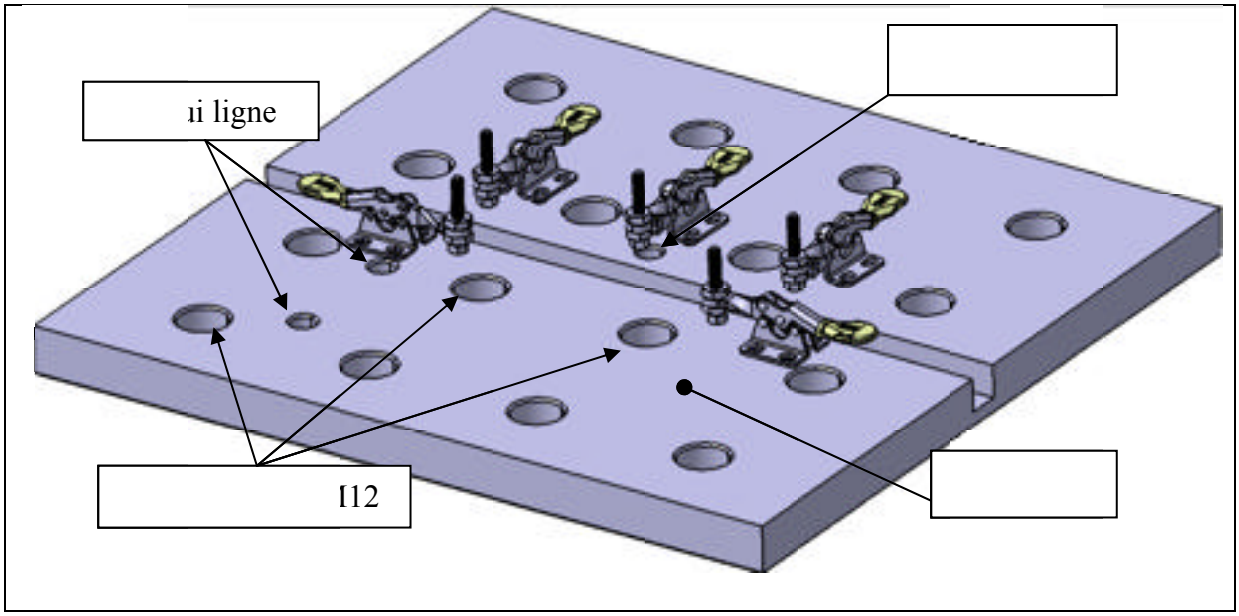


Figure 2.31 Gabarit expérimental de coupe

L'isostatisme du montage est un appui plan sur la face de la base d'aluminium, un appui ligne par deux goupilles et une buté de positionnement par une dernière goupille. La base est fixée et maintenue sur la table dynamométrique par 16 vis de serrage M12. Les leviers de

fixation possèdent une force de serrage de 60 livres force (266 Newtons). Vous retrouverez en ANNEXE III les spécifications techniques de ces leviers de serrage.

2.3.3 Description et choix des opérations de coupe

L'opération de coupe de ce plan d'expérience est d'effectuer une multitude de rainures. Ces rainures sont toutes effectuées selon la même direction, soit la direction X négative du système de coordonnées de la machine outil. Le choix de cette direction n'est que d'un point de vue ergonomique afin de faciliter la manipulation de l'outillage et des câbles des systèmes de mesure. De plus, il est plus facile de positionner le montage dans cette direction avec la porte de grande dimension de la machine. Chaque outil de coupe possédant une géométrie particulière effectue deux coupes. Ces coupes se font à deux niveaux différents, avec un décalage axial de 0.02 pouce de l'épaisseur du laminé, afin de certifier une coupe sur une portion de l'arête tranchante neuve.

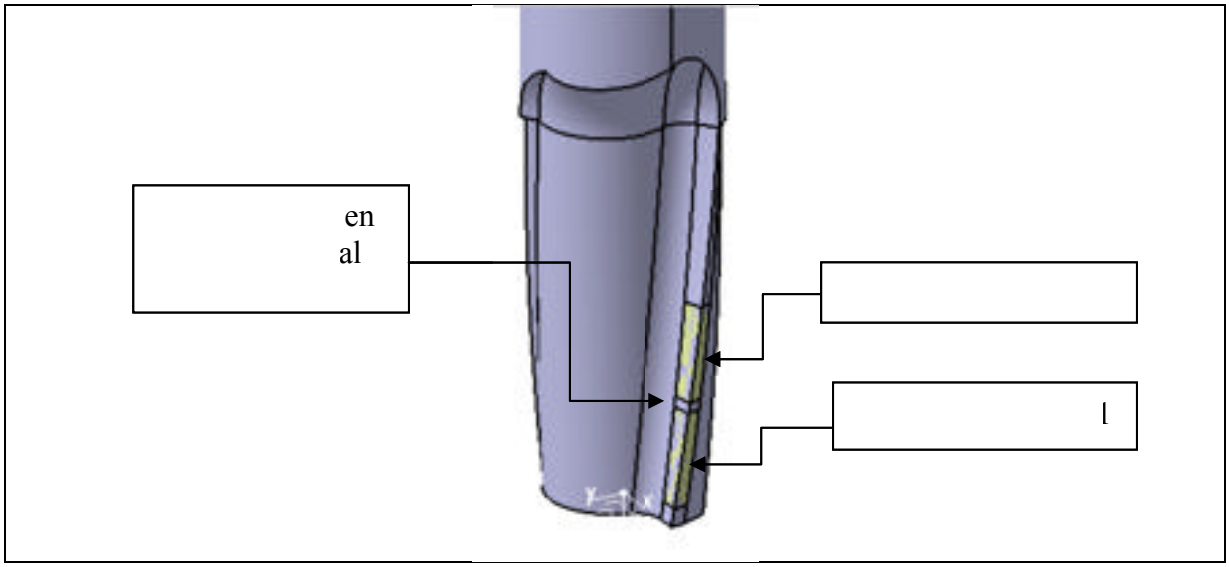


Figure 2.32 Identification des zones de l'outil utilisé lors de la coupe

Les vitesses de coupe utilisées dans le cadre de ce plan d'expérience ont été fixées à des valeurs assez basses, car selon la littérature technique et scientifique, les carbures non revêtus

s'usent très rapidement à grande vitesse de coupe en plus de certifier une dynamique de coupe stable.

Les deux vitesses de coupe utilisées sont :

- 75 m/min (2506 RPM);
- 150 m/min (5012 RPM).

Les vitesses d'avance utilisées dans ce travail sont :

- 0.0508 mm/tour (0.002in/tour);
- 0.1016 mm/tour (0.004 in/tour).

La sélection de ces vitesses d'avance a été justifiée par la consultation d'ouvrages scientifiques et techniques sur la coupe des matériaux composites. Plusieurs fournisseurs n'osent pas se compromettre sur l'attribution de paramètres de coupe. Il est généralement reconnu qu'une basse vitesse de rotation jumelée à une basse vitesse d'avance assure une stabilité dynamique de la coupe. Ainsi, lorsque la coupe s'effectue dans une zone de stabilité, les efforts de coupe mesurés sont directement liés au phénomène de coupe sans bruit de signal externe. L'objectif de ce plan d'expérience est d'établir un lien entre la géométrie de l'outil de coupe et le phénomène de coupe, tant par les forces que par la qualité globale de la surface coupée.

2.3.4 Systèmes de mesure.

Dans le cadre de cette expérimentation, les réponses observées sont principalement les efforts de coupe dans la direction d'avance et les efforts dans la direction axiale de l'outil. Le système de mesure est la table dynamométrique KISTLER présentée à la section Système d'acquisition des forces de ce document. La réponse reliant la qualité de surface est typiquement d'ordre visuel. L'observation porte sur les marques d'outil ainsi que sur les

longueurs de fibres non coupées. Un pied à coulisse 0-8 pouces Mitutoyo à affichage électronique de modèle 500-163-20 a servi pour effectuer ces mesures. Deux mesures sont prises sur l'échantillon. Une mesure longitudinale indiquant le départ des fibres non coupées aux plis externes du laminé et une autre mesure transversale afin de quantifier la longueur des fibres non coupées.

CHAPITRE 3

TRAITEMENT DES RÉSULTATS

3.1 Performance des outils de coupe

Ce chapitre traitera des efforts de coupe générés par les différents outils de coupe testés ainsi que sur la qualité de la surface générée par ces coupes. Une plage opérationnelle des paramètres de coupe sera définit pour chacun des outils. De ces plages opératoires, une comparaison des outils sera effectuée par l'équation de l'indice de performance traité dans le prochain chapitre.

3.1.1 Forces

Les forces mesurées, dans le cadre de cette recherche, sont présentées par outil et dans les trois directions de coupe. Les signaux des efforts de coupe sont globalement enregistrés et par la suite tronqués en segments de 2 ou 4 rotations afin d'évaluer la force moyenne selon les trois axes de la table dynamométrique. Les figures suivantes illustrent le prétraitement des signaux de forces. Il est plus difficile de distinguer le passage de dents avec un outil ayant un nombre de dents supérieur à 3 car la fréquence de passage de la dent de l'outil correspond souvent à un multiple de la fréquence d'échantillonnage des efforts de coupe. Pour les outils possédant plus de trois dents, à vitesses de coupe élevée, les signaux sont brouillés en raison de l'entrée dans la plage de fréquence naturelle de la table d'acquisition de forces (voir ANNEXE I).

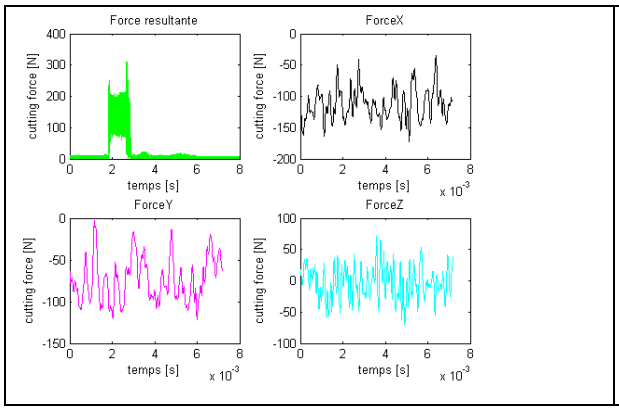


Figure 3.1 Signaux des efforts de coupe de 2 rotations d'un outil à huit dents

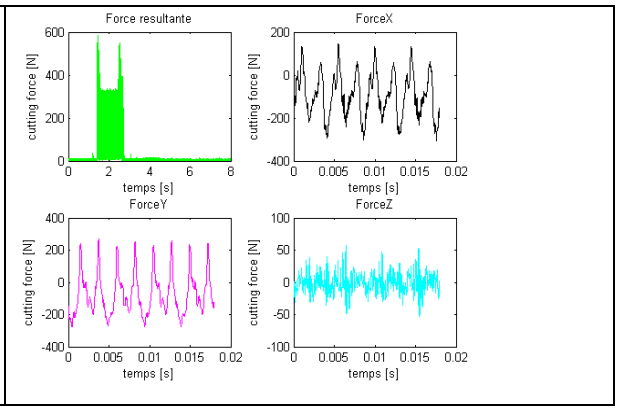


Figure 3.2 Signaux des efforts de coupe de 4 rotations d'un outil à deux dents

3.1.1.1 Forces de coupe pour l'outil C1

Pour l'outil C1, les graphiques suivants (Figure 3.6 à la Figure 3.8) illustrent la progression des efforts de coupe dans un laminé de 24 plis à de multiples avances et selon plusieurs vitesses de coupe. Les graphiques illustrent que l'amplitude des efforts de coupe reste sensiblement la même pour une même avance avec une vitesse de coupe variable. Les Figure 3.9 à la Figure 3.14 présentent la progression des efforts de coupe pour les laminés de 32 et 40 plis respectivement.

Les efforts axiaux pour les trois laminés différents présentent des progressions d'évolution de la force moyenne ne suivant pas l'augmentation de la vitesse d'avance, contrairement aux graphiques d'efforts de coupe dans la direction d'avance ou normale à la surface coupée. Les efforts normaux de coupe semblent varier légèrement en fonction de la vitesse de coupe comparativement aux efforts de coupe dans la direction d'avance.

La Figure 3.3 à la Figure 3.5 illustre le vecteur des efforts de coupe dans la direction de l'avance, la direction normale à la surface coupé et les efforts axiaux.

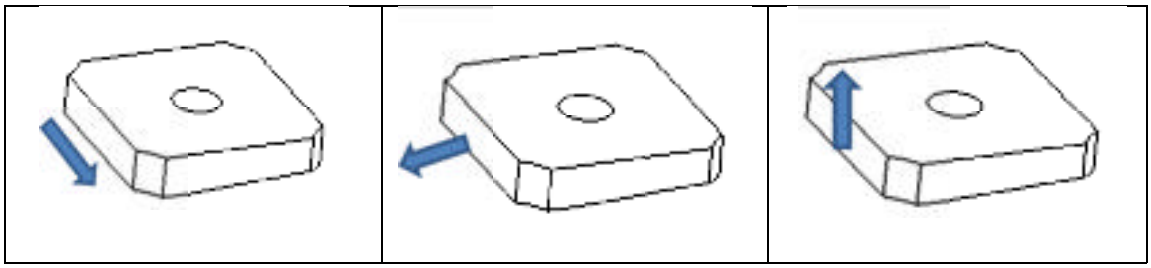


Figure 3.3 Schéma de la direction des forces d'avance

Figure 3.4 Schéma de la direction des forces normales

Figure 3.5 Schéma de la direction des forces axiales

Les figures suivantes exposent les efforts moyens dans les trois directions vectorielles de l'avance, de la normale à la surface coupée et la direction axiale.

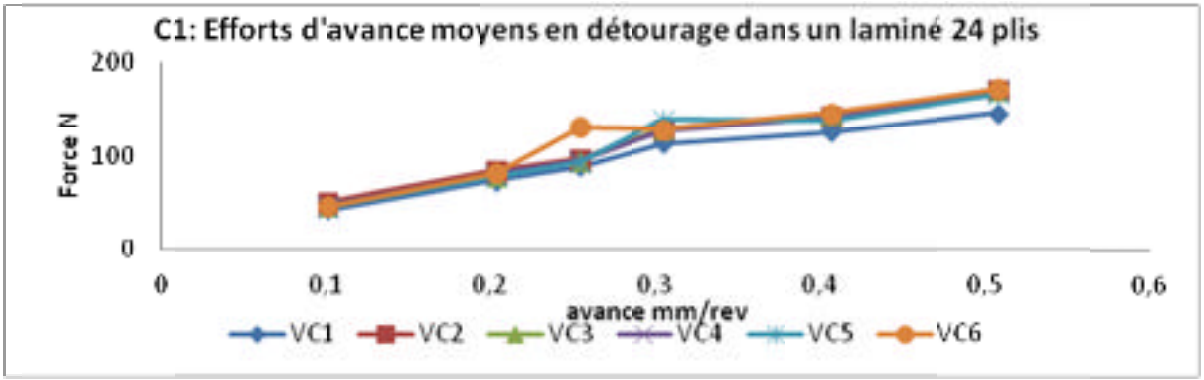


Figure 3.6 Graphique des efforts d'avances de l'outil C1 dans un laminé 24 plis

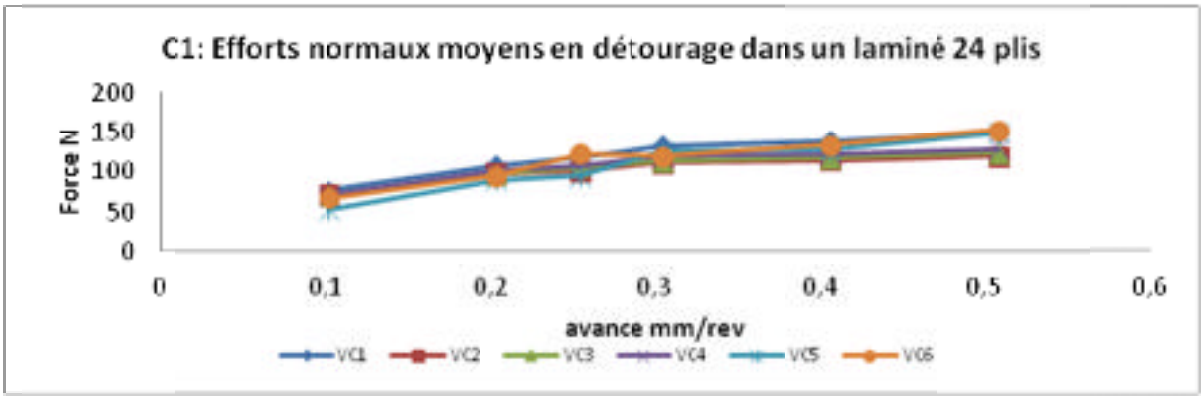


Figure 3.7 Graphique des efforts normaux de l'outil C1 dans un laminé 24 plis

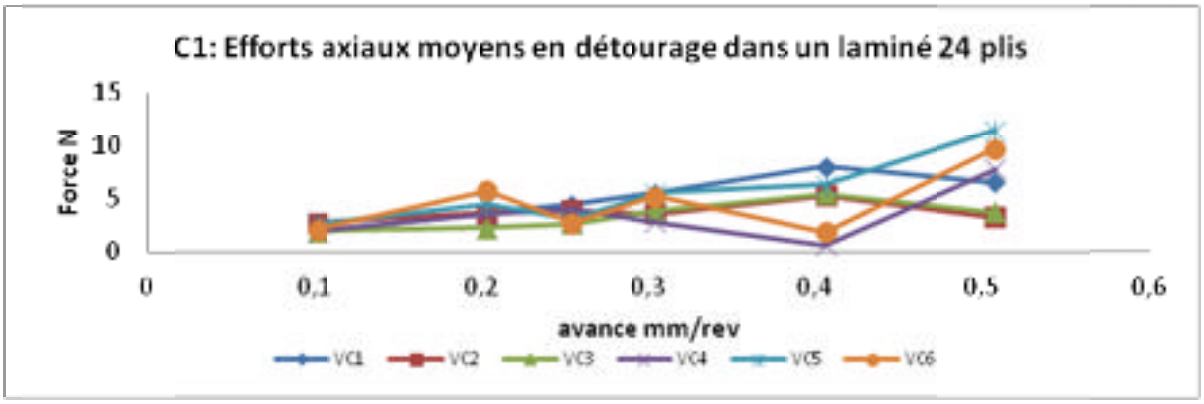


Figure 3.8 Graphique des efforts axiaux de l'outil C1 dans un laminé 24 plis

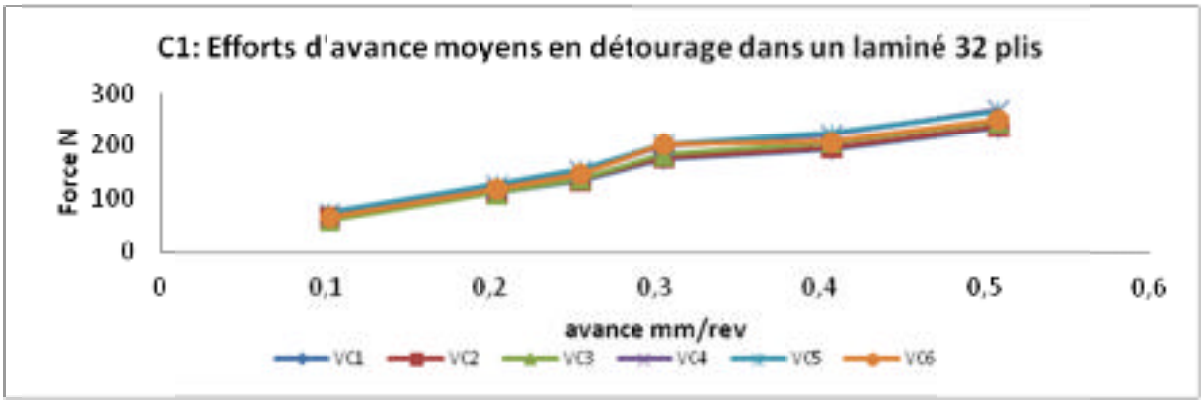


Figure 3.9 Graphique des efforts d'avances de l'outil C1 dans un laminé 32 plis

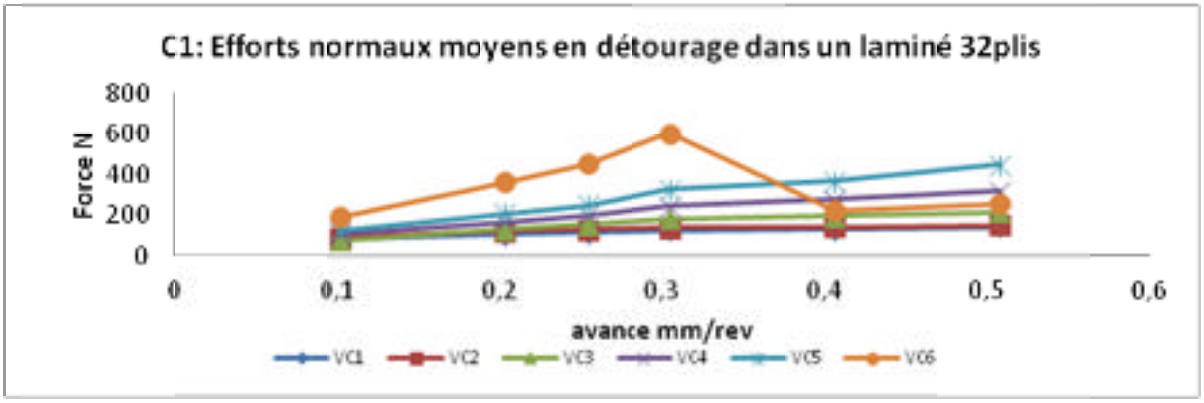


Figure 3.10 Graphique des efforts normaux de l'outil C1 dans un laminé 32 plis

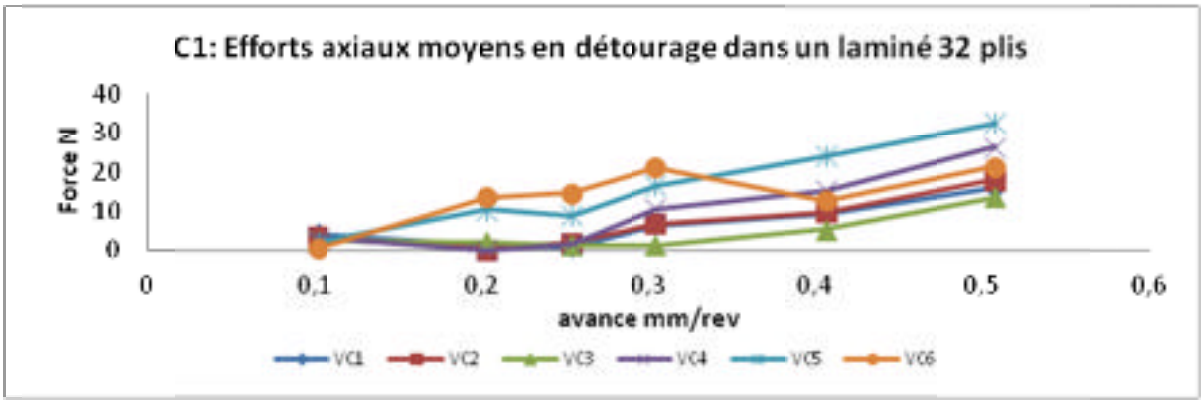


Figure 3.11 Graphique des efforts axiaux de l'outil C1 dans un laminé 32 plis

Figure 3.12 Graphique des efforts d'avance de l'outil C1 dans un laminé 40 plis

Figure 3.13 Graphique des efforts normaux de l'outil C1 dans un laminé 40 plis

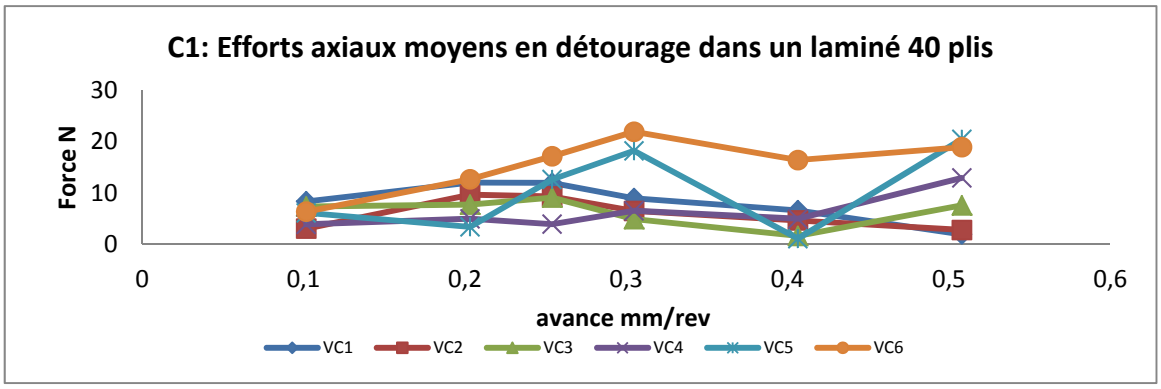


Figure 3.14 Graphique des efforts axiaux de l'outil C1 dans un laminé 40 plis

Les Figure 3.12 à la Figure 3.14 illustrent la variation de force en fonction de la vitesse de coupe pour les six avances étudiées. Les trois graphiques n'illustrent pas les mêmes tendances concernant l'impact de la vitesse de coupe sur la progression des efforts axiaux en fonction de l'avance par révolution. Le graphique illustrant les efforts pour un laminé de 24 plis ne montre aucun effet de la vitesse de coupe sur l'amplitude de l'effort de coupe. Par contre, le graphique présentant les résultats du laminé de 32 plis illustre un effet significatif de la vitesse de coupe à partir de 400m/min. Plus mitigé, le graphique des résultats pour un laminé de 40 plis illustre une progression pour les avances 5 et 6, cependant à faible avance, la vitesse de coupe semble ne pas affecter la réponse des efforts. Une analyse approfondie portera sur ces résultats. Il semble quand même clair que la vitesse de coupe, en moyenne, affecte très peu les efforts de coupe comparativement à l'avance par révolution dans le cas de l'outil C1.

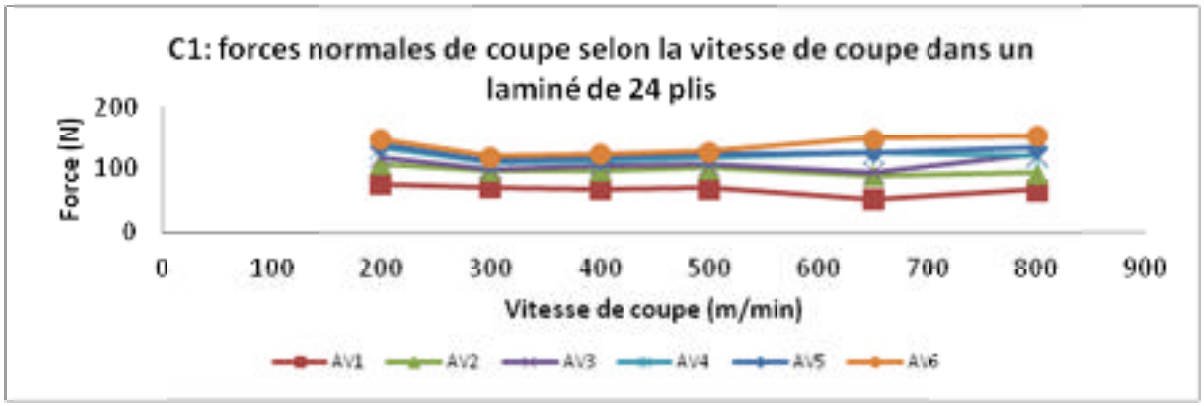


Figure 3.15 Graphique des forces normales de coupe selon la vitesse de coupe dans un laminé de 24 plis pour l'outil C1

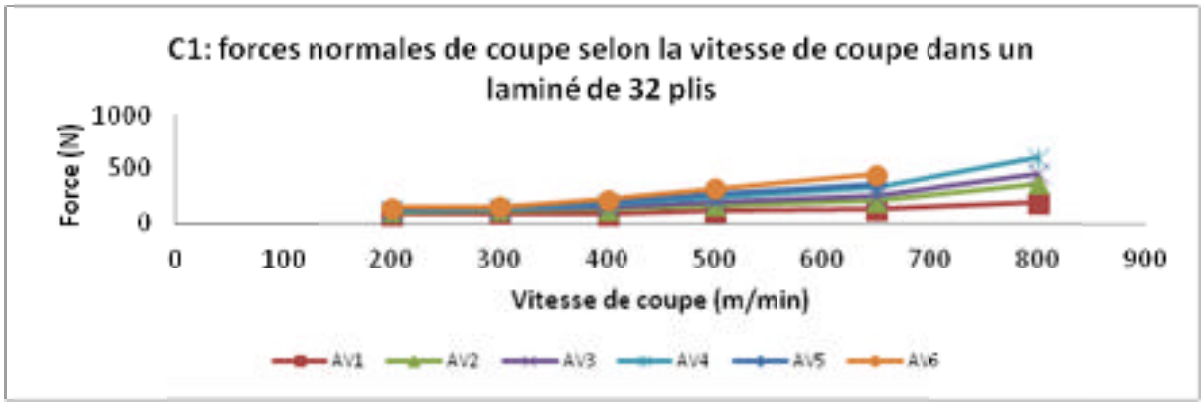


Figure 3.16 Graphique des forces normales de coupe selon la vitesse de coupe dans un laminé de 32 plis pour l'outil C1

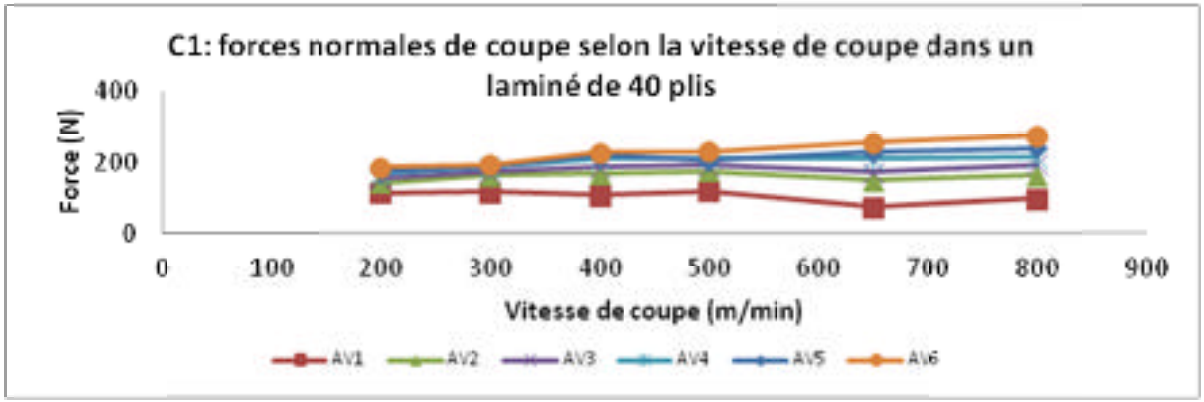


Figure 3.17 Graphique des forces normales de coupe selon la vitesse de coupe dans un laminé de 40 plis pour l'outil C1

3.1.1.2 Forces de coupe pour l'outil C2

Les graphiques suivants exposent les résultats des essais de coupe effectués avec l'outil C2 pour les différentes épaisseurs de laminés.

Les efforts de coupe générés par l'usinage avec l'outil C2 ne démontrent pas aussi clairement que pour l'outil C1 l'effet négligeable de la vitesse de coupe sur l'amplification des forces d'usinage dans la direction d'avance. Le profil des efforts moyens de coupe dans la direction normale à la surface coupée varie aussi selon les épaisseurs de laminé. Une amplitude des efforts de coupe apparaît aux vitesses de coupe Vc 5 et Vc 6 pour les laminés de 32 et 40 plis. L'évolution des efforts normaux pour le laminé de 24 plis ressemble au profil des forces pour l'outil C1 dans la même direction de coupe.

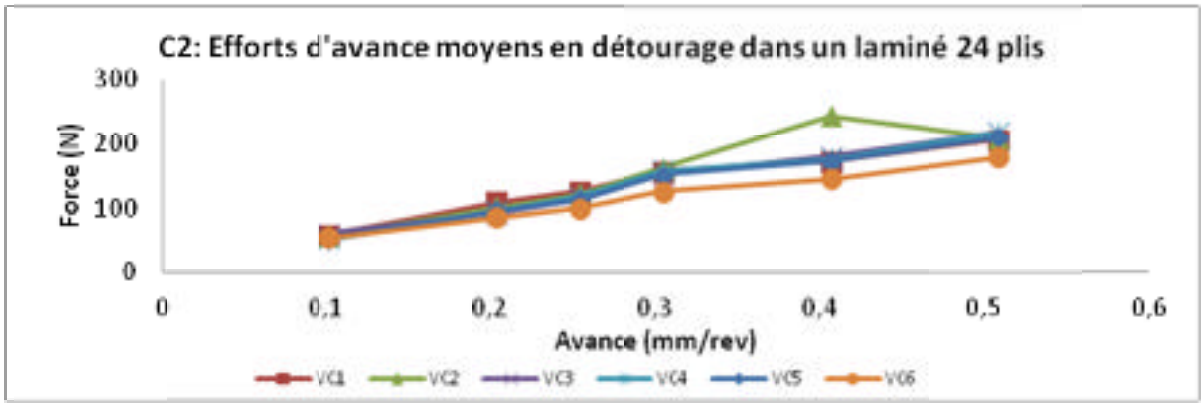


Figure 3.18 Graphique des efforts d'avance de l'outil C2 dans un laminé 24 plis

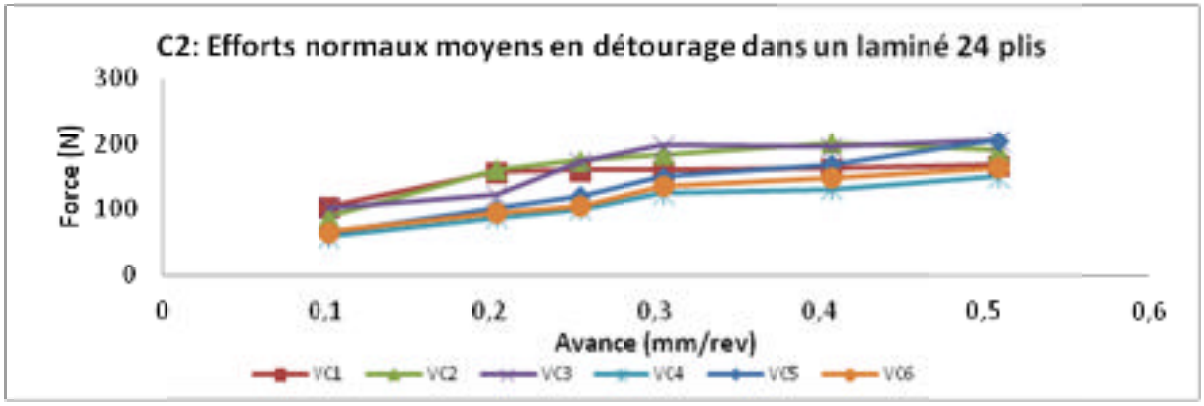


Figure 3.19 Graphique des efforts normaux de l'outil C2 dans un laminé 24 plis

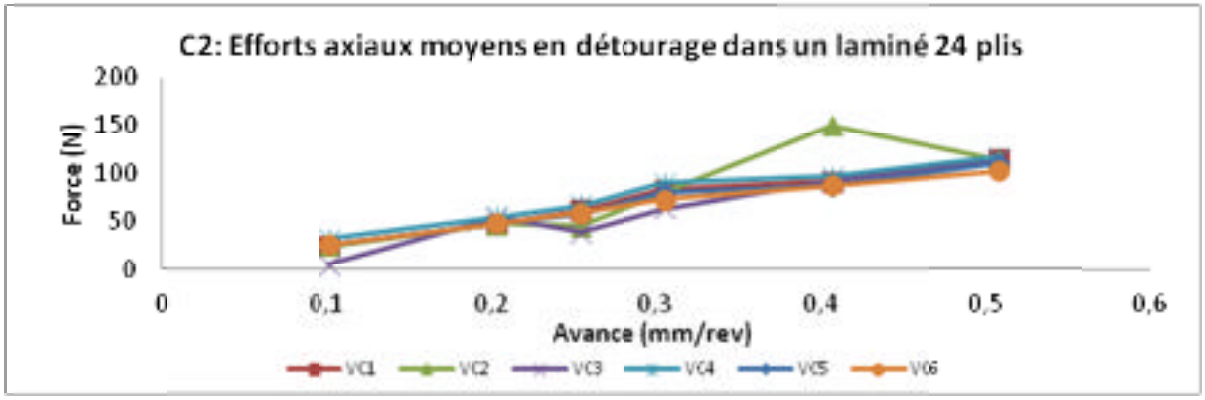


Figure 3.20 Graphique des efforts axiaux de l'outil C2 dans un laminé 24 plis

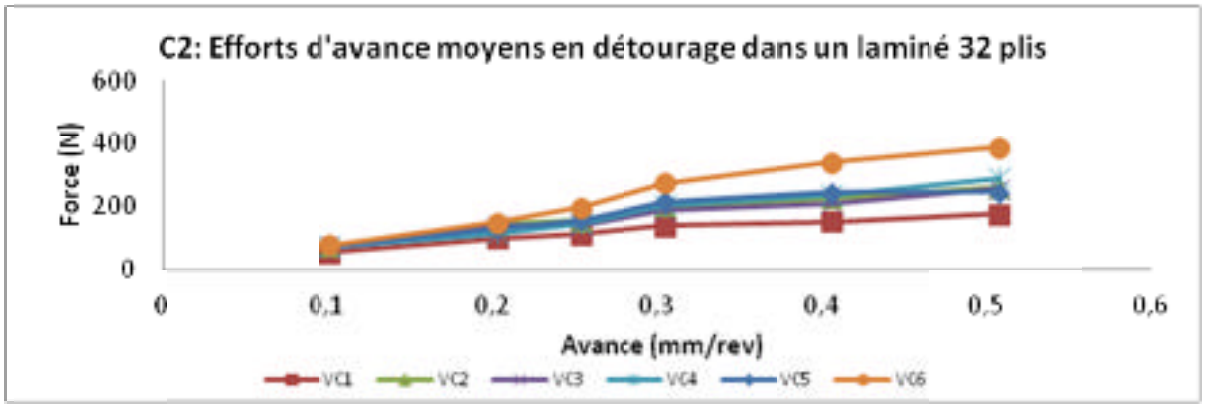


Figure 3.21 Graphique des efforts d'avance de l'outil C2 dans un laminé 32 plis

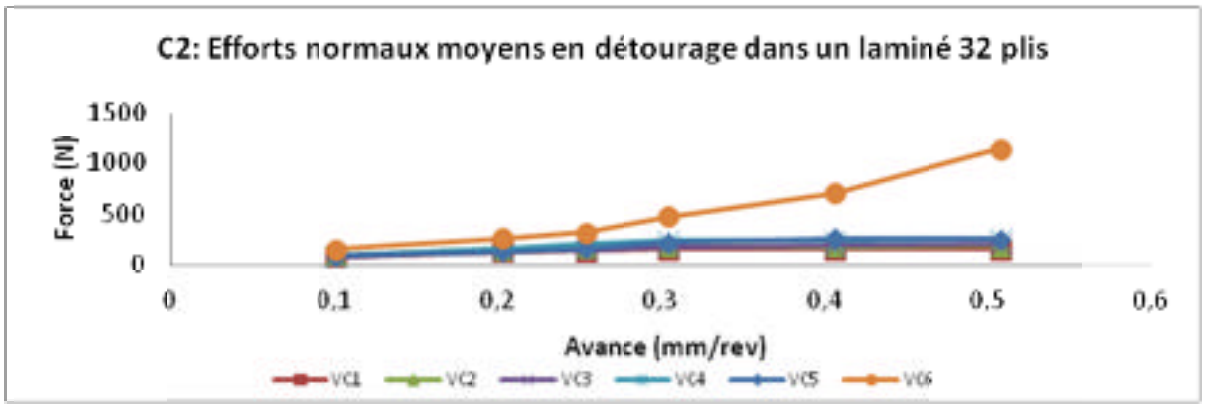


Figure 3.22 Graphique des efforts normaux de l'outil C2 dans un laminé 32 plis

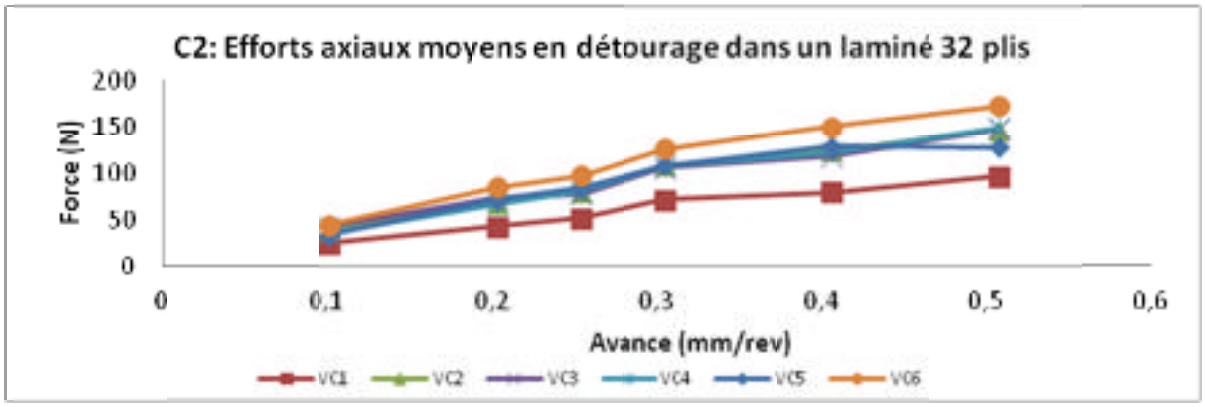


Figure 3.23 Graphique des efforts axiaux de l'outil C2 dans un laminé 32 plis

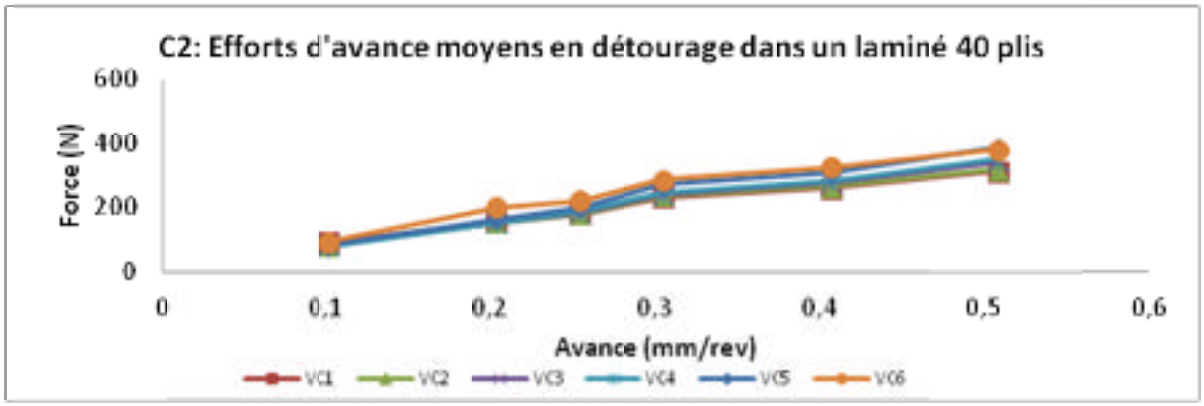


Figure 3.24 Graphique des efforts d'avance de l'outil C2 dans un laminé 40 plis

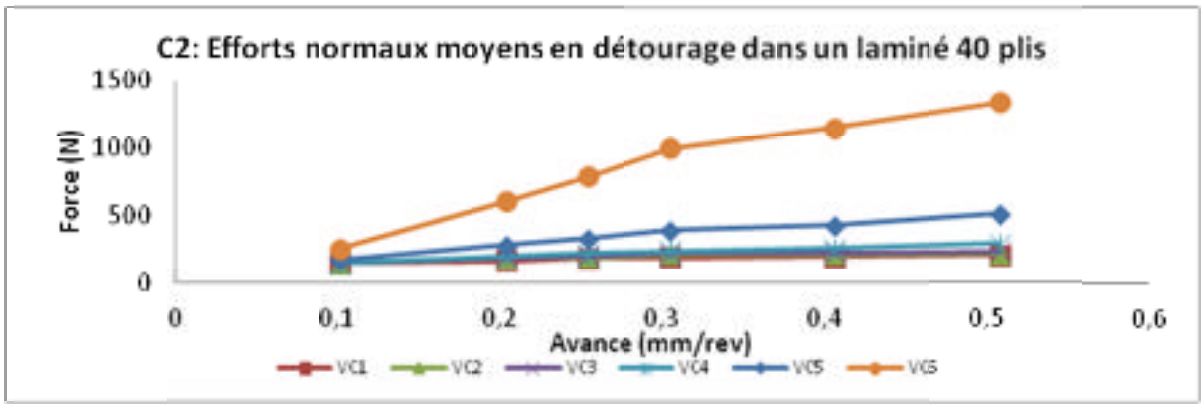


Figure 3.25 Graphique des efforts normaux de l'outil C2 dans un laminé 40 plis

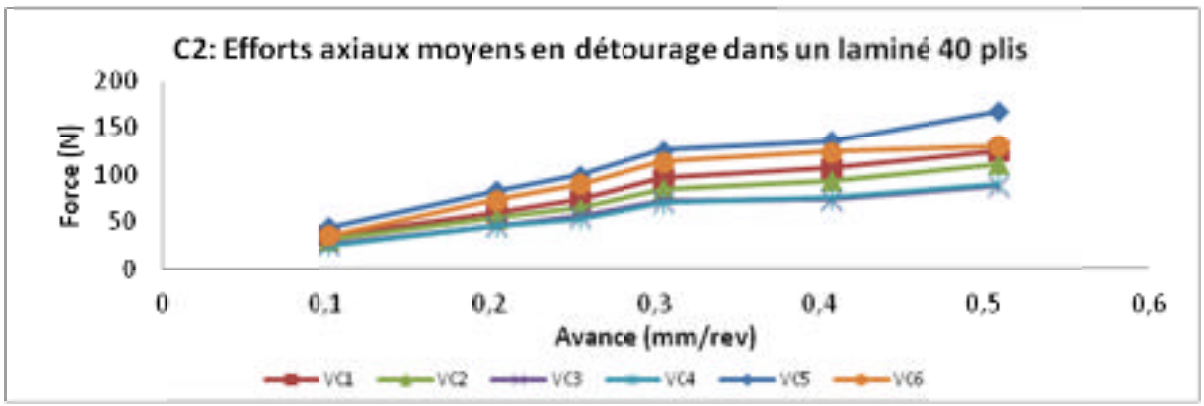


Figure 3.26 Graphique des efforts axiaux de l'outil C2 dans un laminé 40 plis

3.1.1.3 Forces de coupe pour l'outil C3

Lors des essais de coupe avec l'outil C3, la série d'expérimentation pour la plaque n'a pas pu s'effectuer en même temps que l'expérimentation des plaques de 32 et 40 plis. Un manque de ressource en outil de coupe est à l'origine de ce délai. Suite à la réception de l'outillage manquant (délai de 3 mois), un amplificateur de la table d'acquisition faisait défaut, générant une perte de l'acquisition des efforts dans la direction des Y. Pour cette raison il ne sera pas possible de présenter l'évolution des efforts normaux pour la plaque de 24 plis.

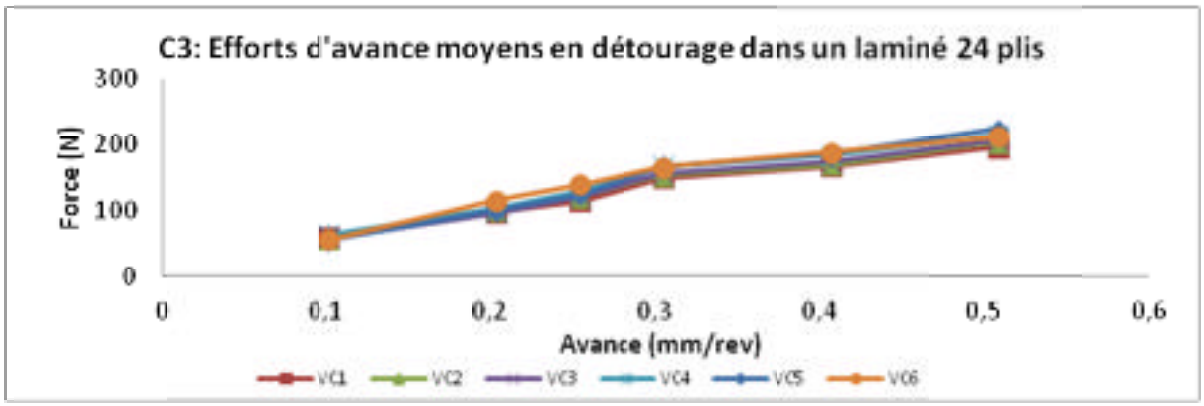


Figure 3.27 Graphique des efforts d'avance de l'outil C3 dans un laminé 24 plis

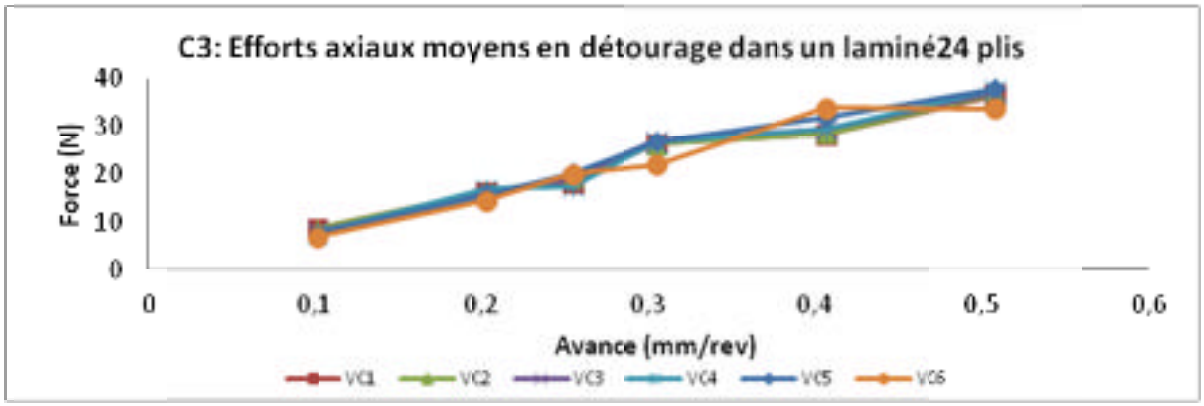


Figure 3.28 Graphique des efforts axiaux de l'outil C3 dans un laminé 24 plis

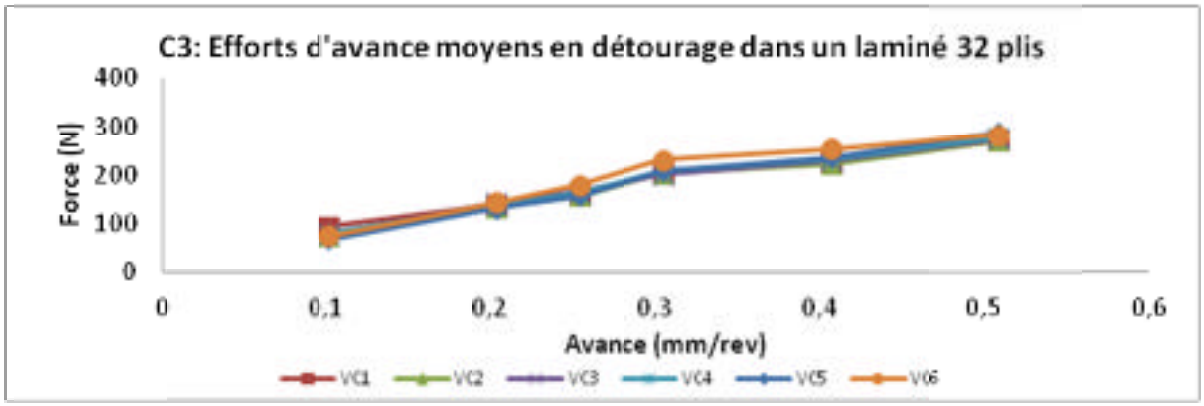


Figure 3.29 Graphique des efforts d'avance de l'outil C3 dans un laminé 32 plis

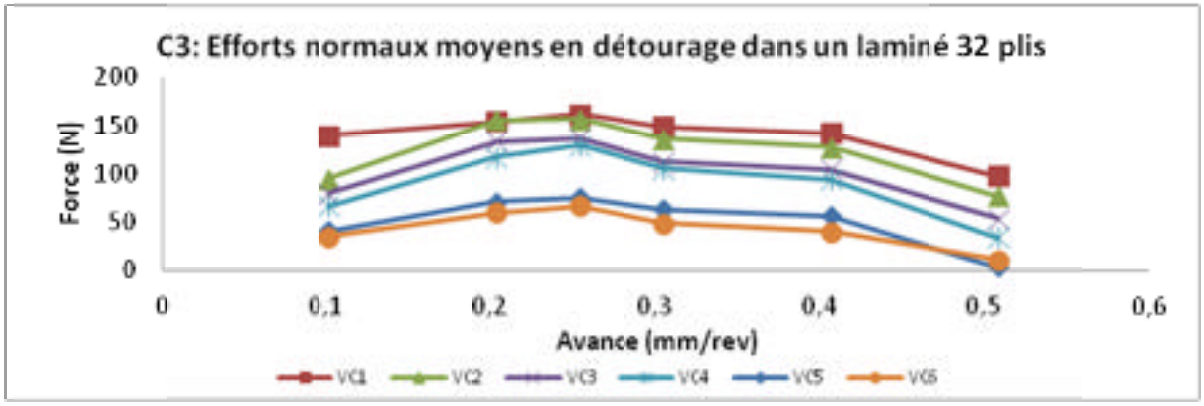


Figure 3.30 Graphique des efforts normaux de l'outil C3 dans un laminé 32 plis

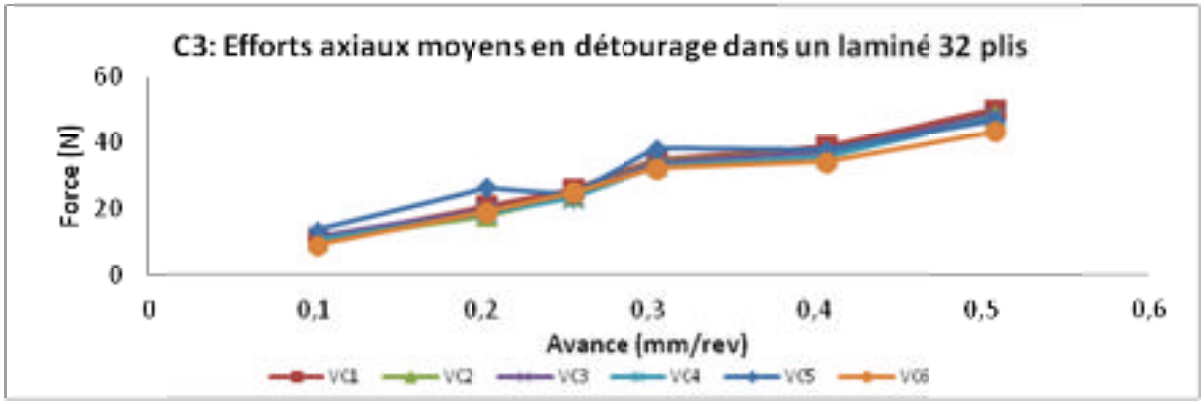


Figure 3.31 Graphique des efforts axiaux de l'outil C3 dans un laminé 32 plis

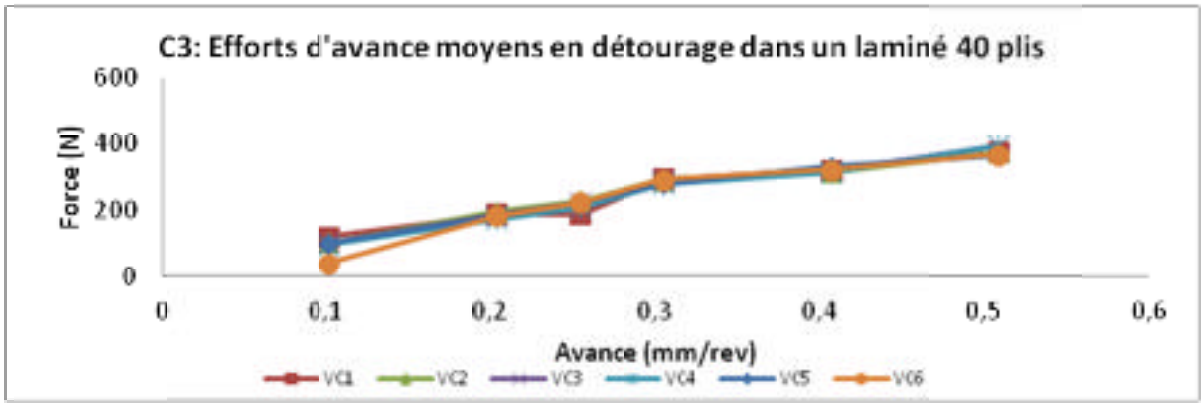


Figure 3.32 Graphique des efforts d'avance de l'outil C3 dans un laminé 40 plis

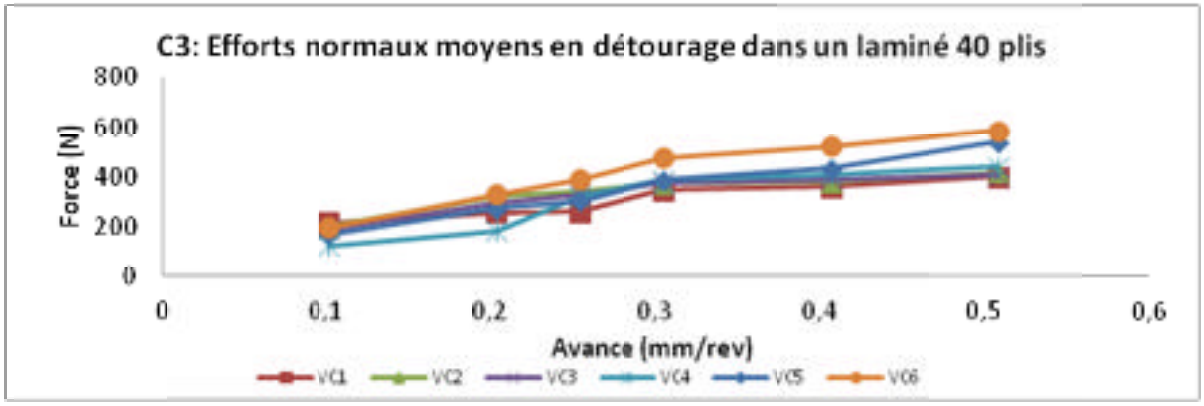


Figure 3.33 Graphique des efforts normaux de l'outil C3 dans un laminé 40 plis

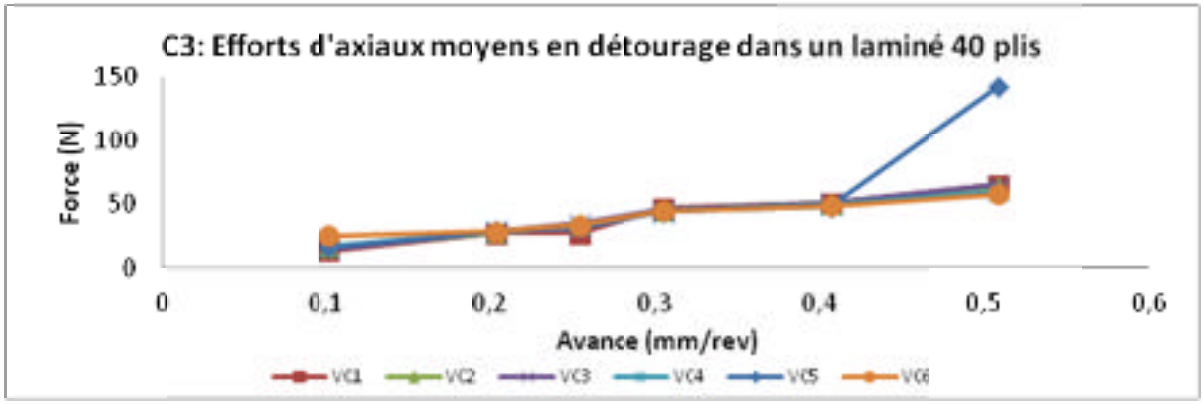


Figure 3.34 Graphique des efforts axiaux de l'outil C3 dans un laminé 40 plis

Les essais de coupe avec l'outil C3 présentent, pour les efforts dans la direction de l'avance, une corrélation linéaire selon le facteur de l'avance par révolution. L'impact de la vitesse de

coupe pour ces graphiques est quasi inexistant. Ces résultats sont similaires aux résultats obtenus avec l'outil C1. Dans les graphiques des résultats des efforts normaux à la face coupée, l'avance et la vitesse de coupe ont un impact sur les résultats. Fait intéressant dans l'observation de ces deux graphiques, ils n'ont pas la même tendance de l'évolution des efforts de coupe, par contre, ils présentent un décalage des efforts en fonction de la vitesse de coupe. Les graphiques des efforts normaux pour un laminé de 32 plis présentent des courbes de forces plus élevées pour les basses vitesses de coupe que les hautes vitesses de coupe avec une diminution selon l'avance. Ce graphique est à l'antipode des autres graphiques. Les efforts axiaux suivent la même tendance d'évolution des forces en fonction de l'avance avec un faible impact de la vitesse de coupe sur les résultats des efforts de coupe.

3.1.1.4 Forces de coupe pour l'outil C4

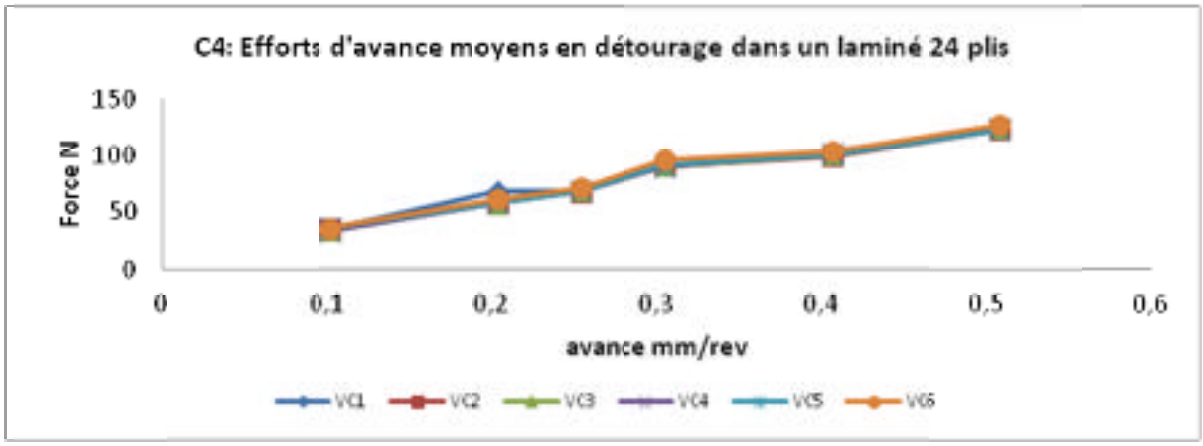


Figure 3.35 Graphique des efforts d'avance de l'outil C4 dans un laminé 24 plis

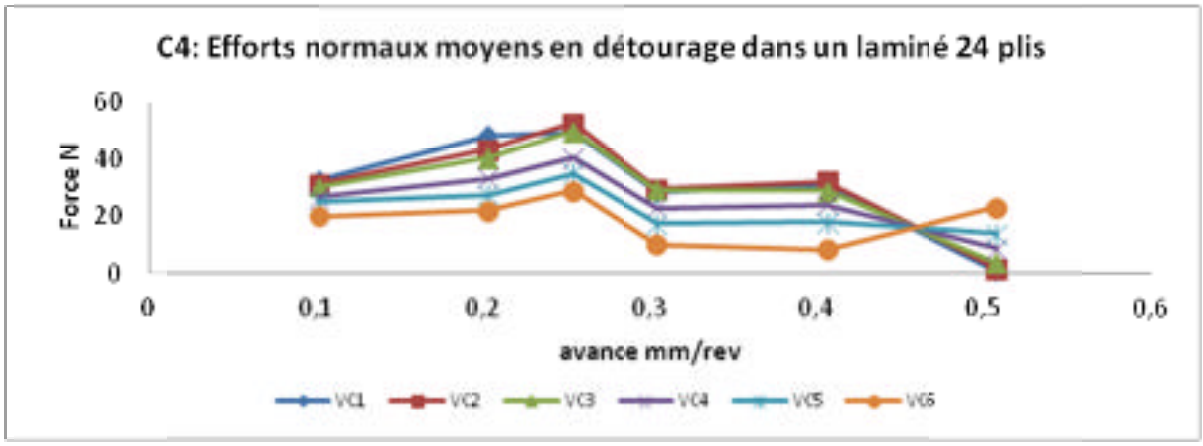


Figure 3.36 Graphique des efforts normaux de l'outil C4 dans un laminé 24 plis

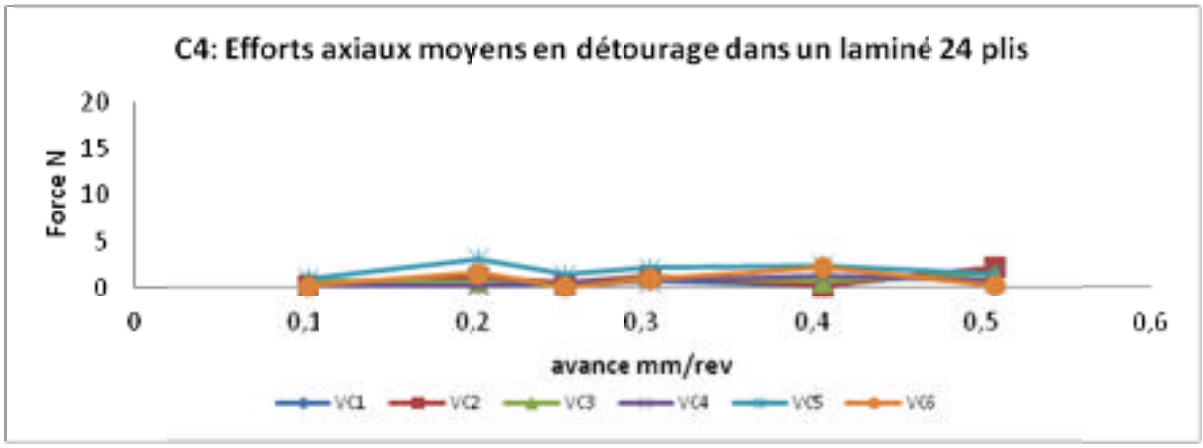


Figure 3.37 Graphique des efforts axiaux de l'outil C4 dans un laminé 24 plis

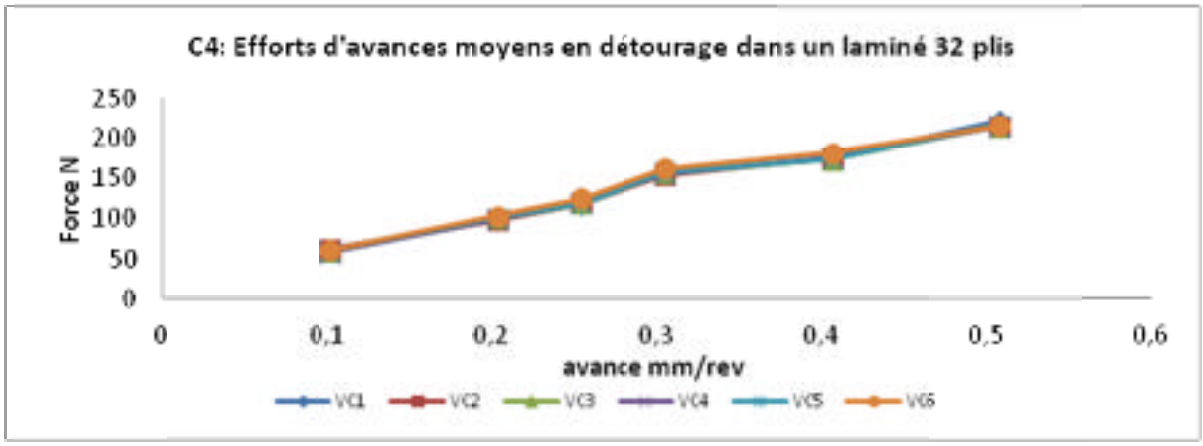


Figure 3.38 Graphique des efforts d'avance de l'outil C4 dans un laminé 32 plis

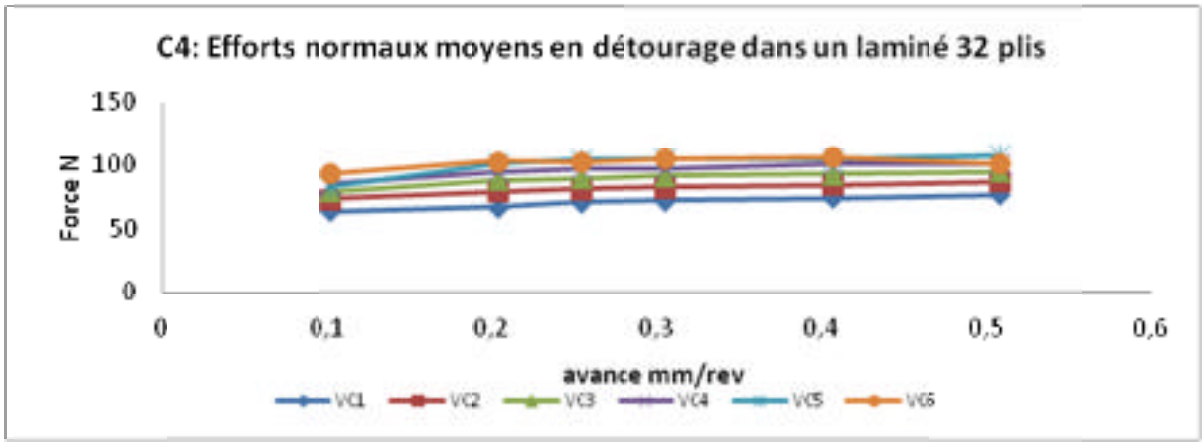


Figure 3.39 Graphique des efforts normaux de l'outil C4 dans un laminé 32 plis

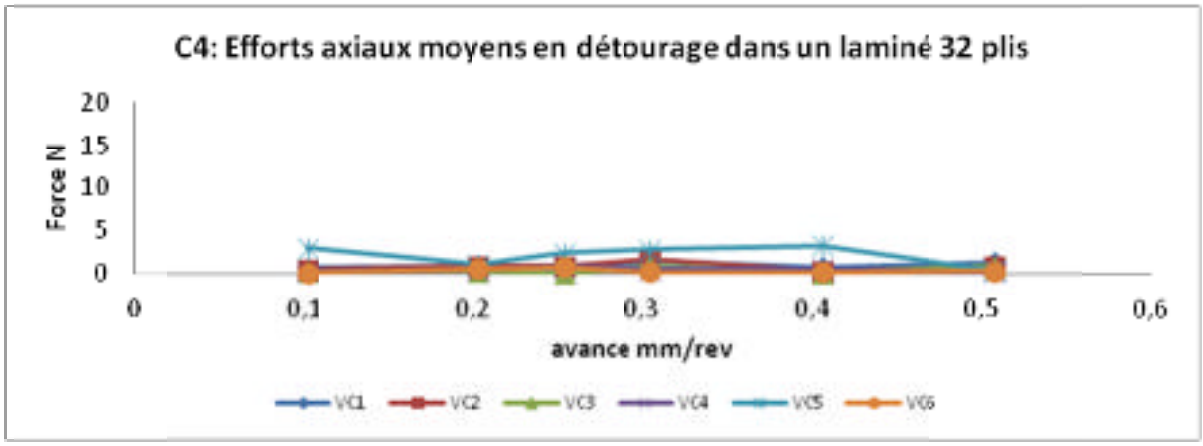


Figure 3.40 Graphique des efforts axiaux de l'outil C4 dans un laminé 32 plis

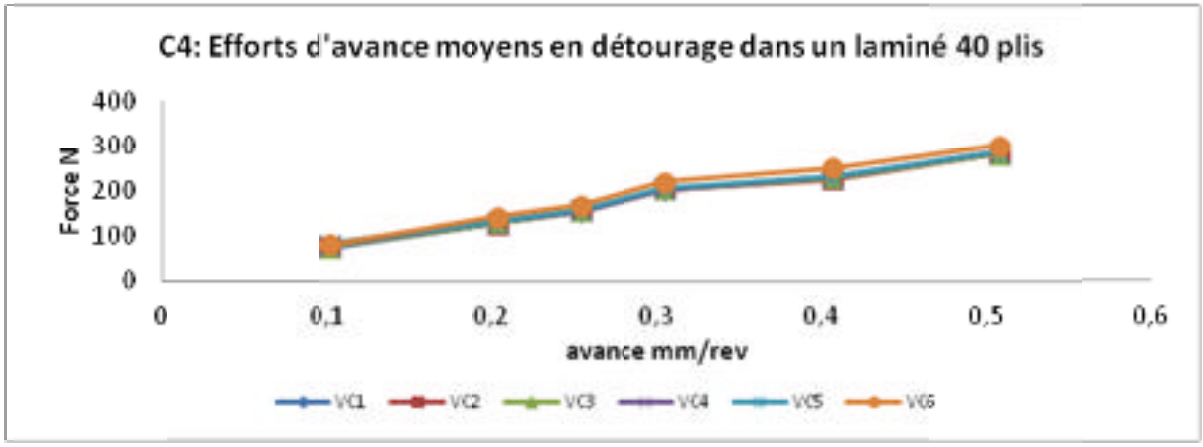


Figure 3.41 Graphique des efforts d’avance de l'outil C4 dans un laminé 40 plis

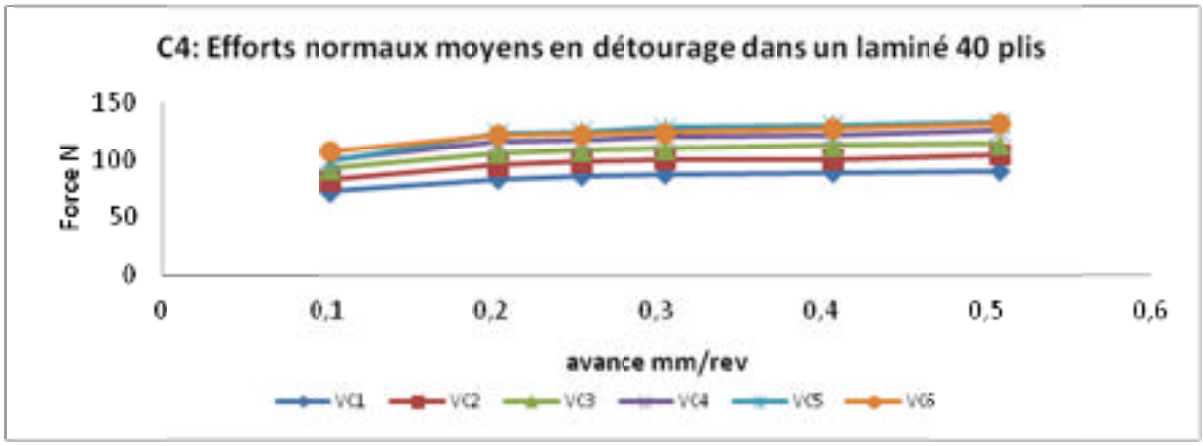


Figure 3.42 Graphique des efforts normaux de l'outil C4 dans un laminé 40 plis

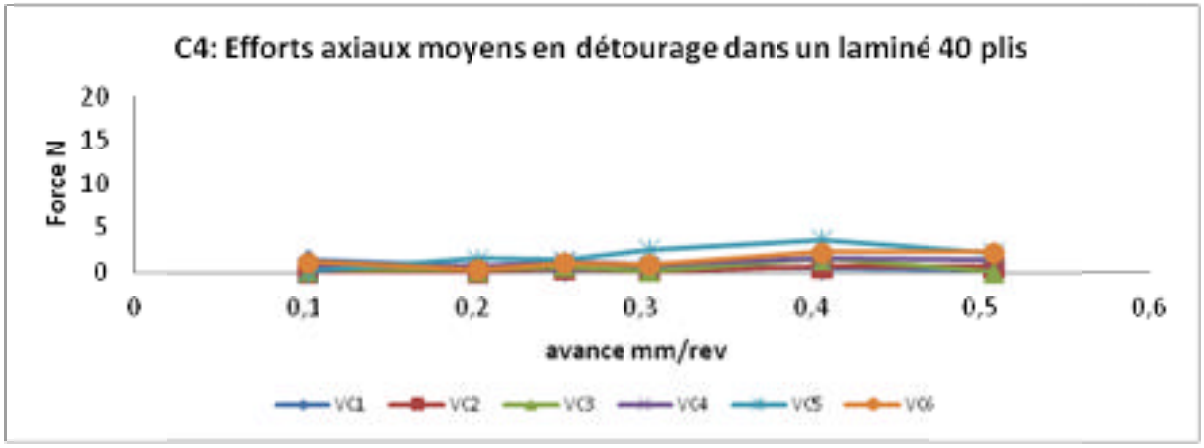


Figure 3.43 Graphique des efforts axiaux de l'outil C4 dans un laminé 40 plis

Les graphiques des résultats des essais de coupe effectués avec l'outil C4 démontrent clairement ce à quoi les autres graphiques produits par les résultats de C1 et C3 illustraient sommairement. Les efforts de coupe dans la direction d'avance sont fonction de l'avance uniquement. Les efforts de coupe dans la direction normale sont fonction de l'avance et de la vitesse de coupe. Les efforts de coupe dans la direction axiale du laminé ne sont pas marqués par l'avance ni par la vitesse de rotation.

3.1.1.5 Comparaison des efforts des différents outils

Les graphiques qui suivent illustrent les résultats des efforts de coupe pour les mêmes directions de coupe pour chacune des technologies d'outils testés. Il y a une grande différence dans les efforts de coupe pour un même taux d'enlèvement de matière par outil de coupe. La différence des forces est moins marquée pour les efforts de coupe dans la direction de l'avance avec une tendance similaire de progression des forces. Par contre, dans les graphiques des efforts normaux et axiaux, l'outil C1 et C4 démontrent un effet tranchant permettant de réduire les efforts de coupe, ce qui surclasse les outils C2 et C3. L'outil C4 est la technologie qui maintient les efforts de coupe au minimum dans les trois directions. Dans la direction des efforts de coupe axiaux, l'outil C4 et C1 présente un effet de constante, illustrant que l'avance n'a aucun effet sur la composante de force selon l'axe de l'outil.

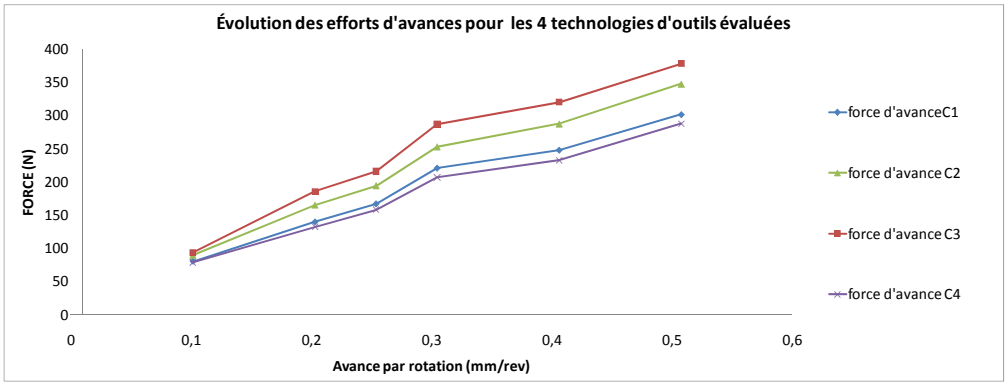


Figure 3.44 Comparaison des efforts d'avance des technologies d'outils testées

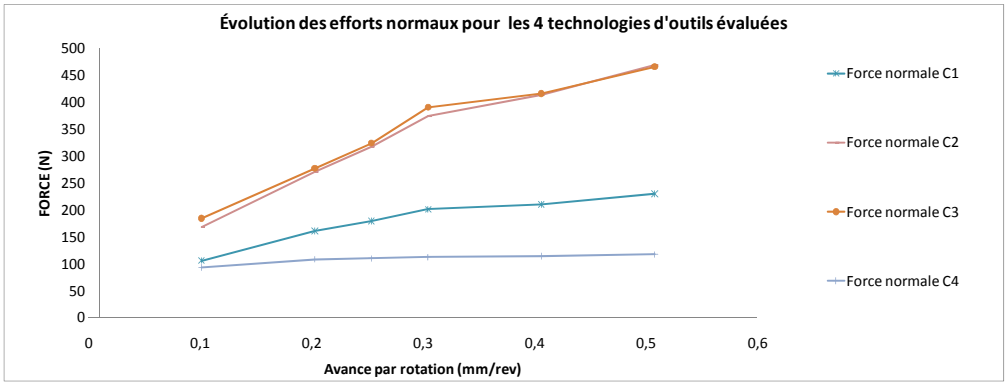


Figure 3.45 Comparaison des efforts normales des technologies d'outils testées

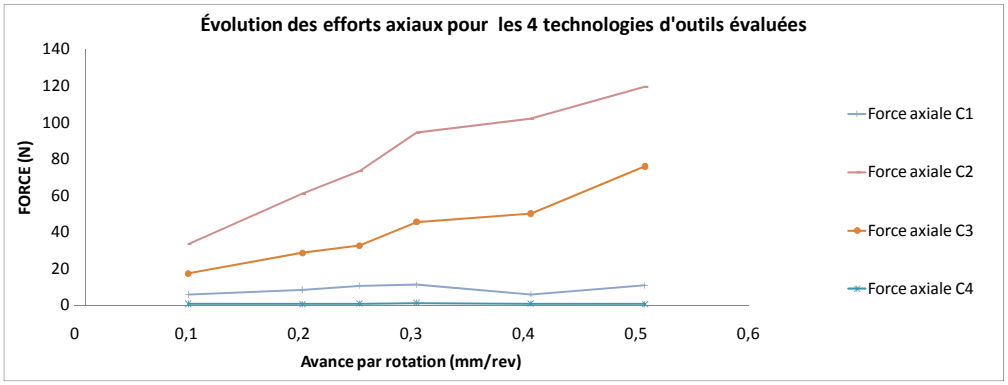


Figure 3.46 Comparaison des efforts axiales des technologies d'outils testées

3.1.2 Observation de l'usure des outils après la phase d'essais de coupe.

Cette section expose les résultats de clichés photos illustrant l'usure des outils à la fin de chaque expérimentation. Les outils C1, C2, C3 et C4 ont été photographiés après leur utilisation.

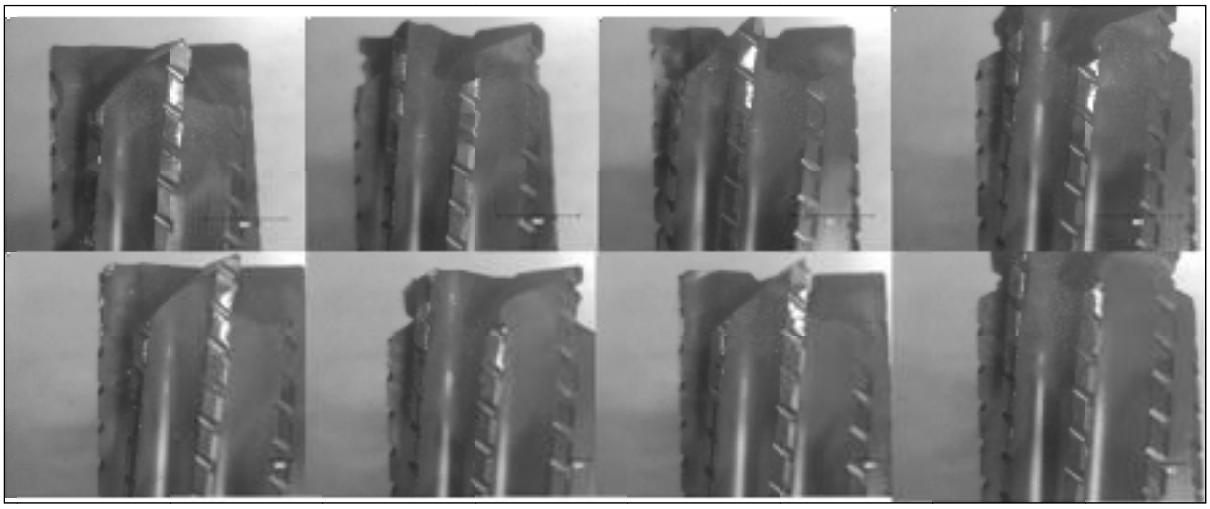


Figure 3.47 Observations de l'usure de l'outil C1 après la coupe(X10)

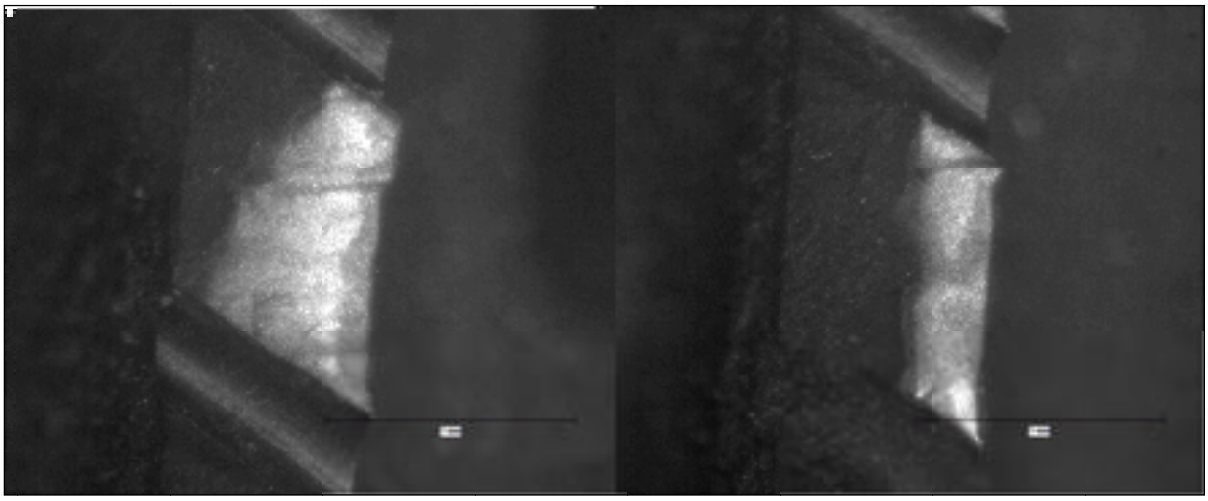


Figure 3.48 Agrandissement de l'usure sur une lèvre de coupe de C1 (X50)

Pour l'outil C1, de l'usure significative apparaît sur les lèvres de coupe (Figure 3.47). L'usure n'est pas constante sur toutes les lèvres de l'outillage. Le revêtement ne résiste pas aux 36 tests de coupe.

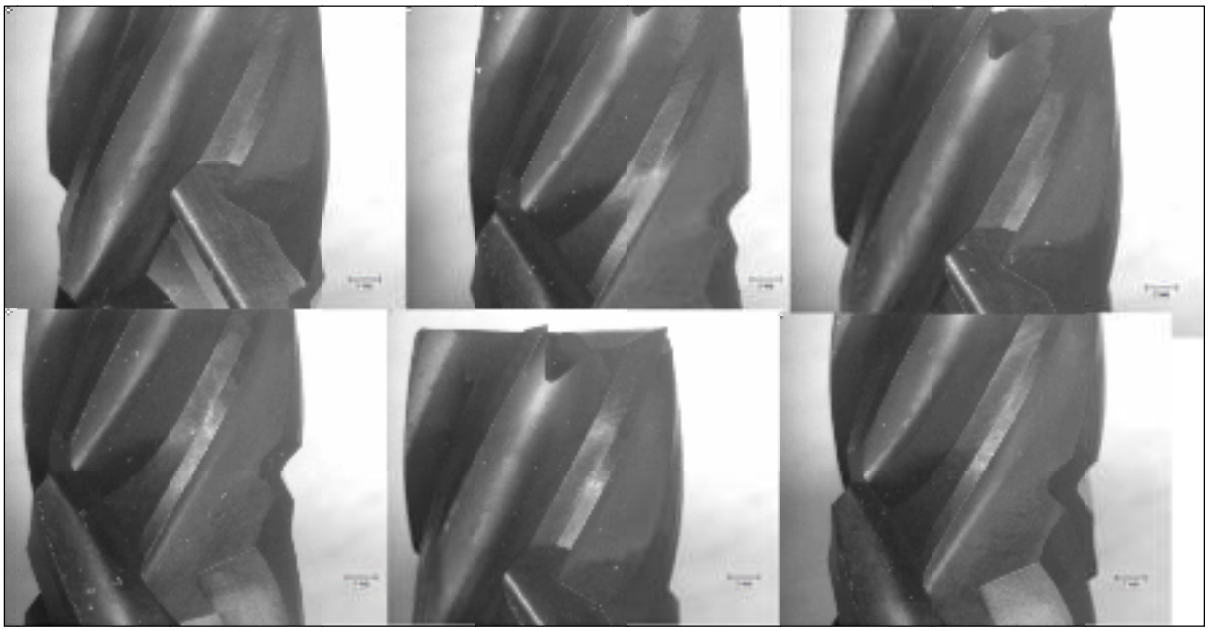


Figure 3.49 Observations de l'usure de l'outil C2 après la coupe (X10)

L'outil C2, par contre, ne démontre pas de signe significatif d'usure pour l'usinage des laminés de 24 et 32 plis (voir Figure 3.49). Par contre, en raison d'un mauvais serrage de l'outil lors des 4 premières vitesses de coupe testées, dans le cadre de l'expérimentation de la découpe du laminé à 40 plis, une usure significative est apparue. Ceci est une hypothèse car l'auteur n'a pu répéter ou réévaluer la même expérimentation. Une différence marquée dans la sonorité de coupe enregistrée lors de ce test présentait une différence entre ce test et les autres tests de coupe.

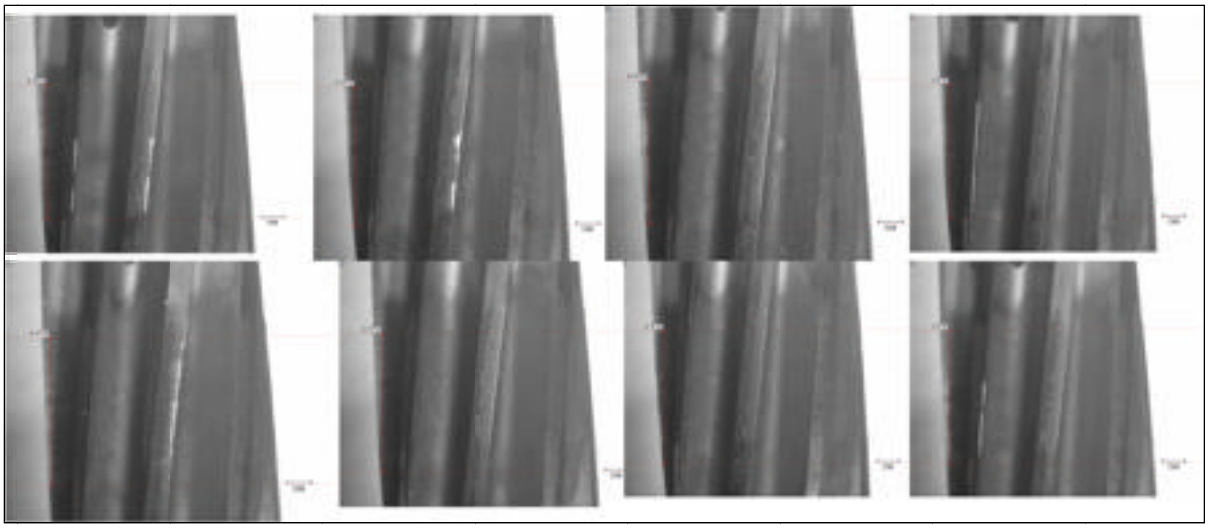


Figure 3.50 Observations de l'usure de l'outil C3 après la coupe (X10)

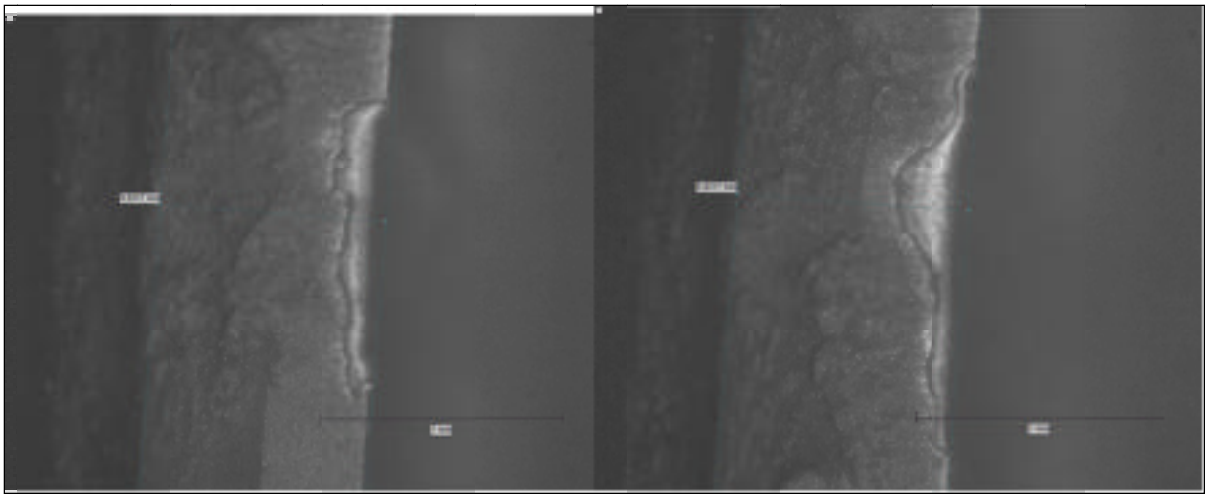


Figure 3.51 Agrandissement de l'usure sur deux lèvres de coupe de C3 (X50)

Pour les expérimentations effectuées avec l'outil C3, une usure significative apparaît. L'usure sur les lèvres de coupe n'est pas uniforme sur toutes les dents de l'outil (voir la Figure 3.51). Une abrasion de l'arête tranchante s'opère une fois le revêtement usé.

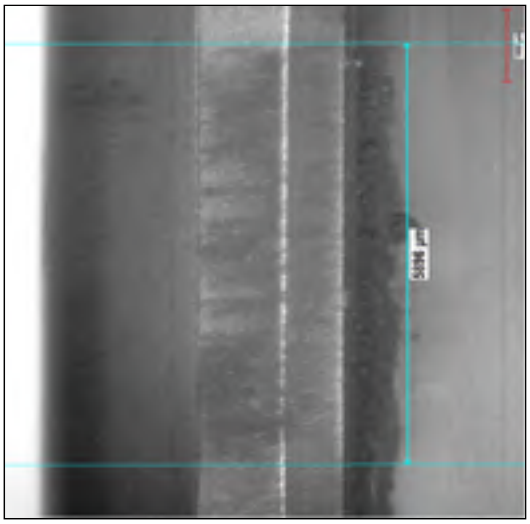


Figure 3.52: lèvre de coupe de l'outil C4(X10)

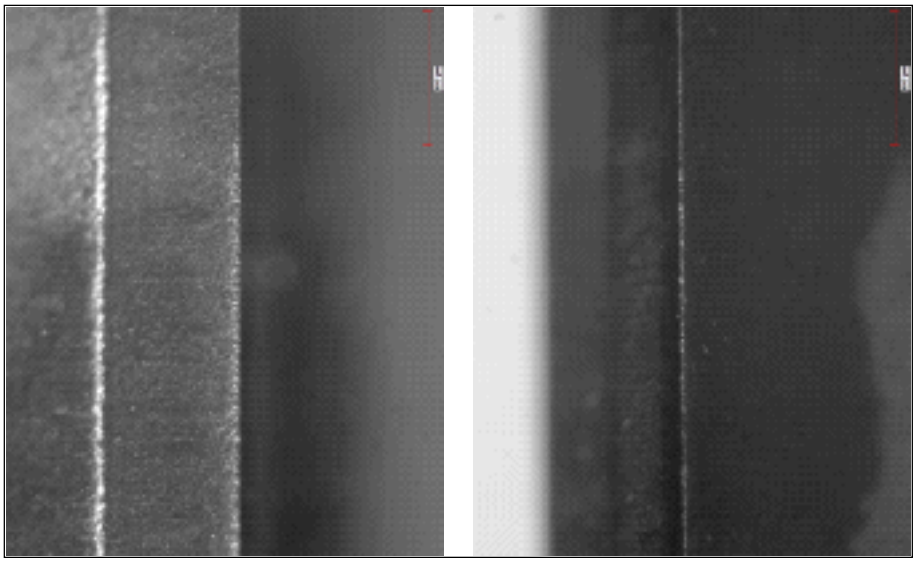


Figure 3.53 Agrandissement de l'arête tranchante de l'outil C4 (X50)

Malgré les dépôts de résidus de coupe sur la face de dépouille de l'outil, l'arête tranchante de l'outil C4 ne présente pas d'usure significative. L'intégrité de l'arête tranchante est intacte suite aux expérimentations pour les différentes plaques coupées.

En raison des signes d'usure pour l'outillage C1 et C3, il faut valider que l'ordre d'expérimentation n'affecte pas les efforts de coupe en raison d'une usure progressive lors de l'expérimentation. La section suivante traite des ces expérimentations.

3.1.3 Effet du plan d'expérimentation sur les efforts de coupe

Afin de réduire le biais du programme d'exécution du plan d'expérience qui démarre à faible vitesse de coupe jusqu'à la plus haute vitesse de coupe. Il a été décidé que l'exécution des essais de coupe avec un plan d'expérimentation inversé fera la lumière sur l'effet de l'usure sur les forces générées lors de la coupe. Pour l'outil C1, les graphiques de la Figure 3.54 et de la Figure 3.55 illustrent les efforts moyens en fonction de l'avance. Ces figures présentent les efforts de coupe de la plus haute vitesse de coupe à la plus faible vitesse de coupe. En théorie, si l'usure affecte les résultats les deux courbes se croiseraient à la vitesse de coupe 3 ou 4 de l'expérimentation. La Figure 3.54 expose les efforts moyens enregistrés lors de cette expérimentation. Les deux courbes ne se croisent jamais. Ce qui implique que lors de ce test l'usure de l'outil combinée aux coupes précédentes n'affecte pas les efforts moyens. Le test du plan d'expérimentation inverse génère des efforts de coupe légèrement supérieurs au test de l'expérimentation initiale.

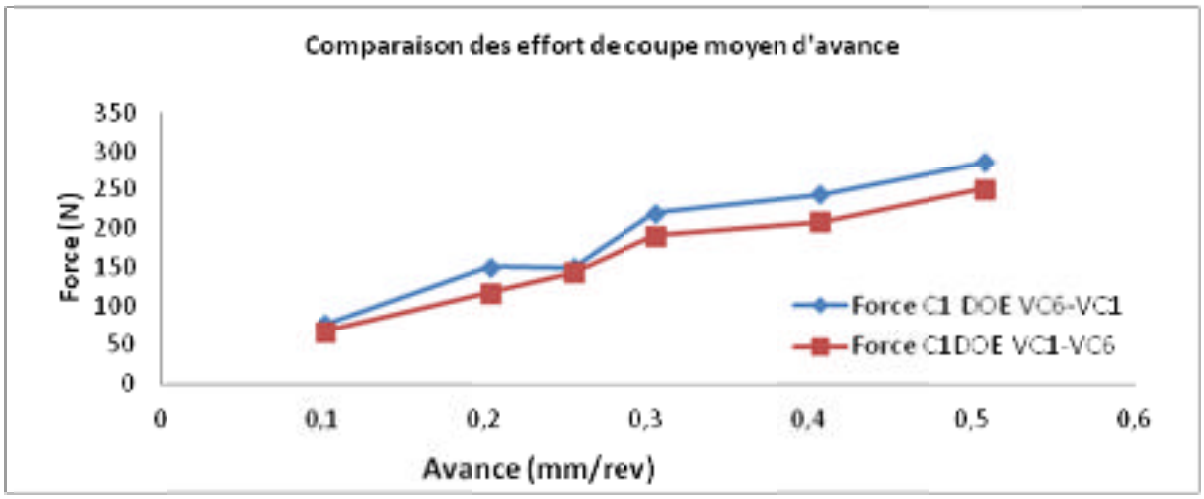


Figure 3.54 Comparaison des efforts moyens d'avance de l'expérimentation inversée

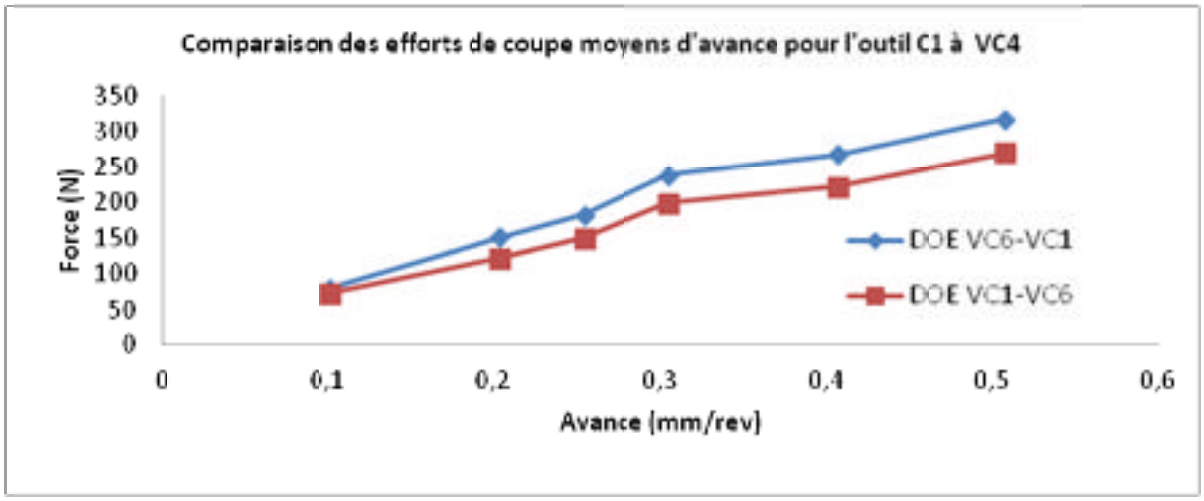


Figure 3.55 Comparaison des efforts moyens d'avance de l'expérimentation inversée à Vc 4

3.1.4 Finis de surface

La rugosité est un des paramètres permettant de définir la qualité d'une surface usinée. Plusieurs essais ont permis d'établir la qualité de la surface des plaquettes échantillons suite à leur usinage. Une des méthodes utilisées dans ce projet est l'attribution d'une appréciation de rugosité par la comparaison viso-tactile à l'aide d'une plaquette d'échantillon prévue à cet effet.

La seconde méthode qui a été utilisée consiste en la mesure directe des profils de rugosité à l'aide d'un profilomètre et le calcul des paramètres statistiques. De cette méthode, les mesures peuvent s'effectuer selon plusieurs directions. Les résultats exposés dans cette section concernent les réponses obtenues selon les différentes méthodes employées.

3.1.4.1 Comparaison viso-tactile.

L'attribution d'un critère de qualité d'état de surface avec cette méthode consiste à définir à l'aide d'une référence, une rugosité par contact tactile. Cette méthode possède l'avantage d'être très rapide. Les tableaux qui suivent illustrent les matrices des critères de qualité de surface. Sur une échelle pondérée de 1 à 10, il est possible d'établir ou de définir une qualité de surface. Le tableau 3.1 illustre l'échelle des critères viso-tactiles en fonction de la rugosité arithmétique des échantillons de référence.

Tableau 3.1 Grille d'évaluation viso-tactile

Ra	0,8	1,28	1,76	2,24	2,72	3,2	5,06	6,92	8,78	12,5
Critère VT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Le code de couleur exprime le niveau de qualité. Le vert est une haute qualité de type finition. Le jaune exprime une qualité moyenne et le rouge une zone de qualité d'ébauche non acceptable pour la production.

3.1.4.2 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C1

Tableau 3.2 Réponses viso-tactiles de l'état de surface produit avec l'outil C1 pour les trois plaques

	Critère viso-tactile C1 24 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	2	2	2,5	3	3	3,25
VC2	2,25	2	2,5	3	3	3,5
VC3	1,5	4	3	3	3	3
VC4	3	2,75	3	3	4	6
VC5	2	2	3	5	5	7
VC6	5	4	4	5	6	6
	Critère viso-tactile C1 32 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	1	1	2	2	3	4
VC2	3	2	3	3	4	4,5
VC3	3	3,5	3,5	2	2,5	3
VC4	2	2	2,5	2,5	4	4
VC5	3	3,5	3,5	4	5	5,5
VC6	2	2,5	2,5	2,5	3	3,5
	Critère viso-tactile C1 40 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	1	2	2	2,5	2,5	3
VC2	2	2	3	3,5	5	3
VC3	2	2,5	3,5	3	3	4
VC4	1,5	2	2,5	3	3	4
VC5	3	4	6	6	6	7
VC6	2	4	4	8	9	7

3.1.4.3 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C2

Tableau 3.3 Réponses viso-tactiles de l'état de surface produit avec l'outil C2 pour les trois plaques

	Critère viso-tactile C2 24 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	3	3	3	4	4	5
VC2	3	3	3	4,5	5	6
VC3	2,5	3	3,5	4	5	5
VC4	4	5	5	5	6	7
VC5	4	4	6	7	7	8
VC6	3	6	6	7	8	9
	Critère viso-tactile C2 32 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	2	4	5	4	4	4
VC2	5	4	4	4	5	5
VC3	5	6	4	5	5	7
VC4	4	4	5	7	7	7
VC5	4	4	4	5	6	6
VC6	3	4	5	5	4	5
	Critère viso-tactile C2 40 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	4	1,5	1,5	1,5	1,5	2
VC2	3	1,5	2	2	2	2
VC3	2	1,5	1,5	2	2	2
VC4	3	1,5	1,5	2	2	2
VC5	4	5	7	10	10	10
VC6	7	8	8	8	10	10

3.1.4.4 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C3

Tableau 3.4 Réponses viso-tactiles de l'état de surface de l'outil C3 produit pour les deux plaques

	Critère viso-tactile C3 32 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	2	2	2	2	3	3
VC2	2	2	3	3	3	3
VC3	2	3	4	3	3	3
VC4	5	2	3	4	4	4
VC5	3	4	4	5	5	6
VC6	3	7	6	5	6	7
	Critère viso-tactile C3 40 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	2	2	2	3	3	3
VC2	1,5	1,5	1,5	2	2	3
VC3	1,5	1,5	2	2,5	3	4
VC4	1,5	2	2,5	3	4	6
VC5	2	2,5	3,5	3,5	6	6
VC6	2	3	3	4	5	7

Notons que la plaque du laminé de 24 plis n'a pas été coupée avec l'outil C3, d'où l'absence de réponse viso-tactiles.

3.1.4.5 Comparaison viso-tactile : Échantillons coupés avec l'outil C4

Tableau 3.5 Réponses viso-tactiles de l'état de surface de l'outil C4 pour les trois plaques

	Critère viso-tactile C4 24 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	5	5	3	2	3	3
VC2	2	2	2	3	3	3
VC3	2	2	3	3	3	3
VC4	2	1,5	2	2	3	3
VC5	2	2	3	3	3	2
VC6	1,5	2	3	4	4	4
	Critère viso-tactile C4 32 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	5	1,5	1,5	2	2,5	3
VC2	1,5	1	1,5	2	2,5	2,5
VC3	2	2	2	2,5	2,5	2,5
VC4	1	1,5	2	2	2	2,5
VC5	5	1,5	1,5	2	2	2,5
VC6	1	2	2	2	3	2,5
	Critère viso-tactile C4 40 plis					
	Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
VC1	1	1,5	1,5	2	3	3
VC2	1	1,5	1,5	2	2,5	3
VC3	1	1,25	1,5	2	2,5	3
VC4	6	1	1,5	1,5	2,5	3
VC5	6	1,5	1,5	1,5	2	2,5
VC6	1,5	2	3	3	5	5

3.1.4.6 Résultats des mesures de rugosité

Plusieurs mesures ont été effectuées avec le profilomètre afin d'obtenir une réponse de rugosité en fonction des paramètres de coupe. Les premiers tests ont porté sur la rugosité transverse. Les graphiques suivants illustrent les réponses en rugosité en fonction de l'avance par révolution sous des critères de rugosité Ra et Rt en micro mètre.

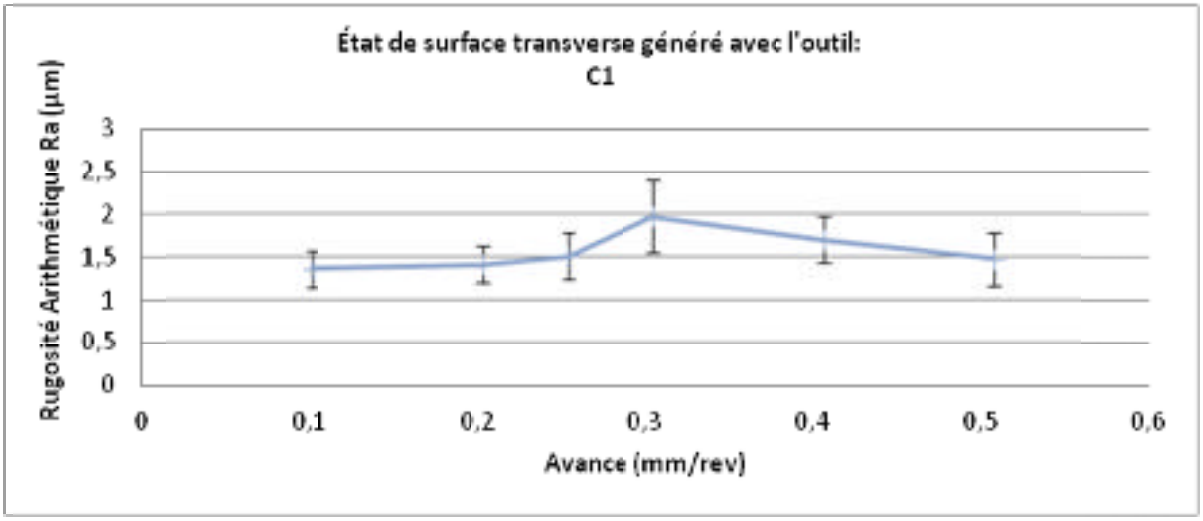


Figure 3.56 Résultats de la rugosité transverse en Ra pour C1

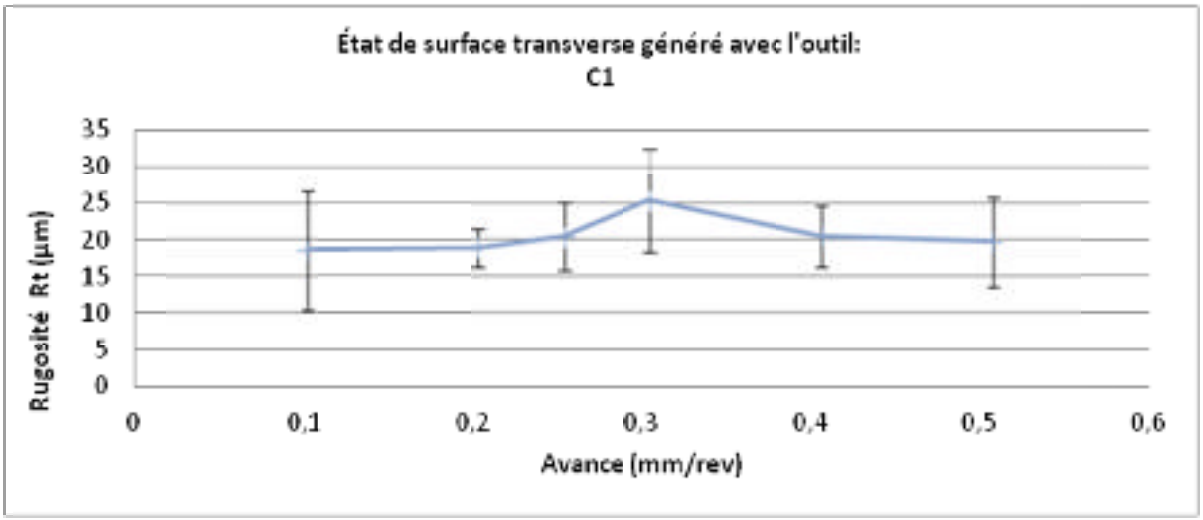


Figure 3.57 Résultats de la rugosité transverse en Rt pour C1

Les barres d'erreurs correspondent à l'intervalle de confiance appliqué aux mesures effectuées sur les échantillons ayant été coupés par le même outil à la même vitesse d'avance. Les mêmes résultats peuvent s'observer pour l'outil C3.

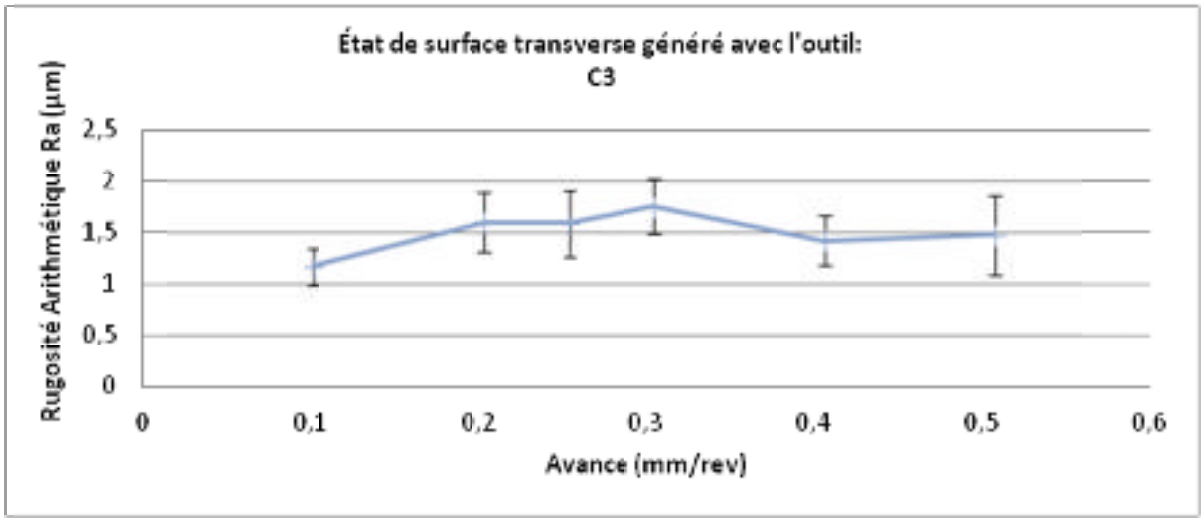


Figure 3.58 Résultats de la rugosité transverse en Ra pour C3

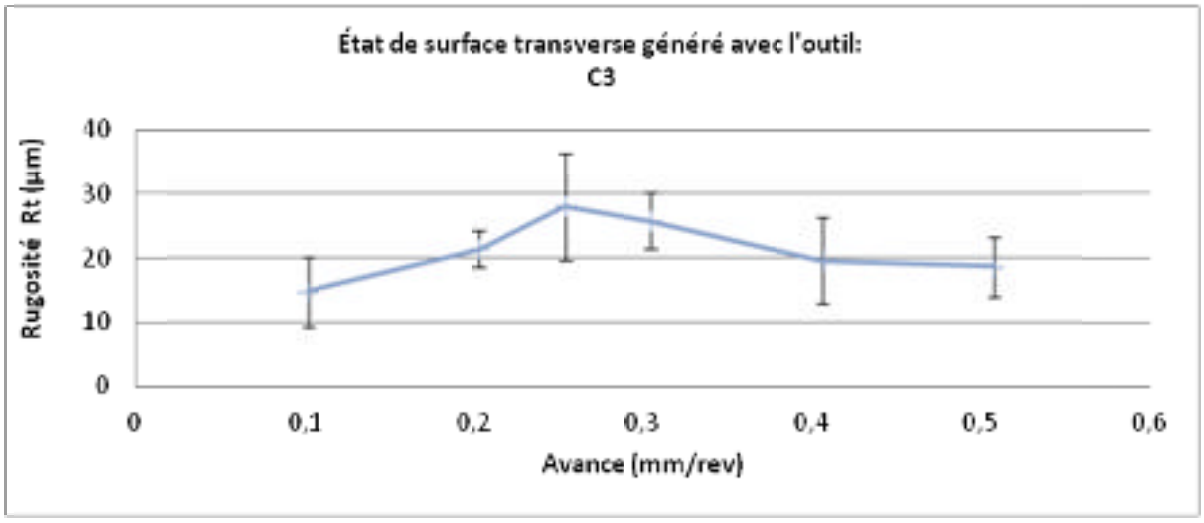


Figure 3.59 Résultats de la rugosité transverse en Rt pour C3

Pour les deux outils étudiés, peu importe l'avance, il est possible de trouver un état de rugosité transverse Ra dans les alentours de 1 à 2.5 microns et Rt de 9 à 36 microns. Ces mesures rendent donc la sélection de paramètres de coupe difficile.

Suite à l'obtention des ces résultats, une série de mesures longitudinales ont donc été effectuées sur les échantillons de la plaque 24 plis produit avec l'outil C1. Les deux graphiques suivants illustrent les résultats de lectures de rugosité Ra et Rt. La sélection de

l'emplacement de la mesure est prise aléatoirement. La prise de mesure est dite aléatoire car l'opérateur du profilomètre ne connait pas l'orientation de la fibre à l'endroit ou le stylet ce dépose et effectue ça lecture.

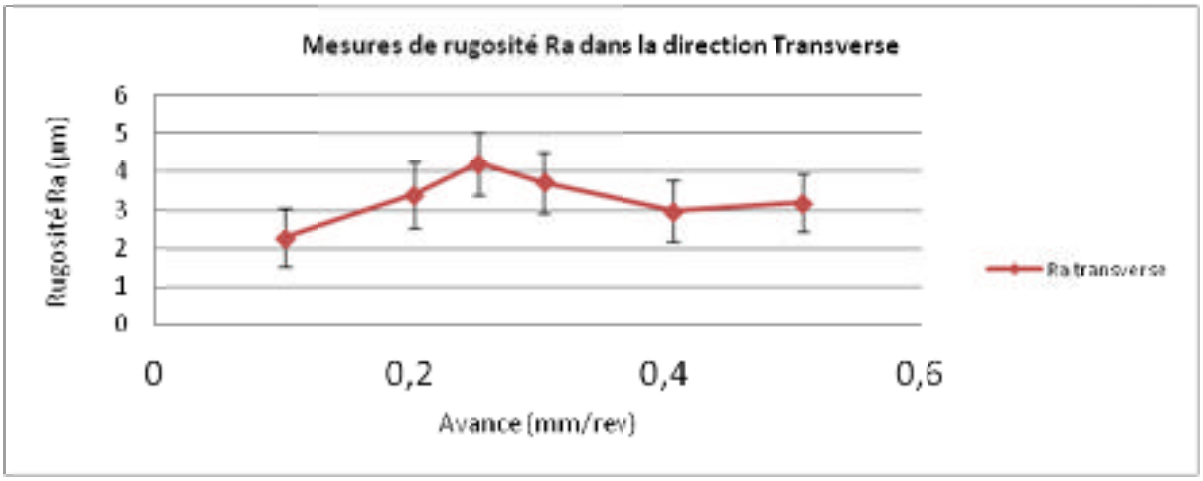


Figure 3.60 Résultats de la rugosité longitudinale en Ra pour C1

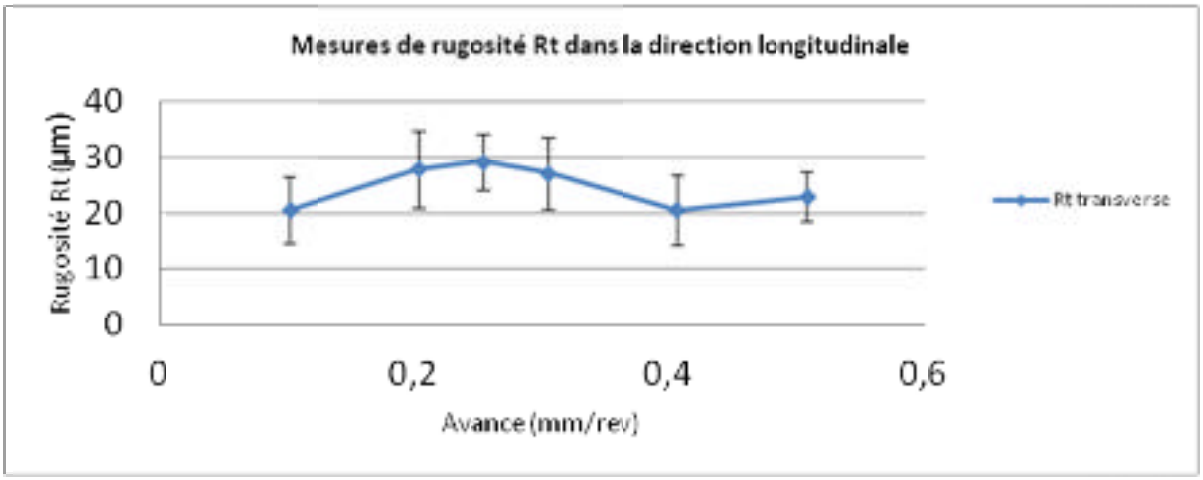


Figure 3.61 Résultats de la rugosité longitudinale en Rt pour C1

3.1.4.7 Résultats des clichés des surfaces au microscope électronique à balayage.

La visualisation des surfaces coupées est nécessaire afin de comprendre ou de trouver une explication fiable aux résultats illustrés dans la section précédente. Plusieurs échantillons

pour les différents outils ont été photographiés. Les figures qui suivent proviennent d'un échantillon produit avec l'outil C1.

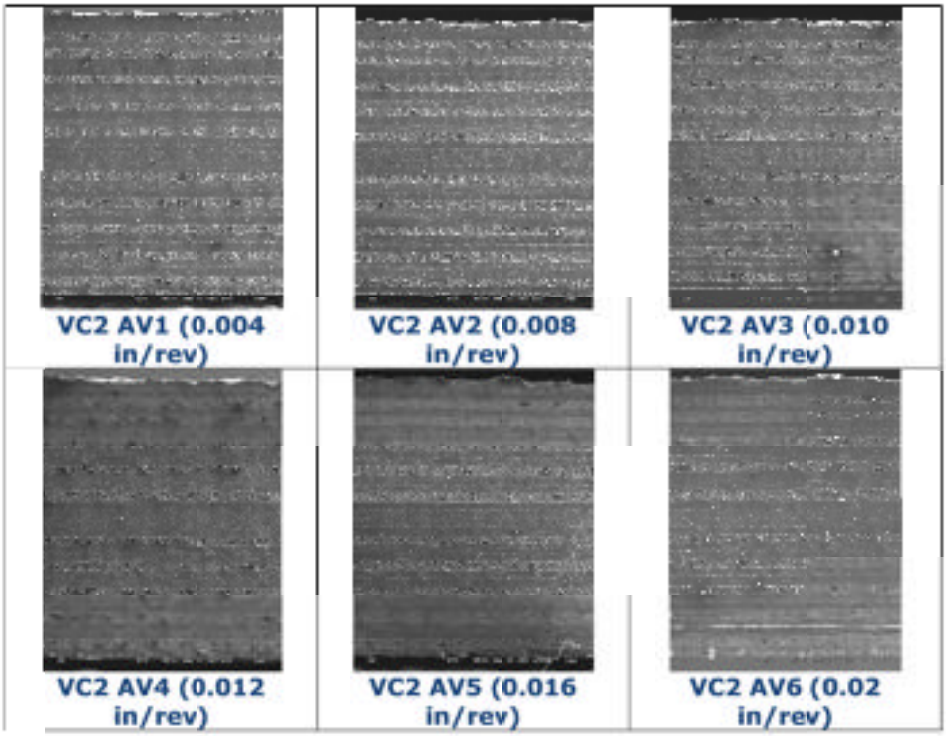


Figure 3.62 Agrandissement des surfaces usinées en opposition avec l'outil C1 et la vitesse de coupe 2

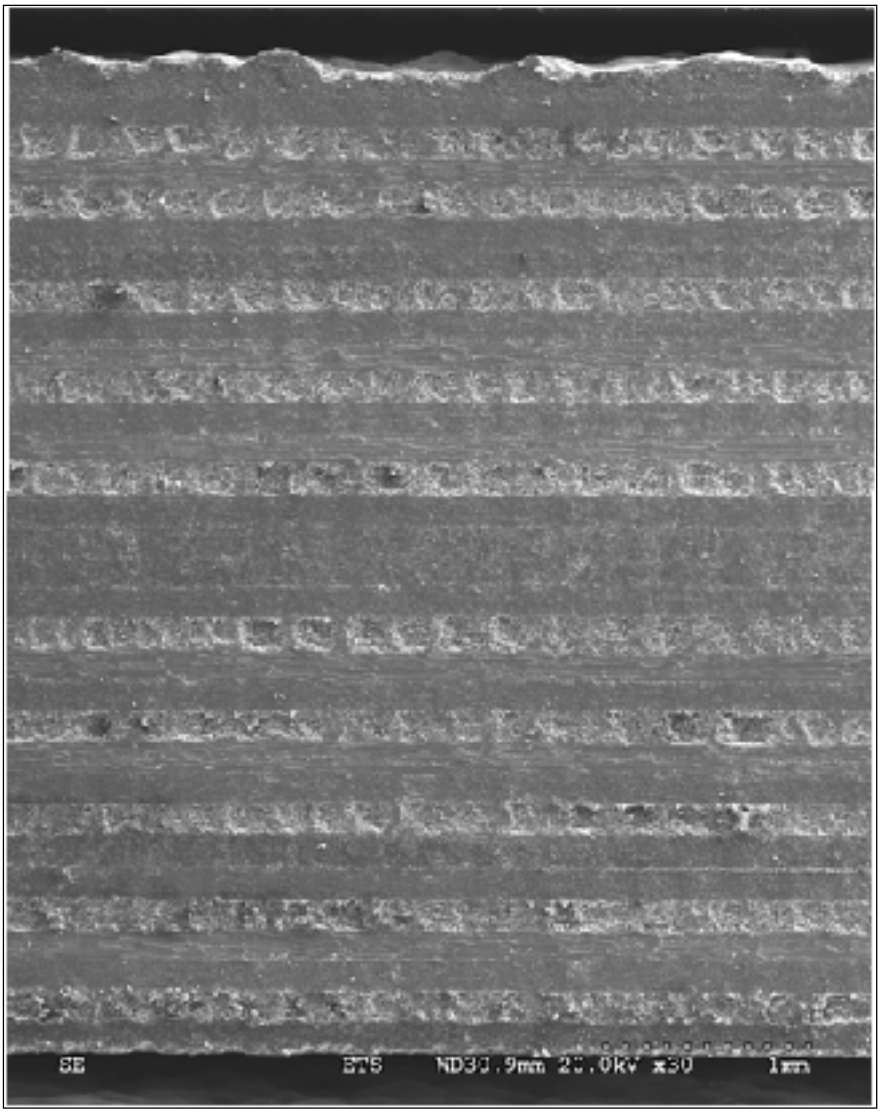


Figure 3.63 Agrandissement à 30 X de la surface machinée par l'outil C1 à la vitesse de coupe 2 pour l'avance 1

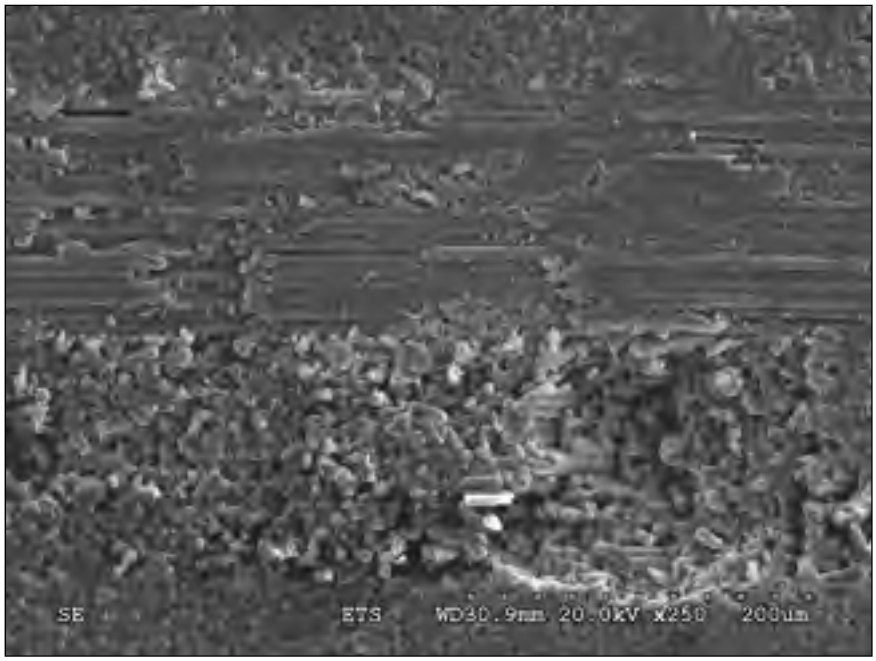


Figure 3.64 Agrandissement de deux plis coupés à VC2, av1
pour une orientation de fibre de 0 et -45 degrés (X 250)

La figure montrant la section globale coupée illustre plusieurs cavités générées par l'usinage sur des plis bien distincts. Suite à un agrandissement, il est possible de constater qu'il se produit de l'arrachement de matière localisé. Le mode de rupture des différentes fibres n'est pas le même, ce qui vient confirmer la théorie des modes de rupture pour un laminé composite. Il se peut que lorsque les mesures de rugosité sont prises, le stylet parcours la surface en passant par une zone avec de l'arrachement de matière. Cette lecture possède alors une rugosité très élevée. Une deuxième lecture peut être faite juste en périphérie de la zone d'arrachement et ainsi obtenir une lecture avec une rugosité plus faible. De ces observations, des mesures pli par pli sont effectuées sur des échantillons coupés par l'outillage C4.

3.1.4.8 Résultats de rugosité pli par pli pour l'outil C4

Afin de réduire le nombre de mesures et d'avoir des résultats significatifs sur la rugosité en fonction de l'orientation, le laminé d'épaisseur de 32 plis a été sélectionné. L'outil C4 est un outil possédant de très bons résultats suite à l'évaluation viso-tactile avec les plaques de références viso-tactiles. L'épaisseur d'un pli, selon la spécification de l'industriel, est en

moyenne de 0.144 millimètre. Un total de douze échantillons a été sélectionné selon la configuration présentée à la Figure 3.65.

Pour chaque avance par révolution, deux vitesses de coupe ont été sélectionnées. Le nombre total de mesure est de 384 lectures. Les graphiques suivants illustrent le profil de rugosité Rt qui est sensiblement constant pour toutes les surfaces analysées. La Figure 3.66 expose deux graphiques de la rugosité Rt et Rv pour des échantillons à des vitesses de coupe et des vitesses d'avance différentes.

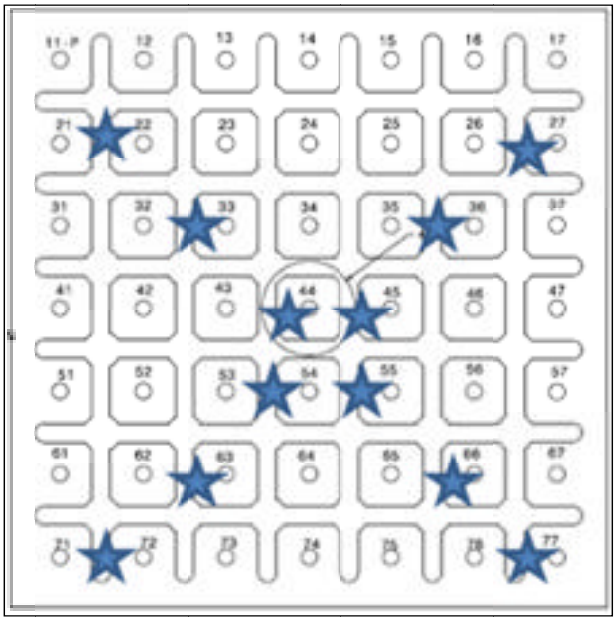
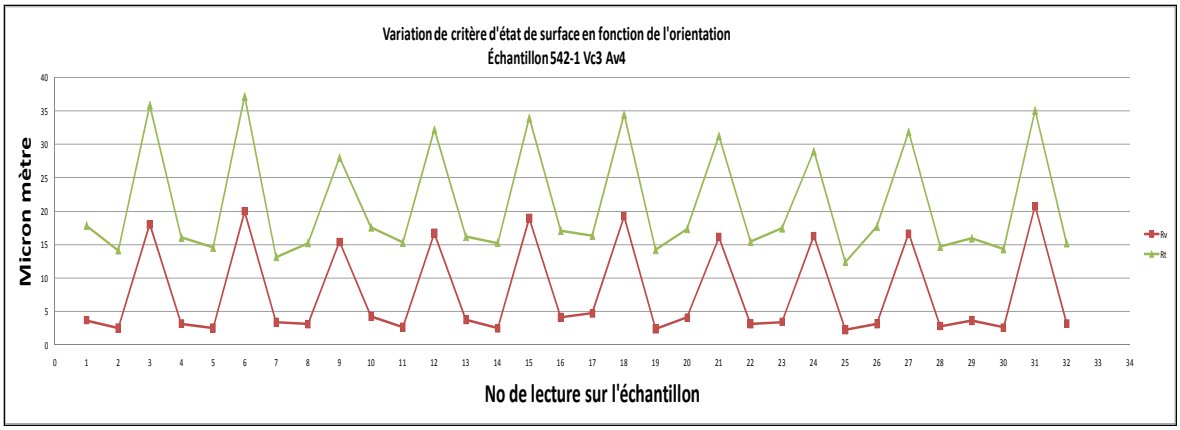


Figure 3.65 Échantillons sélectionnés pour l'évaluation pli par pli de la rugosité



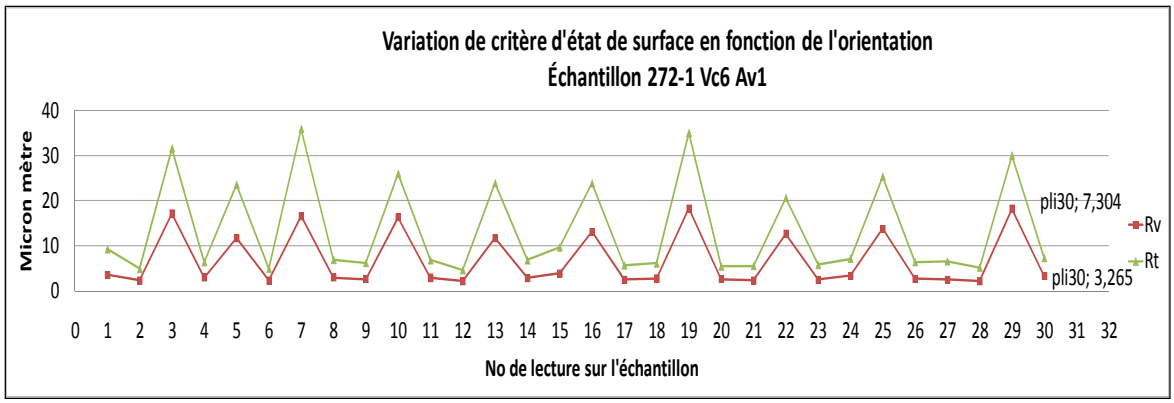


Figure 3.66 Profils de rugosité Rt et Rv pour des conditions de coupes différentes

Le laminé de 32 plis possède 10 plis avec une orientation de -45 degrés en fonction de la direction de coupe. On retrouve 10 sommets coïncidents avec la position de cette orientation dans le laminé coupé. Suite à l'observation des 32 plis des 12 échantillons, on retrouve les résultats suivants en valeur maximale et minimale avec la moyenne des mesures.

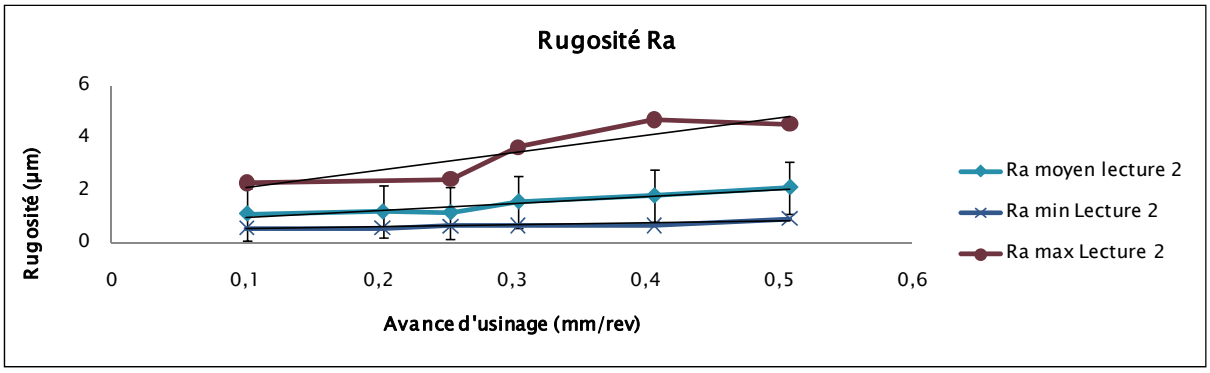


Figure 3.67 Évolution de la rugosité Ra en fonction de l'avance

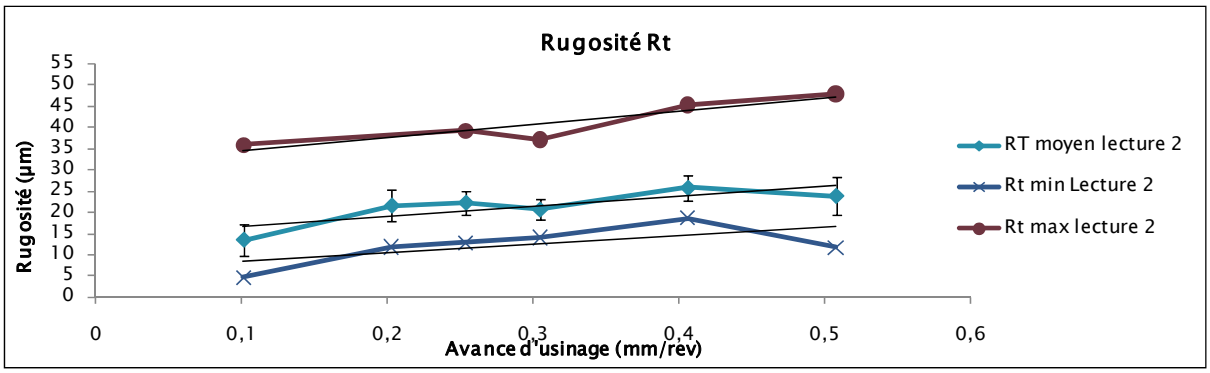


Figure 3.68 Évolution de la rugosité Rt en fonction de l'avance

On observe une progression nette de la rugosité en fonction de l'avance sur la Figure 3.67 et Figure 3.68. La valeur moyenne des 32 lectures par échantillon est relativement proche des valeurs minimum mesurées.

Par la suite, il est possible, et facilement repérable, d'observer les mesures sur une hypothétique orientation. Donc, l'orientation à -45 degrés est l'orientation générant la plus grande rugosité. L'orientation des fibres à 0, 90 et 45 degrés sont les orientations générant les plus faibles valeurs de rugosité. Les graphiques suivant, présentés à la Figure 3.69 et à la Figure 3.70 illustrent les réponses en rugosité en fonction de l'avance pour différentes orientations de fibres.

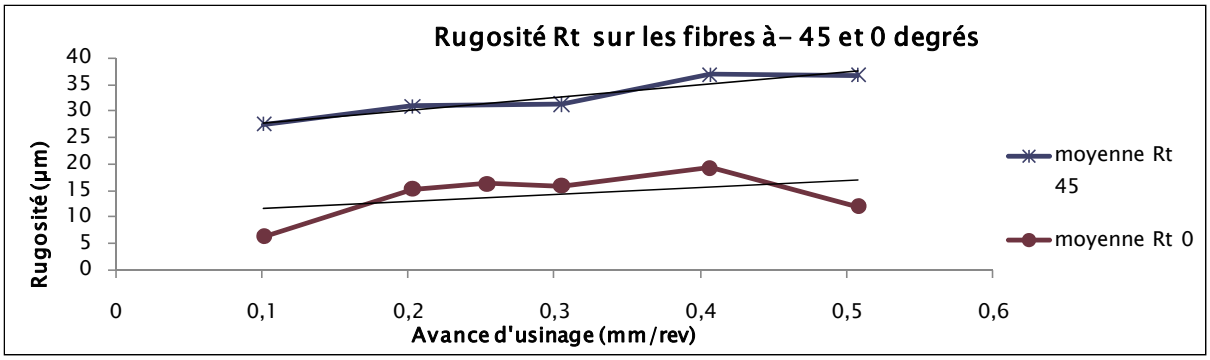


Figure 3.69 Évolution de la rugosité Rt en fonction de l'avance pour différente orientations de fibres

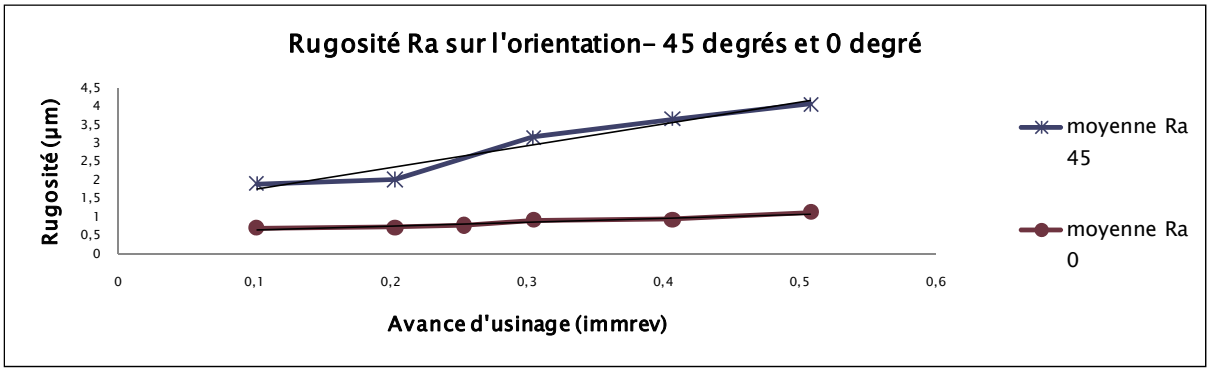


Figure 3.70 Évolution de la rugosité Ra en fonction de l'avance pour différente orientations de fibres

Il devient clair, que l'orientation des fibres induit des rugosités différentes lors du détourage par fraisage des laminés composites.

3.1.5 Génération des défauts lors de l'usinage

3.1.5.1 Analyses non destructives avant la coupe

À l'aide d'un collègue participant au projet CRIAQ, monsieur Louis-Alexandre Généreux, les plaques fabriquées chez le partenaire industriel ont été inspectées à l'aide d'une unité d'inspection aux ultrasons. Les figures suivantes illustrent les résultats obtenus après la compilation des images A,B et C-scan.

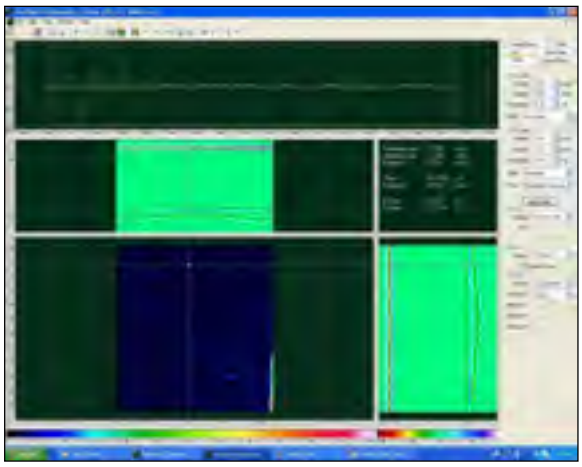


Figure 3.71 Image compilée du C-scan de la plaque 1

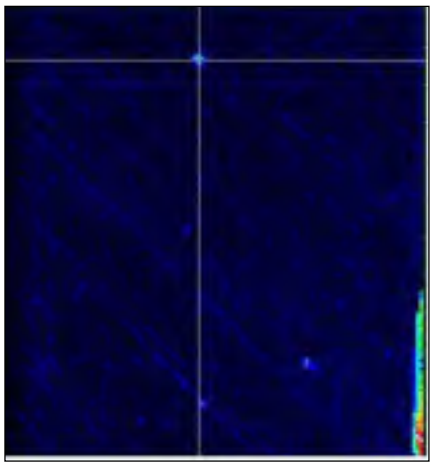


Figure 3.72 Agrandissement de la plaque 1 analysée

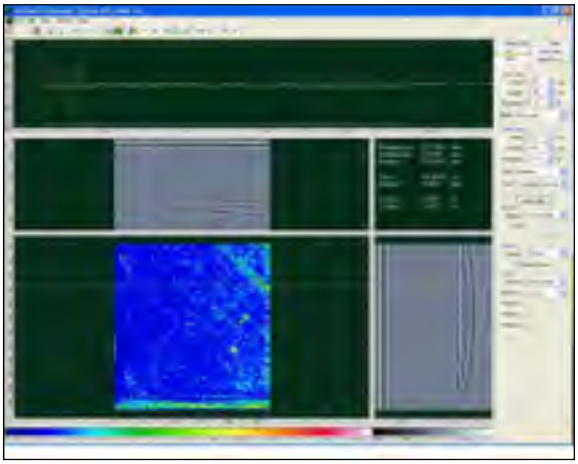


Figure 3.73 Image compilée du C-scan de la plaque 2

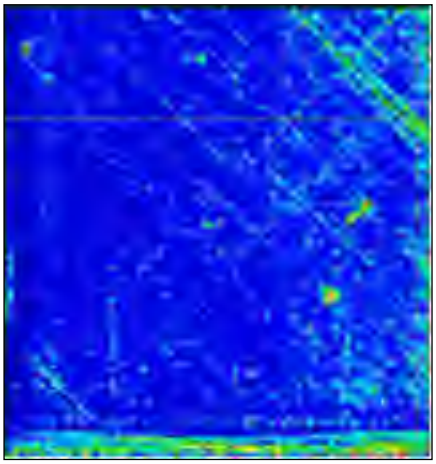


Figure 3.74 Agrandissement de la plaque 2 analysée

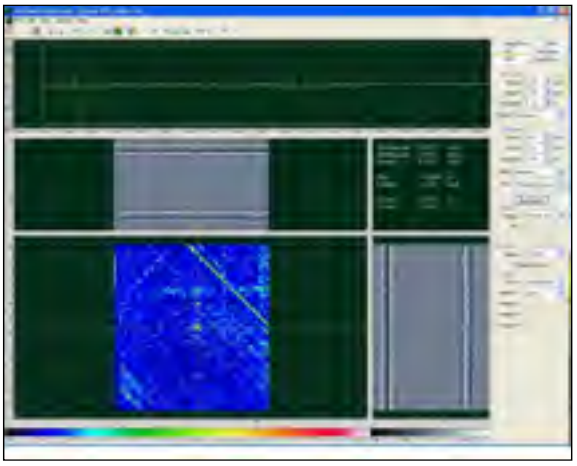


Figure 3.75 Image compilée du C-scan de la plaque 3

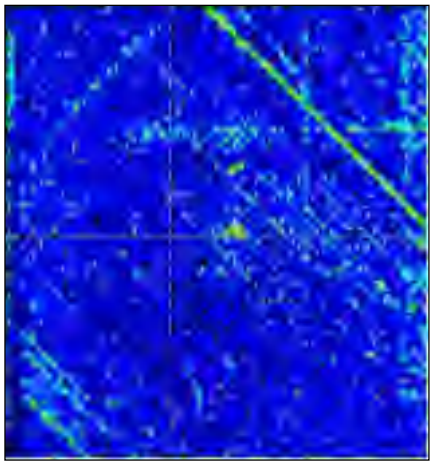


Figure 3.76 Agrandissement de la plaque 3 analysée

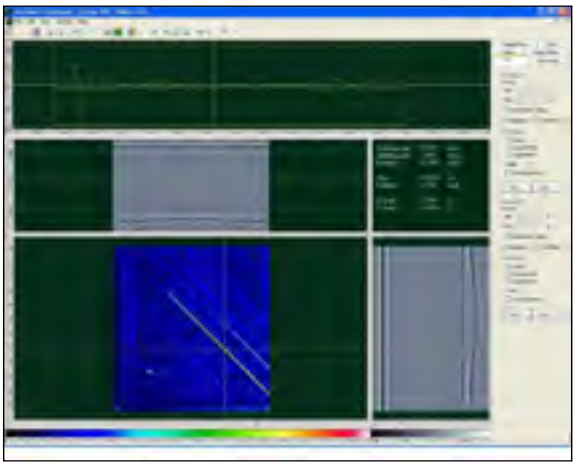


Figure 3.77 Image compilée du C-scan de la plaque 4

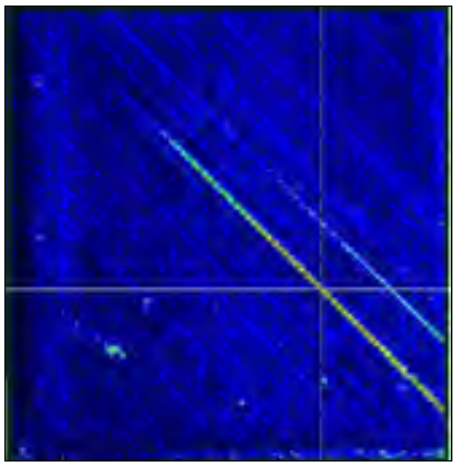


Figure 3.78 Agrandissement de la plaque 4 analysée

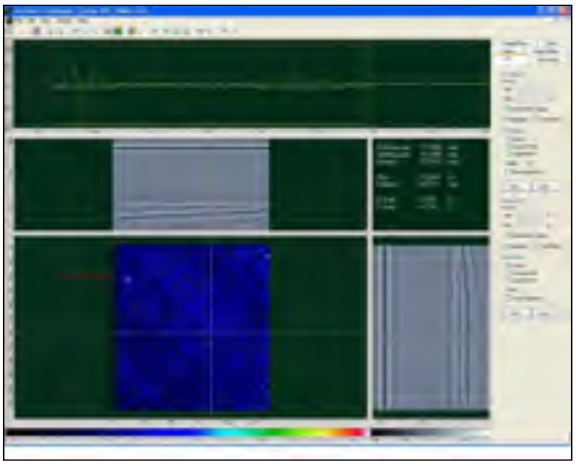


Figure 3.79 Image compilée du C-scan de la plaque 5

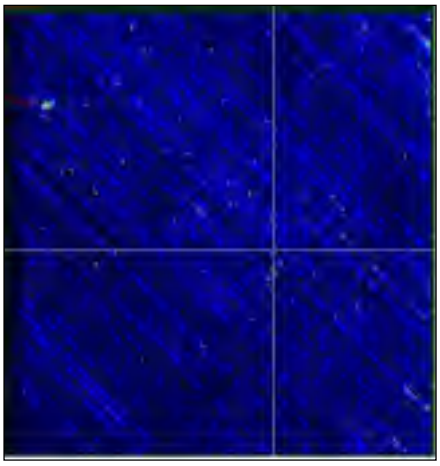


Figure 3.80 Agrandissement de la plaque 5 analysée

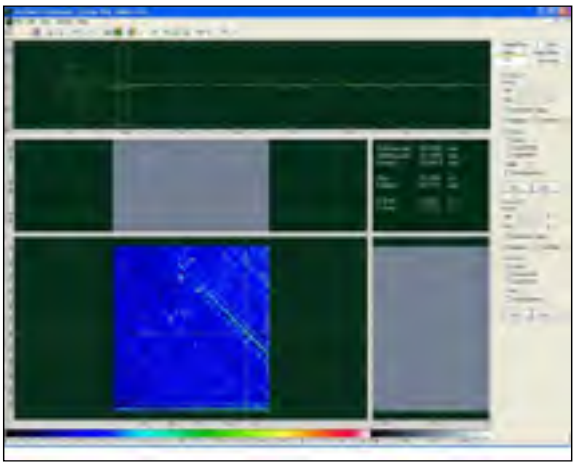


Figure 3.81 Image compilée du C-scan de la plaque 6

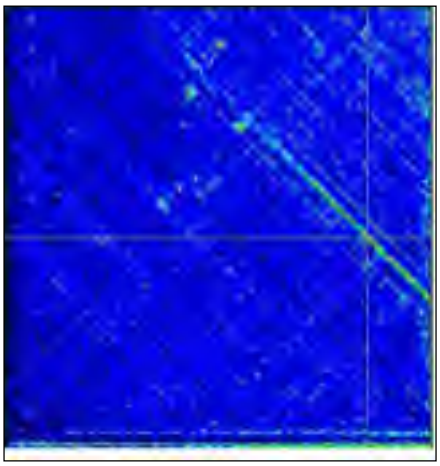


Figure 3.82 Agrandissement de la plaque 6 analysée

Selon les analyses et les spectres sonores évalués par monsieur Généreux, l'intégrité des plaques sont affectées principalement par le mauvais alignement manuel des plis aux orientations de 45 et -45 degrés lors de la fabrication des laminés chez l'industriel. Les plaques 3,4 et 6 possèdent des défauts de positionnement des fibres à -45 degrés. Un seul échantillon par plaque, passe par cette zone. Une recherche approfondie sur ces échantillons sera effectuée. Ayant validé l'intégrité des laminés, le plan d'expérimentation a été effectué

selon la procédure élaborée à la section 2.2.7. La section suivante illustrera les différents défauts obtenus lors de l'usinage.

3.1.5.2 Rebords ébréchés et fibres non coupées

Lors de l'expérimentation des essais de coupe avec les différents fournisseurs d'outils, un seul des fournisseurs a généré la plupart des défauts. L'outil C2 avec les hélices en type chevron, a généré le plus de défauts. La Figure 3.83 et la Figure 3.84 décrivent les différents défauts observés lors de la coupe avec l'outil C2.

Figure 3.83 Délamination à la couche supérieure du laminé

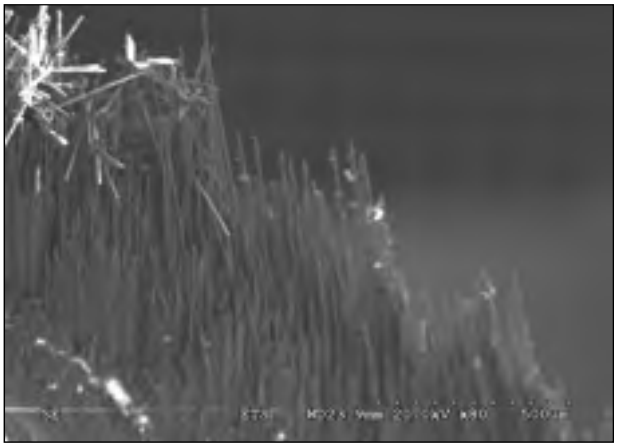


Figure 3.84 Fibres non coupées à la sortie de la coupe.

Le délaminage apparent, survient principalement sur les plis extérieurs non supportés par le gabarit d'usinage. Les fibres non coupées apparaissent lors de la fin des essais de coupe et à la sortie de la coupe de l'échantillon.

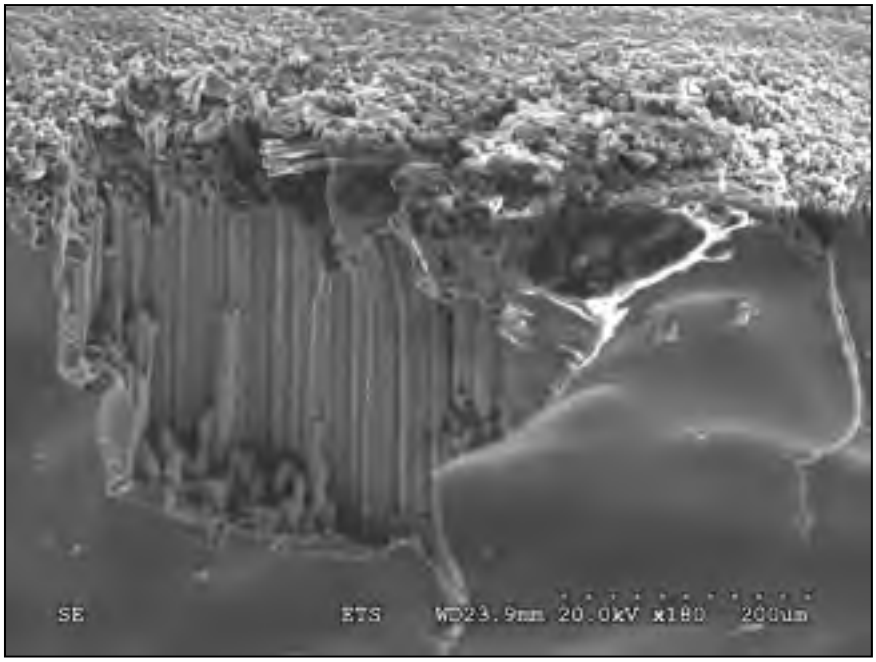


Figure 3.85 Arrachement des la couche externe du laminé

L'arrachement de la matière est survenu sur la couche extérieure du laminé

3.1.5.3 Analyses non destructives après la coupe

L'analyse non destructive post coupe ne sera pas traité dans ce document. Des essais en laboratoire sont effectués afin de valider la méthodologie d'inspection. Vous trouverez dans le mémoire de maîtrise de monsieur Louis-Alexandre Généreux de plus amples informations au sujet de l'analyse non destructive d'une surface usinée par détourage.

Suite à l'observation des images C-scan avant la coupe de la plaque 6, un seul échantillon coupé dans une zone problématique fut observé au microscope électronique à balayage. Visuellement, aucun signe de délaminage n'a pu être observé hors de tout doute raisonnable.

3.2 Résultats de l'expérimentation sur l'effet des paramètres géométriques sur le détourage des laminés composites.

3.2.1 Forces de coupe

Lors de l'expérimentation des essais de coupe avec les outils de coupe ayant des paramètres géométriques variés, le système d'acquisition des efforts de coupe (table dynamométrique), présentait une problématique d'acquisition des forces selon la direction Y. Un amplificateur de signaux faisait défaut. Pour cette raison, les graphiques des efforts de coupe ne présentent pas les efforts selon l'axe Y, représentant les efforts normaux.

Pour chaque outil fabriqué, deux répétitions de coupe sont effectuées. Le traitement des signaux de force est effectué pendant deux révolutions au premier et au deuxième tiers de la coupe. La nomenclature des fichiers décrit les paramètres géométriques utilisés lors de l'expérimentation.

La Figure 3.86 et la Figure 3.88 illustrent le traitement des données effectué par les macros programmées dans le logiciel MATLAB.

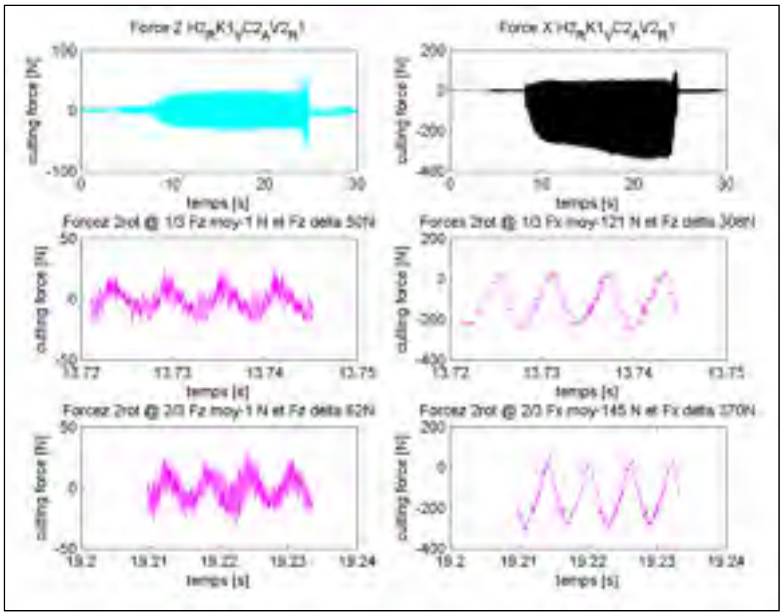


Figure 3.86 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK1 possédant un angle d'attaque de 0 degré et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev

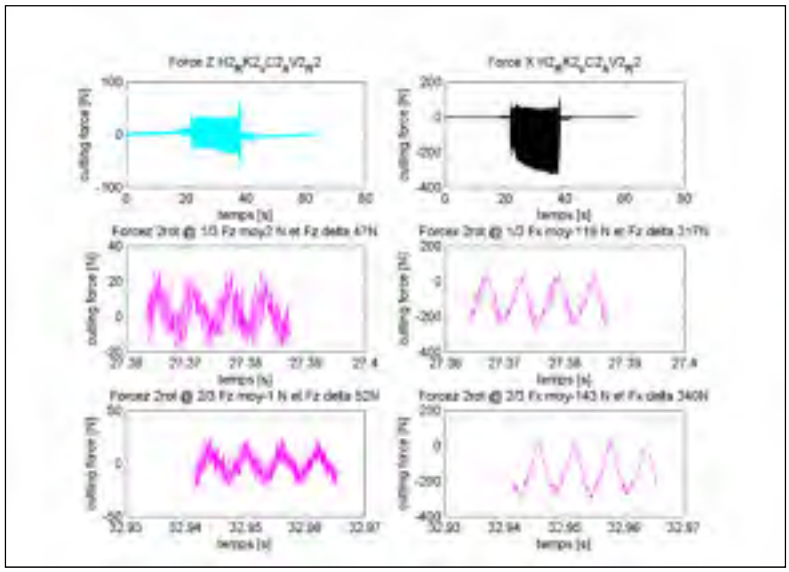


Figure 3.87 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK2 possédant un angle d'attaque de 5 degrés et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev

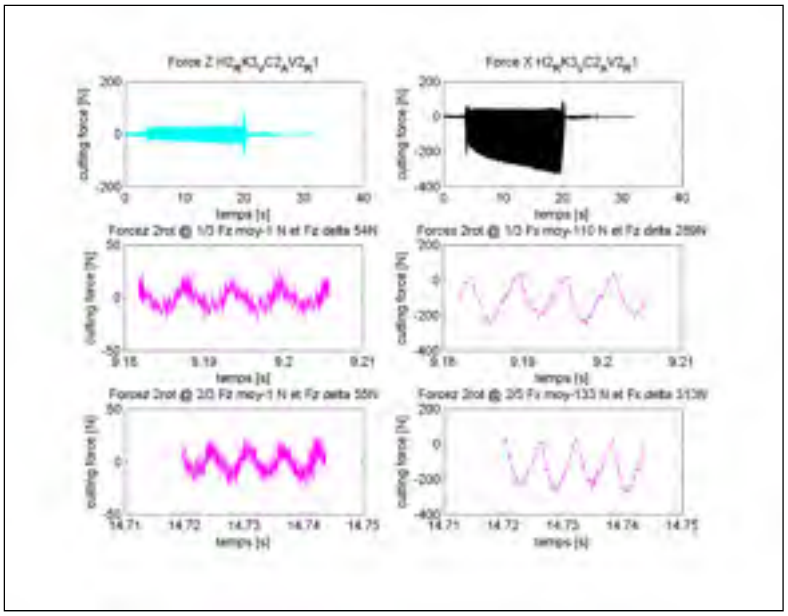


Figure 3.88 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK3 possédant un angle d'attaque de 10 degrés et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev

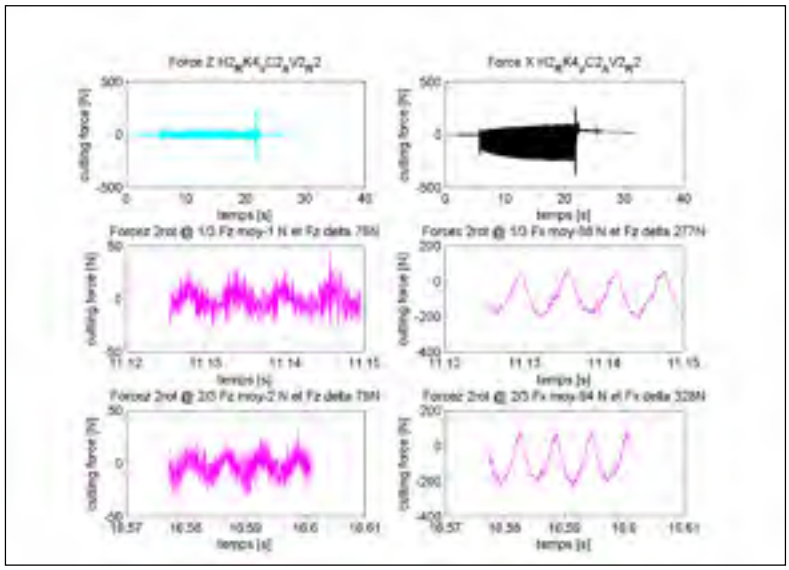


Figure 3.89 Signaux des efforts de coupe avec l'outil H2RK4 possédant un angle d'attaque de 15 degrés et une hélice de 0 degré à la vitesse de coupe de 150 m/min avec une avance de .1016mm/rev

Suite à l'observation des signaux globaux des efforts de coupe dans la direction d'avance X, une augmentation significative de l'amplitude et de la valeur moyenne des forces apparaît

dans le temps. Suite à cette observation, le traitement des signaux devait quantifier cette progression.

Tableau 3.6 Traitement des forces moyennes en direction des X d'un outil avec une hélice neutre (0 degré) avec un angle d'attaque variant de 0 à 15 degrés

TEST	FX MOYEN 1/3 (N)	FX MOYEN 2/3 (N)	% DE VARIATION
H2RK1 VC2 AV2 R1	-121,0	-145,0	19,83%
H2RK1 VC2 AV2 R2	-122,0	-146,0	19,67%
H2RK2 VC2 AV2 R1	-139,0	ERRONÉ	N/A
H2RK2 VC2 AV2 R2	-119,0	-143,0	20,17%
H2RK3 VC2 AV2 R1	-110,0	-133,0	20,91%
H2RK3 VC2 AV2 R2	-108,0	-132,0	22,22%
H2RK4 VC2 AV2 R1	-85,0	-84,0	1,18%
H2RK4 VC2 AV2 R2	-88,0	-94,0	6,82%
MOYENNE	-111,5	-125,3	15,83%
ECART-TYPE	18,1	25,6	8,29%

Tableau 3.7 Traitement des amplitudes de forces en direction des X d'un outil avec une hélice neutre (0 degré) avec un angle d'attaque variant de 0 à 15 degrés

TEST	FX AMP 1/3 (N)	FX AMP 2/3 (N)	% DE VARIATION
H2RK1 VC2 AV2 R1	308,0	370,0	20,13%
H2RK1 VC2 AV2 R2	318,0	376,0	18,24%
H2RK2 VC2 AV2 R1	324,0	ERRONÉ	N/A
H2RK2 VC2 AV2 R2	317,0	340,0	7,26%
H2RK3 VC2 AV2 R1	289,0	313,0	8,30%
H2RK3 VC2 AV2 R2	282,0	318,0	12,77%
H2RK4 VC2 AV2 R1	325,0	341,0	4,92%
H2RK4 VC2 AV2 R2	277,0	328,0	18,41%
MOYENNE	305,0	340,9	12,86%
ECART-TYPE	19,5	24,3	6,16%

La variation des forces moyennes d'avance est d'environ 15% incluant les valeurs extrêmes des huit tests de coupe. La variation d'amplitude suit la même tendance de variation avec un pourcentage moyen de 13%. Vous trouverez en ANNEXE IV tous les graphiques compilés ayant servis au traitement des résultats d'efforts de coupe.

Le traitement des résultats permet, à l'aide d'outil statistique, de prédire une surface de réponse pour des paramètres de coupe donnés avec la variation des paramètres géométriques.

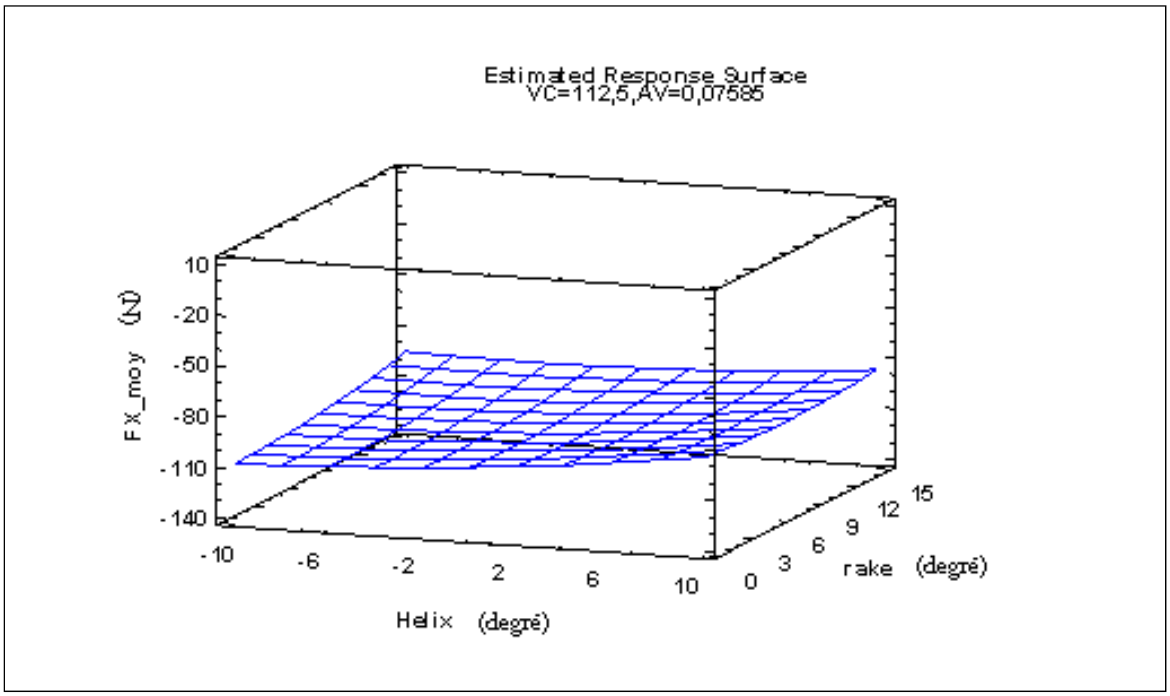


Figure 3.90 Graphique de la surface de réponse à une vitesse de coupe de 112.5 m/min avec une avance 0.075mm/revolution

Une plus grande attention sur l'analyse statistique sera portée dans la section suivante.
En plus des efforts de coupe, les surfaces générées par l'usinage est un critère important dans l'évaluation d'une coupe.

3.2.2 Défauts de surface

Les défauts de surface observés sont principalement des observations qualitatives dans l'intégrité de la coupe de l'échantillon sans laisser de brins de fibres de carbone non tranchés. Les figures qui suivent illustrent le type de fibres non coupées.

Figure 3.91 Fibres de carbone non tranchées vues de l'intérieur de la face coupée

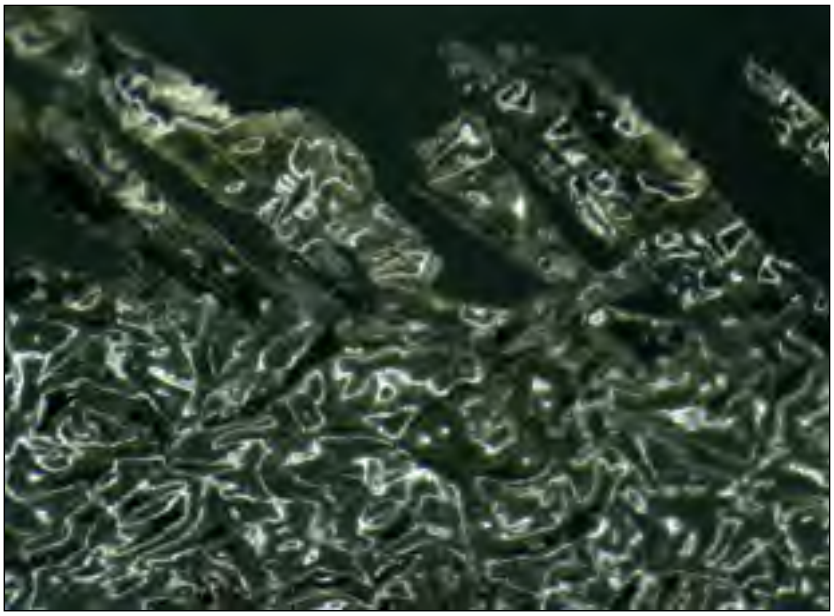


Figure 3.92 Fibres de carbone non tranchées vues de l'extérieur de la face coupée

Les résultats quantitatifs de ces observations consistent à mesurer la distance du début de la coupe non complète sur la globalité de la surface ainsi que la longueur de fibres non coupées en partant de la surface machinée. La coupe non complète est définit par l'effilochage des fibres aux plis externe que l'outil n'a pu couper tel qu'illustré à la Figure 3.92.

Sur la multitude d'essais effectués, seulement 16 essais de coupe ont produits une coupe complète et globale intègre sans génération de défauts.

Tableau 3.8 Récapitulatif des essais de coupe ayant générés une coupe sans défaut.

#	Tool no	Helic	Rake	VC	Av	REP	HAUT	LONGUEUR	LARGEU	BAS	LONGUEU	LARGEU
4	EMC375-2F1-4	10	0	150	0,004	R1	N	0	0	N	0	0
7	EMC375-2F2-3	10	5	150	0,002	R1	N		0	N		
13	EMC375-2F4-1	10	15	75	0,002	R1	N		0	N		
20	F5-4	0	0	150	0,004	R2	N		0	N		
26	EMC375-2F7-2	0	10	75	0,004	R1	N		0	N		
26	F7-2	0	10	75	0,004	R2	N		0	N		
27	EMC375-2F7-3	0	10	150	0,002	R1	N		0	N		
32	EMC375-2F8-4	0	15	150	0,004	R1	N		0	N		
35	EMC375-2F9-3	-10	0	150	0,002	R1	N		0	N		
38	EMC375-2F10-2	-10	5	75	0,004	R1	N		0	N		
42	EMC375-2F11-2	-10	10	75	0,004	R1	N		0	N		
42	F11-2	-10	10	75	0,004	R2	N		0	N		
44	F11-4	-10	10	150	0,004	R2	N		0	N		
46	EMC375-2F12-2	-10	15	75	0,004	R1	N		0	N		
48	EMC375-2F12-4	-10	15	150	0,004	R1	N		0	N		
48	F12-4	-10	15	150	0,004	R2	N		0	N		

De ce tableau récapitulatif, les modes de chacun des paramètres variés sont traités. Selon ces résultats, un outil possédant un angle d'hélice à -10 degrés, un angle de coupe de 10 degrés opéré à une vitesse de coupe à 150m/min avec une avance de .01016 mm/révolution semble produire les meilleurs résultats de coupe.

Lors de l'observation des progressions des efforts de coupe dans le temps ainsi que le nombre assez élevé d'échantillons possédant des défauts d'usinage présentés dans les sous-sections précédentes, il devenait impératif d'observer l'usure de l'outil après les coupes.

3.2.3 Observation de l'usure de l'outillage

L'usure des outils fut observée pour tous les outils de manière systématique par une évaluation visuelle. À la lumière des résultats d'observation, tous les outils utilisés ont une usure significative dans les zones utilisées de l'arête tranchante. Les figures qui suivent illustrent l'usure par abrasion des carbures sous l'effet des fibres de carbone tranchées.

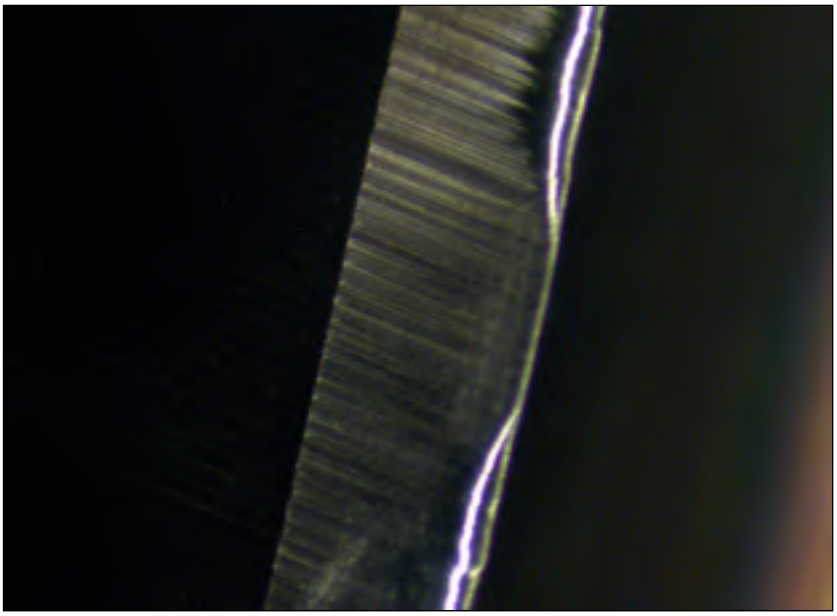


Figure 3.93 Arête tranchante usée après les deux répétitions (X25)

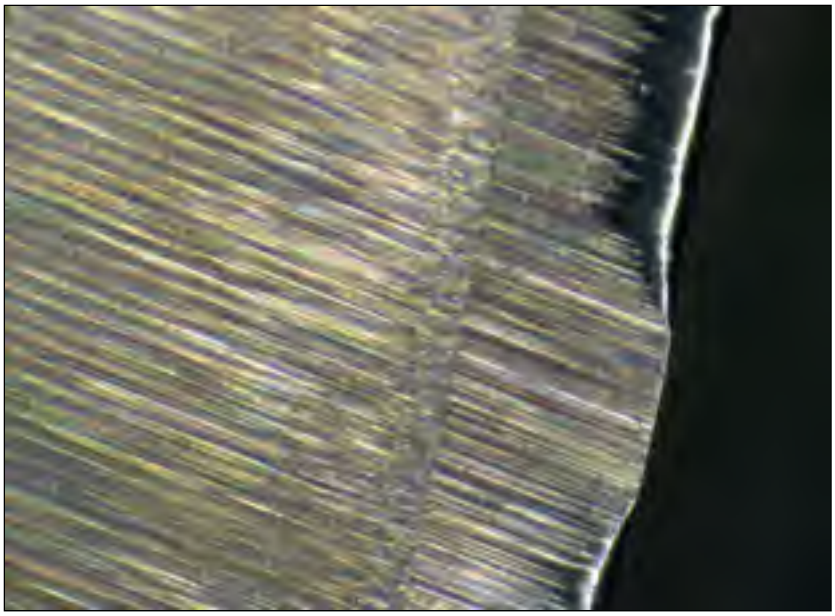


Figure 3.94 Agrandissement de la jonction de l'arête tranchante usée et la portion de l'outil non utilisée (X50)

En prenant comme référence l'arête non usée avec la longueur de la face de dépouille de l'outil, il est possible de calculer le pourcentage de l'arête usée. Dans ce cas bien précis, une usure d'environ 15% de la dépouille est faite. Le suivi de l'usure n'a pas été fait dans le

cadre de ce travail. Il est clair que ce type d'usure affecte l'efficacité d'un outil à bien trancher la matière et à produire un état et une qualité de surface de haute qualité.

Suite à la présentation des résultats, la section suivante illustre le raisonnement d'analyse permettant de sélectionner parmi les fournisseurs d'outils testés le meilleur outil lors des tests du premier plan d'expérience et de retrouver les paramètres géométriques les plus appropriés pour la conception d'un outil de coupe dédié au détourage, provenant du second plan d'expérience.

CHAPITRE 4

ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Identification de la performance de l'outillage de coupe

4.1.1 Paramètres influents et équations de prédiction des efforts de coupe

Lors de l'expérimentation des essais de coupe en vue d'évaluer la performance d'un outil de coupe, les efforts de coupe, selon les trois directions spatiales, ont été enregistrés et traités. L'analyse portée sur ces données consiste à évaluer les paramètres les plus influents et en ressortir les équations de prédiction des efforts de coupe en fonction des coefficients de régression retrouvés dans les analyses statistiques. Une comparaison entre les modèles d'ordre 2 et du premier ordre sera effectuée.

L'objectif est d'établir une évaluation de paramètres de coupe générant les plus faibles efforts de coupe à un même taux d'enlèvement de matière, qui définit le potentiel du tranchant de l'outil et sa capacité à usiner à haute vitesse d'avance.

4.1.1.1 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C1

L'analyse effectuée dans ce travail évalue la variance selon, si possible, deux modèles afin d'observer les interactions entre les facteurs variés dans le plan d'expérimentation. Nous nous limiterons aux modèles simplifiés du premier ordre ainsi que du second degré.

Les tableaux qui suivent illustrent les valeurs statistiques obtenues pour le modèle du second ordre sur l'analyse ANOVA pour l'outil C1.

Tableau 4.1 ANOVA sur FX pour l'outil C1 R2=98.003 modèle du second degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	1540,25	1	1540,25	14,71	0,0002
B:AV	349883	1	349883	3341,83	0
C:PLY	126776	1	126776	1210,87	0
AA	364,702	1	364,702	3,48	0,065
AB	247,643	1	247,643	2,37	0,1273
AC	288,748	1	288,748	2,76	0,1
BB	4009,69	1	4009,69	38,3	0
BC	19882,1	1	19882,1	189,9	0
CC	3602,74	1	3602,74	34,41	0

Tableau 4.2 ANOVA sur FX pour l'outil C1 R2=92.48 modèle du premier degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	1446,05	1	1446,05	3,89	0,0512
B:AV	349739	1	349739	940,94	0
C:PLY	124276	1	124276	334,35	0

Tableau 4.3 ANOVA sur FY pour l'outil C1 R2= 58.5 modèle du second degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	111095	1	111095	33,3	0
B:AV	132047	1	132047	39,58	0
C:PLY	95211,2	1	95211,2	28,54	0
AA	936,362	1	936,362	0,28	0,5974
AB	5574,1	1	5574,1	1,67	0,1992
AC	2406,38	1	2406,38	0,72	0,3978
BB	22088	1	22088	6,62	0,0116
BC	5081,1	1	5081,1	1,52	0,2201
CC	104834	1	104834	31,43	0

Tableau 4.4 ANOVA sur FY pour l'outil C1 R2=40.70 modèle du premier degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	108727	1	108727	24,17	0
B:AV	121915	1	121915	27,1	0
C:PLY	90557,5	1	90557,5	20,13	0

Tableau 4.5 ANOVA sur FZ pour l'outil C1 R2 =51.84 modèle du second degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	513,186	1	513,186	23,86	0
B:AV	887,994	1	887,994	41,28	0
C:PLY	405,259	1	405,259	18,84	0
AA	105,666	1	105,666	4,91	0,029
AB	152,922	1	152,922	7,11	0,009
AC	104,419	1	104,419	4,85	0,0299
BB	9,71674	1	9,71674	0,45	0,5031
BC	6,09793	1	6,09793	0,28	0,5956
CC	209,05	1	209,05	9,72	0,0024

Tableau 4.6 ANOVA sur FZ pour l'outil C1 R2=38.42 modèle du premier degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	487,225	1	487,225	18,79	0
B:AV	825,208	1	825,208	31,83	0
C:PLY	369,641	1	369,641	14,26	0,0003

Tableau 4.7 ANOVA sur FC pour l'outil C1 R2= 72.53 modèle du second degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	876073	1	876073	82,57	0
B:AV	319272	1	319272	30,09	0
C:PLY	1,42E+06	1	1,42E+06	133,91	0
AA	16116,1	1	16116,1	1,52	0,2207
AB	37404,9	1	37404,9	3,53	0,0634
AC	184145	1	184145	17,36	0,0001
BB	47369,6	1	47369,6	4,46	0,0371
BC	12103,4	1	12103,4	1,14	0,2881
CC	1980,17	1	1980,17	0,19	0,6667

Tableau 4.8 ANOVA sur FC pour l'outil C1 R2=64.63 modèle du premier degré

Source	Somme des carrés	Degrés	Moyenne carré	F-Ratio	P-Value
A:VC	853166	1	853166	66,27	0
B:AV	285364	1	285364	22,17	0
C:PLY	1,31E+06	1	1,31E+06	101,59	0

Ce qui ressort des analyses ANOVA sur les efforts de coupe selon l'avance (FX), la normale (FY) ,l'axe de l'outil (FZ) et les efforts instantanés (FC) sont que les paramètres, tels que la

vitesse de coupe (VC), l'avance (AV) et le nombre de plis (PLY) sont les facteurs dominants et que leur interaction entre eux ou mis au carré ne sont pas les plus significatifs. Malgré un R carré faible (voir les tableau 4.1 àtableau 4.8), la valeur du facteur P tend vers 0, signifiant leur importance dans le phénomène de coupe. La corrélation pour les efforts de coupe dans la direction de l'avance (X) représente seulement que le modèle est très près des valeurs expérimentales acquises.

En comparant les surfaces de réponse des modèles linéaire et du second ordre, l'interaction des facteurs devient plus significative pour les forces selon la normale (FY) et la force axiale (FZ). Les figures qui suivent exposent les différentes surfaces de réponse des analyses.

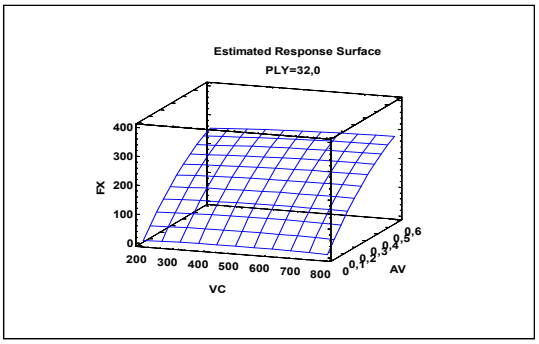


Figure 4.1 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre

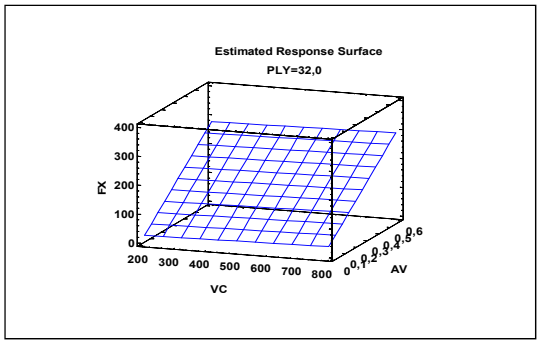


Figure 4.2 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre

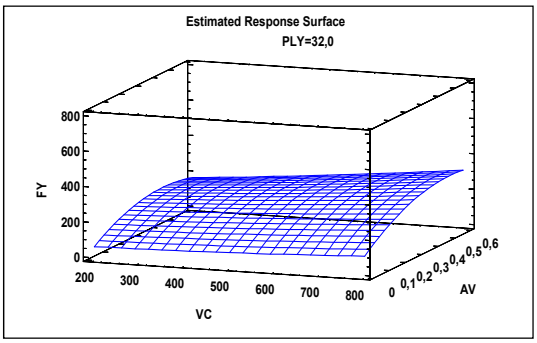


Figure 4.3 Surface de réponse de FY pour le modèle du second ordre

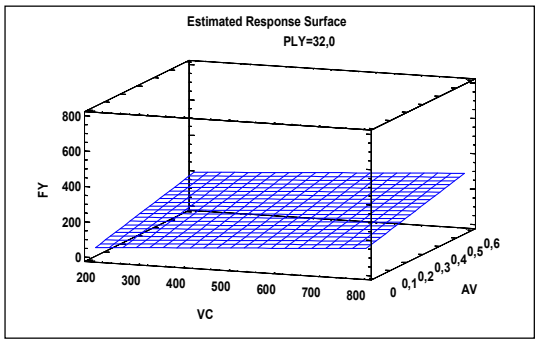


Figure 4.4 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre

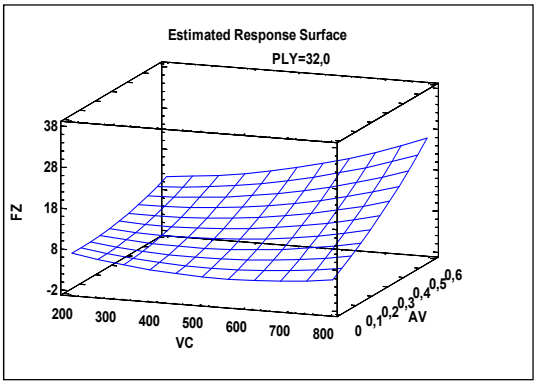


Figure 4.5 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre

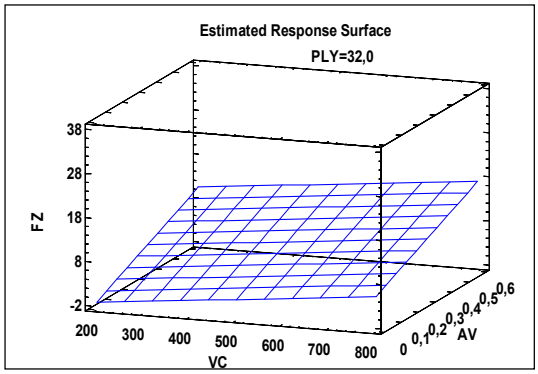


Figure 4.6 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre

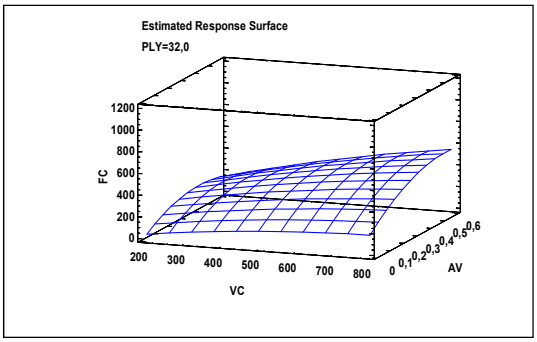


Figure 4.7 Surface de réponse de FC pour le modèle du second ordre

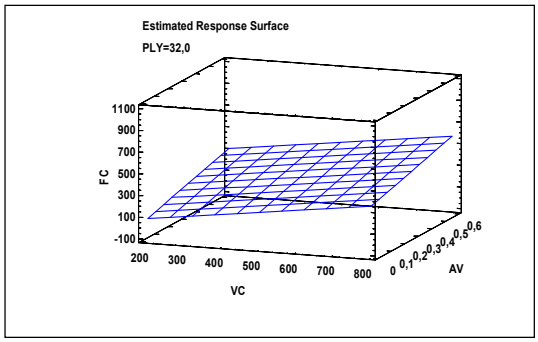


Figure 4.8 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre

Malgré la représentation plus fidèle du modèle du second ordre, la représentation linéaire de l'évolution des efforts de coupe est de loin plus facile à utiliser pour des fins de comparaison et de compréhension, car la représentation du nombre de pli au carré n'a pas de signification réelle sauf en exploitant son épaisseur linéaire non constante. Pour cette raison, des équations du premier ordre seront utilisées afin de comparer, au même taux d'enlèvement de matière les outils entre eux. Les équations suivantes en (4.1) représentent les équations de prédiction pour l'évaluation des efforts de coupe selon les différentes directions et les forces instantanées FC.

$$
\begin{aligned}
FX &\approx -147 + 0{,}018VC + 429AV + 5{,}2*PLY \\
FY &\approx -124 + 0{,}156VC + 253{,}5AV + 4{,}4*PLY \\
FZ &\approx -12{,}6 + 0{,}01VC + 20{,}85AV + 0{,}28*PLY \\
FC &\approx -545 + 0{,}44VC + 388AV + 16{,}8*PLY
\end{aligned}
\tag{4.1}
$$

À l'aide de ces équations, il sera possible d'évaluer les efforts moyens dans les différentes directions ainsi que les efforts instantanés de coupe selon les différentes configurations des paramètres de coupe ainsi qu'avec le nombre de plis du laminé.

4.1.1.2 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C2

Vous trouverez dans les trois prochaines sous sections les images relatives aux surfaces de réponses et les valeurs P pour les facteurs significatifs ainsi que les équations de régression

des modèles du premier ordre. Lors de l'analyse des résultats effectuée pour l'outil C2, une différence entre le modèle du second ordre et du premier ordre apparaît. Cette différence est peu perceptible pour les efforts dans la direction des X. La Figure 4.9 et la Figure 4.10 représentent respectivement la surface du second et du premier ordre. Globalement, la progression est constante et la vitesse de coupe interagit moins que l'avance et le nombre de plis. Par contre, pour les graphiques des surfaces de réponse des forces FY, FZ, présentées par la Figure 4.11, par la Figure 4.12, par la Figure 4.13 et par la Figure 4.14les efforts à l'intérieur du domaine de test présentent des efforts de coupe beaucoup plus élevés que ce que produit les modèles du premier ordre, ce qui peut, avantager la sélection de l'outil C2 car l'objectif est de minimiser les efforts de coupe pour le même taux d'enlèvement de matière. Dans la section « Comparaison de l'outillage », les plages opératoires dictées par les résultats de la dynamique de coupe seront employées afin de comparer la performance des outils testés.

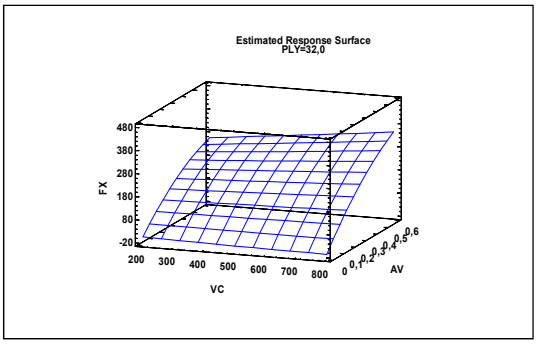


Figure 4.9 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre

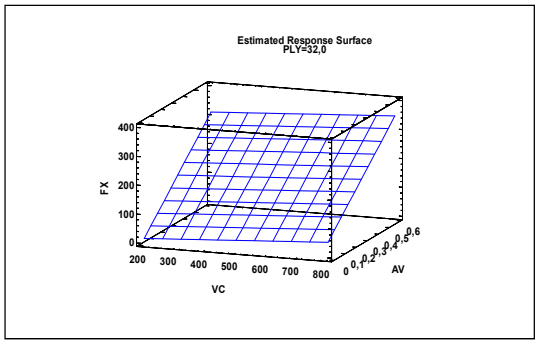


Figure 4.10 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre

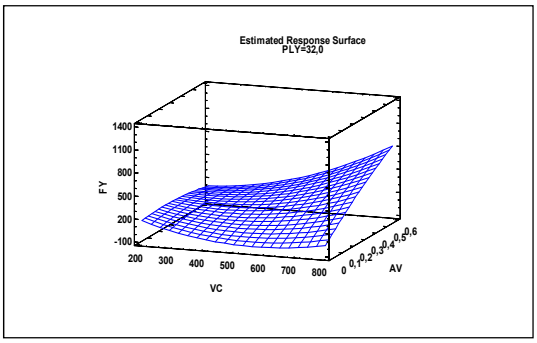


Figure 4.11 Surface de réponse de FY pour le modèle du second ordre

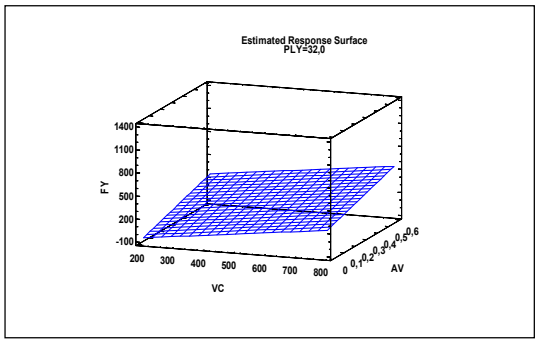


Figure 4.12 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre

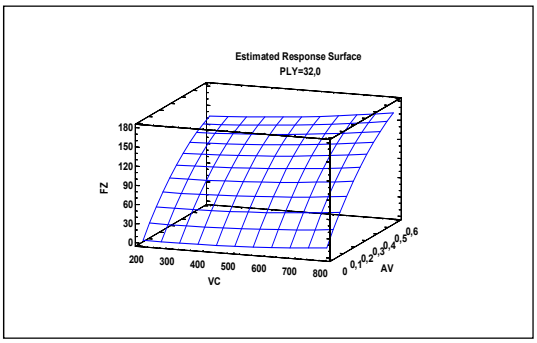


Figure 4.13 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre

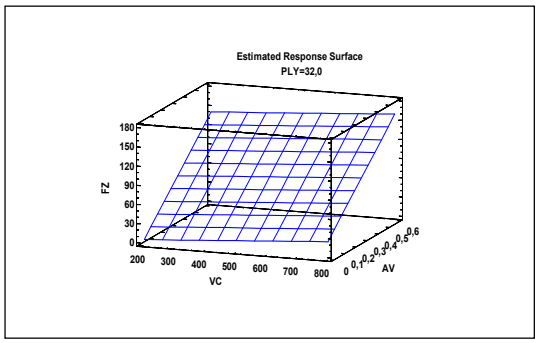


Figure 4.14 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre

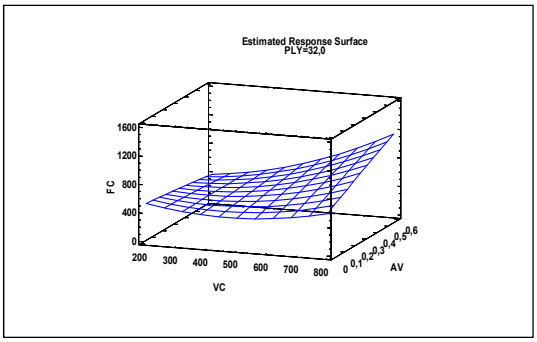


Figure 4.15 Surface de réponse de FC pour le modèle du second ordre

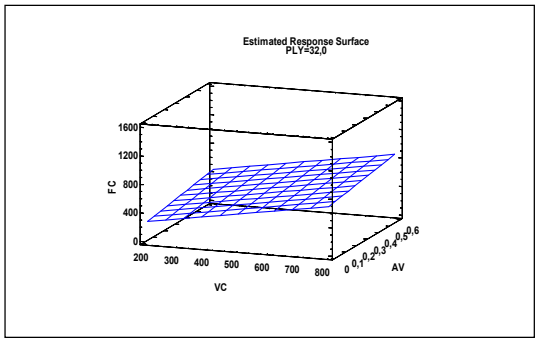


Figure 4.16 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre

Les coefficients de régression du modèle du deuxième ordre pour l'outil C2 sont plus élevés que les coefficients de régression de l'outil C1. Ce qui explique que les modèles présentés sont plus fiable d'un point de vue pratique. Par contre, il y a une chute drastique de ces mêmes coefficients pour le modèle du premier ordre. Le tableau suivant illustre les coefficients de régression des différents modèles selon les analyses de la variance.

Tableau 4.9 Résultats des coefficients de régression pour les deux modèles pour l'outil C2

Modèles	R carré			
	FX	FY	FZ	FC
Modèle du premier ordre	87,01	44,6	76,2	29,4
Modèle du second ordre	92,78	79,8	83,75	61

Les équations de prédiction des efforts de coupe visant à évaluer l'outil C2 sont présentées ci-dessous.

$$
\begin{aligned}
FX &\approx -176 + 0{,}06VC + 500AV + 5{,}5*PLY \\
FY &\approx -538 + 0{,}47VC + 537AV + 12{,}1*PLY \\
FZ &\approx -23{,}5 + 0{,}03VC + 230AV + 0{,}66*PLY \\
FC &\approx 133 + 0{,}68VC + 311AV - 0{,}02*PLY
\end{aligned}
\tag{4.2}
$$

Il est important de garder en mémoire que ces modèles de prédiction ne sont valides que dans le domaine d'expérimentation du plan de test. Il fait peu de sens qu'il y ait des efforts de coupe non nuls lorsque tous les paramètres de l'équation sont à zéro.

Il est, par ailleurs, intéressant de constater que la forme des surfaces de réponse du modèle du second ordre de l'outil C1 et de l'outil C2 est différente sauf pour les efforts dans la direction X. Le comportement des outils dans les mêmes plages opératoires diffère affichant des extrémums à des endroits différents et un sens de courbure opposé. En raison des propriétés géométriques distinctes de chaque outil, il est possible que ces variations soient induites par le nombre de dents, l'angle d'hélice et tous les autres paramètres géométriques.

4.1.1.3 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C3

En raison d'un problème d'expérimentation pour l'usinage de la plaque P1, possédant 24 plis, il est impossible d'obtenir un modèle du second ordre car il ne reste que deux niveaux au facteur PLY dans l'évaluation des efforts de coupe Y, Z et FC. Une autre plaque a été usinée mais avec une problématique d'acquisition pour les capteurs Y, générant une problématique pour l'évaluation des donnés FY et FC. La comparaison des modèles du second ordre pour l'outil C1 et C3 ne pourra qu'être faite que pour les efforts FX et FZ.

Les figures suivantes illustrent les différentes surfaces de réponse pour l'outil C3. Les surfaces de réponse disponibles pour les modèles du second ordre sont présentées pour la direction X et Z.

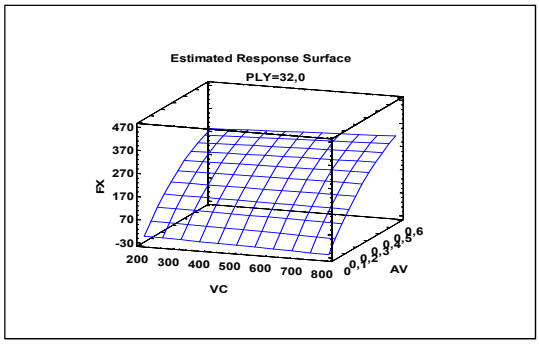


Figure 4.17 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre

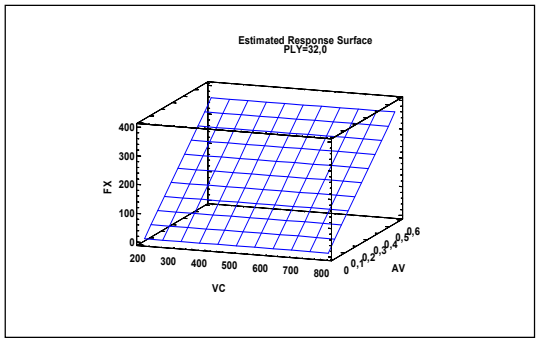


Figure 4.18 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre

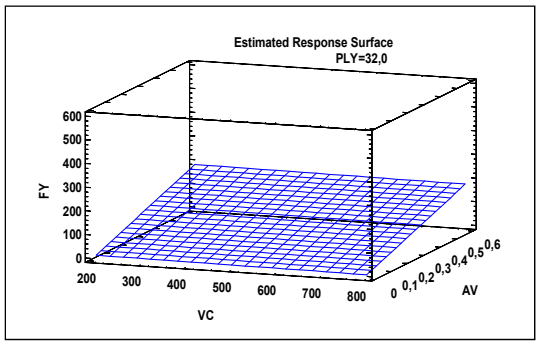


Figure 4.19 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre

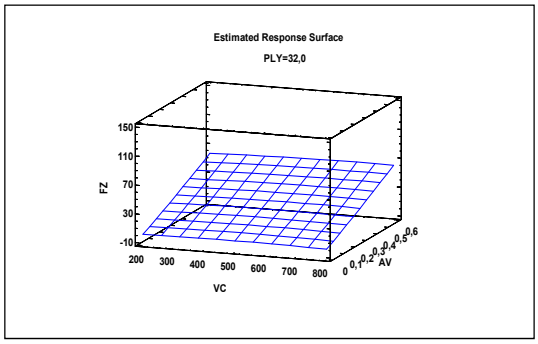


Figure 4.20 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre

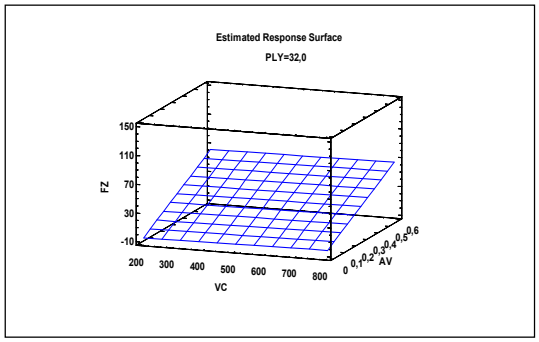


Figure 4.21 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre

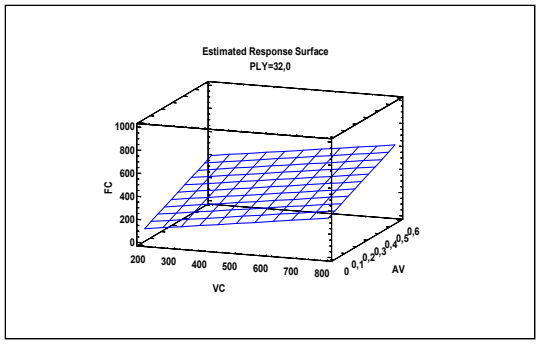


Figure 4.22 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre

La surface de réponse du second ordre pour les forces dans la direction X est quasi identique à celle de l'outil C1 et C2. L'amplitude de force diffère, mais la tendance reste la même pour l'outil C3. Par contre, la surface des forces, dans la direction Z, ne ressemble pas à celle de l'outil C1. La vitesse de coupe ne semble pas affecter l'augmentation des forces et la progression des efforts selon l'avance reste quasi linéaire. Contrairement à la force Z de l'outil C1, où la progression est quadratique pour la vitesse de coupe et pour l'avance par révolution, les plans de réponse des efforts de coupe pour tous les outils testés sont de même tendance avec une orientation vectorielle similaire.

Le tableau suivant expose les coefficients de régression des modèles du premier et du second ordre.

Tableau 4.10 Résultat des coefficients de régression pour les deux modèles pour l'outil C3

Modèles	R carré			
	FX	FY	FZ	FC
Modèle du premier ordre	93,14	76,5	72,81	65,1
Modèle du second ordre	97,9	97,12	80,64	76,48

Les modèles représentant les efforts de coupe dans la direction X sont très représentatifs des essais de coupe. Par contre, le modèle du premier ordre tend moins que le modèle du second ordre pour les efforts de coupe dans la direction Y, Z et instantanées.

Pour fins de comparaison, les efforts de coupe seront évalués selon les équations (4.3) de prédiction suivantes :

$$
\begin{aligned}
FX &\approx -244 + 0{,}0003VC + 588AV + 7{,}9*PLY \\
FY &\approx -988 - 0{,}014VC + 296AV + 31{,}25*PLY \\
FZ &\approx -56 + 0{,}003VC + 113AV + 1{,}56*PLY \\
FC &\approx -543 + 0{,}36VC + 487AV + 18*PLY
\end{aligned}
\tag{4.3}
$$

4.1.1.4 Évaluation et analyse des efforts de coupe pour l'outil C4

L'outil C4, est le dernier outil testé complètement. Plusieurs particularités diffèrent de C4 et des autres outils testés. L'outil C4, possède deux dents. Cette particularité permet d'observer le travail d'une seule dent à l'intérieur de la matière. L'évaluation des efforts de coupe est effectuée par la même analyse de variance afin d'établir les mêmes critères de comparaison entre les outils malgré les différences géométriques et de matériaux. Les surfaces de réponse suivantes illustrent les tendances d'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe.

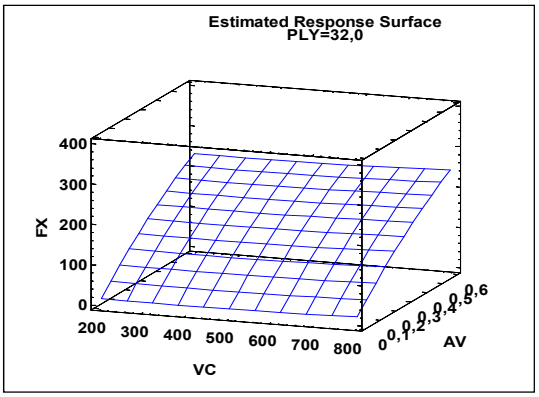


Figure 4.23 Surface de réponse de FX pour le modèle du second ordre

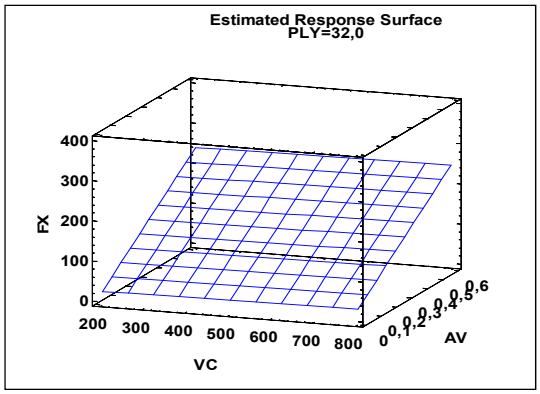


Figure 4.24 Surface de réponse de FX pour le modèle du premier ordre

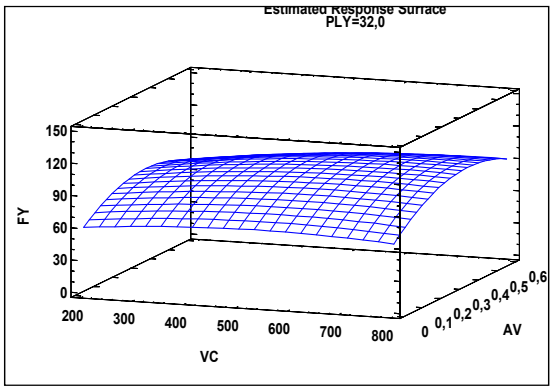


Figure 4.25 Surface de réponse de FY pour le modèle du second ordre

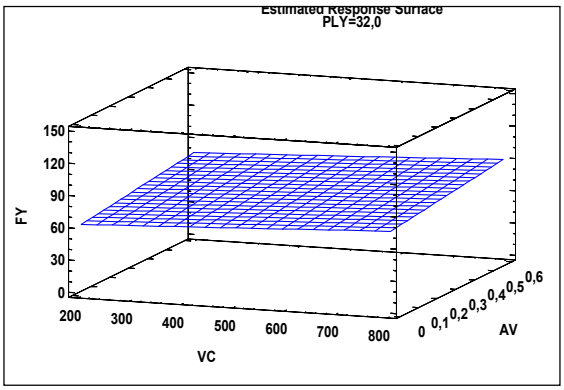


Figure 4.26 Surface de réponse de FY pour le modèle du premier ordre

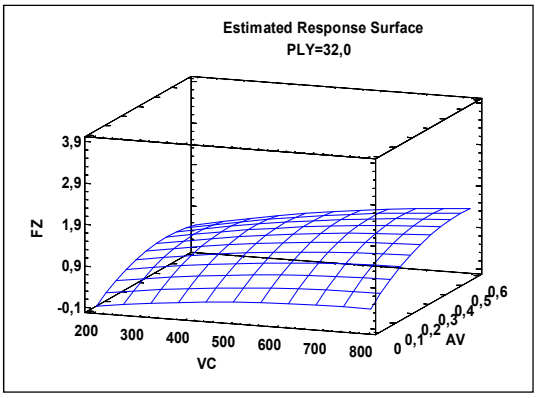


Figure 4.27 Surface de réponse de FZ pour le modèle du second ordre

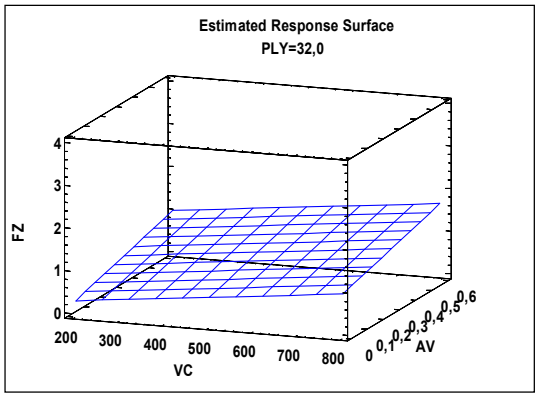


Figure 4.28 Surface de réponse de FZ pour le modèle du premier ordre

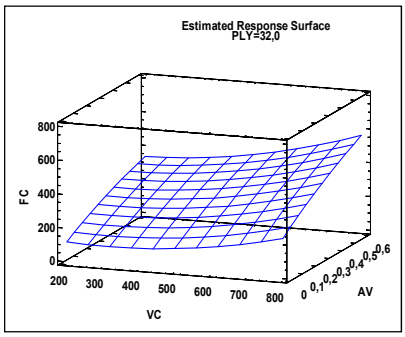


Figure 4.29 Surface de réponse de FC pour le modèle du second ordre

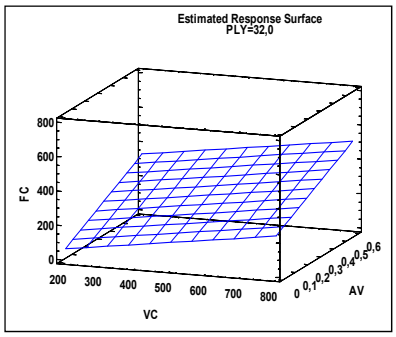


Figure 4.30 Surface de réponse de FC pour le modèle du premier ordre

Les Figure 4.24 à la Figure 4.28 illustrent les surfaces de réponse pour les efforts de coupe pour un modèle du second degré et un modèle du premier ordre. La progression des efforts est directement liée à l'avance et l'interaction de la vitesse de coupe est peu significative dans l'évolution des efforts de coupe. Les efforts en Z sont tellement près d'une valeur nulle qu'il est assez difficile de déceler le modèle qui représente le mieux le phénomène de coupe. Le tableau suivant illustre les coefficients de régression représentant la corrélation du modèle avec les données recueillies.

Tableau 4.11 Résultats des coefficients de régression pour les deux modèles pour l'outil C4

Modèles	R carré			
	FX	FY	FZ	FC
Modèle du premier ordre	92,71	80,28	11,85	88,87
Modèle du second ordre	98,99	96,4	15,57	98,27

Les coefficients de régression pour les modèles décrivant les efforts selon FZ sont inférieurs à 16%. Ce faible coefficient représente la faible importance des facteurs dans le phénomène de coupe dans la direction Z. Il est plus probable que les efforts en Z soient directement liés à la géométrie de l'outil. Ici, l'outil C4 possède une hélice de flûte neutre.

Pour fins de comparaison, il sera utile de prédire les efforts de coupe dans les différentes directions. Les équations suivantes exposent le modèle du premier ordre.

$$\begin{aligned} FX &\approx -184 + 0{,}01VC + 370AV + 6{,}3*PLY \\ FY &\approx -105{,}6 + 0{,}02VC + 25{,}6AV + 5{,}1*PLY \\ FZ &\approx 0{,}05 + 0{,}001VC + 1{,}25AV - 0{,}0002*PLY \\ FC &\approx -403 + 0{,}29VC + 465AV + 12{,}5*PLY \end{aligned} \tag{4.4}$$

Suite à l'attribution des équations de prédiction des efforts de coupe (4.4), il est possible d'un point de vue des efforts de coupe de comparer les outils entre eux pour un même taux d'enlèvement de matière et pour un laminé donné. Les efforts de coupe ne sont pas l'unique réponse observable et désirable dans l'évaluation d'un outil de coupe. Dans le cadre de ce travail, l'aspect de qualité de surface a été évalué. La section suivante expose l'analyse portée sur ce point.

4.1.2 Prédiction de l'état de surface

La prédiction de l'état de surface est importante afin de comparer les différents outils dans une même plage opératoire afin de s'assurer de la qualité demandée. Dans la section 3.1.4

portant sur l'évaluation de l'état de surface, une méthode pondérant la rugosité de surface Rt et Ra en fonction d'un critère viso-tactile (vt) est proposée.

Pour évaluer le potentiel de la méthode viso-tactile, l'évaluation s'est concentrée sur l'outil C4 avec une lecture pli par pli de 12 échantillons.

Tableau 4.12 Critère vt pour les échantillons mesurés des essais avec l'outil C4

Av1	Av2	Av3	Av4	Av5	Av6
5					3
	1			2,5	
		2	2,5		
		2	2		
	1,5			2	
1					3

À l'aide de ces évaluations, il est possible de trouver un parallèle entre le critère vt et la qualité de surface.

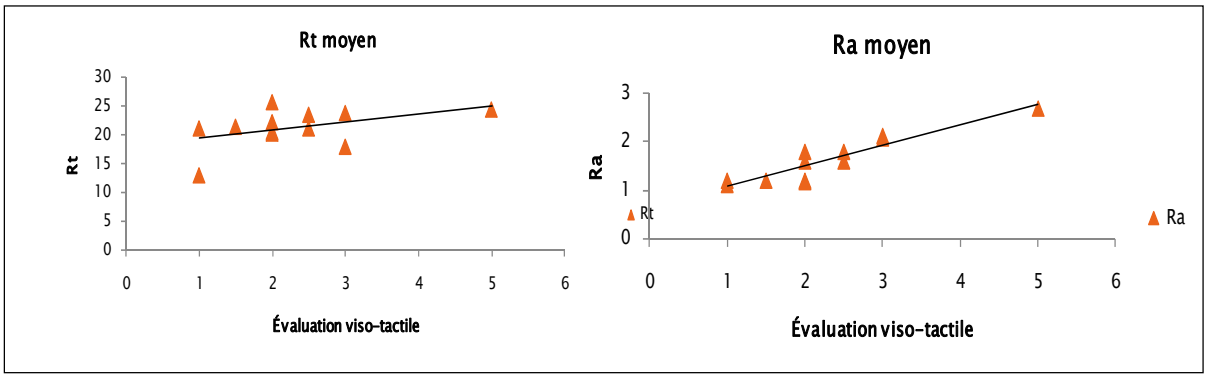


Figure 4.31 Graphiques de la rugosité moyenne Rt et Ra en fonction du critère viso-tactile.

Une des problématiques de cette méthode est que l'échantillon de base de référence ne donne que l'information sur la rugosité Ra. Donc, la corrélation des courbes donnant la fonction Rt en fonction de l'évaluation viso-tactile n'est pas aussi élevée que le coefficient de régression attribué au critère de rugosité Ra. Le R-carré pour le modèle linéaire du Ra est de 80.74, ce qui est acceptable pour ce genre de travail avec le nombre d'échantillons mesurés. Par contre, le coefficient de régression R-carré attribué au critère Rt est 20.87, ce qui est très bas.

Une des explications physiques du manque de corrélation associé au critère Rt, malgré une bonne corrélation du critère Ra, est que le doigt n'est pas assez fin pour sentir tous les creux

d'une surface. Aussi, le fait que la plaque de référence soit basée sur un critère de rugosité Ra contribue à la corrélation de l'évaluation avec la mesure Ra réelle. Les équations suivantes illustrent la rugosité en fonction du critère d'évaluation viso-tactile « vt ».

$$\begin{aligned} Ra(vt) &\approx .423vt + .664 \\ Rt(vt) &\approx 1.43vt + 18 \end{aligned} \tag{4.5}$$

À l'aide des matrices d'attribution des critères viso-tactiles appliqués sur les différentes plaques disponibles (section 3.1.4), il est possible de retrouver la rugosité pour une plage opératoire donnée. À l'aide des efforts de coupe ainsi que de la qualité de surface, il est possible, dans le cadre de ce travail, de comparer les différents outils sous un critère de productivité et de qualité. La section suivante expose l'équation d'identification de l'indice de performance servant à comparer les différents fournisseurs d'outils testés dans le cadre de ce plan d'expérimentation. L'intérêt industriel de cet indice de performance permet de mettre en lumière l'interaction de la productivité, de la qualité et de l'investissement. Cette méthode de comparaison systémique, permet pour un utilisateur donné, selon ces besoins, de trouver l'outil de coupe approprié à ces découpes.

4.1.3 Équation d'identification de l'indice de performance

Afin de comparer les différents outils de coupe utilisés dans le cadre de ce plan d'expérience, la méthode systématique utilisée est d'établir une équation d'identification de la performance par l'attribution d'un indice. Cet indice correspond à la somme pondérée de ratio basé sur un outil de référence. Dans le cadre de ce travail, l'outil de référence est l'outil C1. Cette sélection est purement aléatoire et seulement basée sur l'ordre de réception des outils lors de l'expérimentation.

Deux concepts sont importants à définir avant de présenter l'équation. Il est important de garder en mémoire que les ratios des attributs techniques présentés peuvent être variés selon les besoins de l'entreprise et ou de l'application de l'outillage. De plus, la stabilité de coupe est un critère que l'auteur impose. Il est clair que la définition de la stabilité est basée sur les

observations de l'opérateur et de l'auteur du travail. Ce qui est présenté dans le cadre de ce travail consiste à définir les plages opératoires des différents outils testés et de les comparer dans les limites acceptables de ces outils.

L'équation suivante illustre les différents ratios basés sur l'outil de référence.

$$Indice_Performance_{stable} = \alpha\left(\frac{Fav_{ref}}{Fav_{outil}} * \frac{Faxial_{ref}}{Faxial_{outil}}\right) + \beta\left(\frac{Q_{ref}}{Q_{outil}} * \left(\frac{1}{1+usure}\right)\right) + \ldots \tag{4.6}$$
$$+\delta\left(\frac{Ra_{ref}}{Ra_{outil}} * \frac{Rt_{ref}}{Rt_{outil}}\right) + \gamma(1-\text{delaminage}) + \eta\left(\frac{\$_{ref}}{\$_{outil}}\right)$$

L'équation (4.6) possède cinq ratios pouvant être classés en trois grandes divisions. La première section est attribuable à la productivité définie par les ratios des efforts de coupe ainsi que le taux d'enlèvement de matière prenant en compte l'observation de l'usure. La deuxième section comporte la portion qualité attribuable à la rugosité et au délaminage observable. La dernière section est la portion financement relative à l'investissement initial de l'achat de l'outil ayant servi à l'usinage des plaques tests. Il est possible de se dire, que dans la section relative à l'investissement, la durée de vie devrait être quantifiée. Dans le cadre de ce travail, aucun test d'usure ou de durée de vie n'a été fait. Seul l'investissement initial est comparé. Les tests d'usure seront effectués ultérieurement dans le cadre d'un autre projet.

Il est certain que pour ces trois sections il est possible de modifier l'équation afin de mieux respecter les besoins de l'entreprise. Les facteurs de pondération sont aussi des attributions basées sur des informations techniques de l'industriel. La section suivante expose le raisonnement dans l'attribution des facteurs de pondération.

4.1.4 Attribution de la pondération des facteurs de l'équation de l'indice de performance

Les valeurs des facteurs de pondération sont aussi des indices devant être sélectionnés avec soin et ou selon les besoins de l'entreprise. Ces facteurs, dans le cadre de ce travail, sont

basés sur un document technique de l'industriel dans le cadre de ce projet de recherche. Le nom de ce document est BAPS 188-008 NCPR2.

En clair, ce document expose les besoins relatifs à la coupe de matériaux composites. Il est important d'usiner la pièce avec la plus grande vitesse possible. Ce propos expose la nécessité d'avoir un haut taux d'enlèvement de matière. D'un point de vue qualité, le document demande que les fibres de carbone ne soient pas exposées à l'environnement extérieur et qu'aucun délaminage ne soit généré. Sur un autre pan de la qualité, la rugosité est traitée dans le document BAPS 188. La rugosité maximale acceptée est un critère Ra inférieur à 125 µin ou 5µm.

Selon plusieurs informations techniques du futur montage, les pièces seront fixées par succion à l'aide d'un gabarit muni d'une pompe à vide. Par expérience, il est primordial de maintenir la pièce sur la surface du gabarit en tout temps. Donc, plus les efforts de coupe sont bas, moins la pièce aura tendance à se mouvoir sur la surface de référence du gabarit d'usinage. Il est donc important que les efforts de coupe dans la direction normale à la pièce soient minimisés. La table suivante expose la pondération attribuée aux cinq facteurs de l'équation de définition de l'indice de performance.

Tableau 4.13 Pondération des facteurs de l'équation de l'indice de performance

$\left\{\begin{matrix}\alpha = 20\% \\ \beta = 20\%\end{matrix}\right\}$	Section force et productivité
$\left\{\begin{matrix}\delta = 20\% \\ \gamma = 20\%\end{matrix}\right\}$	Section qualité
$\{\eta = 20\%\}$	Section finance

Dans le cadre de ce travail et de ce plan d'expérience, la pondération est divisée en portion égale aux cinq ratios de l'équation. Donc, les facteurs sont maintenus à 20%. Maintenant que toutes les équations sont disponibles afin de prédire les résultats, les indices de performance pour chaque outil peuvent être calculés.

4.1.5 Comparaison de l'outillage

La comparaison des outils de coupe se base sur des paramètres de coupe assurant la stabilité de coupe. L'outil C2, lors des essais de coupe, ne possède aucune plage assurant la stabilité de coupe. Par contre, la comparaison sera quand même effectuée.

Le tableau suivant illustre les plages opératoires des quatre outils testés.

Tableau 4.14 Plages opératoires des outils testés pour une plaque de 32 plis

Plages opératoires	C1	C3	C2	C4
VC HR(m/min)	300	200	200	650
VC BR(m/min)	200	200	200	200
VC proposée (m/min)	250	200	150	400
Av HR (mm/rev)	0,4064	0,4064	0,508	0,508
Av BR (mm/rev)	0,2032	0,3048	0,508	0,2032
Av proposé (mm/rev)	0,4064	0,4064	0,635	0,254

Les suffixes HR et BR représentent les paramètres de coupe à haut et bas régime. L'auteur propose des plages de paramètres de coupe à utiliser en opération. À l'aide de ces plages, il est maintenant possible de quantifier les valeurs numériques. Le tableau suivant expose les valeurs numériques servant à définir l'indice de performance des quatre outils.

Tableau 4.15 Valeurs des paramètres des outils testés pour une plaque de 32 plis

Outil	C1	C3	C2	C4
Diamètre (mm)	10,00	9.525	9.525	9.525
Fx HR (N)	250,46	292,03	396,60	290,08
Fx BR (N)	140,73	228,02	396,60	134,63
Fx proposé (N)	250,46	292,03	48 ,50	160,54
Fz HR (N)	9,44	57,60	119,60	1,00
Fz BR (N)	8,22	43,37	119,60	1,00
Fz prposé (N)	9,44	57,60	145,00	1,00
Q HR (mm^3/min)	179797,49	119865,00	149831,24	486951,54
Q BR (mm^3/min)	59932,50	89898,75	149831,24	59932,50
Q proposé (mm^3/min)	149831,24	119865,00	140466,79	149831,24
Ra HR (µm)	1,93	1,93	2,36	1,72
Ra BR (µm)	1,51	1,51	2,36	1,30
Ra proposé (µm)	2,14	1,93	2,41	1,40
Rt HR (µm)	22,29	22,29	23,72	21,58
Rt BR (µm)	20,86	20,86	23,72	20,15
Rt proposé (µm)	23,01	22,29	23,90	20,50
vt HR (unité)	3,00	3,00	4,00	2,50
vt BR (unité)	2,00	2,00	4,00	1,50
vt estimé (unité)	3,50	3,00	4,13	1,75
Coût ($)	195,00	126,58	124,78	225,00
Signe d'usure (oui/non)	1,00	1,00	1,00	0,00
Delamination (oui/non)	0,00	0,00	0,00	0,00
	C1	C3	C2	C4
Indice de performance HR	0,900	0,886	0,797	2,309

Il y a une nette démarcation entre les outils C1 à C3 et l'outil C4. L'outil C4 possède un indice de performance toujours supérieur à deux. Le graphique suivant expose l'histogramme des indices de performance aux différents régimes.

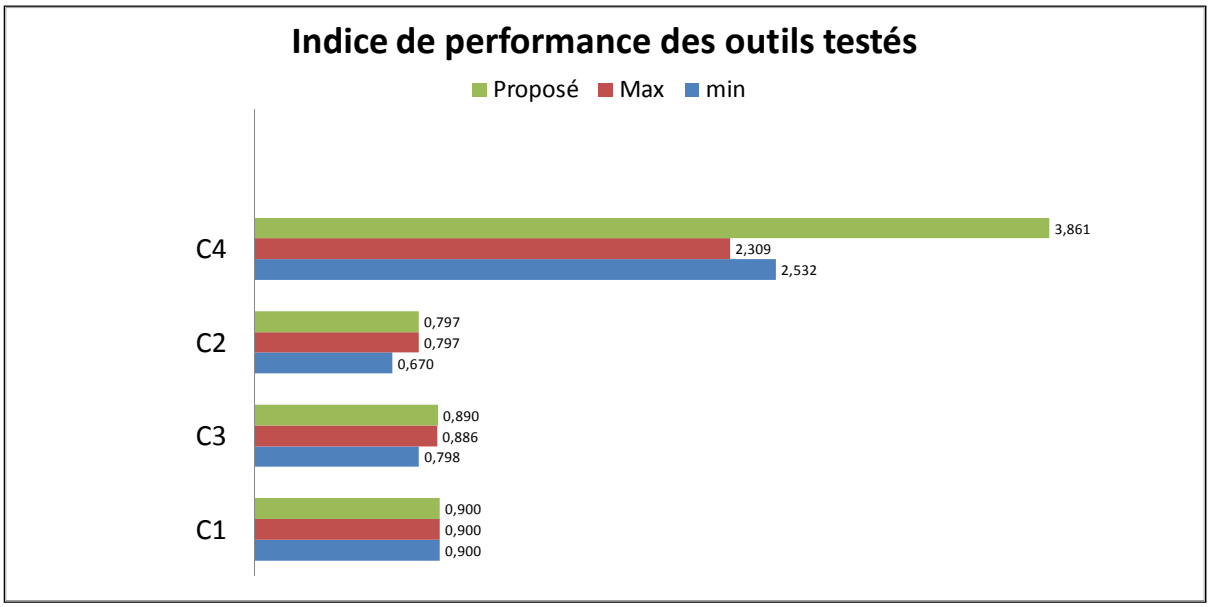


Figure 4.32 Histogramme de l'indice de performance des différents outils testés

Observant les différents indices de performance, l'outil C4 est nettement supérieur aux trois autres outils. En deuxième position, l'outil C1 est le plus performant suivi de très près par l'outil C3. L'outil C2 n'est pas conseillé car les plages utilisées pour fins de comparaison ne sont pas des plages assurant la stabilité. Ce qui rend l'outil C4 le plus performant est que les efforts selon l'axe Z est minimisé et tend vers une valeur près de 1. L'investissement initial pour l'outil C4 nuit à l'indice de performance car il coûte près de deux fois plus cher que ses rivaux. Une étude éventuelle concernera la durée de vie devrait permettre d'enrichir les résultats

4.2 Identification des paramètres géométriques influant lors du détourage de laminés carbone/époxy

4.2.1 Analyse des efforts de coupe et objectif d'optimisation

Lors de l'expérimentation du plan d'expérience sur l'effet des paramètres géométriques des outils de coupe, l'analyse des efforts de coupe se fait selon la direction de l'avance et la direction axiale. Les tableaux présentés ci-dessous illustrent une analyse d'optimisation pour minimiser ou maximiser les efforts de coupe dans une direction donnée. Par exemple, afin de maintenir la pièce en tout temps sur son gabarit de serrage, les efforts dans la direction axiale doivent être maximisés, car le Z positif de la table de force est en direction de la table de la machine. Par contre, les efforts d'avance doivent être minimisés afin de trancher la matière avec un minimum d'effort.

Tableau 4.16 Paramètres optimum pour maximiser Fz moyen

Factor	*Low*	*High*	*Optimum*
Helix	-10,0	10,0	-10,0
rake	0,0	15,0	6,12517
VC	75,0	150,0	150,0
AV	0,0501	0,1016	0,1016

Tableau 4.17 Paramètres optimum pour minimiser l'amplitude de Fz

Factor	*Low*	*High*	*Optimum*
Helix	-10,0	10,0	-0,875294
rake	0,0	15,0	15,0
VC	75,0	150,0	75,0001
AV	0,0501	0,1016	0,0501

Tableau 4.18 Paramètres optimum pour minimiser Fx moyen

Factor	*Low*	*High*	*Optimum*
Helix	-10,0	10,0	-9,48584
rake	0,0	15,0	0,00000829835
VC	75,0	150,0	150,0
AV	0,0501	0,1016	0,1016

Tableau 4.19 Paramètres optimum pour minimiser l'amplitude de Fx

Factor	*Low*	*High*	*Optimum*
Helix	-10,0	10,0	9,98671
rake	0,0	15,0	14,9998
VC	75,0	150,0	150,0
AV	0,0501	0,1016	0,0501

Tableau 4.20 Désirabilité et objectif d'optimisation à réponses multiples

	Desirability	*Desirability*		*Weights*	*Weights*	
Response	*Low*	*High*	*Goal*	*First*	*Second*	*Impact*
FZ_ oy	-13,8262	12,5259	Maximize	1,0		1,5
FZ_amp	21,677	191,348	Minimize	1,0		1,5
FX_moy	-138,761	-12,3575	Minimize	1,0		1,5
FX_amp	200,656	342,26	Minimize	1,0		1,5
MMR	218,297	873,188	Maximize	1,0		1,0

Tableau 4.21 Paramètres optimum d'optimisation à réponse multiple

Factor	*Low*	*High*	*Optimum*
Helix	-10,0	10,0	-10,0
rake	0,0	15,0	7,24274
VC	75,0	150,0	150,0
AV	0,0501	0,1016	0,0938327

Tableau 4.22 Valeur des réponses aux facteurs optimums

Response	*Optimum*
FZ_moy	9,37359
FZ_amp	61,3815
F _moy	-105,653
FX_amp	268,177
MMR	806,433

Les optimisations d'une réponse unique permettent de mettre en lumière les facteurs permettant de minimiser ou maximiser la réponse. Par contre, l'objectif de cette expérimentation est d'optimiser la conception d'un outil de coupe. Donc les objectifs présentés dans le Tableau 4.20 exposent la maximisation des efforts axiaux moyens et le taux d'enlèvement de matière (MMR) ainsi que la minimisation de l'amplitude des efforts selon la direction d'avance (X), la direction axiale (Z) et la force moyenne dans la direction d'avance. De cette optimisation, l'angle d'hélice optimum est évalué à -10 degrés et l'angle d'attaque optimum est évalué à 7.24 degrés. Les paramètres de coupe proposés par l'optimisation consiste à pousser la vitesse de coupe à sa valeur maximale, soit à 150 m/min et avec une avance de 0.09 mm/révolution.

En plus des valeurs optimales en efforts de coupe, il est maintenant important d'évaluer la qualité de la surface et de retrouver les paramètres ayant générés la meilleure qualité de surface.

4.2.2 Paramètres de coupe et géométriques ayant générés la meilleure qualité de surface.

La qualité de surface des échantillons est un critère important dans la sélection des paramètres géométriques. Selon le tableau 3.8, portant sur les essais ayant générés la meilleure qualité de surface, le mode des essais permet d'observer quel paramètre revient le plus souvent dans ces essais.

Tableau 4.23 Paramètres des facteurs analysés selon leur mode statistique

Facteurs	MODE	Unité
Helice	-10	degrés
Rake	10	degrés
VC	150	m/min
Av	0,1016	mm/rev

Selon l'optimisation statistique à réponse multiple, les objectifs d'optimisation sont de maximiser le taux d'enlèvement de matière et de minimiser les défauts d'usinage. Selon l'analyse d'optimisation à réponses multiples, les quatre facteurs analysés tendent vers les mêmes valeurs que le tableau 4.23, sauf pour la valeur de l'angle d'attaque (rake) qui est plus basse.

Tableau 4.24 Valeurs des facteurs analysés et d'optimization pour réduire les défauts en maximisant le taux d'enlèvement de matière.

Facteur	*Bas*	*Haut*	*Optimum*
Helix	-10,0	10,0	-10,0
rake	0,0	15,0	3,93147
VC	75,0	150,0	149,999
AV	0,0501	0,1016	0,1016

Ce qui semble ressortir de l'évaluation des paramètres géométriques est qu'un angle d'attaque compris entre 4 et 10 degrés va produire une coupe de qualité tout en minimisant les efforts de coupe lors des opérations d'usinage. Ce qui confirme par le fait même le graphique de la Figure 1.16 et la Figure 1.17 des tests réalisés par Wang et Ramulu. Il y a bien sûr des différences entre les deux études, mais un angle d'attaque positif est la solution afin de minimiser les efforts de coupe. Suite à l'attribution des paramètres géométriques d'un outil de coupe permettant l'usinage de façon efficace et sans génération de défaut, la section suivante expose une conception d'un outil de coupe.

4.2.3 Conception de prototype et analyse structurale

4.2.3.1 Conception préliminaire du prototype.

Ce qui ressort principalement de ce travail, est qu'un outil de coupe dédié au détourage de matériaux composites doit conserver son tranchant afin de permettre un coupe franche de la matière. La matière de l'outil ayant permis de conserver tout au long des tests son potentiel de coupe est l'outil C4, possédant des lèvres de coupe en PCD. De plus, par l'analyse des paramètres géométriques de l'outillage de coupe, il en ressort qu'un angle d'attaque de l'arête tranchante doit être entre 4 et 10 degrés selon les analyses d'optimisation, ou bien 10 degrés lors de l'observation des modes statistiques des meilleurs échantillons de coupe. Suite

à l'inspection des lèvres de l'outil C4 présentée au tableau 2.4, on retrouve le même angle d'attaque.

Afin de maintenir au maximum la pièce sur son gabarit, un angle d'hélice négatif peut être préconisé. Par contre, d'un point de vue fabrication mécanique, il est très complexe de former une plaquette de PCD de forme hélicoïdale. De cette problématique technique, il en ressort qu'une hélice neutre peut-être un compromis viable à la conception d'outil sans une augmentation des coûts de fabrication. Une observation relative à la fabrication des outils possédant des plaquettes en PCD, les carbures agissant comme socle d'assise pour les PCD sont taillés à même les brutes cylindriques de carbure. Afin de maximiser la longueur effective de coupe des plaquettes de PCD brasées sur les carbures, l'idée d'utiliser un insert de carbure réversible est venue lors d'un remue-méninge. À l'aide de cette conception à inserts réversibles, il est possible de couper selon les épaisseurs utilisées, de 6 à 10 fois la même longueur avant d'obtenir l'usure de changement d'outil. La figure suivante illustre un dessin de détail de la plaquette et du porte-plaquette de fraisage.

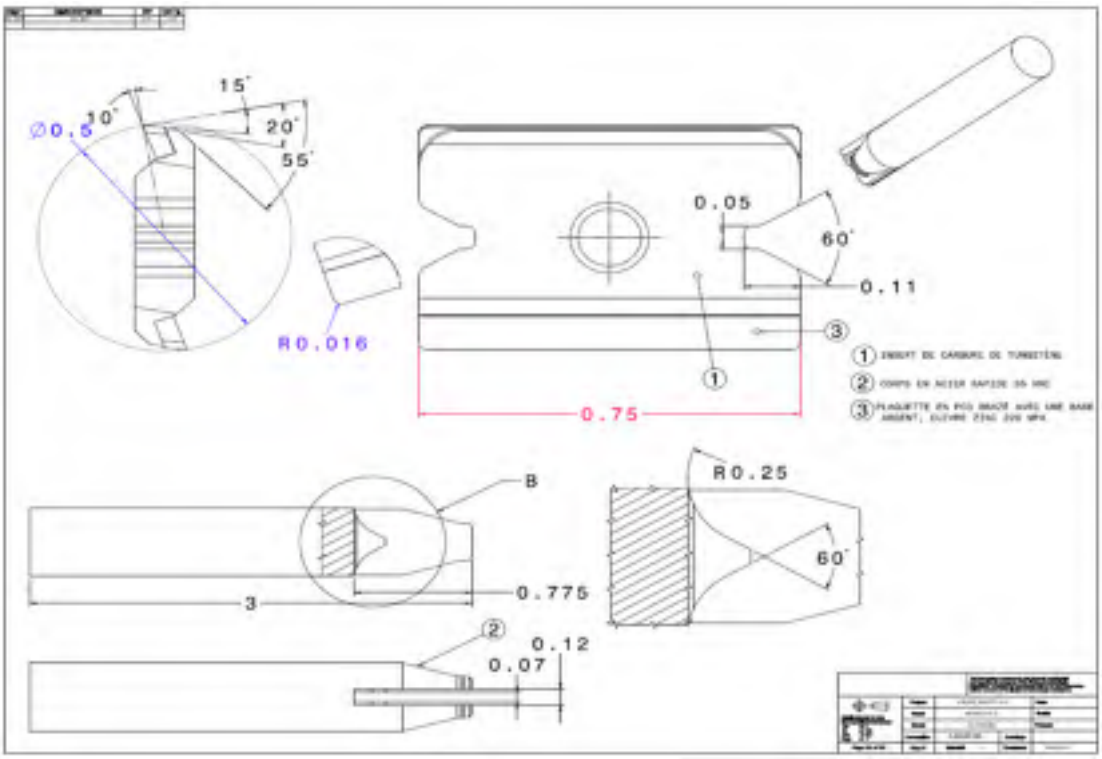


Figure 4.33 Dessin de détails de l'outil prototype par serrage d'un insert de carbure avec des plaquettes de PCD brasées.

L'outil présenté est de diamètre coupant de 0.5 in, soit de 12.7 mm. Inférieur à cette dimension, il est difficile de trouver des plaquettes de PCD de faible largueur pour avoir un corps d'outil assez rigide pour un insert de deux lèvres. Il est par contre possible de concevoir un outil avec une seule lèvre de coupe. Il est conseillé d'effectuer une conception balancée en masse et en inertie au centre de rotation. Le corps de l'outil en acier, possède deux encoches de localisation, permettant de centrer l'insert de carbure avec le porte-plaquette en acier. La vis de serrage, non illustrée sur le dessin de détail, n'est là que pour bloquer les degrés de liberté selon la direction du vecteur de rotation de l'outil. La section suivante illustre l'analyse structurale des composants de l'outil de coupe soumis à des efforts de coupe lors d'une opération de rainurage.

4.2.3.2 Analyse structurale du prototype

L'assemblage comporte quatre pièces soumises à de multiples contacts. Ces contacts sont de types permanents. Ce type de contact crée une liaison permanente entre les composants de l'assemblage. Il est possible de retrouver à l'interface de ces contacts, le cisaillement, les contraintes principales, ainsi que les déformées de la matière à cet endroit précis. Dans le carde de ce travail, l'auteur s'intéresse aux contraintes de cisaillement afin d'évaluer les multiples possibilités de métal d'apport lors du brasage. Les conditions frontières du modèle posent que l'arbre du porte-plaquette est encastré sur 100 mm de longueur de la partie cylindrique du manchon de serrage. L'assemblage est soumis à la force centrifuge donnée à une vitesse de rotation de 28000 RPM (2932 Rad/s). Les efforts de coupe sont appliqués sur une des plaquettes, sur une surface représentant l'épaisseur d'un laminé de 40 plis, ainsi que les efforts de coupe instantanés selon les trois directions de coupe. La force résultante est de 823.45 N. La figure suivante illustre les conditions frontières et le cas de chargement appliqué dans le modèle d'analyse structurale par éléments finis.

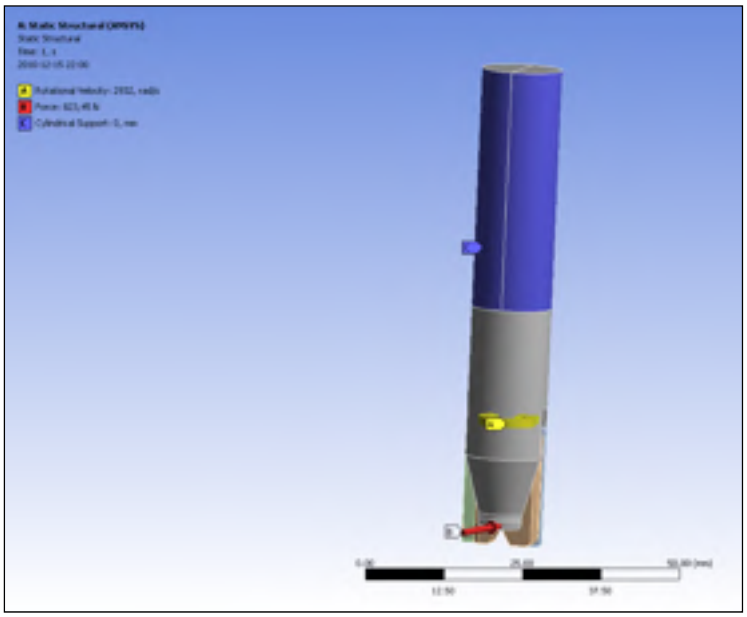


Figure 4.34 Conditions frontières du modèle d'analyse structurale de l'outil prototype

Dans cette analyse, les contraintes sont évaluées tant sur le porte-plaquette, sur l'insert de carbure que sur la face de la plaquette brasée de PCD. Les contraintes maximales sur le porte-plaquette sont principalement dans le bout de l'arbre. La décroissance de la contrainte dans la région d'appuis de la plaquette est très rapide et tend vers une contrainte inférieure à 1000 MPa. La limite élastique d'un acier outil est environ de 1650 MPa alors que la limite ultime est de 1950 MPa.

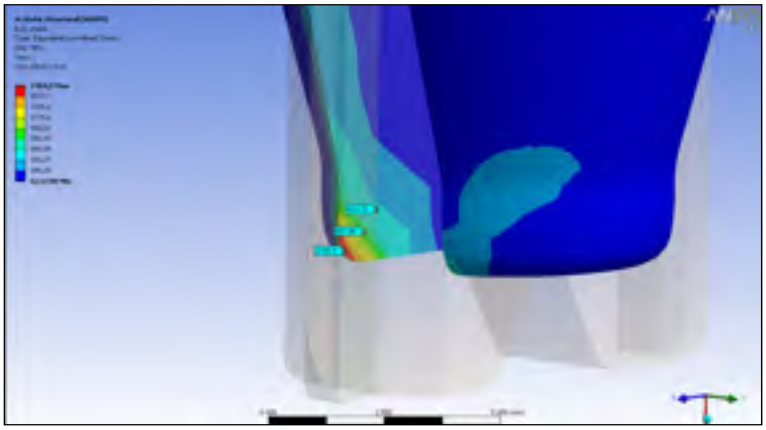


Figure 4.35 Résultat de l'analyse structurale du porte plaquette

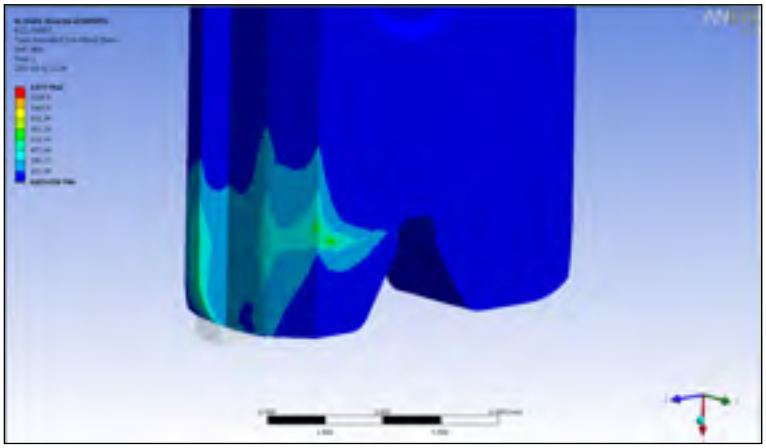


Figure 4.36 Résultat de l'analyse structurale de l'insert de carbure

L'insert de carbure est soumis à moins de contraintes que le porte plaquette. La valeur maximale de la contrainte du porte plaquette est de 1763 Mpa, et est localisée à l'interface « insert » et « porte plaquette » dans le bas du rayon du porte-plaquette. La contrainte maximale de l'insert est maximale sur un nœud à 1393 MPa. Par contre, au voisinage de l'élément présentant la contrainte maximale, les éléments donnent des contraintes inférieures à 1000 MPa.

La plaquette de PCD ne possède pas vraiment de problématique de contrainte car le PCD est un compactage de diamant dans une matrice de Cobalt. Elle peut résister à de lourdes pressions de compression. Ce qui intéresse l'auteur, dans ce travail, est d'évaluer le cisaillement à l'interface de la jonction plaquettes de PCD et l'insert de carbure de tungstène. La figure qui suit illustre le résultat des contraintes de cisaillement à l'interface des deux pièces servant à joindre les deux éléments entre eux.

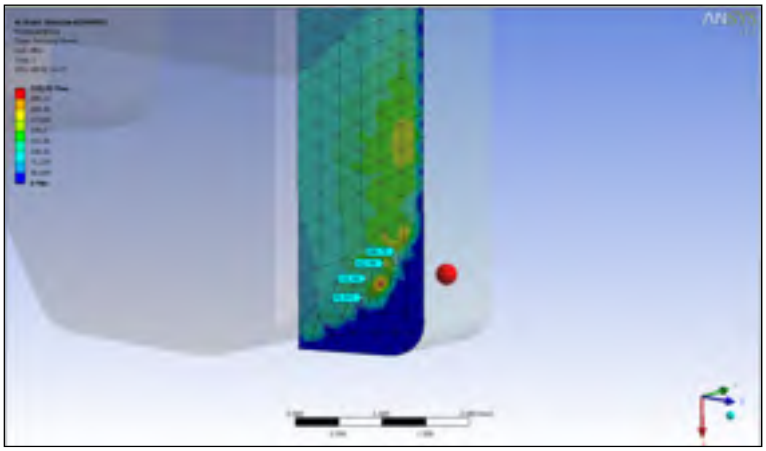


Figure 4.37 Contrainte de cisaillement au joint de brasage

La contrainte maximale est évaluée à 326 MPa sur l'élément de jonction entre le rayon de l'insert de carbure avec la plaquette de PCD. Selon les fournisseurs de produits de brasage, les contraintes à la rupture peuvent varier entre 310 MPa jusqu'à 800 MPa selon la qualité du brasage. Ici, les contraintes de cisaillement chutent drastiquement autour de l'élément possédant la contrainte de 326 MPa. La moyenne des quatre éléments voisins à l'élément possédant la contrainte maximale est d'environ 135 MPa, ce qui est amplement suffisant pour

supporter le chargement des efforts de coupe et de conserver la liaison entre la plaquette de PCD et l'insert de carbure.

CONCLUSION

L'évaluation de la performance d'un outil de coupe dédié au détourage de matériaux composites peut être obtenue par l'attribution d'un indice de performance. Cet indice provient d'une somme de ratio à maximiser ou minimiser par groupe d'action :

- les efforts de coupe;
- le taux d'enlèvement de matière;
- la rugosité
- la génération de défauts;
- le coût d'investissement.

À ces cinq groupes, on attribue le poids en appliquant un facteur de pondération favorisant ou en équilibrant l'importance de ces groupes d'évaluations. Il est à considérer que ces facteurs de pondération peuvent variés d'une entreprise à l'autre selon les requis techniques désirés.

Dans le cadre de ce travail, l'auteur arrive à la conclusion que les efforts de coupe moyens dans la direction de l'avance sont proportionnels à la vitesse d'avance, que les efforts de coupe moyens dans la direction normale à la surface coupée sont proportionnels à la vitesse de coupe et à la vitesse d'avance. Pour les efforts de coupe dans la direction axiale, les efforts de coupe moyens sont aussi proportionnels à la vitesse de coupe et la vitesse d'avance.

La rugosité arithmétique des surfaces usinées est de 0.8 à 12.5 micron pour les quatre fournisseurs d'outil testés dans la première expérimentation. De plus, l'orientation des fibres est un facteur significatif dans la rugosité lorsque les paramètres de coupe sont constants. Les fibres orientées à -45 degrés coupés ont une rugosité Ra et Rt de 2 à 7 fois supérieures à la rugosité des fibres orientées à 0 degré.

Les paramètres de coupe, proposés par l'auteur, devraient être les paramètres de coupe utilisés initialement par le programmeur numérique si le montage est rigide et que la pièce n'est pas en porte à faux. Si le montage est flexible, la vitesse d'avance devrait être réduite.

Pour les différents outils, l'auteur propose des valeurs de paramètres de coupe en vitesse de coupe et en avance par révolution ci-desous:

- C1 : 250m/min et 0.41mm/révolution;
- C2 à ne pas utiliser;
- C3 : 200m/min et 0,41mm/révolution;
- C4 : 400 m/min et 0.254mm/révolution.

L'outil C4 est l'outil qui possède l'indice de performance le plus élevé des quatre outils avec une valeur de 3.86. Les outils C1 et C3 possèdent un indice quasi identique avec des valeurs respectives de 0.9 et de 0.89.

Il est possible pour différentes applications ou différents besoins industriels que la pondération attribuée aux paramètres de l'équation de l'indice de performance soit modifiée par l'utilisateur.

Dans le cadre de l'expérimentation sur l'influence des paramètres géométriques des outils de coupe il ressort comme conclusion qu'un angle d'attaque de 8 à 10 degrés offre d'excellentes propriétés de coupe. L'angle d'hélice négatif permet la génération d'efforts de coupe dans la direction du gabarit d'usinage, réduisant ainsi les efforts de serrage pour maintenir la pièce en position et par le fait même réduire les risques de délaminage dans la direction transverse du laminé. Si le besoin industriel est de maintenir en tout temps la pièce sur son gabarit un angle d'hélice de 10 degrés est une bonne solution.

En raison de sa capacité à résister à l'usure, les plaquettes en PCD devraient être le matériau à utiliser pour l'arrête tranchante. Par contre, ce matériau est assez complexe à mettre en forme dans une autre forme que dans une géométrie plane. Cette problématique implique un angle d'hélice neutre, donc à 0 degré. En raison des coûts des outils, il est judicieux de réutiliser au maximum la longueur de coupe des outils sans toutefois trop modifier la hauteur de la coupe par rapport à la broche de la machine outil afin de ne pas modifier la dynamique de coupe. L'utilisation d'un insert à double position permet de trois à quatre changements

d’hauteur de coupe et, par la suite, il est possible de retourner la plaquette et de couper encore de 3 à 4 fois la profondeur de coupe du laminé en entier.

RECOMMANDATIONS

Plusieurs recommandations sont proposées dans le cadre de ce travail afin d'approfondir les résultats obtenus. Une première recommandation est d'effectuer des tests exhaustifs d'usure de l'outil en respect avec la normalisation ISO. Ces tests pourront alors permettre d'inclure, dans l'équation d'attribution de l'indice de performance, un ratio de la longueur coupée en fonction du coût de l'outil de coupe. Cette valeur est, d'un point de vue industriel, très importante car elle permet d'évaluer le nombre d'outil nécessaire à la fabrication des pièces nécessitant un usinage par détourage.

En deuxième recommandation, suite aux tests de durée de vie des outils de coupe, il serait important d'effectuer des tests de résistance des matériaux en résistance ultime en flexion, traction et torsion afin d'évaluer l'impact de la coupe et de l'usure sur le matériau. Ces tests devraient, par ailleurs, être faits pour des tests de fatigue en utilisant les paramètres de coupe donnés dans le cadre de ce travail.

Dans le cadre de l'expérimentation sur l'évaluation des paramètres géométriques des outils de coupe, une analyse de fabrication devrait être faite en évaluant les coûts et les possibilités de production à petite, moyenne et grande échelle. En dernier lieu, un prototype de l'outil conçu dans le cadre de ce travail devrait être fabriqué et par la suite testé sous la même expérimentation que l'expérimentation effectuée dans ce travail. L'objectif de ces tests permettra de comparer les différents fournisseurs et le nouvel outil.

ANNEXE I

PARAMÈTRES ET SPÉCIFICATION DE LA TABLE DYNAMOMÉTRIQUE KISTLER 9255B

Force

KISTLER
measure. analyze. innovate.

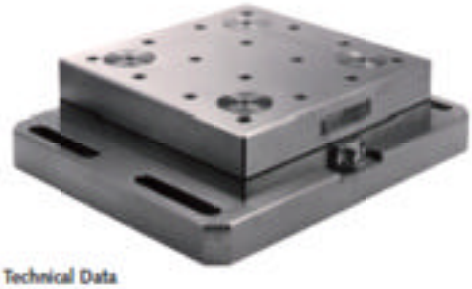
Multicomponent Dynamometer

–20 ... 40 kN, Mounting Plate 260x260 mm

Type 9255B

Quartz 3-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. The dynamometer has a great rigidity and consequently a high natural frequency. Its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces to be measured.

- Wide measuring range
- Fot heavy duty application
- Compact design



Description

The dynamometer consists of four 3-component force sensors fitted under high preload between a baseplate and a top plate. Each sensor contains three pairs of quartz plates, one sensitive to pressure in the z direction and the other two responding to shear in the x and y directions respectively. The force components are measured practically without displacement.

The outputs of the four built-in force sensors are connected inside the dynamometer in a way to allow multicomponent measurements of forces and moments to be performed. The eight output signals are available at the 9-conductor flange socket. The four sensors are mounted ground-insulated. Therefore ground loop problems are largely eliminated.

The dynamometer is rustproof and protected against penetration of splashwater and cooling agents. Together with the connecting cable Type 1687B5/1689B5 and Type 1677A5/1679A5 it corresponds to the protection class IP67.

Application Examples

- Dynamic and quasistatic measurement of the three orthogonal components of a force.
- Cutting force measurements while milling and grinding on larger machines and in machining centers.
- Measurements on stamping machines.
- Measurements on wind tunnel models.
- Measurements of supporting forces at machinery foundations.
- Measurements on rocket propulsion units.

Technical Data

Range	F_x, F_y	kN	–20 ... 20 [1]
	F_z	kN	–10 ... 40 [1]
Calibrated partial range	F_x, F_y	kN	0 ... 2
	F_z	kN	0 ... 4
Overload	F_x, F_y	kN	–24/24
	F_z	kN	–12/48
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	F_x, F_y	pC/N	≈–8
	F_z	pC/N	≈–3,7
Linearity, all ranges		%FSO	≤±1
Hysteresis, all ranges		%FSO	≤0,5
Cross talk		%	≤±2
Rigidity	c_x, c_y	kN/µm	>2
	c_z	kN/µm	>3
Natural frequency	f_0 (x, y, z)	kHz	≈3
Natural frequency (mounted on flanges)	f_0 (x, y)	kHz	≈1,7
	f_0 (z)	kHz	≈2
Natural frequency (mounted on flanges and through top plate)	f_0 (x, y)	kHz	≈2
	f_0 (z)	kHz	≈3,3
Operating temperature range		°C	0 ... 70
Temperature coefficient of sensitivity		%/°C	–0,02
Capacitance (of channel)		pF	≈500
Insulation resistance (20 °C)		Ω	>10^{13}
Ground insulation		Ω	>10^{8}
Protection class EN60529		–	IP67 [2]
Weight		kg	52

[1] Application of force inside and max. 100 mm above top plate area.

[2] With connecting cable Types 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

1 N (Newton) = 1 kg · m · s^{-2} = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 inch = 25,4 mm; 1 kg = 2,2046... lb; 1 N·m = 0,73756... lbft

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2009, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

KISTLER
measure. analyze. innovate.

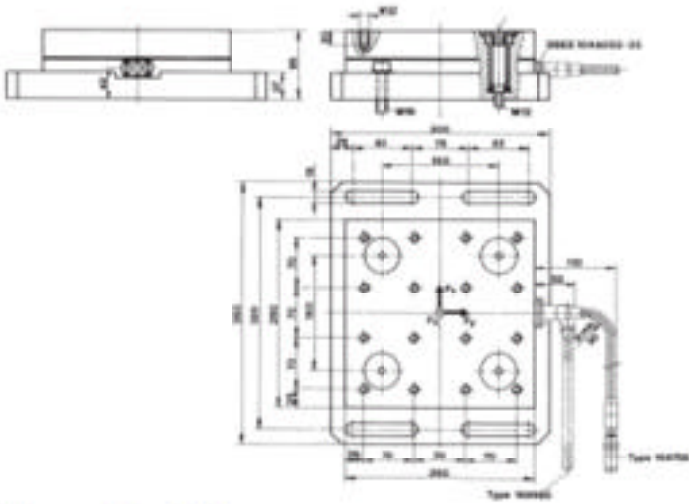


Fig. 1: Dimensions of dynamometer Type 9255B

Mounting

The dynamometer may be mounted with screws or claws on any clean, face-ground supporting surface, such as the table of a machine tool for example.

In order to provide a still better coupling of the measuring instrument with the mounting surface, the dynamometer can, if necessary, additionally be screwed down through the four bores in the top plate. This measure allows to reach a higher resonant frequency of the measuring system. Uneven supporting surface may set up internal stresses, which will impose severe additional loads on the individual measuring elements and may also increase cross talk.

For mounting the force-introducing components, mainly workpieces, sixteen M12 mm blind tap holes in the cover plate are available.

The supporting surfaces for the force-introducing parts must be face-ground to obtain good mechanical coupling to the cover plate.

Signal Conditioning

A multichannel charge amplifier is also needed to build a complete measuring system (i.e. Type 5070A...). The measurement signal is converted into an electrical voltage in the individual channels. The measured value is exactly proportional to the force acting.

Optional Accessories

For 3-Component Force Measurements

F_x, F_y, F_z	Type
• Connecting cable, length l = 5 m (3 leads)	1687B5
• Extension cable, length l = 5 m (3 leads)	1689B5
	1688B5

For 6-Component Force and Moment Measurements

F_x, F_y, F_z / M_x, M_y, M_z	Type
• Connecting cable, length l = 5 m (8 leads)	1677A5
• Extension cable, length l = 5 m (8 leads)	1679A5
	1678A5

Ordering Code	Type
• Multicomponent Dynamometer	9255B

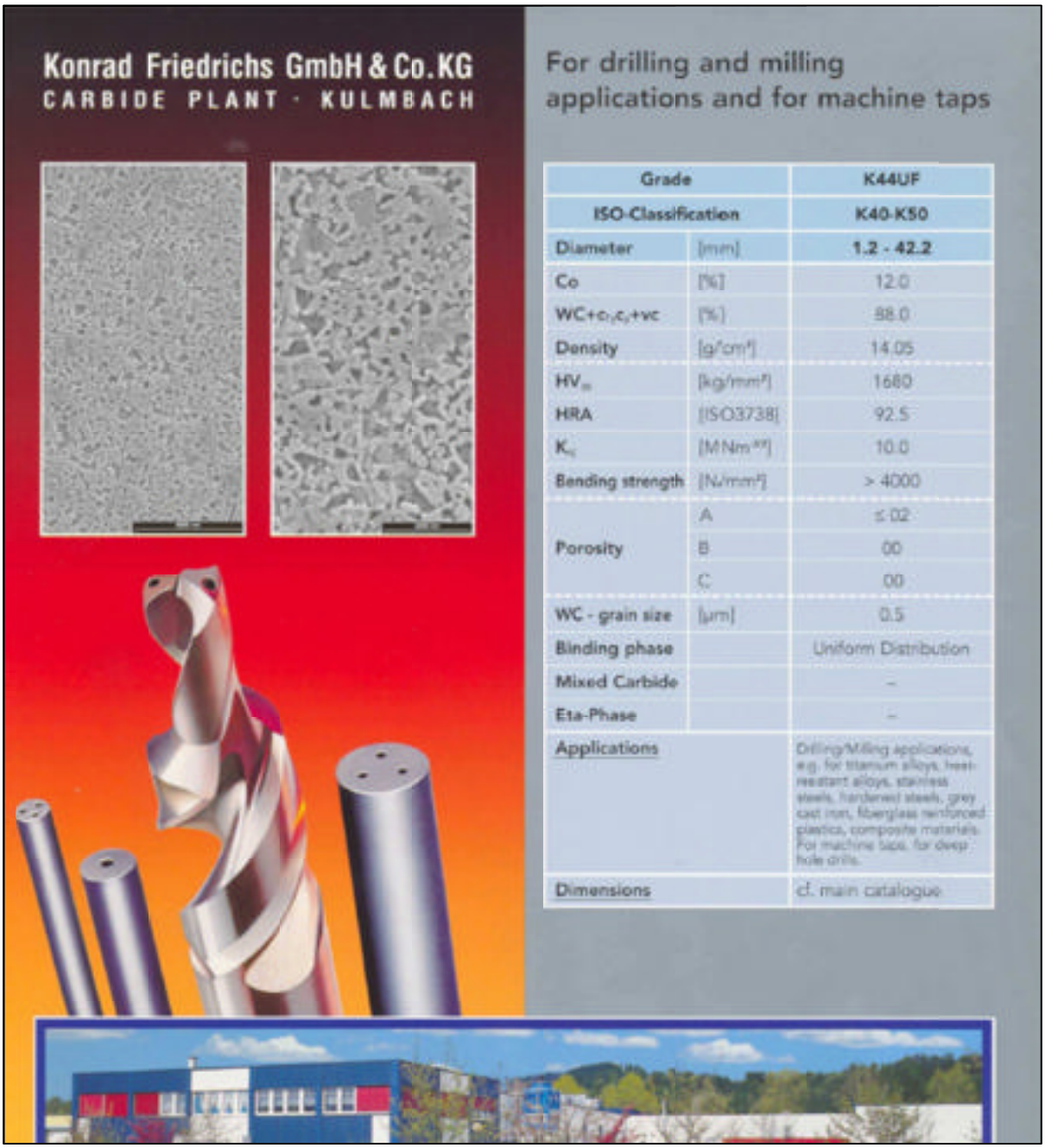
9255B_000-168e-12.09

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2009, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

ANNEXE II

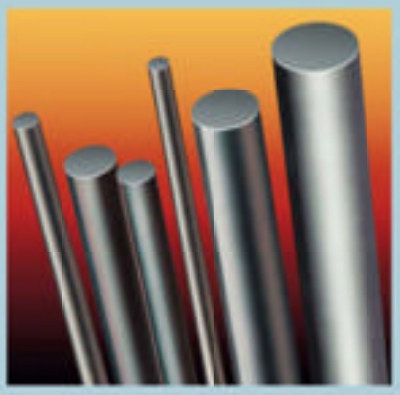
SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DU CARBURE K 44UF



Konrad Friedrichs GmbH & Co.KG
CARBIDE PLANT · KULMBACH

For drilling and milling applications and for machine taps

Grade		K44UF
ISO-Classification		K40-K50
Diameter	[mm]	1.2 - 42.2
Co	[%]	12.0
WC+c_r,c_v+vc	[%]	88.0
Density	[g/cm³]	14.05
HV_{30}	[kg/mm²]	1680
HRA	[ISO3738]	92.5
K_{Ic}	[MNm$^{-3/2}$]	10.0
Bending strength	[N/mm²]	> 4000
Porosity	A	≤ 02
	B	00
	C	00
WC - grain size	[µm]	0.5
Binding phase		Uniform Distribution
Mixed Carbide		–
Eta-Phase		–
Applications		Drilling/Milling applications, e.g. for titanium alloys, heat-resistant alloys, stainless steels, hardened steels, grey cast iron, fiberglass reinforced plastics, composite materials. For machine taps, for deep hole drills.
Dimensions		cf. main catalogue



Rods, unground, without coolant ducts, length: 310 mm

Carbide grades:

K40UF
Item No. 7180

K20F
Item No. 7172

K44UF
Item No. 7175
Surcharge: 5 %

K55SF
Item No. 7186
Surcharge: 10 %

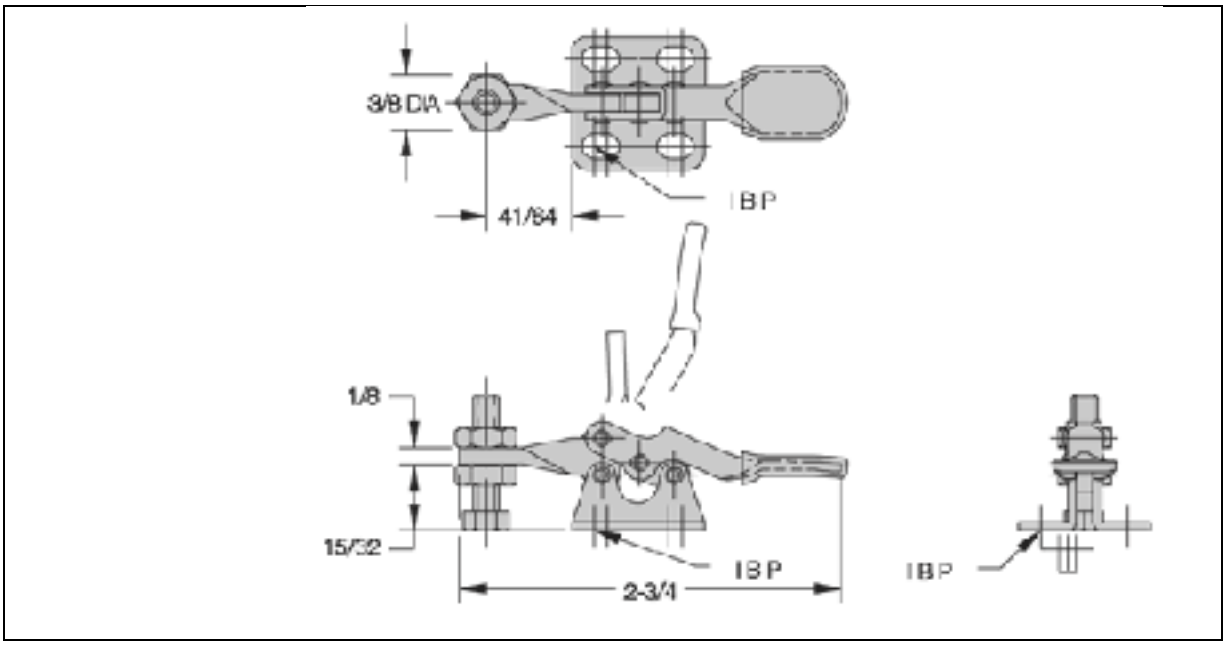
D [mm]	TOL [mm]	Gross price [Euro]
1.2	+0.20	3,19
1.7	+0.20	3.95
2.2	+0.20	4.98
2.7	+0.20	6.48
3.2	+0.20	8.17
3.7	+0.20	9.39
4.2	+0.20	11.74
4.7	+0.20	14.09
5.2	+0.20	16.91
5.7	+0.25	20.01
6.2	+0.25	22.08
6.7	+0.25	25.46
7.2	+0.25	29.22
7.7	+0.25	33.16
8.2	+0.30	38.05
8.7	+0.30	42.84
9.2	+0.30	47.91
9.7	+0.30	53.08
10.2	+0.30	58.24
10.7	+0.30	64.35
11.2	+0.35	69.98
11.7	+0.35	77.03

D [mm]	TOL [mm]	Gross price [Euro]
14.2	+0.50	112.73
14.7	+0.50	120.24
15.2	+0.50	128.70
15.7	+0.50	137.15
16.2	+0.50	145.61
16.7	+0.50	155.94
17.2	+0.50	165.33
17.7	+0.50	174.73
18.2	+0.60	185.06
18.7	+0.60	189.76
19.2	+0.60	199.62
19.7	+0.60	209.95
20.2	+0.60	218.88
20.7	+0.60	232.03
21.2	+0.60	244.24
21.7	+0.60	255.52
22.2	+0.60	267.73
22.7	+0.60	279.94
23.2	+0.60	292.15
23.7	+0.60	304.36
24.2	+0.70	317.52
25.2	+0.70	341.94

D [mm]	TOL [mm]	Gross price [Euro]
29.2	+0.70	479.09
30.2	+0.70	505.39
31.2	+0.70	536.86
32.2	+0.70	569.27
33.2	+0.80	606.85
34.2	+0.80	643.95
35.2	+0.80	682.94
36.2	+0.80	721.92
38.2	+0.80	804.12
40.2	+0.80	890.55

ANNEXE III

SPÉCIFICATION TECHNIQUE DU LEVIER DE SERRAGE CL-150 HTC



STEEL

PART NO.	DESCRIPTION	HOLDING CAPACITY	SHIPPING WEIGHT
CL-150-HTC	Solid Arm, Flanged Base	60 lbs	0.1 lbs
CL-151-HTC	Solid Arm, Straight Base		
CL-152-HTC	Solid Arm, Right Flange		
CL-153-HTC	Solid Arm, Left Flange		
CL-250-HTC	Open Arm, Flanged Base		
CL-251-HTC	Open Arm, Straight Base		
CL-252-HTC	Open Arm, Right Flange		
CL-253-HTC	Open Arm, Left Flange		

ANNEXE IV

FORCES D'ACQUISITION DES ESSAIS DE COUPE DU PLAN D'EXPÉRIENCE DE L'ÉVALUATION DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES LORS DU DÉTOURAGE DE LAMINÉS COMPOSITES

Disponible en contactant le responsable du projet CRIAQ MANU413.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Altintas, Yusuf. 2006. « Mechanics of Metal cutting ». In *Manufacturing Automation: Metal cutting mechanics,machine tool vibrations and CNC design*, sous la dir. de Press, Cambridge. p. 58. Cambridge University Press.

Arola, D. D., et M. Ramulu. 1998. « Net-shape machining and the process-dependent failure of fiber-reinforced plastics under static loads ». *Journal of Composites Technology and Research,* vol. 20, n° Copyright 1998, IEE, p. 210-20.

Arola, D., et M. Ramulu. 1994. « Machining-induced surface texture effects on the flexural properties of a graphite/epoxy laminate ». *Composites,* vol. 25, n° 8, p. 822-834.

Arola, D., et M. Ramulu. 1997. « Net shape manufacturing and the performance of polymer composites under dynamic loads ». *Experimental Mechanics,* vol. 37, n° Compendex, p. 379-385.

Bayer, M. 2002a. « High-speed Tool Steels, M and T Classification ». In *Machining*, sous la dir. de International, ASM. Vol. 16. ASM.

Bayer, M. 2002b. « High-speed Tool Steels, Properties of High-Speed Tool Steels ». In *Machining*, sous la dir. de International, ASM. Vol. 16. ASM.

Bhatnagar, N., N. Ramakrishnan, N. K. Naik et R. Komanduri. 1995. « On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 35, n° Compendex, p. 701-716.

Ferreira, J. R., N. L. Coppini et G. W. A. Miranda. 1999. « Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials ». *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 92-93, p. 135-140.

GE, DiamondInnovation. 2007. « Tool Blanks for Machining ».

Girot, F.Iliescu, D. 2009. « Machinability Aspect of Polymer MAtrix Composites ». In *Machining Composite Materials*, sous la dir. de Davim, J. P. p. 39-111. Wiley.

Horman, S., M. Collier et J. Michael. 2008. « Evaluation of different cutting tool technologies for machining carbon fiber reinforced plastics ». In *Composites Manufacturing 2008, April 14, 2008 - April 16, 2008*. Vol. TP08PUB36, p. 1-12. Coll. « Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers ». Salt Lake City, UT, United states: Society of Manufacturing Engineers.

Iliescu, D., D. Gehin, I. Iordanoff, F. Girot et M. E. Gutierrez. 2010. « A discrete element method for the simulation of CFRP cutting ». *Composites Science and Technology,* vol. 70, n° Compendex, p. 73-80.

ISO, International Standard Organization. 1989. « Tool life testing in milling Part 2 : End milling ISO 8688-2 ». p. 38.

Kalla, D., P. Lodhia, B. Bajracharya, J. Twomey et J. Sheikh-Ahmad. 2005. « CN force predication model in milling of carbon fiber reinforced polymers ». In *Intelligent Systems in Design and Manufacturing VI, 24 Oct. 2005*, 1. Vol. 5999, p. 59990-1. Coll. « Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng. (USA) ». USA: SPIE - The International Society for Optical Engineering. <http://dx.doi.org/10.1117/12.632100>.

Karner, J., M. Pedrazzini, I. Reineck, M. E. Sjostrand et E. Bergmann. 1996. « CVD diamond coated cemented carbide cutting tools ». *Materials Science and Engineering A,* vol. 209, n° Compendex, p. 405-413.

Kim, W. C., et C. K. H. Dharan. 1989. « A fracture control plan for composite structures ». *Engineering Fracture Mechanics,* vol. 34, n° 2, p. 305-324.

Koplev, A., Aa Lystrup et T. Vorm. 1983. « CUTTING PROCESS, CHIPS, AND CUTTING FORCES IN MACHINING CFRP ». *Composites,* vol. 14, n° Compendex, p. 371-376.

Veuillez sélectionner un type de document autre que « Generic » afin de faire afficher la référence bibliographique.

Ramulu, M. 1997. « Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites ». *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences,* vol. 22, n° Compendex, p. 449-472.

Ramulu, M., L. C. Parafitt, P. B. Stickler et D. Kim. 2005. « Influence of manufacturing process and fiber volume on edge finishing characteristics and surface integrity of glass fiber reinforced plastic composites ». In *SAMPE Fall Technical Conference - 37th ISTC, October 31, 2005 - November 3, 2005*. Vol. 2005, p. Seattle SAMPE. Coll. « International SAMPE Technical Conference ». Seattle, WA, United states: Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering.

Rao, G. Venu Gopala, Puneet Mahajan et Naresh Bhatnagar. 2008. « Three-dimensional macro-mechanical finite element model for machining of unidirectional-fiber reinforced polymer composites ». *Materials Science and Engineering: A,* vol. 498, n° 1-2, p. 142-149.

Reineck, I., M. E. Sjostrand, J. Karner et M. Pedrazzini. 1996. « HCDCA diamond-coated cutting tools ». In *6th European Conference on Diamond, Diamond-like and Related*

Materials (Diamond Films'95), 10-15 Sept. 1995, 6-8. Vol. 5, p. 819-24. Coll. « Diam. Relat. Mater. (Switzerland) ». Switzerland: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/0925-9635(95)00468-8>.

Santhanam, A.T. 2002a. « Cemented Carbide Composition and Microstructures ». In *Machining*, sous la dir. de International, ASM. Vol. 16. ASM.

Santhanam, A.T. 2002b. « Coated Carbide Tools ». In *Machining*, sous la dir. de International, ASM. Vol. 16. ASM.

Wang, D. H., M. Ramulu et D. Arola. 1995a. « Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate ». *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* vol. 35, n° Compendex, p. 1623-1623.

Wang, D. H., M. Ramulu et D. Arola. 1995b. « Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate ». *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* vol. 35, n° Compendex, p. 1639-1639.

Wang, X. M., et L. C. Zhang. 2003. « An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 43, n° Compendex, p. 1015-1022.

William, N. 2002. « Grinding,Honing and Lapping,Grinding Equipement and Processes ». In *Machining*, sous la dir. de International, ASM. Vol. 16. ASM.

Zhang, L. C., H. J. Zhang et X. M. Wang. 2001. « A FORCE PREDICTION MODEL FOR CUTTING UNIDIRECTIONAL FIBRE-REINFORCED PLASTICS ». *Machining Science and Technology: An International Journal,* vol. 5, n° 3, p. 293 - 305.