



Contribution to the study of the effect of polymer matrix composite specimen machining on their mechanical performances

Patrick Ghidossi

► To cite this version:

Patrick Ghidossi. Contribution to the study of the effect of polymer matrix composite specimen machining on their mechanical performances. Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2003. English. NNT : 2003ENAM0019 . pastel-00001050

HAL Id: pastel-00001050

<https://pastel.hal.science/pastel-00001050>

Submitted on 18 Feb 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARTS ET MÉTIERS

Centre de Châlons en champagne

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

de

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE

D'ARTS ET MÉTIERS

Spécialité : Procédés de Fabrication

par

Patrick GHIDOSI

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'EFFET DES CONDITIONS D'USINAGE D'ÉPROUVETTES EN COMPOSITES À MATRICE POLYMÈRE SUR LEUR RÉPONSE MÉCANIQUE.

Soutenue le 15 décembre 2003 devant le jury composé de :

MM. P. DAVIES	Ingénieur (HDR), IFREMER Brest	Rapporteur
M. EL MANSORI	MCF, ENSAM Châlons en Champagne	Co-Directeur
F. GIROT	Professeur, ENSAM Bordeaux	Membre invité
F. PIERRON	Professeur, ENSAM Châlons en Champagne	Directeur de thèse
R. PIQUET	MCF, IUT Génie Mécanique et Productique, Toulouse	Examinateur
M. TOURATIER	Professeur, ENSAM Paris	Président
A. VAUTRIN	Professeur, École Nationale Supérieure des Mines de St Étienne	Rapporteur

Remerciements

Cette thèse n'aurait pu avoir lieu sans le soutien sans faille de M. René DOUCET, Directeur du CER ENSAM de Châlons en Champagne qui, avec M. HAUTIER, Directeur de la Recherche à L'ENSAM, ont su aménager mon service d'enseignement de professeur du cadre ENSAM. Je les en remercie vivement.

Toute ma reconnaissance à mon Directeur de thèse M. Fabrice PIERRON, Directeur du LMPF, pour son appui scientifique et à M. Mohamed EL MANSORI, mon Co-Directeur de thèse, pour ses précieux et judicieux conseils ainsi que sa très grande disponibilité.

Je tiens à remercier vivement M. TOURATIER, Professeur des Universités à l'ENSAM de Paris qui m'a honoré en acceptant la présidence du jury. Tous mes remerciements à M. VAUTRIN, Professeur des Universités à l'École Nationale Supérieure des Mines de St Étienne et M. DAVIES, Ingénieur (HDR) à l'IFREMER de Brest qui ont accepté de rapporter mon travail, ainsi qu'à M. PIQUET, Maître de conférences au Laboratoire de Génie Mécanique de Toulouse et M. GIROT, Professeur des Universités à l'ENSAM de Bordeaux pour leur participation au jury.

Je remercie également toute l'équipe du LMPF pour son soutien et ses encouragements, et particulièrement M. Abdel BOUZID et M^{elle} Régine GEOFFROY que j'ai grandement sollicité.

Table des matières

Introduction générale	XIII
1 Étude bibliographique	1
1.1 L'enlèvement de matière par fraisage dans les composites à matrice polymère	1
1.1.1 Généralités	1
1.1.2 Matériaux des outils de coupe	3
1.1.3 Géométries des outils de fraisage	7
1.1.4 Usure des outils de coupe en fraisage des composites	8
1.1.5 Paramètres de coupe	11
1.1.6 Effets de la structure du composite	12
1.1.6.1 Modes de génération du copeau dans les composites	12
1.1.6.2 Endommagements induits par la coupe des composites . .	15
1.1.6.3 États de surface	19
1.2 Effets des paramètres d'usinage sur le comportement mécanique d'éprouvettes en composite	20
1.2.1 Essais normalisés	21
1.2.2 Éprouvettes usinées par perçage	21
1.2.3 Éprouvettes usinées par fraisage	27
1.2.4 Conclusion	29
1.3 Modélisation de la coupe des composites	29
1.4 Synthèse et objectif des travaux présentés	30
2 Protocoles expérimentaux	33
2.1 Essais mécaniques	34
2.1.1 Essai de cisaillement Iosipescu	34
2.1.2 Essai de traction sur anneaux	36

2.1.3	Essai de traction hors-axes	38
2.2	Matériaux composites étudiés	40
2.2.1	Composite n°1	40
2.2.2	Composite n°2	41
2.2.3	Composite n°3	41
2.2.4	Composite n°4	42
2.3	Usinage des éprouvettes	43
2.3.1	Dispositif d'usinage	43
2.3.2	Éprouvettes Iosipescu	44
2.3.3	Éprouvettes anneaux	46
2.3.4	Éprouvettes de traction hors-axes	47
2.4	Instrumentation des essais d'usinage	51
2.4.1	Mesure des efforts de coupe	52
2.4.2	Mesure des températures de surface	54
2.4.3	Mesure des rugosités de surface	57
2.4.4	Microscopies optique et électronique à balayage	57
3	Qualification des endommagements dus à la coupe	59
3.1	Éprouvettes Iosipescu	59
3.1.1	Éprouvettes Iosipescu carbone/époxy (Composite C1)	60
3.1.2	Éprouvettes Iosipescu verre/époxy (Composite C3)	69
3.2	Éprouvettes anneaux (Composite C2)	76
3.3	Éprouvettes de traction hors axes (Composite C4)	80
3.3.1	1 ^{ère} analyse : influences des paramètres de coupe	80
3.3.2	2 ^{ème} analyse : influences des configurations d'usinage	84
3.4	Conclusion	91
4	Essais mécaniques : résultats expérimentaux	93
4.1	Essais de cisaillement Iosipescu	93
4.1.1	Éprouvettes carbone/époxy (Composite C1)	93
4.1.2	Éprouvettes verre/époxy (Composite C3)	96
4.2	Essais de traction sur anneaux (Composite C2)	100
4.3	Essais de traction hors-axes (Composite C4)	104
4.3.1	1 ^{ère} campagne d'essais	104
4.3.2	Seconde campagne d'essais	110

4.4	Les recommandations normatives	113
4.5	Conclusion	114
5	Analyse des résultats	115
5.1	Introduction	115
5.2	États de surface	116
5.3	Observations microscopiques	118
5.4	Conclusion	129
6	Conclusion générale et perspectives	131
	Nomenclature	137
	Bibliographie	138

Liste des tableaux

1.1	Influence de la forme de l'arête de coupe sur l'usinabilité des composites à renfort continu de carbone.	8
1.2	Valeurs numériques des constantes de Taylor.	9
1.3	Extrait de la norme NF-EN-ISO-2818 pour la préparation des éprouvettes.	22
2.1	Dimensions des éprouvettes d'essai de traction hors-axes.	39
2.2	Conditions de coupe des éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy C1.	45
2.3	Conditions de coupe des éprouvettes Iosipescu en verre/époxy C3.	46
2.4	Conditions de coupe des éprouvettes anneaux en verre/époxy C2.	47
2.5	Conditions de coupe de la première campagne d'essais sur éprouvettes de traction hors-axes. Composite C4.	50
2.6	Conditions de coupe de la deuxième campagne des 4 séries d'essais des éprouvettes de traction hors-axes. Composite C4.	51
2.7	Caractéristiques du dynamomètre Kistler 9255B.	52
3.1	Efforts de coupe pour les éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy	66
4.1	Contrainte d'apparition de la 1 ^{ère} fissure. Éprouvettes en carbone/époxy, essai Iosipescu, composite C1	94
4.2	Contrainte à rupture pour les éprouvettes en verre/époxy. Essai Iosipescu, composite C3.	97
4.3	Étude de la normalité des distributions des contraintes à l'apparition de la 1 ^{ère} fissure - éprouvettes Iosipescu verre/époxy, composite C3.	98
4.4	Résultats des tests de normalité des essais de traction des éprouvettes anneaux. Composite C2.	101
4.5	Efforts de traction à rupture supportés par les éprouvettes anneaux en verre/époxy. Composite C2.	102

4.6	Test d'Aspin-Welch sur les résultats mécaniques des éprouvettes anneaux. Composite C2.	103
4.7	Résultats des tests de normalité de la 1 ^{ère} campagne d'essais de traction hors-axes. Composite C4	105
4.8	Test d'Aspin-Welch sur les séries d'éprouvettes de traction hors-axes pré- sentant les plus grands écarts. 1 ^{ère} campagne d'essais, composite C4.	108
4.9	Résultats mécaniques de la seconde campagne d'essais de traction hors- axes. Composite C4.	111
4.10	Résultats mécaniques complémentaires de la 2 ^{ème} campagne d'essais de traction hors axes. Composite C4	112
5.1	Test d'Aspin-Welch sur les séries d'éprouvettes de traction hors-axes pré- sentant les plus grands écarts. Configuration +15°C, composite C4.	129

Table des figures

1.1	Fraisage de profil.	1
1.2	Section coupée par une dent d'outil en opération de fraisage.	3
1.3	Convention d'orientation des fibres.	4
1.4	Modélisation de la zone de cisaillement.	5
1.5	Paramètres d'usure des outils	10
1.6	Usure d'un foret multifacial en perçage grande vitesse	10
1.7	Évolution des usures des fraises en diamant polycristallin.	12
1.8	Formation du copeau en coupe orthogonale.	14
1.9	Mécanismes de formation du copeau.	15
1.10	Délaminage et écaillage en perçage et fraisage.	16
1.11	Déchaussement des fibres en entrée et sortie d'opération de contournage.	16
1.12	Pelûchement en fraisage.	17
1.13	Fléchissement et décohésion de l'interface fibre/matrice.	17
1.14	Taille de la zone endommagée en perçage en fonction du rapport vitesse de coupe sur vitesse d'avance.	18
1.15	Influence des délaminages en entrée et sortie de trou sur la raideur en flexion en fatigue.	23
1.16	Influence de la dégradation thermique en perçage sur la raideur.	24
1.17	Évolution de la contrainte à la rupture en traction d'éprouvettes percées en fonction du rapport vitesse de rotation sur vitesse d'avance.	24
1.18	Courbe de Wöhler pour les essais de compression avec éprouvettes percées par perçage orbital ou foret PCD neuf.	25
1.19	Courbe de Wöhler pour les essais de matage avec éprouvettes percées par détournage ou foret PCD neuf.	26
1.20	Évolution de la résistance au matage d'éprouvettes en verre/époxy en fonction du rapport vitesse de coupe sur vitesse d'avance.	26

1.21	Réduction de la résistance à la traction en fonction de l'outil utilisé pour l'usinage des éprouvettes verre/époxy.	28
1.22	Effort à rupture en flexion 4 points d'éprouvettes carbone/bismaléimide en fonction du mode de préparation.	28
2.1	Définition des éprouvettes Iosipescu.	34
2.2	Chargement des éprouvettes Iosipescu.	35
2.3	Courbe typique de relevé d'essai de cisaillement Iosipescu (éprouvettes carbone/époxy).	35
2.4	Montage d'essai Iosipescu	36
2.5	Essai de traction sur anneau épais.	37
2.6	Courbe de réponse typique d'essai de traction sur anneau épais.	37
2.7	Schématisation d'éprouvettes d'essai de traction hors-axes.	38
2.8	Courbe de réponse typique d'essai de traction hors-axes.	40
2.9	Presse à plateaux chauffants.	42
2.10	Moule de cuisson des plaques de composite verre/époxy.	43
2.11	Centre d'usinage à grande vitesse.	44
2.12	Trajectoire de l'outil pour l'usinage des éprouvettes Iosipescu.	45
2.13	Modes de fraisage des éprouvettes anneaux.	46
2.14	Caractéristiques des outils pour la fabrication des éprouvettes de traction hors-axes.	48
2.15	Modes d'attaque de l'outil de la deuxième campagne d'essais de traction hors-axes.	51
2.16	Relevé des composantes de l'effort de coupe pendant l'usinage d'une entaille d'éprouvette Iosipescu.	53
2.17	Étalonnage de la caméra infrarouge Agema.	55
2.18	Instrumentation de la zone de coupe.	56
2.19	Image infrarouge de la zone de coupe. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	56
3.1	Rugosité Ra dans l'entaille côté $+45^\circ$ c en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu, composite C1.	60
3.2	Rugosité Ra dans l'entaille côté -45° c en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu, composite C1.	61

3.3	Rugosité dans l'entaille en fonction de la longueur usinée par les outils (éprouvettes Iosipescu, composite C1).	62
3.4	Arêtes de coupe des fraises CW ϕ 2 mm neuves et usées.	62
3.5	Observation des deux faces des entailles (éprouvettes Iosipescu, composite C1).	63
3.6	Aspect micrographique des surfaces usinées en fonction des conditions de coupe. Éprouvettes type Iosipescu, composite C1.	64
3.7	Composante normale à la surface usinée de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu. Composite C1	66
3.8	Composante tangentielle à la surface usinée de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu, composite C1	67
3.9	Effort normal à la surface usinée en fonction de la longueur usinée. Éprouvettes Iosipescu. Composite C1	68
3.10	Effort tangentiel à la surface usinée en fonction de la longueur usinée. Éprouvettes Iosipescu. Composite C1	68
3.11	Rugosité des surfaces pour $f_z = 0,01 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$. Éprouvettes Iosipescu, composite C3.	70
3.12	Rugosité des surfaces pour $f_z = 0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$. Éprouvettes Iosipescu, composite C3.	70
3.13	Rugosité Ra (côté -45°c) pour $f_z = 0,01 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$. Éprouvettes Iosipescu, composite C3.	71
3.14	Rugosité Ra (côté -45°c) pour $f_z = 0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$. Éprouvettes Iosipescu, composite C3.	71
3.15	Rugosité Ra (côté $+45^\circ\text{c}$) pour $f_z = 0,01 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$. Éprouvettes Iosipescu, composite C3.	72
3.16	Rugosité Ra (côté $+45^\circ\text{c}$) pour $f_z = 0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$. Éprouvettes Iosipescu, composite C3.	72
3.17	Vue globale de l'entaille sur éprouvettes Iosipescu, composite C3	73
3.18	Observations microscopiques des surfaces usinées des éprouvettes Iosipescu, composite C3.	74
3.19	Effort normal à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté $+45^\circ\text{c}$ (éprouvettes Iosipescu composite C3).	74
3.20	Effort tangentiel à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté $+45^\circ\text{c}$ (éprouvettes Iosipescu composite C3).	75

3.21	Effort normal à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté -45° c (éprouvettes Iosipescu composite C3).	75
3.22	Effort tangentiel à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté -45° c (éprouvettes Iosipescu composite C3).	76
3.23	Mesures de la rugosité R sur les éprouvettes anneaux, composite C2.	77
3.24	Rugosité R des éprouvettes en anneau, composite C2.	77
3.25	Endommagements macroscopiques en fonction du mode d'usinage (éprouvettes anneaux, composite C2).	79
3.26	Rugosité en fonction de la vitesse d'avance, 1 ^{ère} série d'éprouvettes de traction hors-axes, composite C4, outil PCD.	81
3.27	Rugosité en fonction de la vitesse d'avance, 1 ^{ère} série d'éprouvettes de traction hors-axes, composite C4, outil CW.	81
3.28	Températures maximales atteintes par la surface usinée au passage de l'outil PCD, 1 ^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, composite C4.	82
3.29	Températures maximales atteintes par la surface usinée au passage de l'outil CW, 1 ^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, composite C4.	83
3.30	Acuité des arêtes de coupe des outils d'éprouvettes de traction hors-axes.	83
3.31	Refoulement de matière usinée par l'arête de coupe et frottements à l'interface surface usinée/face de dépouille.	84
3.32	Rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4, orientation 15°	85
3.33	Rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4, orientation 30°	85
3.34	Rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4, orientation 45°	86
3.35	Fissures créées pendant l'usinage. Éprouvettes de traction hors-axes, configuration $-\theta^{\circ}$, $V_f = 400 \text{ mm.min}^{-1}$	87
3.36	Observations microscopiques des surfaces usinées, 1 ^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, orientation fibres $+15^{\circ}$ c, composite C4.	88
3.37	Observations microscopiques des surfaces usinées, 1 ^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, orientation fibres $+45^{\circ}$ c, composite C4.	89
3.38	Action de la dent de l'outil dans les configurations $+\theta^{\circ}$ c	90
4.1	Contrainte d'apparition de la 1 ^{ère} fissure en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu. Composite C1	94

4.2	Contrainte d'apparition de la 1 ^{ère} fissure en fonction de la longueur usinée par l'outil. Éprouvettes Iosipescu. Composite C1	95
4.3	Contrainte d'apparition de la 1 ^{ère} fissure en fonction de la rugosité. Éprouvettes Iosipescu. Composite C1	96
4.4	Contrainte d'apparition de la 1 ^{ère} fissure en fonction des longueurs usinées par outil. Éprouvettes Iosipescu, composite C3.	98
4.5	Contraintes d'apparition de la 1 ^{ère} fissure de cisaillement (CMCF). Essai Iosipescu, composite C3.	99
4.6	Taux volumique de fibres des éprouvettes Iosipescu. Composite C3.	100
4.7	Efforts de traction à rupture des éprouvettes anneaux. Composite C2	102
4.8	Contrainte à rupture des éprouvettes de traction hors-axes en fonction de la vitesse de coupe. 1 ^{ère} campagne d'essais. Composite C4	106
4.9	Contrainte à rupture des éprouvettes de traction hors-axes. 1 ^{ère} campagne d'essais. Composite C4	109
4.10	Contrainte à rupture des éprouvettes de traction hors-axes en fonction de la vitesse de coupe. Seconde campagne d'essais, orientation des fibres de 15°, composite C4.	112
4.11	Contrainte à rupture des éprouvettes de traction hors-axes en fonction de l'avance. Seconde campagne d'essais, orientation des fibres de 45°, composite C4.	113
5.1	Influence de la rugosité Ra sur la contrainte maximum à rupture. Éprouvettes de traction hors-axes, orientation des fibres de 15°, composite C4.	116
5.2	Influence de la rugosité Ra sur la contrainte maximum à rupture. Éprouvettes de traction hors-axes, orientation des fibres de 30°, composite C4.	117
5.3	Influence de la rugosité Ra sur la contrainte maximum à rupture. Éprouvettes de traction hors-axes, orientation des fibres de 45°, composite C4.	117
5.4	Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration + θ° . Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	119
5.5	Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration - θ° . Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	120
5.6	Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration + θ° . Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	121
5.7	Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration - θ° . Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	122

5.8	Trous dans la surface usinée dans la configuration $+15^{\circ}\text{c}$, V_f 11000 mm.min $^{-1}$. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	123
5.9	Fibres dépassant de la surface usinée dans la configuration $+45^{\circ}\text{c}$, V_f 11000 mm.min $^{-1}$. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	123
5.10	Observations macroscopiques des surfaces usinées. Éprouvettes de traction hors-axes, configuration $+15^{\circ}\text{c}$, composite C4.	124
5.11	Enrobage en vue d'observation au MEB dans l'épaisseur des éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	125
5.12	Déchaussement des fibres en sub-surface sous l'action de l'arête de coupe. Éprouvettes de traction hors-axes, configuration $+45^{\circ}\text{c}$, composite C4 . . .	126
5.13	Pourcentage de surface usinée endommagée des éprouvettes de traction hors-axes. Orientation fibres $+15^{\circ}\text{c}$, composite C4.	127
5.14	Profondeur totale de fibres déchaussées des éprouvettes de traction hors- axes. Orientation fibres $+45^{\circ}\text{c}$ et -45°o , composite C4.	127
5.15	Contrainte à rupture en fonction du pourcentage de surface endommagée. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.	128
5.16	Contrainte à rupture en fonction de la profondeur endommagée. Éprou- vettes de traction hors-axes, composite C4.	128
6.1	Géométrie des éprouvettes Iosipescu.	134

Introduction générale

L'utilisation des composites à matrice polymère et renfort fibreux dans les applications industrielles est longuement restée cantonnée à des pièces semi-structurales ou d'habillage. Néanmoins, les progrès de la technologie des composites sont tels qu'on assiste de plus en plus à leur emploi comme matériaux de structure. Leur certification pour une application industrielle est en grande partie déterminée par leur capacité à supporter les diverses sollicitations en service. Cela pose avec acuité la problématique des méthodes de caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux sous des sollicitations complexes. Toute réflexion à caractère expérimental sur ce sujet se trouve donc en prise directe avec les sciences de l'ingénieur. La mécanique des matériaux occupe une place de choix dans cette problématique. Comme les autres classes de matériaux, les composites à matrice polymère et renfort fibreux peuvent être soumis à différents types d'essais mécaniques (traction, compression, cisaillement, torsion, ...). L'ensemble de ces méthodes, parfois difficile à mettre en œuvre, donne accès en principe au comportement mécanique généralisé en chargement multiaxial. Pour certains essais mécaniques sur composites, les normes préconisent actuellement des éprouvettes permettant d'évaluer les résistances mécaniques correspondantes. Des recommandations de préparation et d'emploi de ces éprouvettes sont brièvement rapportées. Cette préparation fait souvent appel à la coupe par enlèvement de matière à l'outil coupant dans une plaque. Selon la nature de cette découpe, des endommagements (délaminages, dégradations thermiques, ...) aux abords des chants de l'éprouvette peuvent être occasionnés. Il importe donc de s'assurer que les propriétés mécaniques mesurées ne soient pas affectées par ces endommagements dus à la coupe. Ce problème demeure très peu traité dans la littérature concernant les essais mécaniques des composites. Les normes elles-mêmes sont assez discrètes sur ce point. Partant de ce constat, la spécificité de ce travail s'inscrit sous le sceau d'une double préoccupation :

- évaluer l'interdépendance qui peut exister entre la préparation d'éprouvettes en composites par usinage et leur performances mécaniques ;

- analyser et comprendre cette interdépendance afin de clarifier les enjeux liés à la préparation des éprouvettes de caractérisation du comportement mécanique des composites.

Pour ce faire, l'étude a été orientée essentiellement vers des essais mécaniques pour lesquels les éprouvettes présentent :

- une géométrie simple dont la génération par fraisage en détournage est souple ;
- une large accessibilité des bords usinés pour une meilleure qualification des dommages inhérents à la coupe ;
- une sensibilité potentielle à priori aux endommagements lors de l'essai mécanique.

Seule une étude comparative, essai par essai, permettra une meilleure compréhension ainsi qu'une évaluation tangible de l'interdépendance entre découpe d'éprouvettes en composite et tenue mécanique.

C'est l'ensemble de ces raisons qui a motivé la nature du travail exposé dans ce mémoire. L'objectif est d'apporter des éléments de réponse quant aux effets des procédures de découpe d'éprouvettes sur leur réponse mécanique. Ce travail de recherche n'est pas exhaustif et ne doit être considéré que comme une contribution à un programme beaucoup plus vaste visant à positionner scientifiquement ce thème de recherche peu traité tant au niveau national qu'international.

Le contenu du présent mémoire s'articule de la façon suivante :

- la présentation du sujet, suivie d'une analyse bibliographique centrée essentiellement sur les problèmes liés au fraisage des composites à matrice polymère et renfort fibreux introduit le mode d'usinage étudié. Les recommandations normatives de préparation des éprouvettes en composite sont ensuite exposées. Une analyse des travaux étudiant les liens entre découpe d'éprouvettes en composites et performances mécaniques, suivis par quelques tentatives de modélisation terminent le premier chapitre ;
- la description des protocoles expérimentaux relatifs à la fabrication des composites, de la coupe instrumentée des éprouvettes ainsi que de la conduite des essais mécaniques, est exposée dans le second chapitre. Le choix de chaque triptyque (géométrie et matériau d'éprouvette, préparation par usinage et nature d'essai mécanique) est justifié et les techniques d'analyse des surfaces usinées sont décrites ;
- la compréhension des effets de la découpe d'éprouvettes sur leurs performances mécaniques, qui nécessite de préciser la qualité des surfaces usinées, a conduit à quelques

analyses qualitatives d'aspects microgéométriques et microstructurels obtenus dans diverses configurations de coupe. Tel est l'objet du troisième chapitre ;

- le quatrième chapitre expose l'ensemble des résultats expérimentaux relatifs à la réponse mécanique d'éprouvettes issues de différents matériaux composites dans diverses conditions de préparation et aux sollicitations des essais mécaniques étudiés. Ces résultats couplés aux observations effectuées au troisième chapitre sont confrontés aux préconisations normatives ;
- une analyse globale de l'ensemble des résultats expérimentaux relevés dans ce travail est effectuée au cinquième chapitre. L'esprit recherché par cette analyse est de pister les critères pertinents qui mettent en relief les couplages entre dommages inhérents à la coupe des éprouvettes et performances mécaniques ;
- le dernier chapitre présenté sous forme de conclusions expose les points majeurs de cette étude et esquisse de nouvelles perspectives.

Chapitre 1

Étude bibliographique

1.1 L'enlèvement de matière par fraisage dans les composites à matrice polymère

1.1.1 Généralités

Le fraisage de profil (détourage) trouve son application principalement dans la génération de formes bidimensionnelles dans les plaques composites. Il est souvent employé pour les opérations d'ébavurage de pièces en composite brutes de moulage. Le principe est visualisé en figure 1.1.

L'outil (la fraise) de diamètre D (mm) tourne sur son axe à la vitesse de rotation N (tour.min⁻¹) et enlève la matière par son profil. La vitesse de coupe V_c (m.min⁻¹) est la vitesse péri-

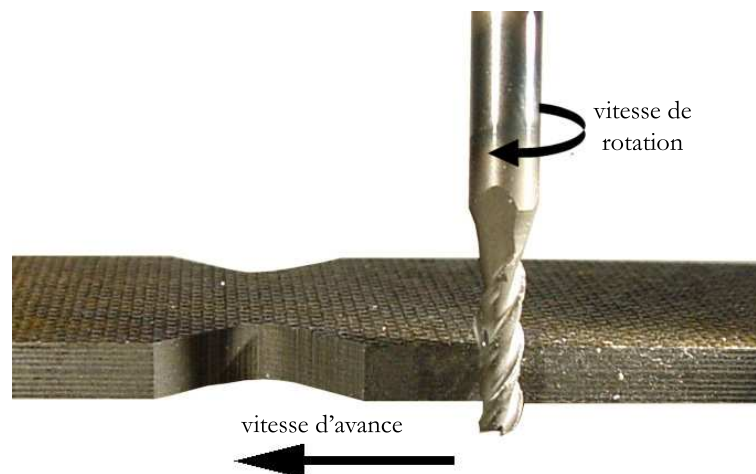


Figure 1.1 – *Fraisage de profil.*

phérique d'une dent de la fraise. La relation entre ces paramètres est :

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad (1.1)$$

Dans cette configuration de coupe (détourage), l'enlèvement de matière a pour objectif d'éliminer les bavures de moulage et de ramener les dimensions de la pièce à des valeurs conformes au dessin de définition. Le fraisage s'effectue alors sur toute l'épaisseur du composite. La profondeur de passe axiale a_p (mm) (cf. figure 1.2) correspond dans ce cas à l'épaisseur de la plaque. La largeur de la bavure enlevée est nommée profondeur de passe radiale a_e (mm) (cf. figure 1.2).

La fraise possède un certain nombre Z de dents. En fixant une avance par dent f_z (mm.dent⁻¹.tour⁻¹) dans la matière au niveau de l'axe de la fraise, la vitesse d'avance V_f (mm.min⁻¹) de la fraise est :

$$V_f = Zf_zN \quad (1.2)$$

Le débit de matière enlevée ou débit de copeau Q (mm³.min⁻¹) est exprimé par la relation suivante :

$$Q = a_p a_e V_f \quad (1.3)$$

Dans le cas du fraisage par contournage, les trajectoires successives des arêtes de coupe génèrent des copeaux dont la section est en forme de croissant (cf. figure 1.2). Suivant que la fraise attaque le copeau par son épaisseur nulle ou son épaisseur maximum, le fraisage est désigné respectivement fraisage en opposition et fraisage en concordance (ou en avallant).

D'autre part, l'angle entre les fibres des matériaux composites usinés et la vitesse d'avance peut varier de -90° à +90°. Par la suite, la convention indiquée sur la figure 1.3 définissant l'orientation des fibres par rapport à la surface usinée sera utilisée.

Durant la coupe, plusieurs phénomènes physiques sont activés au niveau de l'arête tranchante de l'outil. Les modèles les plus simples, comme par exemple celui de Merchant [46] (cf. figure 1.4), sont bidimensionnels et établis dans un plan perpendiculaire à la tangente à l'arête de coupe au point considéré de l'outil. Ils supposent également une acuité d'arête parfaite (rayon d'arête nul). Ces modèles de base ont été initialement établis pour la formation du copeau en régime stationnaire dans des matériaux métalliques isotropes et homogènes et ne prennent en compte que des phénomènes mécaniques activés dans la coupe (cf. figure 1.4) :

- effort de frottement à l'interface copeau/face de coupe ;

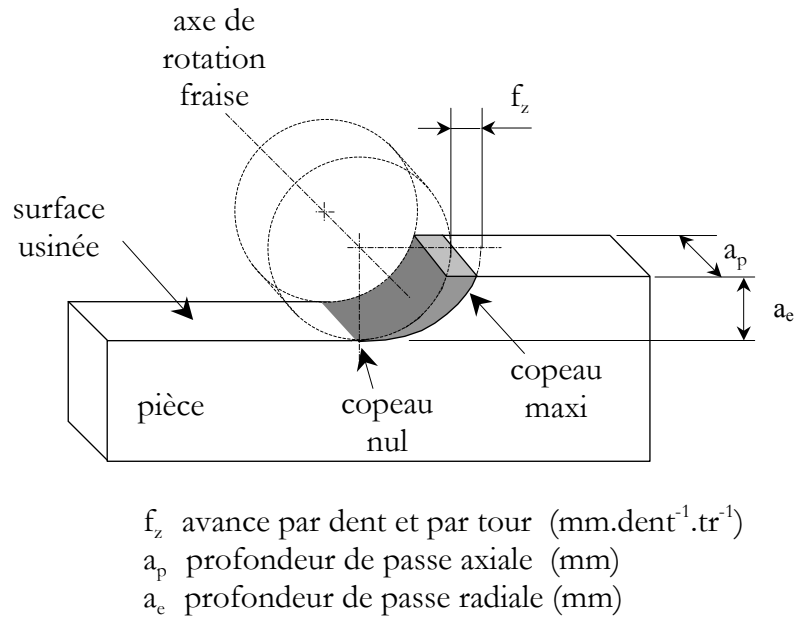


Figure 1.2 – *Section coupée par une dent d'outil en opération de fraisage.*

- déformation de la matière usinée par cisaillement dans un plan idéal nommé plan de cisaillement.

Les phénomènes thermiques engendrés par les frottements et les vitesses de déformation ne sont pas pris en compte dans le modèle simpliste de Merchant. Néanmoins, ils existent et doivent être considérés dans les sollicitations que subit l'outil.

Le modèle de Merchant a été repris dans ses grandes lignes (différentes zones de cisaillement) pour étudier la coupe des matériaux composites. La présence de différentes phases dans la matière usinée (fibres et matrice dans le cas de composites) est la principale différence avec les matériaux métalliques.

1.1.2 Matériaux des outils de coupe

À la vue des sollicitations présentées au paragraphe précédent, les matériaux des outils de coupe doivent répondre à plusieurs caractéristiques :

- résistance au frottement et à l'abrasion à l'interface copeau/face de coupe et à l'interface face de dépouille/surface usinée ;
- dureté à haute température et dissipation de la chaleur produite essentiellement par frottement et déformation plastique ;
- résistance de l'arête de coupe à l'usure par abrasion ;

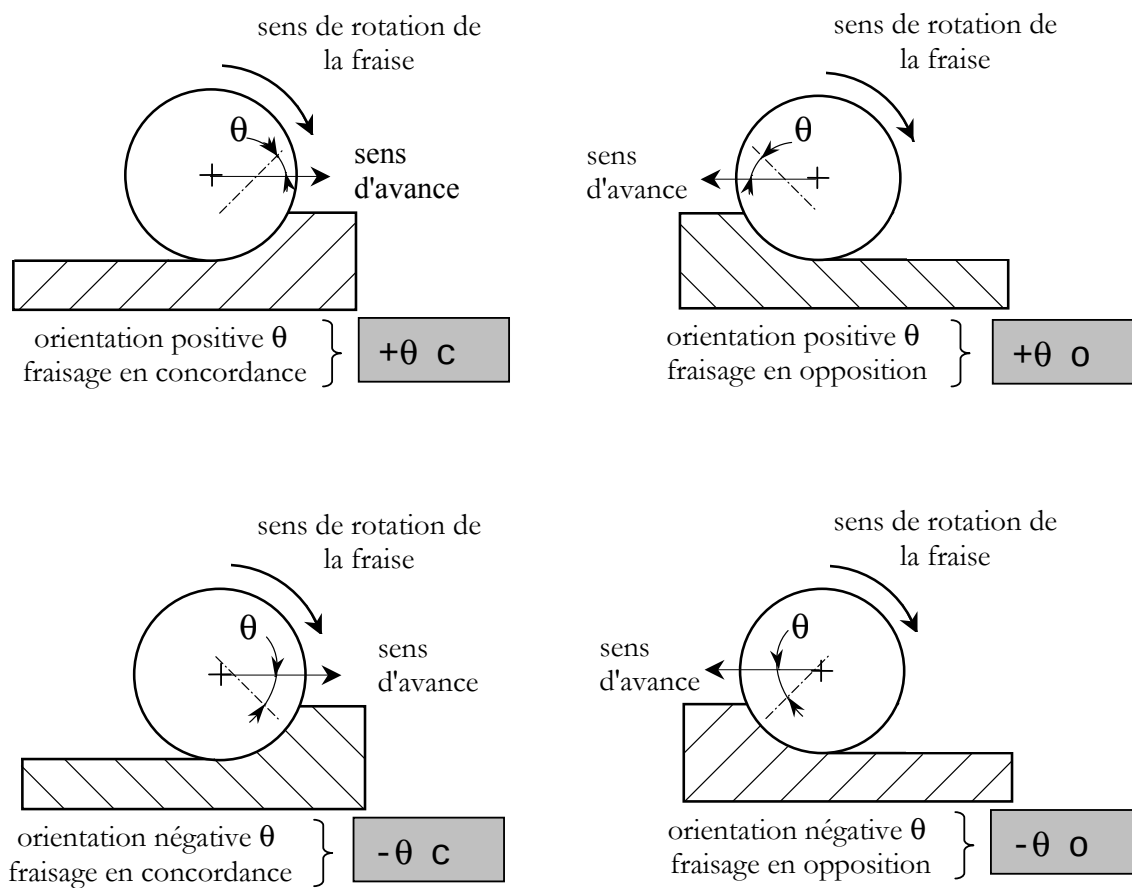


Figure 1.3 – Convention d'orientation des fibres par rapport au sens d'avance.

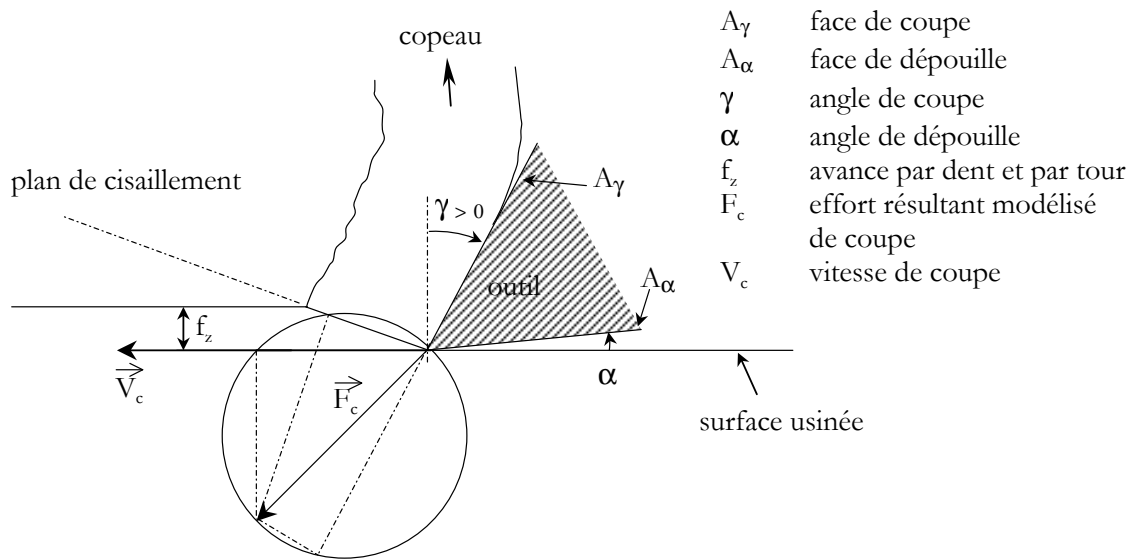


Figure 1.4 – Modélisation de la zone de cisaillement et décomposition de l'effort de coupe résultant au niveau de la pointe de l'outil [46].

- résistance à la fissuration et à l'écaillage (détérioration en modes catastrophiques de l'arête de coupe).

Les matériaux d'outil existants utilisés industriellement sont par ordre croissant de dureté :

- les aciers rapides : ce sont des aciers fortement alliés de tungstène, de chrome, de molybdène et de vanadium. Pour améliorer leurs performances, ces outils peuvent être revêtus par dépôt physique en phase vapeur (Physical Vapor Deposition, PVD). Ce procédé permet d'obtenir des couches minces (épaisseurs 1 à 2 μm) de matériaux durs, principalement du TiN , $TiCN$ et $TiAlN$;
- les carbures de tungstène (CW) : ces matériaux, issus de la technologie des poudres avec un liant métallique, permettent, grâce aux grains de carbure de tungstène, d'obtenir une dureté à chaud et une résistance à l'abrasion nettement supérieures aux aciers rapides. Pour améliorer encore leurs performances, ils peuvent être revêtus de dépôts ioniques obtenus essentiellement par procédés :
 - PVD : voir aciers rapides ;
 - CVD (Chemical Vapor Deposition) : dépôts chimiques en phase gazeuse. Une grande diversité de revêtements est déposable (TiN , $TiCN$, $TiAlN$, Al_2O_3 ,

HfN, etc...) avec un bon accrochage sur le substrat.

- les céramiques et cermets : ce sont des matériaux frittés sans liants métalliques. Ils ont une excellente dureté mais sont très sensibles aux chocs mécaniques et thermiques qui limitent leur utilisation ;
- les nitrures de bore cubiques (CBN) : ils se présentent sous formes très variées :
 - en dépôt électrolytique sur plaquettes en carbure de tungstène ;
 - en insert de CBN fritté et brasé sur plaquette en carbure métallique ;
 - en insert directement fritté sur plaquette en carbure de tungstène.
- le diamant : c'est le plus dur des matériaux ; il se présente sous plusieurs formes :
 - le diamant massif naturel. Sa faible résilience et sa grande fragilité (clivage facile dans quatre directions) restreignent son emploi à de petits outils de tournage pour des opérations de finition ;
 - le diamant synthétique (ou naturel) en cristaux déposés électrolytiquement sur un support métallique ;
 - le diamant polycristallin (PCD) obtenu par frittage de grains de diamant synthétiques. Le PCD est souvent lié, lors du frittage, à un support (une plaquette) à base de carbure de tungstène.

Les différentes études de qualification à la coupe par enlèvement de matière des composites ont eu recours à ces mêmes matériaux d'outil. Dans son travail de thèse sur le perçage de plaques minces en carbone/époxy et verre/époxy, R. Piquet [41] rejette les outils en acier rapide à cause de leur trop faible durée de vie. Leur usure prématurée rend le cisaillement des fibres difficile entraînant ainsi un arrachement de celles-ci. Même revêtus, les aciers rapides sont également écartés à cause de leur faible acuité d'arête. Les céramiques ne conviennent pas en raison de leur faible résistance aux chocs et de leurs susceptibilité aux chocs thermiques. Les seuls matériaux retenus par R. Piquet sont les carbures de tungstène K 20 micrograin (nuance normalisée selon la classification ISO) et les diamants polycristallins. Ces derniers permettent des arêtes de coupe avec d'excellentes acuités (environ 7 à 12 μm) tout en restant très résistantes à l'usure. Dans sa thèse sur la qualification de l'usinage de matériaux composites à matrices organiques renforcées de fibres de verre ou de carbone, P. Guégan [23] recommande des outils à plaquettes en diamant polycristallin plutôt qu'en carbure de tungstène ou en revêtement de grains de diamant afin d'atténuer les dommages inhérents à la coupe. H. Schulz [46] a étudié l'usure des outils de coupe en fraisage grande vitesse de composites à fibres de carbone T300/résine époxy et fibres de

carbone T300/résine polyamide. Il conclut que les seuls outils qui offrent une durée de vie économiquement viable sont les outils PCD et ce à des vitesses de coupe de l'ordre de 2500 m.min⁻¹. Abrate et al. [5] ne valident également en fraisage de composites carbone/époxy et verre/époxy que les outils en carbure de tungstène (CW) et en diamant (PCD). Ramulu [44] compare les outils en carbure de tungstène et en diamant polycristallin lors du tournage de composites à renforts fibreux. Ses expériences montrent que les outils en CW s'usent environ 120 fois plus vite que ceux en PCD.

En conclusion, la majorité des travaux sur l'usinage des composites à matrice polymère avec renforcement fibreux en verre ou en carbone recommandent l'emploi d'outils soit en CW soit en PCD. Le choix des outils PCD est souvent privilégié pour leur bien meilleure résistance à l'usure.

1.1.3 Géométries des outils de fraisage

La géométrie de la partie active des outils de coupe est définie dans la norme française NF ISO 3002-1 dont un extrait est repris dans la norme NF EN ISO 2818 [9]. Plusieurs études se sont attachées à déterminer les configurations géométriques optimales de la coupe des composites. Néanmoins, les critères d'optimisation sont la plupart du temps restés similaires à ceux utilisés pour l'usinage des matériaux métalliques.

À partir d'essais de coupe sur des composites à matrice thermoplastique et renfort continu de carbone, Koplev et al. [29] furent parmi les premiers à s'intéresser à l'influence de la géométrie de l'outil sur le processus de coupe, en relation avec les efforts de coupe générés. Les auteurs ont constaté que l'effort horizontal (dans le sens de la coupe) n'est que peu influencé par l'angle de coupe γ (cf. figure 1.4) alors qu'il est entièrement indépendant de l'angle de dépouille α (cf. figure 1.4). Néanmoins, ce dernier influe significativement sur l'effort vertical (effort de pénétration). En effet, en passant de 5° à 15° pour l'angle de dépouille, une diminution d'environ 30% de l'effort de pénétration a été enregistrée. En ce qui concerne l'influence de l'angle de coupe sur la tenue à l'usure de l'outil, Schulz [46] a étudié ce phénomène lors du fraisage des composites carbone/époxy et carbone/polyamide par des outils PCD. Il a noté un effet significatif de l'angle de coupe ainsi que de l'angle de dépouille sur le taux de détérioration des outils de coupe. Le tableau 1.1 synthétise les résultats de cette étude quant à l'influence de la géométrie d'arête (γ, α) sur la surface usinée, les efforts de coupe générés ainsi que sur l'état d'usure d'outil observé.

Par ailleurs, dans son travail de thèse, Guégan [23] montre que pour obtenir une

plus faible rugosité de surface usinée en fraisage de profil, le choix d'outil à dents (fraise "normale" 2 tailles) est recommandé par rapport à un outil à grains de diamant. Cette conclusion rejoint celle de Schulz [46] puisque l'angle de coupe local au niveau des grains de diamant est en moyenne fortement négatif (environ -40°) alors qu'il est positif ou nul pour les fraises 2 tailles en carbure de tungstène. D'autre part, Guégan [23] constate en perçage une coupe plus franche et des cotes mieux respectées avec des outils à plaquette en diamant polycristallin. Ses conclusions affirment que plus le rayon d'acuité d'arête r_α est faible, plus le cisaillement des fibres s'effectue dans de bonnes conditions. Ainsi, il recommande une acuité d'arête :

- $r_\alpha = 7$ à $12 \mu\text{m}$ pour les arêtes de coupe des outils à plaquettes en diamant polycristallin,
- $r_\alpha = 10$ à $20 \mu\text{m}$ pour les outils en carbure de tungstène.

1.1.4 Usure des outils de coupe en fraisage des composites

Les études du comportement en usure des outils lors de la coupe des composites à matrice polymère ont été majoritairement menées pour des opérations de perçage. Toutefois, en fonction de la configuration de coupe (tournage, fraisage, etc. . .), les modes d'usure d'outils peuvent être variables. De plus, en raison de la diversité et de la complexité des géométries d'outils utilisées, les paramètres usuels de quantification de l'usure d'outil

	α (angle de dépouille)		γ (angle de coupe)	
	faible	grand	faible	grand
Matériau usiné	inclinaison des fibres	surface rugueuse	chute du taux de détérioration de l'arête de coupe	faible taux de détérioration de l'arête de coupe
Outil	faible usure	éclatement de l'outil	faible usure	usure importante
Force	importante	faible	importante	faible

Tableau 1.1 – *Influence de la forme de l'arête de coupe sur l'usinabilité des composites à renfort continu de carbone [46].*

(usure en dépouille VB_{max} , usure en cratère KT_{max} , voir figure 1.5), ne représentent pas systématiquement le bon moyen pour déterminer des taux d'usure.

Lin et Shen [31] ont été confrontés à ce problème dans une étude portant sur le comportement en perçage à grande vitesse de composites unidirectionnels renforcés de fibres de verre. La plage de vitesse de coupe étudiée était comprise entre 210 et 850 m.min⁻¹. Deux types d'outils ont été testés : un foret hélicoïdal et un foret multi-facial (cf. figure 1.6). Lin et Shen [31] ont observé que lors du perçage avec les forets multi-faciaux, la distance axiale A (cf. figure 1.6) entre le coin extérieur de l'arête tranchante et la pointe du foret augmente avec l'usure d'outil. Ceci pousse les auteurs à proposer la variation de la hauteur de pointe comme paramètre de quantification d'usure pour les forets multi-faciaux. Par ailleurs les conclusions de ce travail pointent le problème d'usure d'outil comme principal facteur limitatif de la coupe des composites à grande vitesse. Ce constat a été aussi confirmé par Lin et Chen [30] dans le cas du perçage des composites à renfort fibreux en carbone. Dans cette étude, ils observent que l'usure des forets en carbure de tungstène devient très importante dès que la vitesse de coupe augmente.

En étudiant l'usinabilité des composites carbone/époxy en tournage à l'aide d'un outil en carbure de tungstène K10, Kim et al. [27] confirment expérimentalement l'usure croissante de l'outil avec la vitesse de coupe. Ils constatent également que cette usure en dépouille est influencée par l'inclinaison des fibres. En effet, en appliquant le modèle de Taylor $V_c T^n = C$ (V_c , vitesse de coupe en m.min⁻¹ et T , durée de vie de l'outil en minutes, n et c liés au couple outil/matière), modèle couramment utilisé pour les matériaux métalliques, Kim et al. ont déterminé expérimentalement les coefficients n et C pour leur couple outil-matière (voir tableau 1.2). Par exemple, à une vitesse de coupe de 50 m.min⁻¹, la durée de vie de ce type d'outil chute de 70% pour un stratifié à $\pm 45^\circ$ par rapport à un unidirectionnel à 0° .

orientation des fibres	constantes	
	n	C
0°	1,125	241,5
$\pm 15^\circ$	0,617	93,8
$\pm 30^\circ$	0,481	72,5
$\pm 45^\circ$	0,451	55,4

Tableau 1.2 – Valeurs numériques des constantes de Taylor en tournage de composite carbone/époxy par un outil en CW [27].

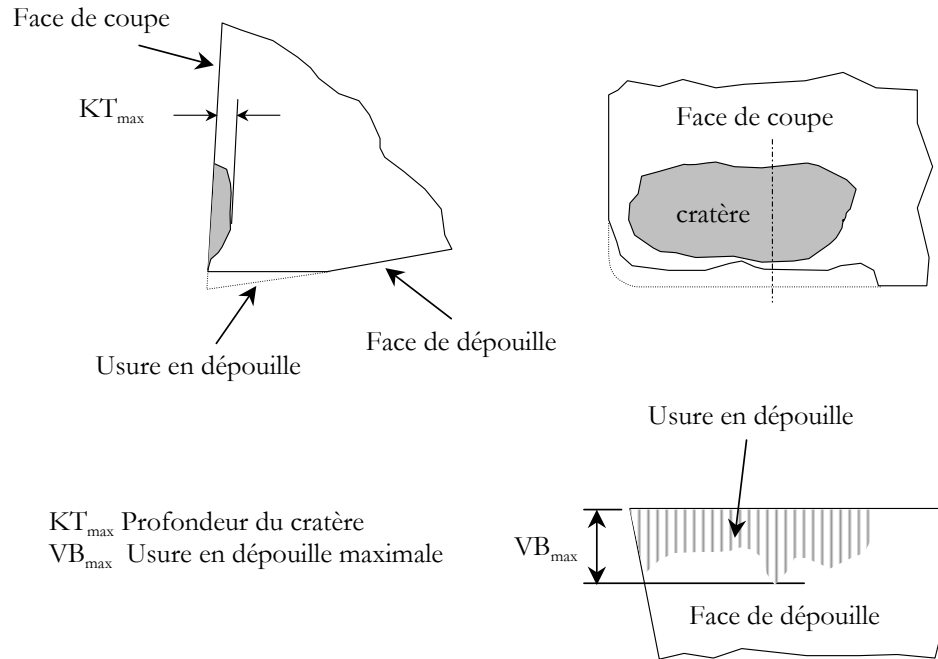


Figure 1.5 – Paramètres d'usure des outils

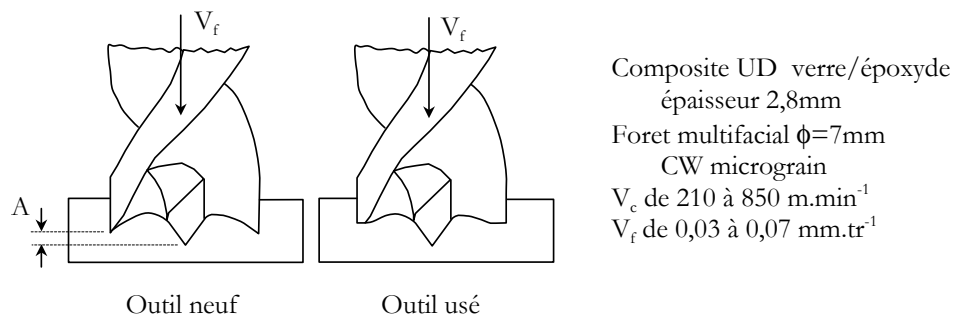


Figure 1.6 – Usure d'un foret multifacial en perçage grande vitesse [31].

Ramulu [44] s'est intéressé aux performances d'outils de tournage avec insert en diamant polycristallin pour la coupe de composites carbone/époxy. Ses conclusions sont :

- une taille de grains supérieure à 20 μm permet d'obtenir une usure moins rapide qu'avec des grains de taille inférieure ;
- pas d'usure en cratère, usure uniforme en dépouille ;
- les outils en CW s'usent environ 120 fois plus vite que ceux en PCD. Leur usure en dépouille n'est pas uniforme.

Les performances comparées des outils PCD et CW rejoignent les conclusions de H. Schulz [46] dans ses études sur le fraisage grande vitesse des composites carbone/époxy et verre/époxy (voir figure 1.7).

1.1.5 Paramètres de coupe

La recherche des paramètres optimaux ($V_a, V_f, a_p, \dots$) pour la coupe des matériaux composites a pour objectif de minimiser la rugosité de surface et les efforts de coupe tout en conservant une durée de vie de l'outil économiquement viable. Plusieurs études s'inscrivent dans ce cadre et celle de Kim et al. [27] en fait partie. En effet, ces auteurs préconisent des vitesses de coupe de 20 à 40 m.min^{-1} pour une avance de 0,2 mm.tour^{-1} lors du tournage des composites en carbone/époxy avec un outil CW non revêtu de grade K10. Dans le cas du tournage d'un composite carbone/phénolique, Sreejith et al. [47] déterminent une vitesse de coupe optimale (pour laquelle les efforts de coupe sont les plus faibles) de 100 m.min^{-1} pour un outil en carbure de tungstène revêtu de nitrure de titane et de 300 m.min^{-1} pour un outil PCD. Les auteurs montrent par ailleurs que la température de coupe est principalement influencée par les vitesses de coupe et d'avance pour les outils en CW, et particulièrement par la vitesse de coupe pour ceux en PCD. Schulz [46] préconise quant à lui les conditions de coupe suivantes pour le fraisage grande vitesse de composites verre/époxy ou carbone/époxy avec un outil diamant PCD :

- vitesse de coupe
 - pour un état de surface optimisé : vitesse de coupe de 3000 m.min^{-1} ;
 - pour une durée de vie optimisée : vitesse de coupe de 2000 m.min^{-1} ;
- vitesse d'avance comprise entre 7500 et 10000 mm.min^{-1} pour un fraise de diamètre 40 mm, 2 dents (ce qui correspond à une avance par dent et par tour comprise entre 0,15 et 0,20 $\text{mm.dent}^{-1}.\text{tour}^{-1}$).

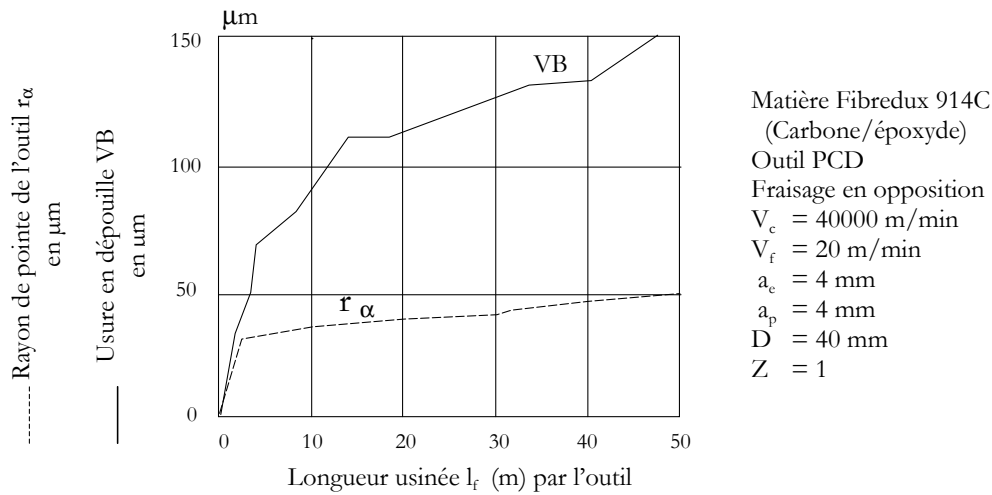


Figure 1.7 – Évolution des usures des fraises en diamant polycristallin [46].

1.1.6 Effets de la structure du composite

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

1.1.6.1 Modes de génération du copeau dans les composites

Koplev et al. [28, 29] furent les premiers à s'intéresser aux mécanismes de formation du copeau dans les composites. En effet, les auteurs ont effectué des essais de coupe brusquement interrompue sur des composites carbone/époxy et ce pour des orientations de fibres de 0° et 90° . Pour réaliser ces essais, une nouvelle technique de préparation des copeaux a été adoptée. Celle-ci consiste à appliquer une colle adhésive à base de caoutchouc sur la surface de la pièce avant usinage. La matière ensuite découpée par les arêtes de coupe de l'outil reste ainsi sous forme de "macro-copeaux". Cette procédure permet d'éviter la forme poudreuse des copeaux rencontrée habituellement en usinage des composites. Cette première tentative de compréhension des mécanismes de la coupe par enlèvement de matière dans les composites fut prolongée par plusieurs travaux, et notamment par Wang et al. (1995) [51], Arola et al. (1996) [19], toujours en coupe orthogonale. L'ensemble de ces auteurs pointent l'orientation des fibres comme le facteur d'influence principal sur la

formation du "copeau". Ils s'accordent également, mais à des degrés d'influence différents, à désigner la nature du composite (matrice et fibres) ainsi que l'angle de coupe de l'outil comme deux paramètres majeurs. Leurs conclusions pratiquement communes permettent de différencier plusieurs modes d'enlèvement de matière suivant l'orientation des fibres qui sont schématisés par la figure 1.8 :

- pour une orientation des fibres à 0° , les mécanismes de formation de copeau se déclinent d'abord par un chargement en mode I (par ouverture) de la section coupée avec rupture le long de l'interface fibre/matrice combiné à un chargement en mode II (glissement droit) dans la direction d'avance de l'outil (la proportion relative de ces deux modes étant fonction de l'angle de coupe). La séparation du "copeau" se produit ensuite après rupture des fibres fléchies dans une direction perpendiculaire à leur axe ;
- pour des orientations positives de fibres jusqu'à $+75^\circ$, le mécanisme de formation du copeau consiste en un cisaillement des fibres par l'arête de coupe. Le copeau est ensuite formé par cisaillement des interfaces fibres/matrice jusqu'à la surface libre ;
- pour une orientation de fibres à 90° ainsi que pour les orientations négatives, l'enlèvement de matière est initié par une ouverture en mode I qui pénètre dans la matière (en dessous de la direction de coupe) en suivant l'interface fibre/matrice, prolongée par une rupture secondaire qui remonte jusqu'à la surface en suivant le cisaillement des fibres.

Koplev [29] souligne que dans le cas d'une orientation des fibres à 0° , la propagation brutale des fissures le long des fibres en condition de déformation de flexion provoque l'apparition de fissures en surface dont la taille maximale n'excède pas deux fois le diamètre des fibres. Lorsque les fibres sont orientées à 90° , la zone de compression située en dessous de l'outil entraîne des fissures de longueur 0,1 à 0,3 mm en profondeur dans le composite.

Un modèle de simulation par éléments finis proposé par Arola et Ramulu [17] reprend les observations expérimentales de la formation du copeau en coupe orthogonale dans un composite. Ce modèle prévoit la formation du copeau en deux zones successives de rupture fragile par cisaillement (cf. figure 1.9). Les orientations et les géométries de ces deux zones (cisaillement primaire puis cisaillement secondaire) sont fonction des orientations des fibres par rapport à la direction de coupe.

Bien que les descriptions de formation de copeaux soient assez simplistes et reposent sur des observations de "macrocopeaux" et non directement sur des copeaux, elles apportent des éléments intéressants de compréhension des mécanismes en jeu.

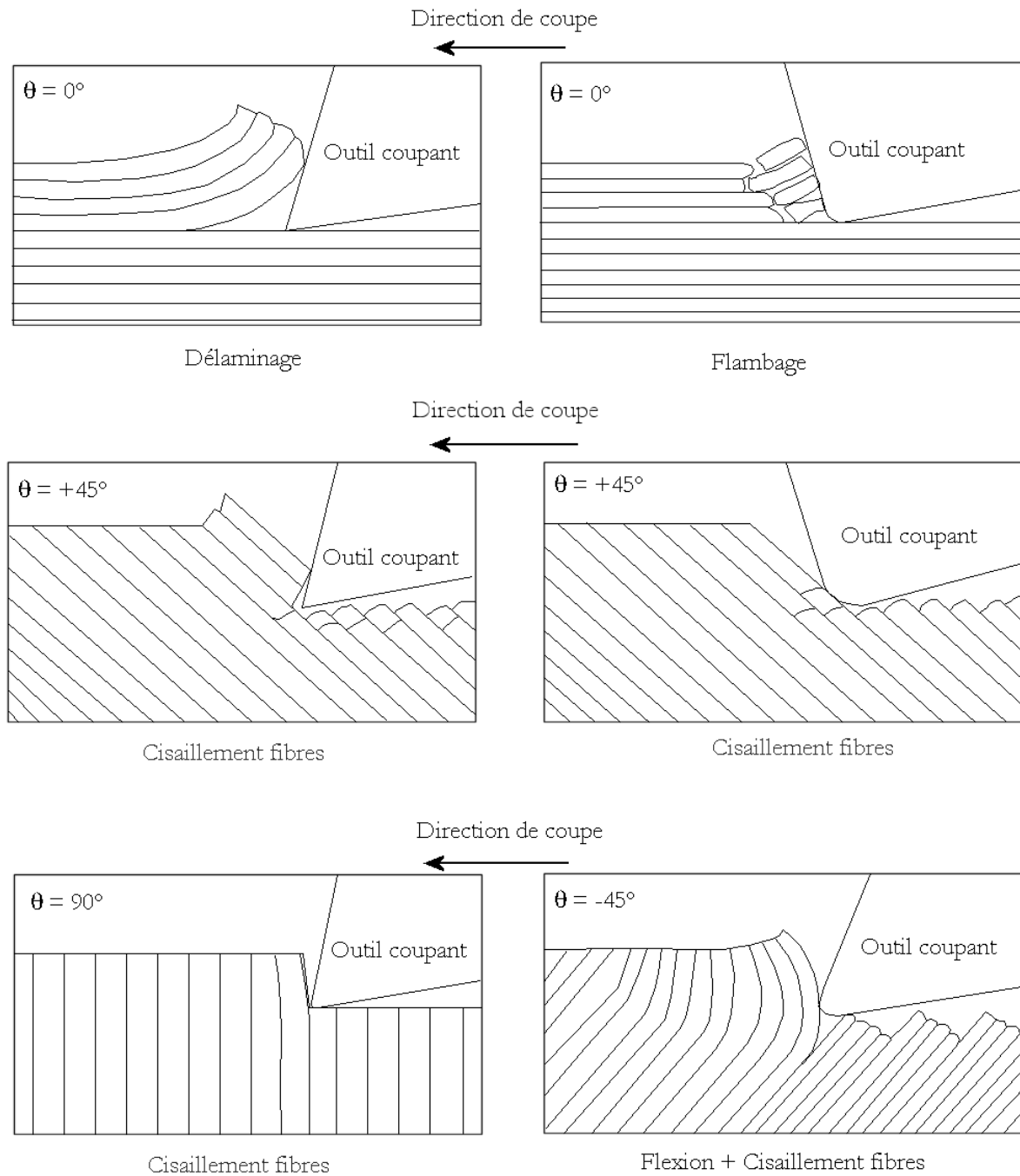


Figure 1.8 – Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du carbone/époxy unidirectionnel, d'après Wang et al. [51].

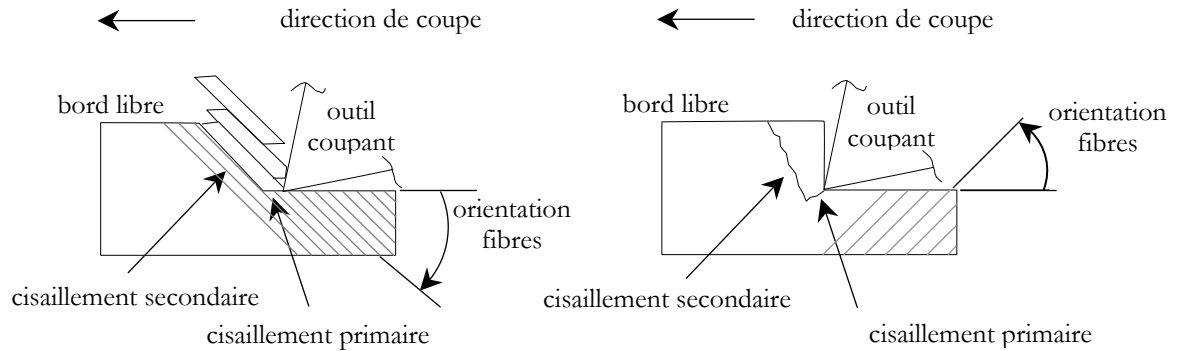


Figure 1.9 – Mécanismes de formation du copeau en coupe orthogonale du carbone/époxy unidirectionnel d'après Arola et al [17].

1.1.6.2 Endommagements induits par la coupe des composites

Les sollicitations mécaniques et thermiques que subit le matériau composite renforcé de fibres lors des opérations d'usinage génèrent des endommagements. Ce paragraphe présente les dommages caractéristiques relevés fréquemment dans la littérature.

Le délaminage est caractérisé par la séparation des plis dans l'épaisseur du composite. Il se distingue par la formation de fissures interlaminaires dans la matière. Cet endommagement se manifeste en perçage, particulièrement en entrée de trou (soulèvement des plis en périphérie du foret dû essentiellement à l'angle de coupe et à l'angle d'hélice du foret, cf. figure 1.10(a)) et/ou en sortie de trou (poussée des plis due à l'âme du foret, cf. figure 1.10(b)). Il se rencontre beaucoup moins en fraisage (décollement des plis dû à l'angle d'hélice de la fraise, cf. figure 1.10(c)). Particulièrement rencontré en perçage aux abords des surfaces libres du composite, le délaminage accompagné de déchirure complète de morceaux de plis est dénommé écaillage (cf. figure 1.10(d)).

En fraisage, le délaminage peut prendre la forme de déchaussement complet de fibres, particulièrement au début et à la fin des prises de passe de contournage lorsque la fraise entre ou sort de la pièce (cf. figure 1.11).

Le pelûchement (cf. figure 1.12) est caractérisé par une mauvaise découpe des fibres par l'outil. Les fibres coupées ont un aspect effiloché, avec un floconnage de la surface lors des opérations de perçage ou de fraisage. Il est essentiellement présent lors de la coupe des composite à fibres d'aramide.

Les microfissures internes : le fléchissement des fibres (cf. figure 1.13) sous la poussée

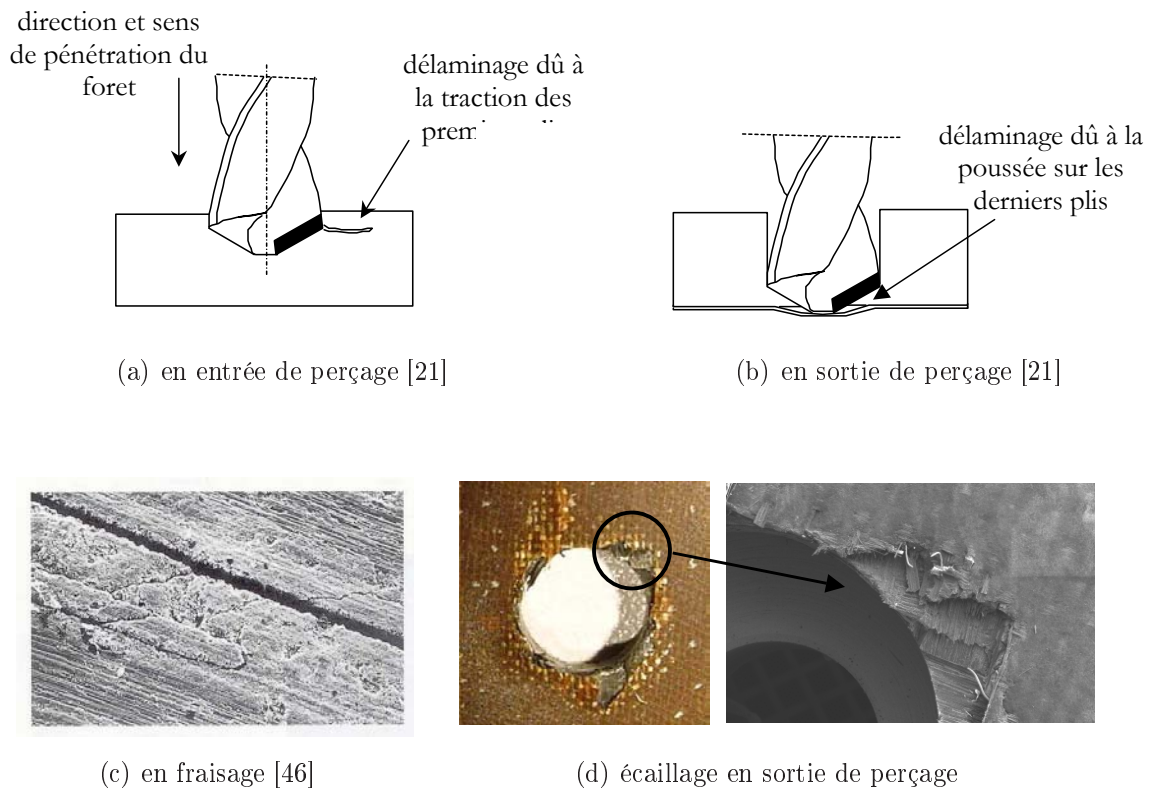


Figure 1.10 – *Délaminage et écaillage en perçage et fraisage.*

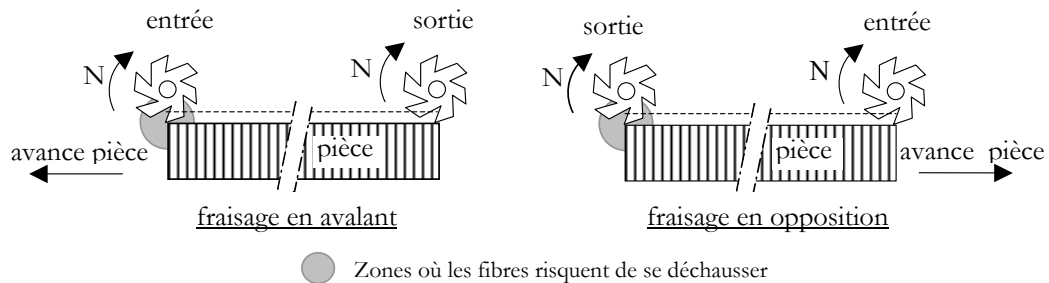


Figure 1.11 – *Déchaussement des fibres en entrée et sortie d'opération de contournage [23].*

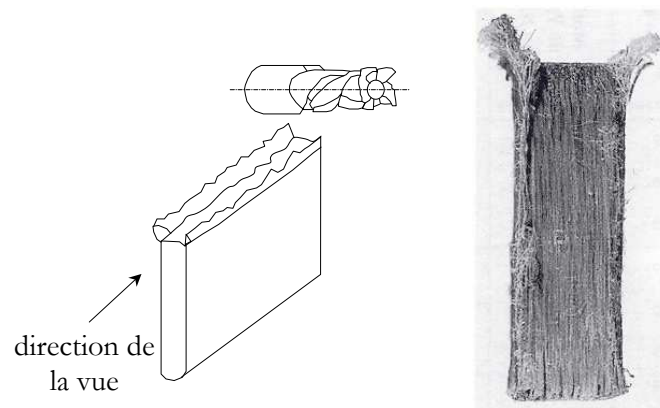


Figure 1.12 – *Pelûchement en fraisage de fibres d'aramide [46].*

de l'arête de coupe au niveau de la surface usinée conduit à un déplacement relatif des fibres par rapport à la matrice assimilable à un glissement. Ce dernier entraîne une décohé- sion de l'interface fibre/matrice.

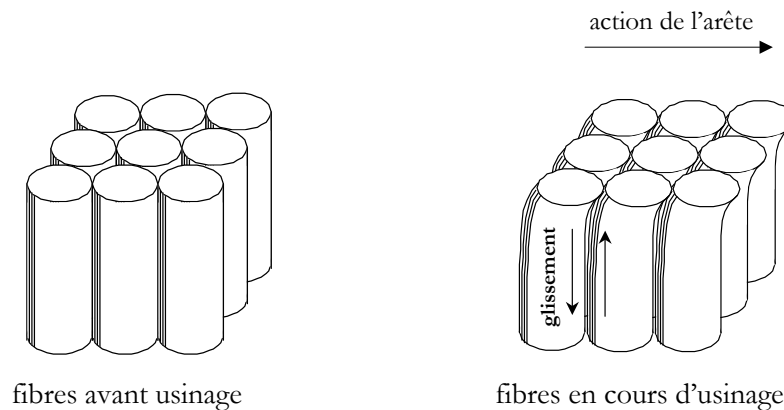


Figure 1.13 – *Fléchissement et décohé- sion de l'interface fibre/matrice [23].*

La dégradation thermique : un dégagement excessif de chaleur au cours d'usinage peut entraîner un risque de dégradation thermique. Globalement, ce risque provoque la carbo- nisation des matrices thermdurcissables et la "fusion" des matrices thermoplastiques. Ce dommage se manifeste systématiquement sous forme binaire : présence ou non de dégra- dation thermique.

Plusieurs travaux ont observé ces endommagements : Tagliaferri et al. [49], A. Di Ilio et al. [24], Arola et al. [15], Guégan [23], Persson et al. [37], Piquet et al. [41, 43, 42]

entre autres. Dans une étude du perçage d'un composite verre/époxy, Tagliaferri et al. [49] soulignent l'absence de norme pour évaluer les endommagements inhérents à la coupe. En quantifiant les endommagements d'écaillage par la largeur endommagée marquée par un liquide pénétrant, ils déterminent que le ratio V_c/V_f (vitesse de coupe sur vitesse d'avance) est un critère très influent (cf. figure 1.14). Leurs constatations montrent que pour un rapport V_c/V_f inférieur à 100, le perçage par foret en acier rapide de diamètre 8 mm génère des copeaux épais et irréguliers, un rapport V_c/V_f supérieur à 250 donne des copeaux sous forme de poussière (ou de poudre). Pour les très grandes valeurs de V_c/V_f , les dommages thermiques des fibres et de la résine restent limités à un petit volume autour du trou.

Ces travaux ont été prolongés par Di Ilio et al. [24] pour des opérations de perçage d'un composite unidirectionnel thermoplastique renforcé de fibres de carbone. Ils constatent que les endommagements sont influencés par l'orientation des fibres (endommagements faibles lorsque les fibres sont orientées de 0° à 45°). En cumulant les endommagements sur tout le pourtour du trou, ils retrouvent, à l'instar de Tagliaferri et al. [49], une limite de la vitesse d'avance par rapport à la vitesse de rotation (fonction de la vitesse de coupe et du diamètre de l'outil), de $0,3 \text{ mm.tour}^{-1}$. La morphologie des bords de perçage est

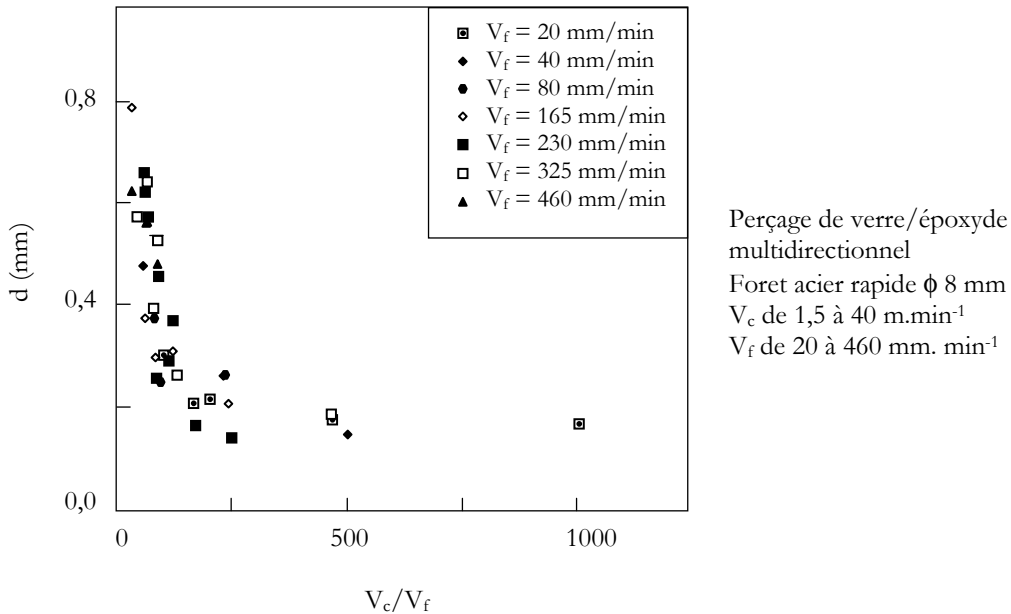


Figure 1.14 – Taille de la zone endommagée d en fonction du rapport vitesse de coupe sur vitesse d'avance [49].

inégaie, suivant l'orientation des fibres. L'intérieur du trou est en général lisse, sauf pour les grandes avances.

Afin de minimiser l'usure d'outil et de limiter les endommagements inhérents à la coupe, Persson et al. [37] ont étudié l'influence de trois types d'outils lors du perçage d'un composite carbone/époxy $[(\pm 45/0/90)_3]_{24S}$. Les modes opératoires testés étaient une fraise diamantée en perçage orbital (perçage par interpolation circulaire avec une fraise de diamètre inférieur au diamètre du trou percé), un foret PCD et un foret en CW en perçage classique. La comparaison des endommagements occasionnés dans les trois configurations montre que le composite percé avec une interpolation hélicoïdale (perçage orbital) est le seul exempt de tout dommage visible.

Dans son travail de thèse, en fraisage de composites à matrice époxy renforcés de fibres longues de verre ou de carbone, Guégan [23] propose que, pour éviter les déchaussements de fibres en entrée et sortie de pièce, l'action de l'arête de coupe soit dirigée vers l'intérieur du matériau composite. De plus, ces décohésions, ainsi que celles sur les bords libres des pièces, sont d'autant plus faibles que l'acuité des arêtes de coupe et que l'avance par dent sont faibles. Par contre, il détermine une avance limite de $0,01 \text{ mm.tour}^{-1}$ en dessous de laquelle apparaissent des endommagements thermiques.

1.1.6.3 États de surface

Les relevés de rugosité d'une surface constituent généralement un bon indicateur de son endommagement et de l'état d'usure de l'outil. De plus, l'état microgéométrique des surfaces usinées est considéré comme un critère lié à leur qualité fonctionnelle. L'objectif de ce paragraphe est de faire le point sur l'évolution de la microgéométrie des surfaces usinées lors de la coupe des composites. En effet, plusieurs auteurs ont porté leur attention sur la caractérisation de la coupe des composites à travers la rugosité des surfaces usinées (Koplev et al. [29], Kim et al. [27], Guégan [23], Arola et al. [15], Wang et al. [51]).

Guégan [23] souligne que le profil d'état de surface des composites obtenu par mesurage tactile opérant par contact ne correspond pas fidèlement au profil réel. En effet, l'action mécanique du stylet en diamant provoque la déformation des fibres qui dépassent de la surface usinée. Ceci conduit à une sous-estimation de la valeur réelle de la rugosité de surface. Même si ce type de mesure ne détermine pas avec précision la valeur du critère de rugosité R_a , il permet cependant de différencier l'aspect micrographique des surfaces. En étudiant le perçage et le fraisage des composites à matrice époxy renforcés de fibres de verre et de carbone, il souligne l'influence des orientations des fibres par rapport à la

surface usinée suivant le sens d'attaque de l'outil. Guégan [23] préconise, pour un meilleur état de surface, un fraisage en opposition lorsque l'orientation des fibres est de $+45^\circ$ (configuration $+45^\circ o$, voir figure 1.3 page 4), et en concordance lorsque l'orientation des fibres est de $-45^\circ c$ (configuration $-45^\circ c$, voir figure 1.3 page 4).

Arola et al. [15] comparent les états de surfaces de matériaux composites carbone/époxy $[(0/90/45/-45)_2(0/90)]_s$ usinés par trois méthodes différentes (jet d'eau, meule diamantée et fraise PCD). Leurs conclusions sont que l'état de surface est meilleur dans le cas de l'usinage par meule diamantée. En ce qui concerne les surfaces obtenues par fraisage, la rugosité est faible ($0,6 \mu m$) dans les plis orientés à 90° , -45° et 0° (orientation donnée par rapport à la direction d'avance de la fraise sans préciser si le fraisage est réalisé en opposition ou en concordance), alors qu'elle atteint une valeur de $11 \mu m$ dans les plis orientés à $+45^\circ$.

Wang et al. [51] montrent, lors de la coupe orthogonale d'un composite verre/époxy par un outil PCD pour des orientations de fibres comprises entre 0° et 90° par rapport à la direction de coupe, que la rugosité de surface est meilleure pour des orientations comprises entre 15° et 60° . Ils soulignent toutefois la présence d'un encrassage de surface qui augmente avec l'orientation des fibres. Les auteurs indiquent que ces dépôts surfaciques diminuent la rugosité et masquent les endommagements en sous-couche (fissures). Cet effet d'encrassage de surface usinée a été aussi rapporté par Koplev et al. [29, 28] lors de la coupe orthogonale d'un composite carbone/époxy et ce particulièrement pour une orientation de fibres d'environ 90° .

Ces résultats parfois contradictoires (Guégan [23], Wang et al. [51]) laissent penser que les valeurs de rugosité obtenues par mesurage profilométrique tactile opérant par contact ne sont pas fiables. Ils suggèrent également que le critère de rugosité R_a ne semble pas un bon indicateur de la qualité de la coupe des composites.

1.2 Effets des paramètres d'usinage sur le comportement mécanique d'éprouvettes en composite

On trouve assez peu de contributions à l'étude des effets des paramètres d'usinage sur le comportement mécanique d'éprouvettes en composite. La plupart des études se concentrent sur la relation entre les conditions de coupe et la qualité des surfaces, comme c'est généralement le cas pour évaluer l'usinabilité des matériaux métalliques. Néanmoins,

la nature hétérogène et anisotrope des composites fibreux affectent fortement le mécanisme de formation du copeau, comme le décrivent en détail Wang et al. [51]. La conséquence en est qu'une dégradation locale sévère peut être provoquée par les conditions d'usinage, affectant alors des performances mécaniques.

1.2.1 Essais normalisés

Lorsque l'on teste des éprouvettes, la première idée est de se renseigner sur ce que les normes préconisent pour la préparation de celles-ci. Par exemple, les normes ASTM [1, 3] précisent : " les éprouvettes peuvent être moulées individuellement pour éviter les effets de bord ou de coupe ou elles peuvent être découpées à partir de plaques. Si elles sont découpées dans des plaques, il faut prendre des précautions pour éviter les entailles, les fissures ou les surfaces rugueuses et inégales. Quand elle est usinée, l'éprouvette doit être sciée avec au moins 3 mm de surépaisseur, les dimensions finales étant obtenues par fraisage, meulage ou les deux avec lubrification à l'eau. " On trouve des recommandations similaires dans la norme française NF EN ISO 2818 [9] à propos de la préparation des éprouvettes en polymère : " les surfaces usinées et les bords des éprouvettes ne doivent pas laisser apparaître de fissures visibles, de rayure ou tout autre défaut lors d'une observation à bas niveau de grossissement ($\times 5$)". Ceci est référencé dans la norme NF T57101 (remplacée par NF EN ISO 527-4 [12, 13]) même si celle-ci traite des plastiques renforcés de fibres. La norme NF EN ISO 2818 préconise également des conditions de fabrication des éprouvettes en plastique par usinage (cf tableau 1.3). Dans tous les cas, toutes ces procédures normalisées considèrent que les endommagements visibles à l'œil nu sont les critères critiques.

1.2.2 Éprouvettes usinées par perçage

Il existe quelques études visant à évaluer les effets des conditions de découpe ou d'usinage d'une éprouvette sur ses performances mécaniques ; la plupart d'entre elles traitent du perçage car c'est l'opération d'usinage la plus courante sur les pièces composites. Dans ce cas, deux types d'essais sont principalement utilisés pour évaluer les performances mécaniques : sollicitations mécaniques (traction, compression, flexion) d'éprouvettes percées et essai de matage sur goupille.

Guégan [23] utilise des éprouvettes percées en composite pour des essais de flexion 4 points cyclique, en contrôlant la diminution de raideur de l'éprouvette en fonction du nombre de

Matière	Méthode d'usinage	Vitesse de rotation ($tr.min^{-1}$)	Outil		Mouvements de l'outil		
			Diamètre (mm)	Nombre de dents Z	Vitesse de coupe V_c ($m.min^{-1}$)	Vitesse d'avance V_t ($m.min^{-1}$)	Profondeur de coupe a (mm)
1- Éprouvette haltère							
Thermoplastiques	fraisage à vitesse moyenne	180 à 500	125 à 150	10 à 16	70 à 250	lente	1 à 5
Thermodurcissables		-	-	-	-	70 à 250	lente
Thermoplastiques	fraisage par reproduction à haute vitesse	8000 à 30000	5 à 20	4 à 8	125 à 2000	lente	0,2
Thermodurcissables		20000	15 à 20	4 à 8	100 à 1500	lente	0,5
2- Éprouvette rectangulaire							
Thermoplastiques	sciage avec une scie circulaire	1000 à 2000	50 à 150	30 à 100	150 à 1000	moyenne	-
Thermodurcissables		1000 à 2000	50 à 150	50 à 150	150 à 1000	moyenne	-
Thermoplastiques	sciage avec une scie à ruban	-	-	correspondant à circulaire	3 à 15	moyenne	-
Thermodurcissables		-	-	-	3 à 15	moyenne	-
Thermoplastiques	découpage avec un disque abrasif	2000 à 13000	50 à 150	-	1000 à 2000	lente	-
Thermodurcissables		2000 à 13000	50 à 150	-	1000 à 2000	lente	-

5- Usinage des entailles							
Thermoplastiques	fraisage à vitesse moyenne	200 à 1000	60 à 80	1	50 à 250	0,07 à 2	0,2 à 2
Thermodurcissables		200 à 1000	60 à 80	1	50 à 250	0,07 à 2	0,2 à 2

Tableau 1.3 – Extrait de la norme NF-EN-ISO-2818 [9] pour la préparation des éprouvettes.

cycles. Deux types d'endommagement sont pris en considération : le délaminage en sortie de trou (qui apparaît pour une grande avance et une vitesse de coupe faible) et l'endommagement thermique (qui apparaît pour une faible avance et une vitesse de coupe élevée). Le résultat intéressant relevé par Guégan est une très faible influence des défauts de délaminage sur les performances des éprouvettes percées, comme le montre la figure 1.15. À l'inverse, les endommagements thermiques affectent les performances mécaniques comme le montre la figure 1.16 pour le même matériau et les mêmes conditions d'essai. Il semble d'après ce qui précède que le délaminage autour du trou n'affecte pas les performances de flexion des éprouvettes percées, contrairement aux endommagements thermiques. Ce résultat a été également mis en évidence par d'autres auteurs. Tagliaferri et al [49] ont réalisé des essais de traction sur des éprouvettes percées avec différents rapports vitesse de coupe sur vitesse d'avance (V_c/V_f). La figure 1.14 page 18 montre que la taille du délaminage dépend de ce rapport, mais la figure 1.17 démontre clairement que la contrainte à la rupture en traction sur éprouvettes trouées n'en dépend pas. Pour finir, Persson et al. [37] parviennent à la même conclusion lors d'essais de fatigue en compression d'éprouvettes percées dans du composite multidirectionnel $[(+45/-45/0/90)_3]_{24S}$ percé avec différents outils provoquant du délaminage (foret PCD) ou non (perçage orbital par contournage avec une fraise de plus petit diamètre), comme le montre la figure 1.18. Certains des auteurs cités plus haut ont également essayé d'évaluer les effets des endommagements en

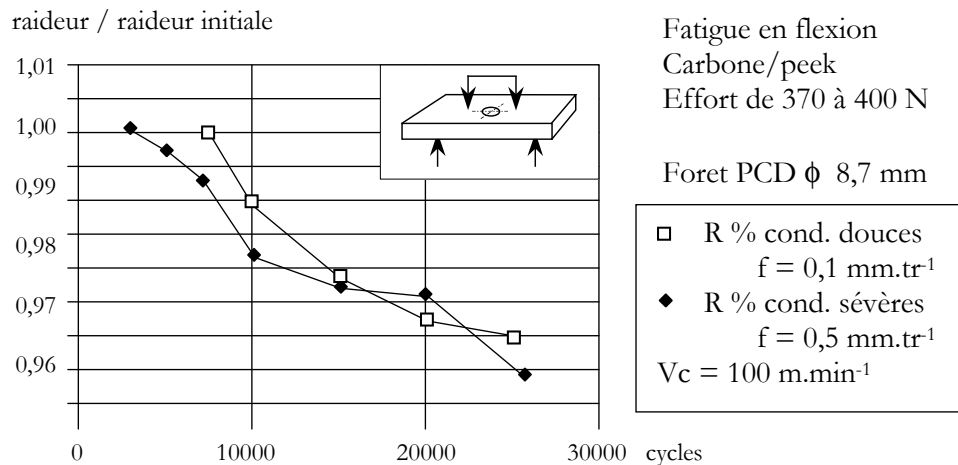


Figure 1.15 – Défauts en entrée et sortie : évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles, composite carbone/PEEK unidirectionnel, conditions douces : vitesse d'avance = 0,1 mm.tr⁻¹ ; conditions sévères : vitesse d'avance = 0,5 mm.tr⁻¹, diamètre du trou : 10 mm [23].

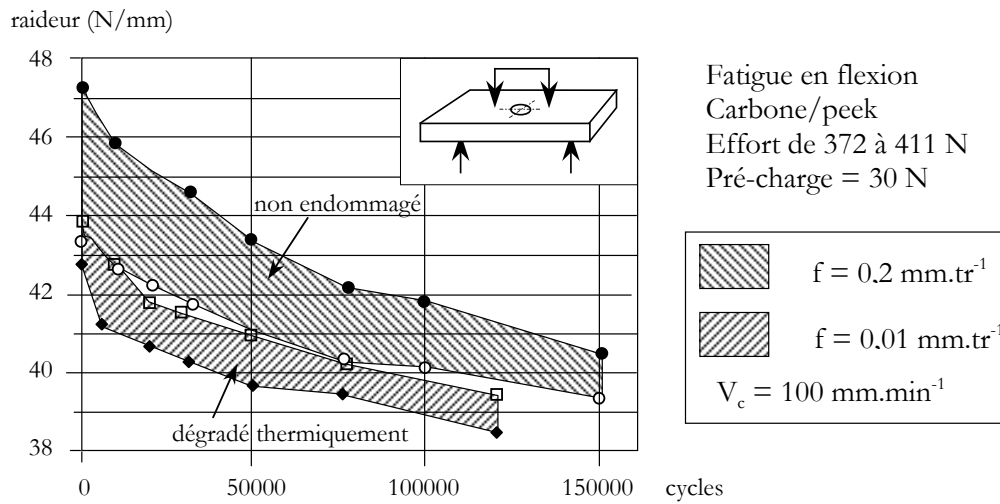


Figure 1.16 – *Dégradations thermiques : évolution de la raideur en fonction du nombre de cycles, composite carbone/PEEK unidirectionnel, pour deux valeurs de l'avance [23].*

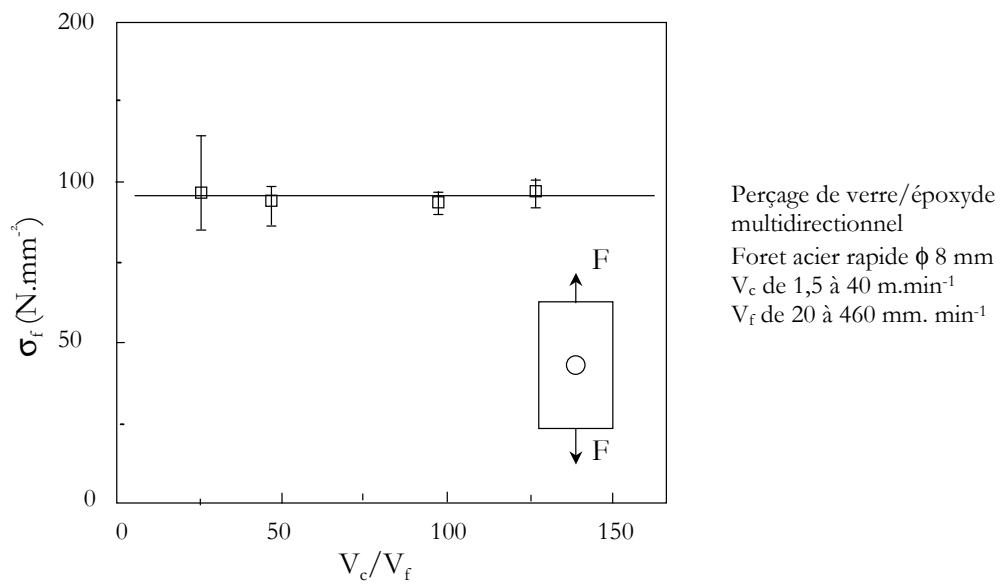


Figure 1.17 – *Évolution de la contrainte à la rupture en traction d'éprouvettes percées en verre/époxy $[0/90/+45/-45]_S$ en fonction du rapport vitesse de coupe sur vitesse d'avance (V_c/V_f) [49].*

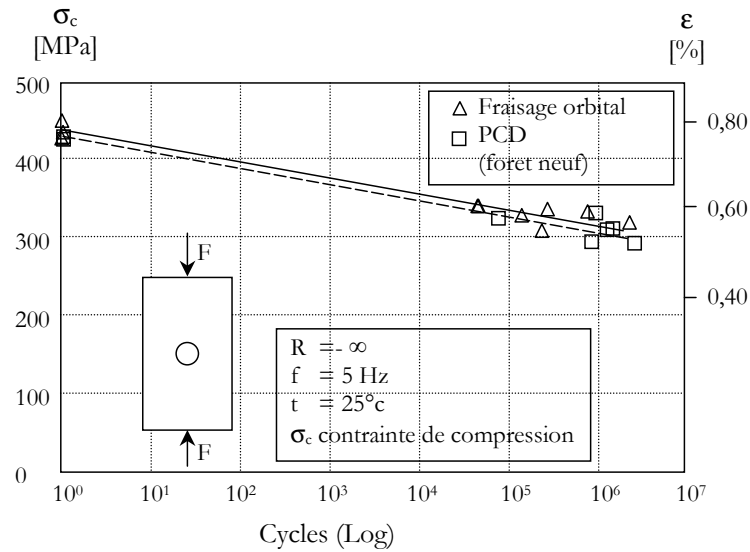


Figure 1.18 – Courbe de Wöhler en compression sur des éprouvettes carbone/époxy multidirectionnelles $[(+45/-45/0/90)_3]_{24S}$ percées avec différents outils provoquant du délaminage (foret PCD) ou non (perçage orbital) [37].

perçage sur la résistance au matage sur goupille. Ce type d'essais tente de reproduire la situation des composites multidirectionnels assemblés mécaniquement (rivets, boulons, ...). Ils ont donc une importante signification d'un point de vue industriel. Persson et al. [37] ont remarqué une différence significative sur les courbes de Wöhler obtenues à partir du même matériau qu'à la figure 1.18, comme le montre la figure 1.19. De la même façon, Tagliaferri et al. [49] notent que la résistance au matage est affectée par le délaminage autour du trou causé par un rapport vitesse de coupe sur avance impropre, comme le montre la figure 1.20. Curieusement, Capello et Tagliaferri [21] notent une dépendance similaire mais leurs efforts pour établir un rapport entre cette dépendance et la mesure des surfaces de délaminage ont échoué. Ils remarquent que : " ce résultat semble indiquer que le comportement à rupture en matage statique d'un trou percé est influencé par les conditions de perçage, mais pas par les endommagements macroscopiques".

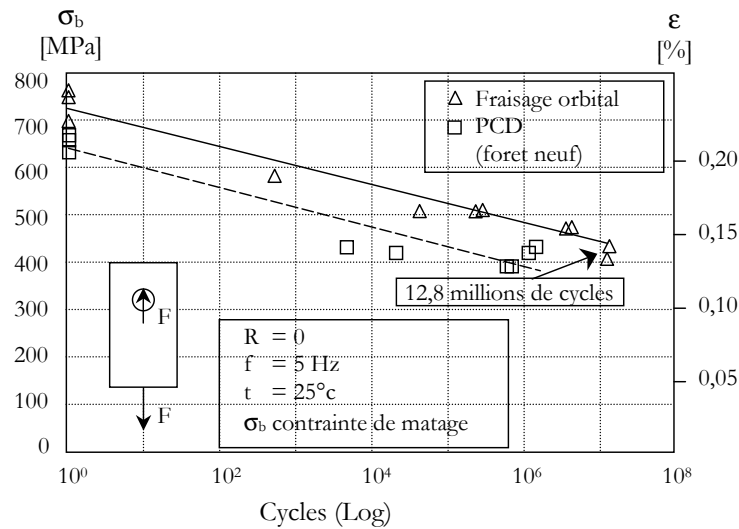


Figure 1.19 – Courbe de Wöhler pour les essais de matage avec éprouvettes carbone/époxy multidirectionnelles $[(+45/-45/0/90)_3]_{24S}$ percées avec différents outils provoquant du délaminage (foret PCD) ou non (perçage orbital) [37].

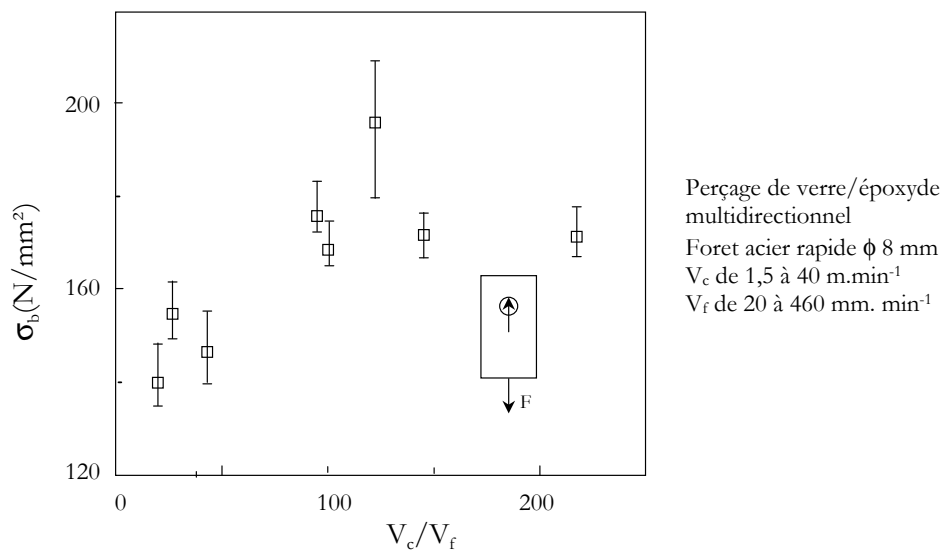


Figure 1.20 – Évolution de la résistance au matage d'éprouvettes en verre/époxy $[0/90/+45/-45]_S$ en fonction du rapport vitesse de coupe sur vitesse d'avance [49].

1.2.3 Éprouvettes usinées par fraisage

Lorsqu'on prépare des éprouvettes d'essai, le fraisage est souvent la première opération, comme le confirme les normes référencées au paragraphe 1.2.1. Un certain nombre d'études ont tenté d'évaluer l'importance de la préparation des éprouvettes sur leurs performances mécaniques. Par exemple, Guégan [23] a réalisé des essais de traction sur des éprouvettes verre/époxy $[0/45/0/90/0/-45/90/0]_{2S}$ préparées par détournage avec des outils PCD ou revêtus diamant sous les mêmes conditions d'usinage. Les résultats sont présentés figure 1.21. Une différence de 9% environ est enregistrée simplement en changeant d'outil de coupe, ce qui est très spectaculaire.

Une autre étude menée par Arola et Ramulu [15] tente de mettre en évidence l'influence de la préparation des éprouvettes sur le comportement en flexion 4 points d'un composite multidirectionnel carbone/époxy $[(0/90/45/-45)_2(0/90)]_S$. Chaque éprouvette est coupée à la scie diamantée, usinée à l'outil PCD ou au jet d'eau abrasif et leur contrainte à la rupture est enregistrée. Aucune différence significative n'a été observée par les auteurs. D'un autre côté, une étude plus récente des mêmes auteurs [18], sur un composite multidirectionnel carbone/bismaleimide $[(0/45/90/-45)6]_S$ également testé en flexion 4 points quasi-statique, a montré des différences assez importantes dans les efforts à rupture en fonction du mode d'usinage, comme le montre la figure 1.22. Des effets similaires ont été mis en évidence par les mêmes auteurs lors d'essais de flexion 3 points dynamique sur des composites à résines bismaléimide et époxy avec fibres de carbone [16]. Le comportement différent des éprouvettes testées en [15] et [18] peut être dû au caractère plus fragile de la résine bismaléimide, les matériaux fragiles étant plus sensibles aux endommagements induits par l'usinage [45]. Néanmoins, cette explication reste à confirmer.

Enfin, Eriksen [22] a procédé à des essais Charpy sur des éprouvettes à matrice thermoplastique renforcée de fibres courtes, en flexion monotone et en fatigue. Il a noté que les performances ne sont pas affectées par la qualité des différentes surfaces obtenues en faisant varier les conditions d'usinage. Cependant, comme l'ont établi entre autres Arola et Ramulu [18], l'état de surface n'est pas un paramètre pertinent pour évaluer la qualité des surfaces usinées dans les matériaux composites, la formation du copeau peut provoquer des endommagements sous la surface [51] qui ne peuvent pas être détectés par mesure de rugosité. Néanmoins, il est raisonnable de penser que le comportement moins fragile des matrices thermoplastiques rend les composites moins sensibles aux défauts induits par l'usinage que pour les matrices thermodurcissables. Dans tous les cas, le nombre très faible d'articles concernant l'usinage des composites à matrice thermoplastique et leurs performances mécaniques ne permet pas de conclure.

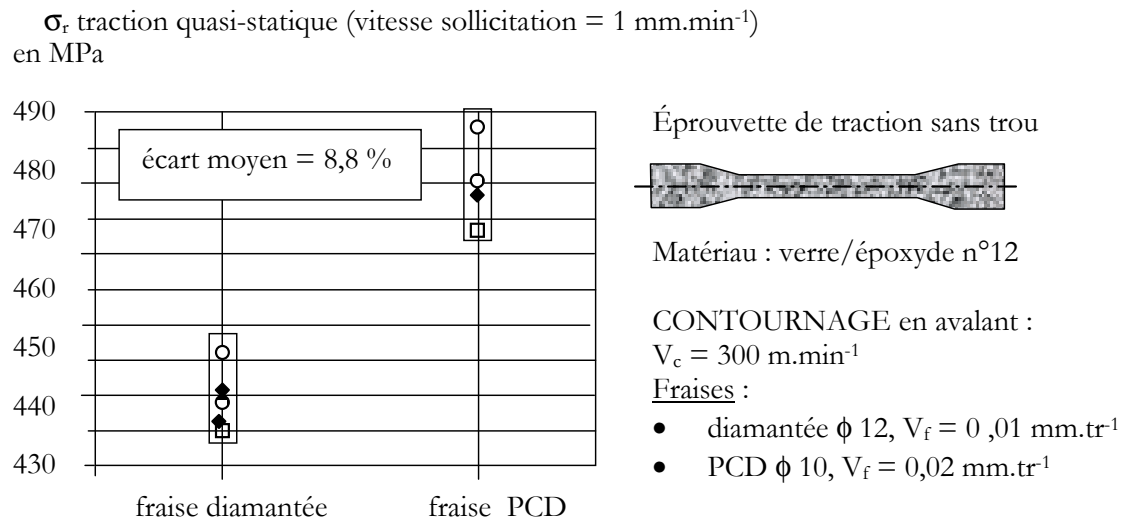


Figure 1.21 – Réduction de la résistance à la traction en fonction de l'outil utilisé pour l'usinage des éprouvettes verre/époxy $[0/45/0/90/0/-45/90/0]_{2S}$ [23].

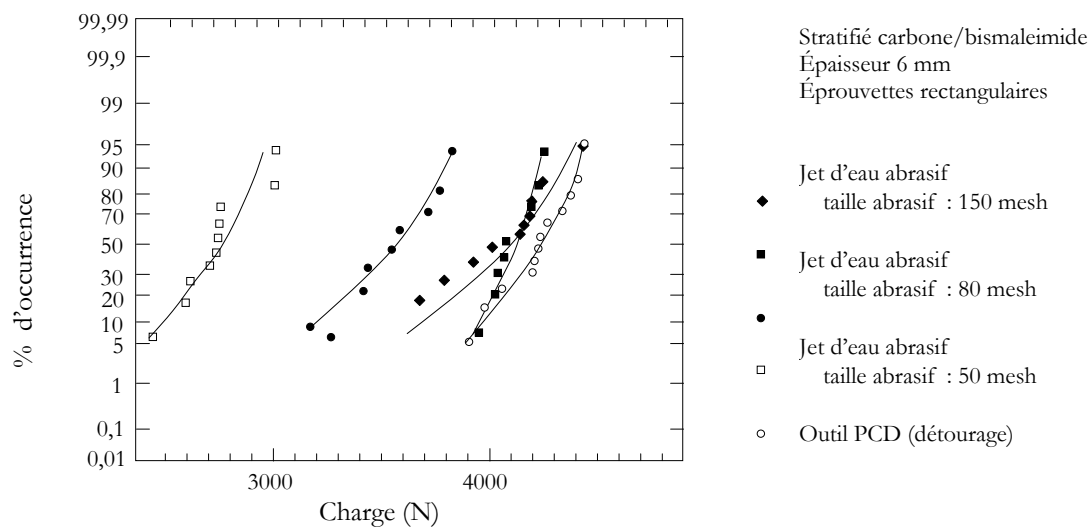


Figure 1.22 – Effort à rupture à la flexion 4 points d'éprouvettes carbone/bismaléimide $[(0/45/90/-45)_6]_S$ en fonction du mode de préparation des éprouvettes. [18].

1.2.4 Conclusion

A partir de ce qui précède, on peut tirer les conclusions suivantes :

- le délaminage affecte la résistance au matage sur goupille mais pas les performances d'éprouvettes percées soumises à des essais en traction, compression ou flexion ;
- les endommagements thermiques semblent avoir une influence sur les performances mécaniques des éprouvettes percées mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir tirer une conclusion ;
- bien que la résistance au matage soit clairement affectée par les conditions de perçage, les délaminages en sortie et en entrée de trou ne sont pas des paramètres significatifs pour quantifier l'endommagement ; d'autres mécanismes d'endommagement doivent être cherchés ;
- de façon étonnante, le type de matériau composite et d'empilement ne semblent pas affecter la tendance ci-dessus, puisque les études précédentes ont été réalisées sur des composites uni- et multidirectionnels avec des matrices époxy ou PEEK et convergent vers la même conclusion ;
- en comparant d'un côté les figures 1.18 et 1.19 et de l'autre les figures 1.14 et 1.20, il est évident que la configuration des essais mécaniques est de première importance pour déterminer si l'endommagement dû à l'usinage est influent ou non ;
- le fraisage affecte le comportement mécanique des éprouvettes en composite bien qu'il y ait un manque d'indicateurs d'endommagement aussi bien qualitatifs que quantitatifs ;
- la rugosité de surface n'est pas un indicateur approprié de l'endommagement pour l'usinage des composites.

Ces résultats soulignent le lien étroit entre le type d'endommagement et le chargement mécanique. Il est alors difficile de donner pour les composites une série unique de critères permettant d'évaluer la qualité de l'usinage. Il faut comprendre comment les endommagements liés à la coupe se propagent ou non en fonction de l'état de contrainte locale sur les surfaces usinées.

1.3 Modélisation de la coupe des composites

Les études sur la modélisation de la coupe des composites, comme par exemple Wern et al. [52], Bhatnagar et al. [20], Mahdi et al. [32], Arola et al. [17], Piquet et al. [43, 41],

sont restées majoritairement centrées sur les efforts de coupe générés par l'outil sur le matériau. Comme pour l'étude de la coupe dans les matériaux homogènes, tous ces travaux restent dans une configuration de coupe orthogonale, de type 2D.

Certains modélisent le matériau composite hétérogène sous la forme d'un matériau homogène équivalent. À la manière de Mahdi et al. [32] dans une étude sur la coupe orthogonale d'un composite unidirectionnel, les caractéristiques mécaniques du matériau homogène et orthotrope équivalent sont calculées à partir des caractéristiques des composants proportionnellement à leurs taux respectifs, en tenant compte de l'orientation des fibres. Son modèle par éléments finis utilise le critère de rupture de Tsai-Hill. Arola et al. [17] utilisent la même démarche, mais distinguent deux modes de formation du copeau suivant l'orientation positive ou négative des fibres (cf. figure 1.9 page 15).

Wern et al. [52] ont utilisé quant à eux deux matériaux modèles (fibres de cuivre ou de verre de dimensions et de répartition maîtrisées, matrice polyester). En posant certaines hypothèses simplificatrices, comme par exemple une acuité d'arête de coupe parfaite, ils parviennent ainsi à définir un modèle semi-empirique des efforts de coupe à partir des puissances spécifiques de coupe (puissance de coupe nécessaire par unité de volume). Leurs conclusions montrent que les puissances spécifiques de coupe des matériaux composites étudiés sont égales à la somme des puissances spécifiques de coupe proportionnelles de chaque composant (matrice, fibre et interface fibre/matrice).

Il faut noter également une étude de Piquet [41] qui, dans son travail de thèse sur le perçage de plaques minces en carbone/époxy, propose un modèle analytique de calcul de l'effort critique de poussée pour éviter les délaminages en sortie de trou en fonction du nombre de plis restant à percer (plaque $[(90/45/0/-45)_3]_S$ de carbone/époxy) basé sur une approche énergétique (taux de restitution d'énergie critique en mode I). Associé à un modèle expérimental liant les conditions de coupe à l'effort de pénétration du foret, Piquet propose ainsi une procédure permettant le calcul de la vitesse maximum d'avance de forets en perçage permettant d'éviter les délaminages.

1.4 Synthèse et objectif des travaux présentés

Ce chapitre vient de préciser les questions soulevées par l'usinage des composites à matrice polymère avec un renfort fibreux en carbone ou en verre. Les problèmes tels que le choix d'outil, les paramètres de coupe optimaux, la dégradation des outils, les endommagements induits par la coupe ainsi que les mécanismes d'enlèvement de matière

ont été largement étudiés. L'analyse des travaux de recherche s'intéressant aux liens entre conditions d'usinage et performances mécaniques a permis de dégager certaines tendances :

- il existe peu de travaux étudiant directement l'influence du mode de préparation des éprouvettes composites sur leurs tenues mécaniques. Les rares essais étudiés dans la littérature sont la flexion et la traction, sur éprouvettes percées ou non ;
- en raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie des composites, ce sujet est beaucoup plus sensible que pour les matériaux métalliques ;
- il est clair que la coupe dégrade le composite, par des mécanismes bien identifiés : délaminage, microfissuration, dégradation thermique, arrachement de fibres. Cependant, ces endommagements n'influencent pas toujours le comportement mécanique des éprouvettes, cela dépend du mode de sollicitation. Si la rupture a lieu loin des zones usinées ou si elle s'initie en compression (fermeture des fissures), les effets sont faibles. Si la rupture s'initie au niveau des surfaces coupées, l'influence est significative, surtout si la rupture s'opère en traction transverse ou cisaillement ;
- les effets ne semblent pas plus spectaculaires en fatigue qu'en quasi-statique ;
- en raison de la complexité des phénomènes impliqués par la coupe, seule une étude essai par essai pourra permettre de bien comprendre les enjeux liés à la préparation des éprouvettes de caractérisation du comportement mécanique des composites.

Ces conclusions suggèrent des travaux complémentaires, s'intéressant à d'autres essais susceptibles d'être affectés par les conditions de préparation des éprouvettes. Les essais choisis dans la suite de ce travail l'ont été en raison de leur normalisation effective ou de leur utilisation courante, avec des sensibilités potentielles à des endommagements de coupe.

Telles sont les raisons qui ont motivé ce travail de thèse.

Chapitre 2

Protocoles expérimentaux

L'objectif de ce travail est de caractériser l'interdépendance qui peut exister entre la préparation d'éprouvettes en composite par usinage et leurs performances mécaniques. L'existence ou non de cette interdépendance peut être ramenée à la superposition de trois niveaux d'influence possibles :

- niveau matériau : lié à la structure et aux spécificités du composite à usiner ;
- niveau technologique : relatif aux paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, ...) et aux performances de la machine d'usinage (stabilité, puissance, ...) ;
- niveau mécanique : lié à la nature de l'essai, à la géométrie de l'éprouvette de caractérisation et au chemin de chargement.

La démarche retenue pour répondre à cet objectif a conduit à limiter les essais mécaniques à ceux pour lesquels les éprouvettes présentent :

- des géométries simples et facilement usinable en fraisage par détournage ;
- une large accessibilité aux bords usinés pour une meilleure observation et quantification des dommages dus à la coupe ;
- une sensibilité potentielle à priori aux endommagements lors de l'essai mécanique.

Trois essais couramment utilisés ont ainsi été choisis : l'essai de cisaillement Iosipescu (normalisé : ASTM-D5379-D5379M-98 [4]), essai de traction sur anneau et essai de traction hors-axes. L'étude porte sur quatre matériaux composites à matrice polymère : un carbone époxy unidirectionnel, deux verre/époxy unidirectionnels et un tube en verre/époxy réalisé par enroulement filamentaire.

2.1 Essais mécaniques

2.1.1 Essai de cisaillement Iosipescu

Cet essai mécanique normalisé (norme ASTM D 5379/D5379 M [4]) consiste à charger en déplacement imposé une éprouvette rectangulaire (géométrie définie en figure 2.1) pourvue de deux entailles symétriques en V à 90° . Ce type d'essai est communément désigné

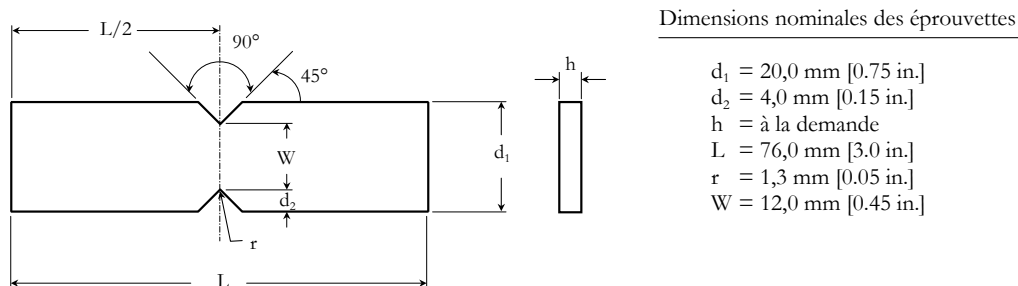


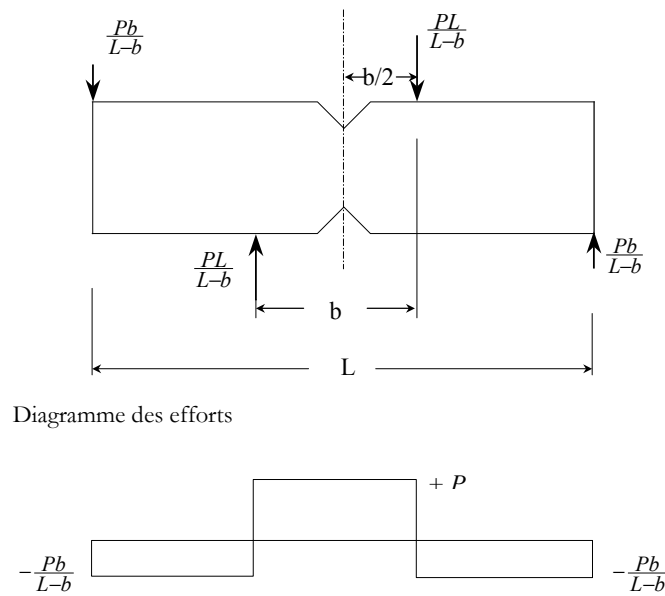
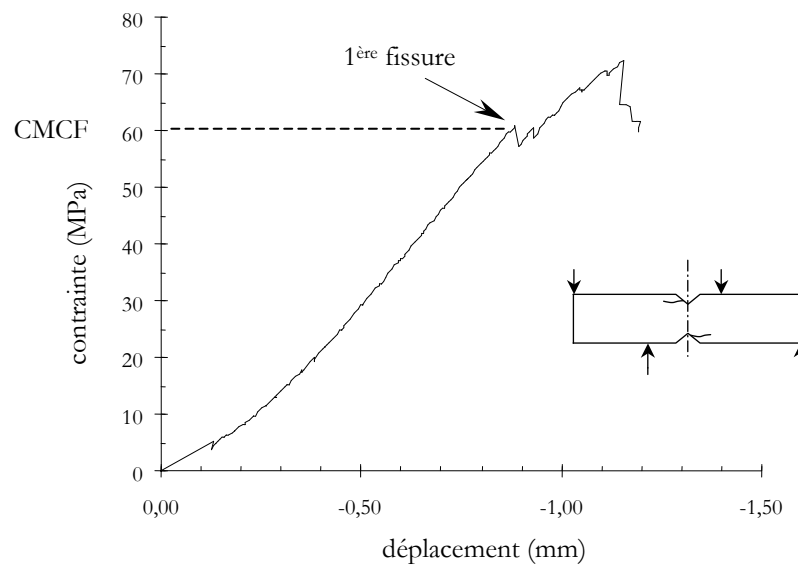
Figure 2.1 – Définition des éprouvettes Iosipescu.

sous l'expression "cisaillement Iosipescu" car il dérive d'une procédure d'essai développé initialement par Iosipescu [25] et Arcan [14]. Le chargement appliqué à l'éprouvette (voir schéma 2.2) permet de générer un champ de contrainte de cisaillement presque pur et uniforme entre les deux entailles. La courbe typique de relevé contrainte-déplacement est donnée en figure 2.3. Au cours de cet essai de cisaillement, une première fissure apparaît systématiquement et brutalement dans la zone de raccordement entre le rayon en fond d'entaille et une face (toujours la même) de l'entaille (cf. schéma sur figure 2.3). Le phénomène se produit identiquement dans les deux entailles quasiment simultanément.

Le choix de cet essai a été guidé par les restrictions indiquées en introduction de ce paragraphe mais également par d'autres critères particuliers :

- les deux premières fissures (quasiment simultanées) sont initiées sous contraintes de cisaillement et de traction transverse conjuguées, donc certainement sensibles aux endommagements de surface ;
- ces premières fissures sont initiées à partir de bords usinés, permettant ainsi une analyse en fonction des conditions de coupe ;
- les éprouvettes sont de dimensions restreintes, permettant de n'utiliser que peu de matériau composite.

Seule la partie de la courbe jusqu'à l'apparition des premières fissures sera exploitée dans cette étude. Le critère de comparaison du comportement mécanique des éprouvettes Iosi-

Figure 2.2 – *Chargement des éprouvettes Iosipescu [4].*Figure 2.3 – *Courbe typique de relevé d'essai de cisaillement Iosipescu (échantillons carbone/époxy).*

pescu sera donc ici l'apparition brutale et quasi-simultanée de ces deux premières fissures. C'est la contrainte moyenne de cisaillement correspondant à ces premières fissures (CMCF) qui sera exploitée dans l'analyse des résultats des prochains chapitres .

Depuis les travaux de Iosipescu [25] et Arcan [14], plusieurs études se sont intéressées à l'amélioration du dispositif de chargement des éprouvettes. Celui retenu est le montage d'essai modifié par F. Pierron [38] (cf. figure 2.4), fabriqué au LMPF (Laboratoire de Mécanique et des Procédés de Fabrication).

Les essais ont été exécutés sur une machine de traction hydraulique Testwell type RK (charge maxi 300 kN), équipée d'une cellule de force RDP Electronics d'une capacité de 5kN. Les conditions de chargement quasi-statique de l'éprouvette ont été réalisées en imposant au mors mobile du montage Iosipescu une vitesse constante de déplacement de $0,01 \text{ mm.s}^{-1}$.

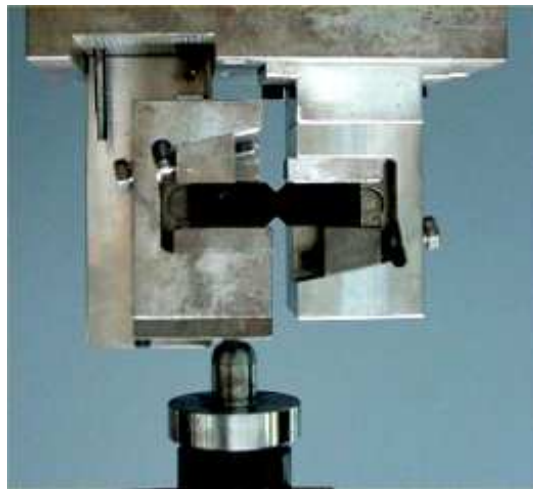
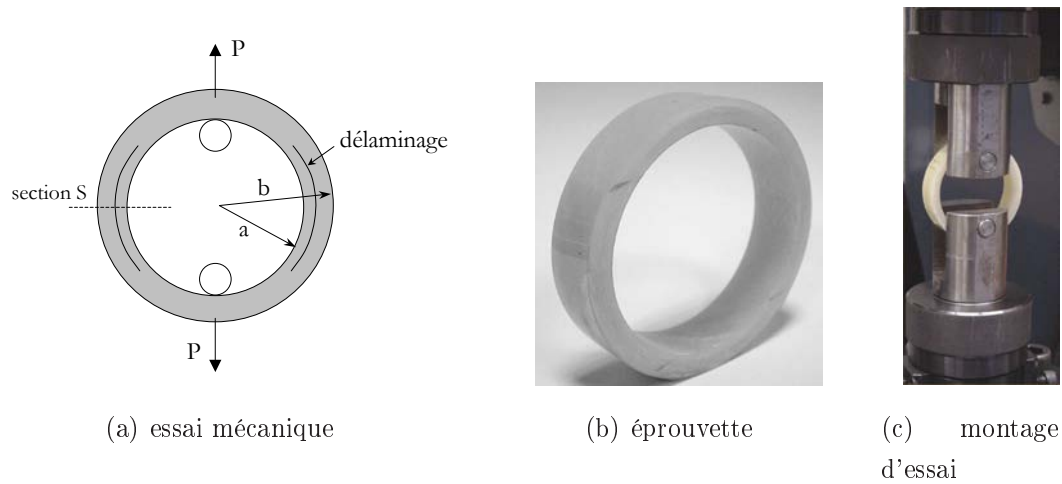


Figure 2.4 – Montage d'essai Iosipescu amélioré par F. Pierron [38].

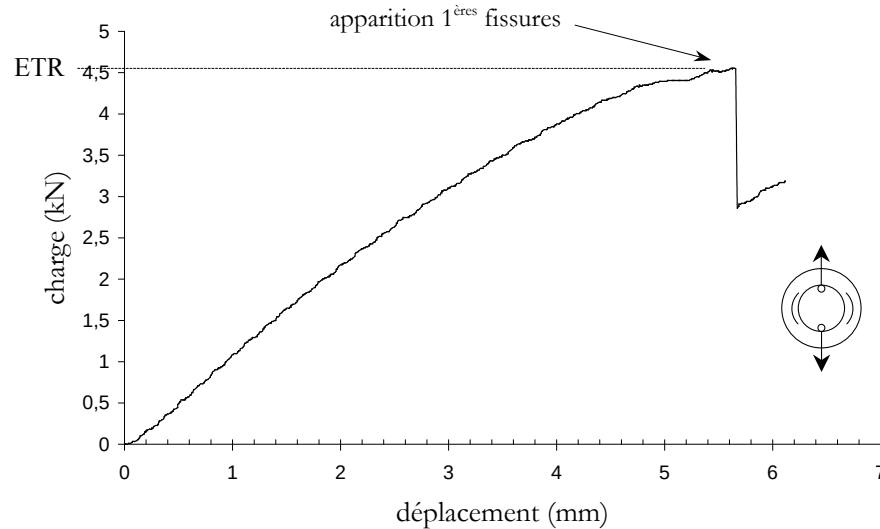
2.1.2 Essai de traction sur anneaux

Cet essai mécanique consiste à charger en déplacement imposé une éprouvette en forme d'anneau par deux appuis diamétralement opposés (cf. fig. 2.5(a)). La figure 2.5(b) représente une telle éprouvette qui sera dans cette étude de diamètre extérieur 67 mm, de diamètre intérieur 55 mm et de profondeur 15 mm.

Le déroulement de l'essai amène les éprouvettes en anneaux en matériau composite à subir une rupture fragile par délaminage. Dans une étude sur le délaminage d'anneaux en

Figure 2.5 – *Essai de traction sur anneau épais.*

verre/époxy (enroulement filamentaire à $\pm 55^\circ$) sous sollicitation de traction transverse, Wu et al. [53] ont montré que le délaminage se produisait quasiment systématiquement lorsque le rapport h/R (épaisseur de l'anneau sur son rayon moyen) dépassait une valeur critique. Cet endommagement se crée dans la zone de la section S (cf. figure 2.5(a)) à 90° par rapport aux efforts de traction, aux environs du milieu de son épaisseur, puis se propage ensuite dans la direction orthoradiale. Une courbe de réponse typique de la charge

Figure 2.6 – *Courbe de réponse typique d'essai de traction sur anneau épais.*

en fonction du déplacement est donnée en figure 2.6.

Le critère de comparaison retenu dans cette étude est l'effort de traction à rupture (ETR) de l'éprouvette (apparition brutale d'une première macrofissure). L'analyse des résultats

est basée sur les variations de ETR enregistrées pour les différentes séries d'éprouvettes anneaux.

Le choix de cet essai a été guidé par les restrictions indiquées en introduction de ce paragraphe mais également par d'autres critères particuliers :

- cet essai a fait l'objet de travaux permettant de prédire le type d'endommagement (délaminage sous traction transverse) et sa localisation [50, 53] ;
- cette campagne d'essais a pu être réalisée grâce à une collaboration avec l'IFREMER (M. P. Davies du centre IFREMER de Brest).

Le montage d'essai (cf. figure 2.5(c)) conçu et réalisé pour cette étude est constitué de deux chapes fixées sur une machine de traction. Elles positionnent les deux axes qui appliquent la sollicitation mécanique à l'anneau. Ces essais ont été réalisés sur une machine de traction hydraulique Testwell type RK (charge maxi 300 kN), équipée d'une cellule de force RDP Electronics d'une capacité de 5 kN. Les conditions de chargement quasi-statique de l'éprouvette sont assurées par une vitesse de déplacement de $0,01 \text{ mm.s}^{-1}$ imposée par la machine d'essai.

2.1.3 Essai de traction hors-axes

Cet essai mécanique consiste à charger en traction une éprouvette rectangulaire en matériau composite. La direction de sollicitation est inclinée d'un angle θ par rapport aux axes d'orthotropie du matériau (cf. figure 2.7). Les dimensions des éprouvettes de traction de cette étude. Elles sont données dans le tableau 2.1.

À la différence de l'essai de traction dans les axes du matériau, l'orthotropie du composite induit, pour cet essai hors-axes, des contraintes de traction mais aussi de cisaillement dans l'éprouvette. Sun et al. [48] ont préconisé l'utilisation de talons "obliques" (cf. figure 2.7) pour obtenir une contrainte quasi-uniforme de traction dans l'éprouvette. Les travaux de Kawai et al. [26], Pierron et al. [39, 40], confirment cette homogénéité du champ de

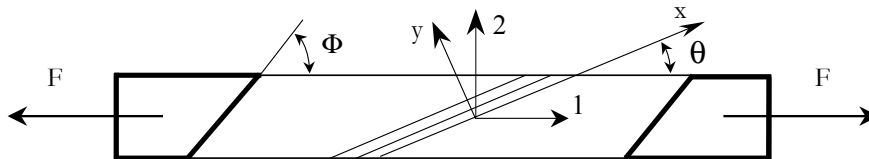


Figure 2.7 – Schématisation d'éprouvettes d'essai de traction hors-axes.

orientation des fibres (°)	longueur éprouvette (mm)	largeur éprouvette	
		ébauchée (mm)	usinée (mm)
15	202	22	16
30	202	28	22
45	182	31	25

Tableau 2.1 – *Dimensions des éprouvettes d'essai de traction hors-axes.*

contrainte dans l'éprouvette. L'angle Φ (cf. figure 2.7) des talons est calculé à partir des coefficients S_{11} et S_{16} de la matrice de souplesse dans le repère $\{1,2\}$ lié à l'éprouvette, connaissant les caractéristiques mécaniques du matériau testé et l'angle d'inclinaison des fibres θ . Ainsi, l'angle Φ (figure 2.7) vaut : $\cot \phi = -\frac{S_{11}}{S_{16}}$ [48]. Les caractéristiques mécaniques des matériaux testés sont préalablement déterminées expérimentalement.

La courbe réponse typique de cet essai est représentée en figure 2.8. Dans notre étude, le critère d'analyse et de comparaison est la contrainte maximum à rupture (CMR) déterminée sur ces réponses mécaniques.

Le choix de cet essai a été guidé par les restrictions indiquées en introduction de ce paragraphe mais également par d'autres critères particuliers :

- la simplicité de la configuration géométrique de ce type d'éprouvette simplifie l'étude de l'effet de l'orientation des fibres ;
- bien que non normalisé, cet essai a fait l'objet de nombreux travaux [26, 33, 34, 36, 40, 39, 48] mais sans directives précises sur la fabrication des éprouvettes. Or celles-ci pourraient avoir un impact sur les résultats mécaniques ;
- la possibilité de maîtriser la fabrication des plaques de matériau composite.

Les essais ont été réalisés sur deux machines d'essais différentes. Elles sont toutes les deux des machines de traction mécanique Instron (modèle TT-DM et modèle 4482). Dans les deux cas, le chargement des éprouvettes, serrées dans des mors manuels, s'est effectué à la vitesse constante de 1 mm.min^{-1} jusqu'à leur rupture. Suivant les niveaux de chargement atteints, les machines d'essai sont équipées de deux capteurs d'effort (fournisseur : Phimeasure). Jusqu'à 9,5 kN, une cellule de charge modèle TEMPO ABA de capacité 10 kN a été utilisée, tandis que les chargements plus importants ont nécessité une cellule TCE-10T de 100 kN. La mesure des déplacements est assurée par un capteur inductif RDP Electronics type GTX 5000 de course 10 mm. L'acquisition et le traitement des signaux (cellule de charge et déplacement) sont effectués sous Labview.

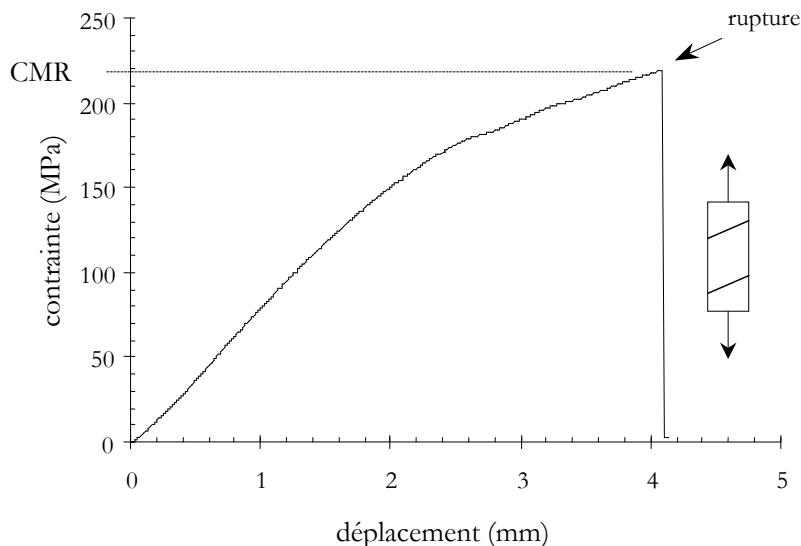


Figure 2.8 – *Courbe de réponse typique d’essai de traction hors-axes.*

2.2 Matériaux composites étudiés

Quatre composites à matrice époxy et renforcés de fibres longues ont été utilisés suivant les essais considérés :

- un composite carbone/époxy unidirectionnel (référéncé C1) ;
- un composite tubulaire en verre/époxy (référéncé C2) ;
- deux composites verre/époxy unidirectionnels (référéncés C3 et C4).

2.2.1 Composite n°1 [C1]

Ce composite est un stratifié unidirectionnel $[0_{17}]$ en carbone T300J/matrice époxy réalisé à partir d’un préimprégné CTE₀ 0 13.2 DA508 T300J et commercialisé par la société STRUCTIL. La masse surfacique du préimprégné est de 203 g.m^{-2} . Le taux volumique de fibre du composite est de $60 \pm 2\%$ (données fabricant). Ce stratifié de 2 mm d’épaisseur est utilisé pour fabriquer des éprouvettes Iosipescu.

Les trois plaques de composites de dimensions 300x300 mm ont été réalisées par le Centre d’Enseignement et de Recherche de l’ENSAM de Lille. Le cycle de cuisson a été de 2 heures à 180°C sous une pression de 5 bars.

2.2.2 Composite n°2 [C2]

Il s'agit d'un tube de verre E/matrice époxy, obtenu par enroulement filamentaire avec un angle de bobinage des fibres de $\pm 55^\circ$ (donnée fabricant) par rapport à l'axe du tube . Ses caractéristiques commerciales sont :

- renfort : verre E EC 14 2400 P185 (ensimage polyvalent) ;
- matrice époxy : araldite LY 556/HY 905/DY 061 - CIBA ;
- taux volumique de fibre : 56,6% ;
- diamètre intérieur : $\phi = 55$ mm ;
- diamètre extérieur : $\phi = 67$ mm ;
- épaisseur : 6 mm ;
- longueur : 2 m.

Ce composite a été fabriqué par la société Straglen (Indre et loire). Il est utilisé pour fabriquer des éprouvettes anneaux.

2.2.3 Composite n°3 [C3]

Il s'agit d'un stratifié verre/époxy unidirectionnel $[0_3]$ réalisé en plaques de dimensions 470 mm x 470 mm, d'épaisseur 2,2 mm, à partir de préimprégné Vicotex[®] BE M10/29,5%/25x2400-60 mm, commercialisé par la société Composites Distribution à Orvault (Loire Atlantique). Le préimprégné se présente sous la forme d'une bande de 60 mm de large. Sa masse surfacique nominale est de 1418 g.m⁻² dont 1000 g.m⁻² de grammage de structure unidirectionnelle en fibres de verre E de 2400 tex. Le volume nominal de fibres est de 51,85 % (données fabricant). L'épaisseur du pli polymérisé est de 0,74 mm. Ce composite est utilisé pour fabriquer des éprouvettes Iosipescu.

La mise en œuvre du composite n° 3 a été effectuée au laboratoire à l'aide d'une presse pneumatique à plateaux chauffants (voir figure 2.9).

Les caractéristiques de cette presse sont :

- deux plateaux chauffants à régulation de température indépendante ;
- surface de chauffe utile : 500 mm x 500 mm ;
- température maximale de 175 °C avec des cycles programmables indépendamment pour chaque plateau ;
- pression maximale de serrage des deux plateaux de l'ordre de 6 bars (le cycle de pressage n'est pas programmable) ;

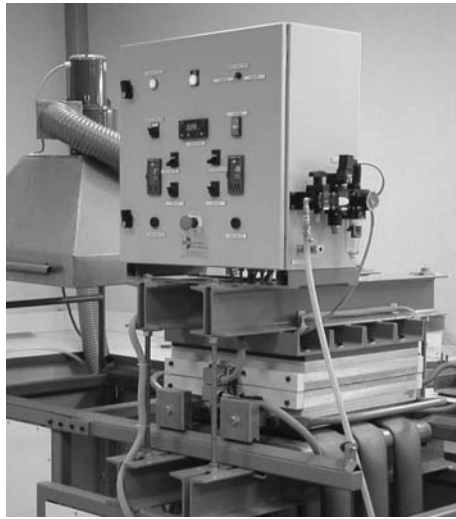


Figure 2.9 – Presse à plateaux chauffants.

- puissance électrique installée : 8 kW.

Le préimprégné est découpé et positionné dans un cadre de 470 mm x 470 mm et d'épaisseur égale à celle du composite et pressé entre deux plaques d'acier inoxydable. Le cycle de cuisson du préimprégné a été établi après plusieurs essais préliminaires autour des plages préconisées dans la notice technique du fabricant. Après plusieurs essais accompagnés systématiquement d'une expertise des plaques obtenues, le cycle de cuisson a été figé ainsi :

1. une montée en température : $5^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ jusqu'à 125°C , sous pression de 5 bars ;
2. un palier de température de 2 heures à 125°C , sous pression de 5 bars ;
3. un arrêt du chauffage et refroidissement à l'air du moule, maintenu sous pression entre les deux plateaux chauffants.

2.2.4 Composite n°4 [C4]

Il s'agit d'un verre/époxy unidirectionnel $[0_3]$ réalisé à partir de préimprégné HexPly[®] BE M10/34,5%/24x2400-60 mm, commercialisé par la société Composites Distribution à Orvault (Loire Atlantique).

Le préimprégné se présente sous la forme d'une bande de 60 mm de large. Sa masse surfacique nominale est de 1465 g.m^{-2} dont 960 g.m^{-2} de grammage de structure unidirectionnelle en fibres de verre E OCF 111A de 2400 tex. Le volume nominal de fibres est de 46,70 % (données fabricant). L'épaisseur du pli polymérisé est de 0,74 mm. Ce composite est utilisé pour fabriquer des éprouvettes de traction hors-axes.

La mise en œuvre du composite n° 4 a été effectuée au laboratoire à l'aide de la presse

pneumatique à plateaux chauffants (voir figure 2.9) dont les caractéristiques sont données dans le paragraphe précédent.

Les plaques de stratifié en composite C4 ont été pressées dans un moule rigide spécialement réalisé (cf. figure 2.10). L'épaisseur des plaques est ainsi calibrée par des cales dont l'épaisseur est fonction du nombre de plis utilisés et des caractéristiques du préimprégné. La résine époxy des composites C3 et C4 étant la même (M10), le cycle de cuisson du composite C3 a été conservé pour le composite C4.



Figure 2.10 – *Moule de cuisson des plaques de composite verre/époxy.*

2.3 Usinage des éprouvettes

Le mode d'usinage commun à toutes les éprouvettes est du fraisage. Le dispositif d'usinage par fraisage est d'abord présenté puis, pour chacun des types d'éprouvettes, leurs conditions de coupe.

2.3.1 Dispositif d'usinage

Il s'agit d'un centre d'usinage à grande vitesse et à commande numérique Mikron de référence HSM 700 (cf. fig. 2.11). Ses caractéristiques principales sont :

- vitesse de rotation de la broche : 1000 à 42000 tr.min⁻¹ ;
- vitesse d'avance de l'outil dans la matière : 0 à 20000 mm.min⁻¹ ;
- accélération maxi : 10 m.s⁻² ;
- 3 axes pilotés (en position, en vitesse de déplacement et en accélération) ;
- 4^{ème} et 5^{ème} axes par plateau rotatif.



Figure 2.11 – *Centre d'usinage à grande vitesse.*

2.3.2 Éprouvettes Iosipescu

L'usinage des éprouvettes Iosipescu en composites C1 et C3 consiste à réaliser des coupons rectangulaires entaillés des deux côtés, avec un rayon de fond d'entaille de 1,3 mm (cf. figure 2.1). Les opérations de préparation de ce type d'éprouvette sont :

1. découpe d'ébauches à la scie à ruban. Ces dernières font 76,2 mm de longueur pour une largeur de 20 mm. Les fibres du matériau composite (C1 ou C3) sont orientées dans le sens de la longueur de l'éprouvette ;
2. fraisage par détourage de profil de ces ébauches comme l'indique la figure 2.12. Ce mode d'usinage consiste à suivre le profil fini de l'éprouvette avec la fraise en un seul passage de la fraise sur l'épaisseur du composite. Les deux côtés sont usinés en un seul programme.

Les fibres étant dans le sens longitudinal de l'éprouvette, nous avons donc un usinage des fibres à $+45^\circ$ dans la première partie de chaque entaille (où la fraise entre dans l'entaille) et à -45° dans la deuxième partie de l'entaille (où la fraise sort de l'entaille). La figure 1.3 page 4 précise cette convention.

Le fraisage par détourage se fait avec une fraise JH 40-HEMI à deux dents de diamètre 2 mm en carbure de tungstène micrograin K10 et revêtu HEMI (revêtement PVD). Les conditions de coupe utilisées pour la fabrication des éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy (composite n°1) et en verre/époxy (composite n°3) sont regroupées respectivement dans les tableaux 2.2 et 2.3.

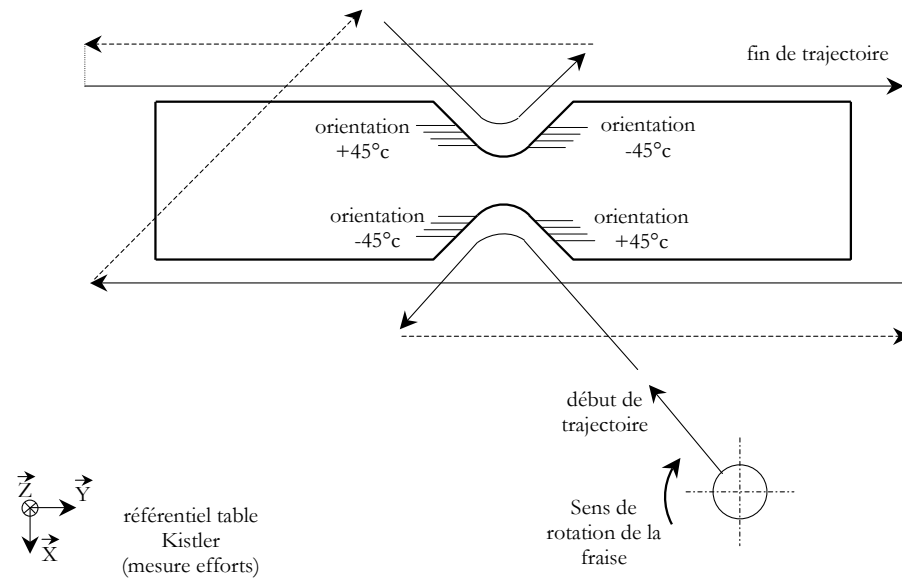


Figure 2.12 – Trajectoire de l'outil pour l'usinage des éprouvettes Iosipescu (trait plein : vitesse travail, trait pointillé : vitesse de dégagement).

Opération	Avance ($mm.tr^{-1}.dent^{-1}$)	Vitesse de coupe ($m.min^{-1}$)	Outil (n°)
fraisage de profil en concordance. fraise CW	0,01	31	1
		63	
		94	
		126	2
		157	
		189	
		220	
		251	

Tableau 2.2 – Conditions de coupe des éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy C1.

Opération	Avance ($mm.tr^{-1}.dent^{-1}$)	Vitesse de coupe ($m.min^{-1}$)	Outil n°
fraisage de profil en concordance. fraise CW	0,01	63	1
		126	2
		189	3
		251	4
	0,02	63	5
		126	6
		189	7
		251	8

Tableau 2.3 – Conditions de coupe des éprouvettes Iosipescu en verre/époxy C3.

2.3.3 Éprouvettes anneaux

La préparation de ce type d'éprouvette comporte deux phases :

1. tronçonnage-ébauche en anneaux de 20 mm d'épaisseur, à partir du tube de composite verre/époxy C2, par un disque diamanté de granulométrie $50\ \mu m$ et de diamètre 350 mm, à une vitesse de rotation de $3000\ tr.min^{-1}$;
2. fraisage-finition pour ramener l'épaisseur à 15 mm caractéristique des éprouvettes en anneaux. Deux modes de finition ont été pratiqués : le fraisage de profil (cf. figure 2.13(a)) et le fraisage en bout (cf. figure 2.13(b)).



(a) Fraisage de profil



(b) Fraisage en bout

Figure 2.13 – Modes de fraisage des éprouvettes anneaux.

Pour les opérations de finition, trois types de fraises, chacune de diamètre 10 mm, ont été testés :

- fraises en carbure de tungstène micrograin du fabricant FRAISA et commercialisées sous la référence 5275 RW STG 56 ;
- fraises à inserts en diamant polycristallin du constructeur DIXI et commercialisées sous la référence DIXI 2032 ;
- fraises en carbure de tungstène revêtu d'un dépôt diamanté de référence JD35L-DIAMOND et commercialisées par Jabro Tools.

Une série d'éprouvettes témoins a été réalisée directement en tronçonnage avec le disque diamanté utilisé pour réaliser les ébauches. Le tableau 2.4 résume les conditions de coupe utilisées pour chaque opération d'usinage de ces éprouvettes.

Opération	Matière de l'outil	Avance par dent (<i>mm.dent</i> ⁻¹)	Vitesse de coupe (<i>m.min</i> ⁻¹)	Série d'éprouvettes <i>n</i> ^o
fraisage de profil	CW	0,02	157	1
			628	4
	PCD		157	2
			1256	3
fraisage en bout	CW		157	5
			628	6
	PCD		157	7
			1256	8
	Carbure Revêtu		157	9
			628	10
tronçonnage	Disque Diamanté	manuelle	4800	11

Tableau 2.4 – Conditions de coupe des éprouvettes anneaux en verre/époxy C2.

2.3.4 Éprouvettes de traction hors-axes

Toutes les éprouvettes de traction ont été découpées dans des plaques de composites verre/époxy n°4 réalisées au laboratoire. La préparation de ce type d'éprouvette par usi-

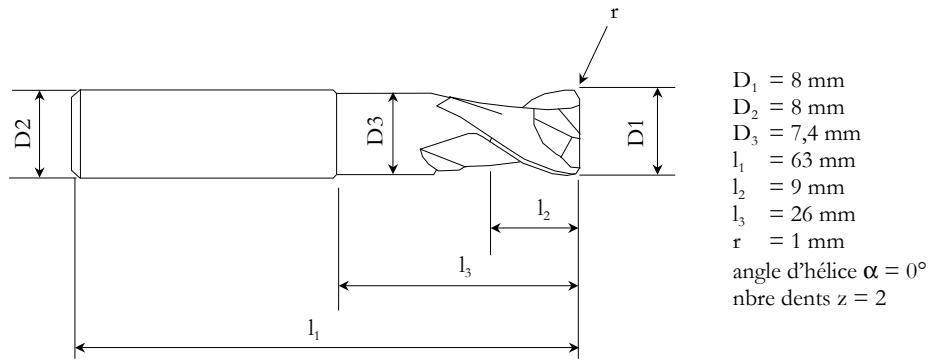
nage consiste en deux phases :

- découpe d'ébauches au disque diamanté avec une sur-épaisseur de 3 mm de chaque côté, selon les recommandations de les normes ASTM [1, 2, 3] ;
- fraisage de profil des deux faces afin de ramener l'éprouvette aux dimensions normalisées.

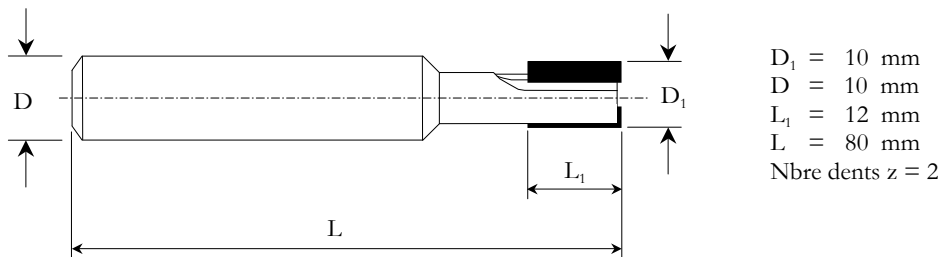
Les outils de coupe que nous avons considérés sont ceux largement utilisés pour l'usinage des composites :

- une fraise en CW référencée U 5275 (cf. figure 2.14(a)) de la société FRAISA ;
- une fraise à insert en diamant polycristallin référencée 2032 (cf. figure 2.14(b)) du fournisseur DIXI FRAMA.

La section de coupe étant figée par les recommandations des normes ASTM [1, 2, 3] (profondeur de passe axiale a_p égale à l'épaisseur du composite, profondeur de passe



(a) fraise U 5275 en CW



(b) fraise 2032 en PCD

Figure 2.14 – Caractéristiques des outils pour la fabrication des éprouvettes de traction hors-axes.

radiale a_e d'environ 3 mm), deux paramètres de coupe, à savoir la vitesse de coupe V_c et l'avance par dent f_z , restent à explorer. Leurs valeurs ont été choisies à l'intérieur des couples outil-matière qui caractérisent les domaines de fonctionnement de chaque outil. Le problème étant de faire apparaître les influences de l'orientation des fibres, de V_c et de f_z qui vont conduire ou non à une interdépendance entre préparation d'éprouvettes et réponses mécaniques, deux campagnes d'usinage ont été réalisées :

- dans la première, la configuration d'orientation des fibres est fixée à $+\theta_c$. Cette campagne d'usinage se répartie en 120 éprouvettes réparties sur 24 séries, avec les combinaisons de configurations suivantes :
 1. trois configurations d'orientation des fibres : $+15^\circ_c$, $+30^\circ_c$ et $+45^\circ_c$;
 2. deux vitesses de coupe V_c pour chaque outil. Elles ont été sélectionnées, pour chaque type d'outil, en fonction des limites recommandées par les fournisseurs ;
 3. deux avances, les mêmes pour les deux outils et toujours dans leur zone de fonctionnement.

Le tableau 2.5 récapitule les combinaisons des paramètres de cette première campagne d'usinage.

- la deuxième campagne n'a concerné que la fraise PCD afin de s'affranchir d'un éventuel effet d'usure. Les orientations des fibres ont été limitées à 15° et 45° mais étendues aux configurations $+\theta^\circ_c$, $-\theta^\circ_c$, $+\theta^\circ_o$ et $-\theta^\circ_o$ (cf. figure 2.15) afin de balayer plus largement le spectre des orientations possibles. Nous avons également étendu à 10 le nombre d'éprouvettes par série afin d'estimer au mieux les coefficients de variation des résultats. Un balayage plus fin du domaine de validité du couple outil-matière outil PCD/composite n°4, en terme de vitesse d'avance (combinaison entre vitesse de rotation et avance par dent de l'outil) a été également réalisé. Le tableau 2.6 précise les configurations V_c - f_z -orientations fibres.

Outil	Conditions de coupe		Orientation des fibres (°)
	vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	avance (mm.dent ⁻¹ .tr ⁻¹)	
PCD ϕ 10 mm	100	0,03	+15°C
		0,15	
	1000	0,03	
		0,15	
CW ϕ 8 mm	100	0,03	
		0,15	
	450	0,03	
		0,15	
PCD ϕ 10 mm	100	0,03	+30°C
		0,15	
	1000	0,03	
		0,15	
CW ϕ 8 mm	100	0,03	
		0,15	
	450	0,03	
		0,15	
PCD ϕ 10 mm	100	0,03	+45°C
		0,15	
	1000	0,03	
		0,15	
CW ϕ 8 mm	100	0,03	
		0,15	
	450	0,03	
		0,15	

Tableau 2.5 – Conditions de coupe de la première campagne d'essais sur éprouvettes de traction hors-axes. Composite C4.

vitesse de coupe V_c (m.min ⁻¹)	avance par dent f_z (mm.dent ⁻¹ .tr ⁻¹)
209	0,03
393	0,1
1302	0,07
1152	0,15

Tableau 2.6 – *Conditions de coupe de la deuxième campagne des 4 séries d'essais des éprouvettes de traction hors-axes. Composite C4.*

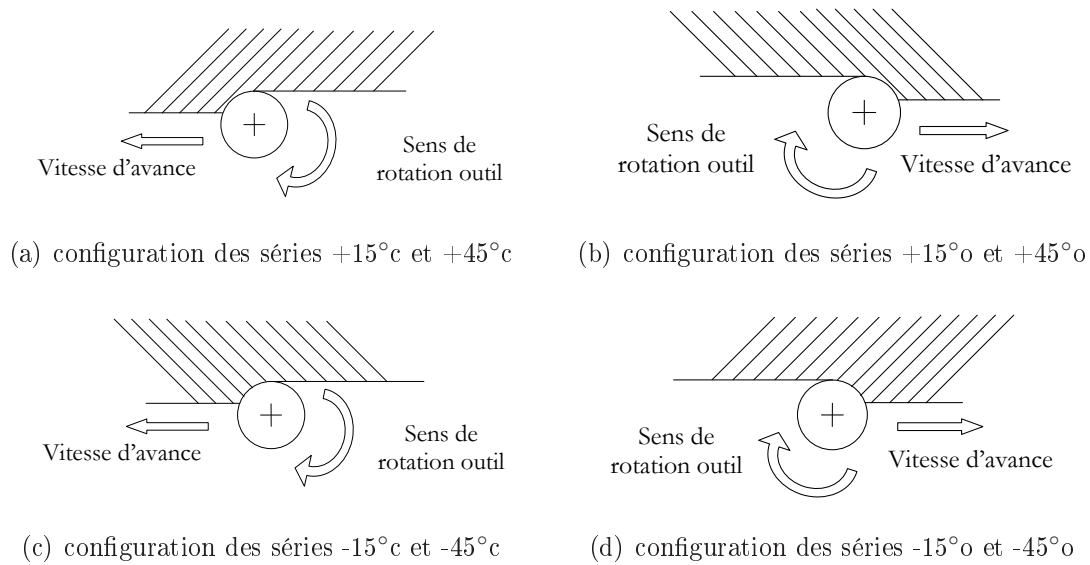


Figure 2.15 – *Modes d'attaque de l'outil de la deuxième campagne d'essais de traction hors-axes.*

2.4 Instrumentation des essais d'usinage

L'étude bibliographique a souligné les principales sources d'endommagement des matériaux composites à matrice polymère renforcés de fibres au cours de l'usinage, à savoir les efforts de coupe avec les risques de délaminage et de fissuration, et les températures atteintes par le matériau composite pendant l'usinage.

L'instrumentation de la zone de coupe, les moyens d'analyse et d'observation des surfaces usinées faciliteront la compréhension des phénomènes mis en jeu et des endommagements créés par l'opération de fraisage.

2.4.1 Mesure des efforts de coupe

La mesure des efforts de coupe en cours d'usinage consiste en une chaîne d'acquisition composée d'un dynamomètre Kistler 9255B et d'un amplificateur de charge Kistler 5019 à trois canaux. Le dynamomètre à quartz trois composantes peut ainsi mesurer les composantes F_x , F_y et F_z de la résultante des efforts de coupe exercés sur la pièce usinée et ce dans le repère fixe du capteur. Les principales caractéristiques du dynamomètre Kistler 9255B sont indiquées dans le tableau 2.7.

direction de la composante	gamme de mesure (kN)	seuil de réponse (N)	rigidité (kN. μm^{-1})
X	-20 à 20	< 0,01	> 2
Y	-20 à 20		> 2
Z	-10 à 40		> 3

Tableau 2.7 – *Caractéristiques du dynamomètre Kistler 9255B.*

L'acquisition et le traitement des signaux correspondant à chaque composante F_x , F_y et F_z de la résultante de l'effort de coupe sont effectués sous Labview. Un relevé d'effort correspondant à l'usinage d'une entaille des éprouvettes Iosipescu est donné en figure 2.16. Les valeurs moyennes des trois composantes F_x , F_y et F_z de l'effort de coupe sont calculées pour chacun des deux cotés de l'entaille. Le montage d'usinage des éprouvettes Iosipescu est positionné pour que l'axe X du référentiel du capteur Kistler soit parallèle au grand axe de l'éprouvette (cf. figure 2.12 page 45). Par changement de repère, le calcul des composantes de l'effort de coupe dans un repère lié à la surface usinée est aisé. Ce sont ces composantes qui seront utilisées dans cette étude pour analyser les phénomènes mis en jeu pendant la coupe.

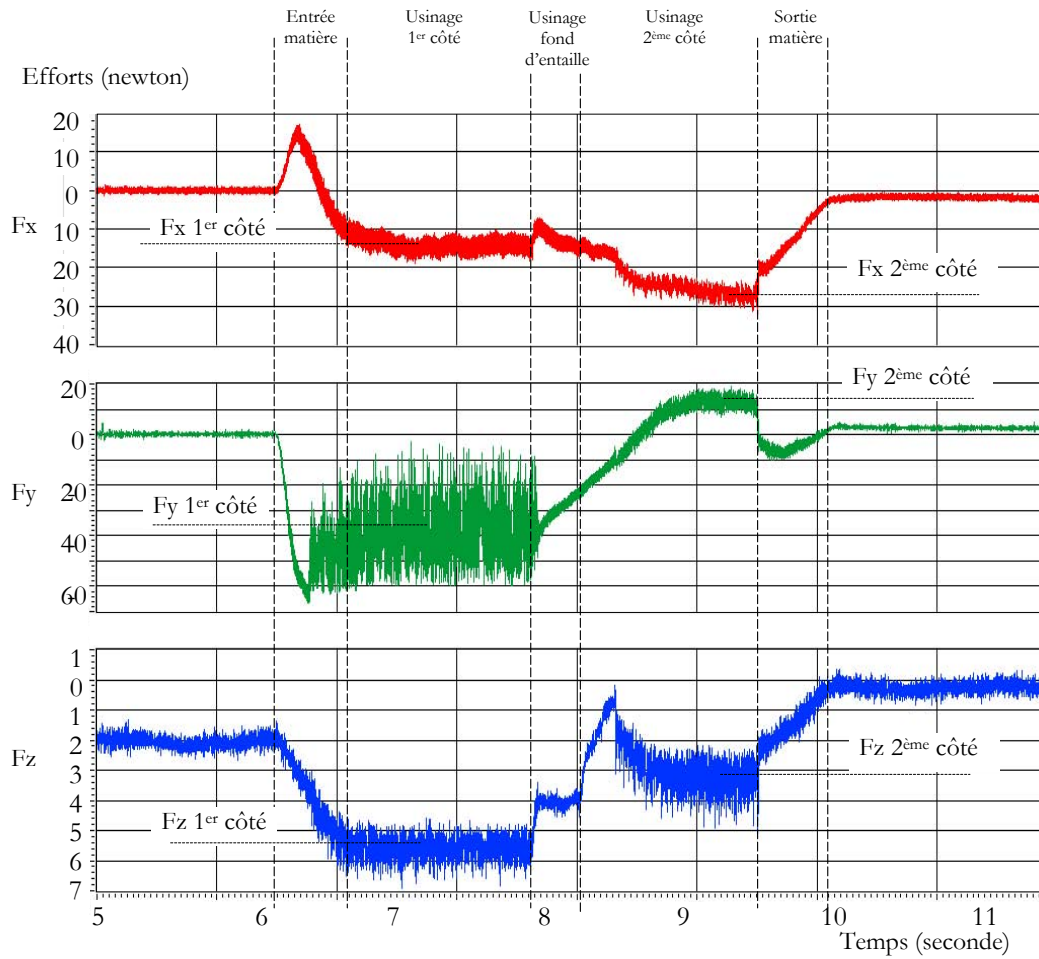


Figure 2.16 – Relevé des composantes de l'effort de coupe pendant l'usinage d'une entaille d'éprouvette Iosipescu.

2.4.2 Mesure des températures de surface

La métrologie thermique adoptée pour évaluer la température générée lors de la coupe des éprouvettes est la thermographie infrarouge. Cette technique permet la mesure à distance de températures de surface et de ses variations temporelles et spatiales sur l'objet examiné. Le système d'acquisition est conçu pour capter la séquence vidéo dans le domaine infrarouge et fonction de la luminance de l'objet observé, l'analyser par le logiciel de traitement, et la transformer en des images en fausses couleurs analysables par l'œil humain.

On détermine la valeur de la température de la surface observée grâce à la loi de Planck. Mais un corps réel émet moins de rayonnement que le corps noir de même température utilisé par la loi de Planck, quelle que soit la longueur d'onde. Pour en tenir compte, on définit ainsi une émissivité ε de ce corps par le rapport des luminances du corps réel et du corps noir. L'objet réel s'éloigne d'autant plus du corps noir que son facteur d'émissivité est faible. De plus, l'émissivité spectrale ε d'un objet réel dépend de nombreux paramètres dont les principaux sont:

- la température de l'objet ;
- l'état de surface de l'objet (polissage, oxydation...);
- le matériau lui-même ;
- la forme de l'objet;
- les facteurs environnants (température ambiante, humidité, ...)

Ce coefficient d'émissivité est donc déterminé expérimentalement dans cette étude, en corrélant les températures indiquées par la chaîne d'acquisition infrarouge à des mesures de référence obtenues par thermocouple (cf. figure 2.17). La procédure expérimentale utilisée est la suivante :

- un thermocouple a été noyé entre deux échantillons de composite verre/époxy de dimensions 50 mm x 25 mm x 2,3 mm, collés entre eux sur leurs grandes faces. Le thermocouple est positionné à 0,5 mm de la surface du composite visée par la caméra infrarouge ;
- l'ensemble, positionné dans le montage d'usinage sur la machine à commande numérique, est chauffé à l'air chaud jusqu'à 170°C ;
- la décroissance thermique mesurée par le thermocouple est enregistrée ;
- le coefficient d'émissivité est ajusté pour que la courbe de décroissance de la température enregistrée par la caméra coïncide avec celle mesurée par le thermocouple.

La plage de température validée est de 50°C à 160°C avec un coefficient d'émissivité ε déterminé de 0,808.

Le système de mesure de température consiste en une caméra infrarouge de marque AGEMA (modèle THV 900 LW ST) avec son logiciel de visualisation et d'analyse des champs de température des surfaces visées.

La caméra thermique est disposée devant la surface usinée de l'éprouvette (cf. figure 2.18). La chaîne d'acquisition enregistre une séquence vidéo à la vitesse de 30 images par seconde incluant un dégagement rapide de l'outil à 40 m.min⁻¹ en cours d'usinage afin de pouvoir visualiser la surface fraisée. Le logiciel de traitement permet d'en extraire une image représentant le champ thermique de la surface usinée de l'éprouvette au niveau de l'interface arête de coupe/matière usinée au moment où la fraise vient de se dégager en vitesse rapide de la zone de coupe (cf. figure 2.19). La température maximale atteinte par la surface usinée de l'éprouvette au passage de l'outil est déduite de l'analyse de ce champ thermique. Elle est mesurée dans une zone centrée sur l'axe de la fraise qui vient de se dégager en mouvement vertical à vitesse rapide de 40 m.min⁻¹. Cette température maximale de la surface usinée sera celle utilisée dans l'analyse des résultats expérimentaux de cette étude.

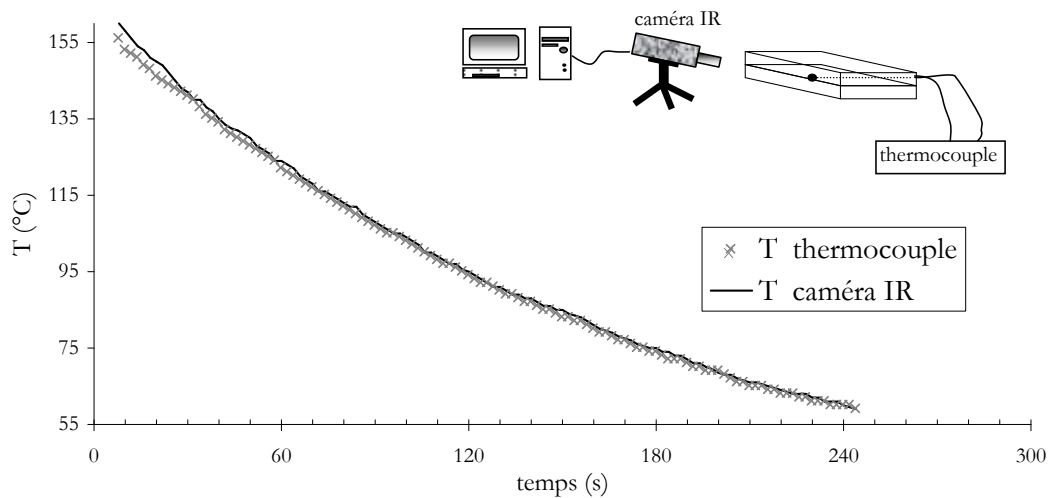


Figure 2.17 – *Étalonnage de la caméra infrarouge Agema.*

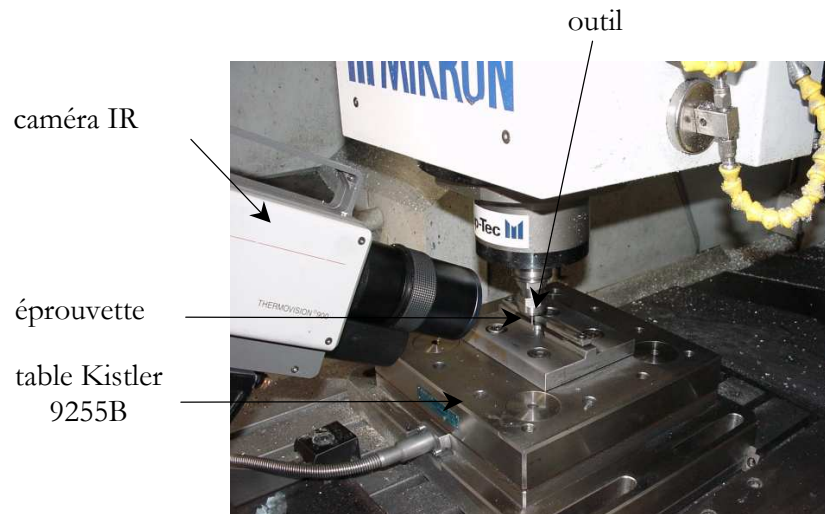


Figure 2.18 – *Instrumentation de la zone de coupe.*

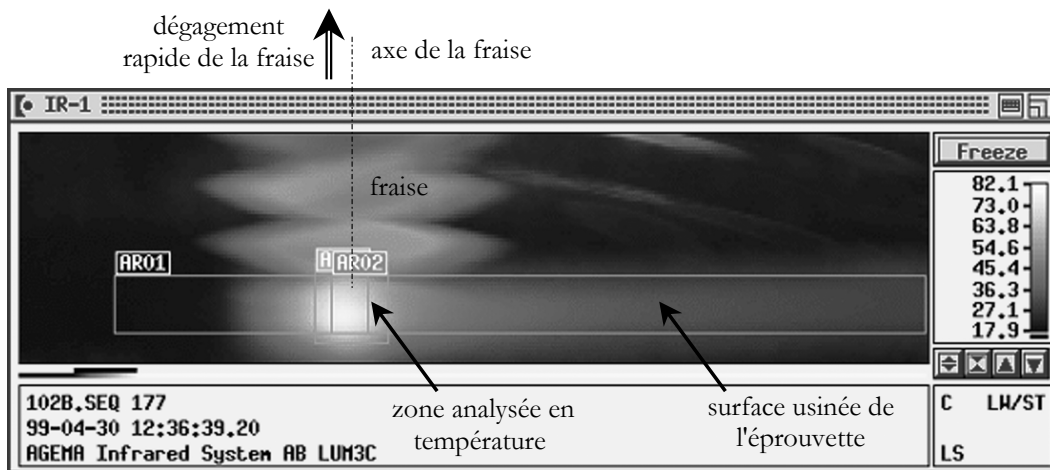


Figure 2.19 – *Image infrarouge de la zone de coupe. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.*

2.4.3 Mesure des rugosités de surface

Les relevés de rugosité de surface sont utilisés généralement comme indicateur de l'endommagement de celle-ci et de l'état d'usure de l'outil. La qualité de l'état de surface peut influencer les performances mécaniques des éprouvettes. Dans cette étude, les profils de surface ont été effectués par un profilomètre constitué d'un capteur équipé d'une pointe de diamant avec un rayon d'extrémité $2\text{ }\mu\text{m}$, se déplaçant linéairement sur la surface. La rugosité est caractérisée respectivement par les valeurs de R ou Ra (R au sens de la norme ISO 12085 [11] avec les critères A = $200\text{ }\mu\text{m}$ et B = $1000\text{ }\mu\text{m}$, Ra au sens de la norme ISO 11562 [10] avec une longueur de base de $0,8\text{ mm}$) sur une longueur de palpement de 4 mm dans le sens de la vitesse d'avance de l'outil.

2.4.4 Microscopies optique et électronique à balayage

Comme souligné dans le premier chapitre de ce mémoire, la préparation des éprouvettes en composite par usinage entraîne des endommagements aux abords de la zone usinée tels que les arrachements des fibres, les délaminages visibles, les délaminages internes ou les dégradations thermiques. Afin de mieux cerner l'ensemble de ces avaries associées à l'usinage des différentes éprouvettes étudiées, une expertise ex-situ a systématiquement été effectuée. Cette expertise consiste, tout d'abord, en un nettoyage par ultrason des éprouvettes (afin de débarrasser les surfaces usinées d'éventuels dépôts et résidus de fibres coupées), puis en une observation au microscope optique, ceci afin d'avoir une première vue sur les différences qui apparaissent en fonction des paramètres de coupe. Ensuite, des micro-sections localisées ont été analysées au microscope électronique à balayage (MEB). Le microscope optique consiste en une lunette binoculaire Nikon SMZ-2T à grossissement de 10 à 120 fois. Celle-ci est équipée d'une caméra Sony modèle SSC-DC38P. Cet équipement est couplé à un logiciel d'analyse d'image CLEMEX Vision. Le MEB utilisé est un JEOL modèle JSM-5510 LV. Ses principales caractéristiques sont :

- grossissement de 18 à 300000 ;
- dimensions maximum des éprouvettes : $\phi\text{ }32\text{mm}$;
- modes de fonctionnement : HV (high vacuum) et LV (low vacuum) ;
- détecteur SEI (électrons secondaires) et BEI (électrons rétrodiffusés) ;
- tension d'accélération : de $0,5$ à 30 kV .

Chapitre 3

Qualification des endommagements dus à la coupe

Bien que l'étude bibliographique ait soulevé les limites de l'utilisation de la mesure des états de surface pour quantifier avec fiabilité les endommagements dus à la coupe, les critères de rugosité relevés permettront tout de même une étude comparative des surfaces usinées. Les évolutions constatées seront recoupées avec des observations macro et microscopiques. Celles-ci permettront la compréhension du comportement de la structure du composite (fibres et matrice) et de la formation des endommagements créés sous l'action de l'arête de coupe de l'outil. Dans certains cas, les relevés de champs thermiques et de composantes de l'effort de coupe compléteront les analyses.

3.1 Éprouvettes Iosipescu

L'usinage des éprouvettes Iosipescu a été précisé au paragraphe 2.3.2. Pour mémoire, le fraisage s'effectue en concordance et la trajectoire de l'outil (cf. figure 2.12 page 45) induit une orientation des fibres (côté éprouvette) de $+45^\circ\text{c}$ dans la première moitié des entailles et de -45°c dans la deuxième moitié. Dans la configuration de fraisage en concordance des éprouvettes Iosipescu, la vitesse réelle des dents de la fraise par rapport au composite est égale à la vitesse de coupe de 31 m.min^{-1} à 251 m.min^{-1} moins la vitesse d'avance de 100 mm.min^{-1} à 800 mm.min^{-1} (cf. figure 1.3 page 4). Les dents de l'outil attaquent les fibres du composite en les couchant sur la surface usinée dans le cas de la configuration de -45°c et en les soulevant dans celle de $+45^\circ\text{c}$.

3.1.1 Éprouvettes Iosipescu carbone/époxy (Composite C1)

Rugosité de surface

Les figures 3.1 et 3.2 représentent respectivement le critère de rugosité Ra à l'entrée (côté orientation des fibres $+45^\circ$) et à la sortie (côté orientation des fibres -45°) de l'entaille pour les éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy (les orientations des fibres sont conformes à la figure 1.3 page 4). La première remarque est qu'à la vitesse de coupe de 126 m.min^{-1} , à l'endroit où le premier outil utilisé pour usiner les neuf premières éprouvettes a été remplacé par un outil neuf, les valeurs des critères d'état de surface reviennent aux mêmes niveaux que pour la toute première éprouvette. Ce constat n'est significatif que dans le cas où l'orientation des fibres est de -45° . Il est intéressant également de relever que lorsque l'arête tranchante de l'outil est bien affûtée (outil neuf), la surface usinée présente une forte rugosité pour l'attaque des fibres avec une orientation de $+45^\circ$ (Ra de l'ordre de $9 \mu\text{m}$) comparée à celle -45° (Ra des l'ordre de $2 \mu\text{m}$), résultat également obtenu par Guégan [23]. Cette différence peut être expliquée par l'analyse du mode d'action de l'arête de coupe. En effet, le fraisage en concordance est caractérisé par l'attaque du copeau suivant sa plus grande section. La matière est arrachée de la surface. Mais dans

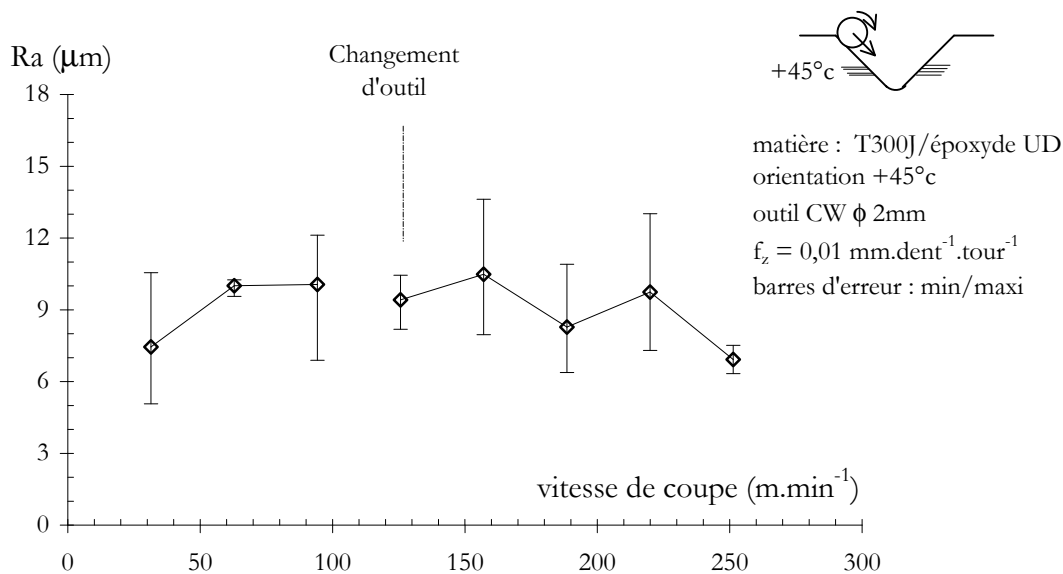


Figure 3.1 – Rugosité Ra dans l'entaille côté $+45^\circ$ en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu, composite C1.

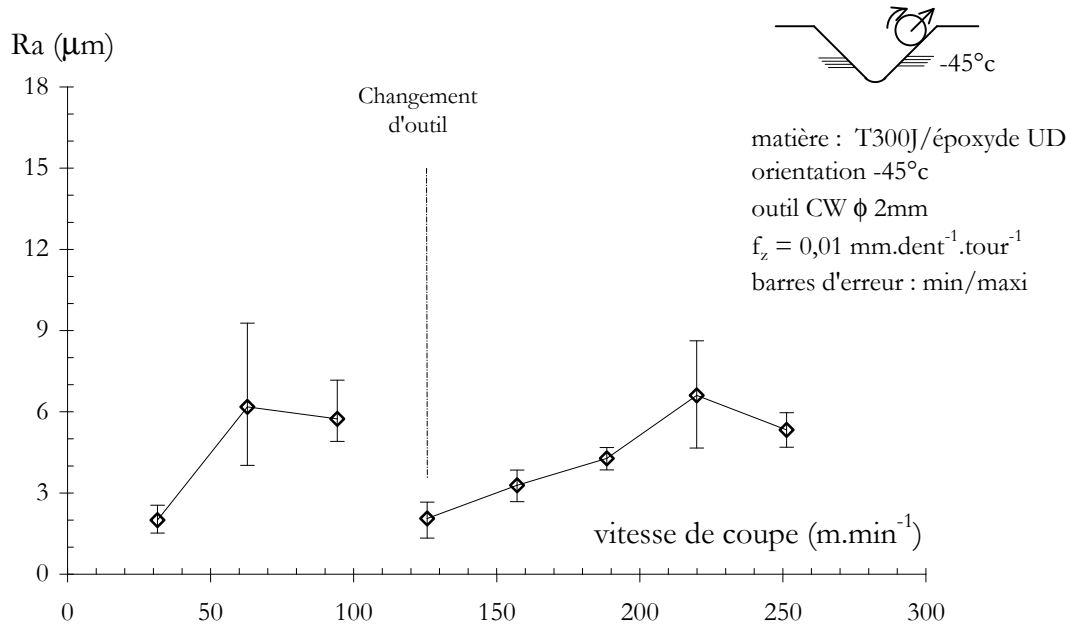


Figure 3.2 – Rugosité Ra dans l'entaille côté -45°c en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu, composite C1.

le cas d'un matériau composite unidirectionnel, les fibres inclinées à +45°c amplifient le phénomène de décohésion de la surface usinée, tandis que les fibres orientées à -45°c se compriment les unes sur les autres avant leur sectionnement par l'arête de coupe (explications dans l'introduction de ce paragraphe). Les figures 3.1 et 3.2 montrent que la rugosité Ra mesurée, lorsque les arêtes de coupe sont neuves, augmente rapidement au bout de quelques pièces usinées jusqu'à environ 6 μ , aussi bien en basse vitesse de coupe (pour V_c de 60 à 90 m.min⁻¹) qu'en haute vitesse de coupe (pour V_c de 220 à 250 m.min⁻¹). L'évolution de la rugosité en fonction de la longueur usinée par l'outil (figure 3.3) a donc été examinée pour vérifier l'influence éventuelle de l'usure de l'outil. Cette rugosité côté -45°c augmente sensiblement avec la longueur parcourue par l'outil, donc avec l'usure des arêtes contrairement au côté +45°c où l'état de surface semble être insensible à cette usure. Le mode d'usinage en concordance choisi dans cette étude confirme les observations faites lors de la coupe orthogonale de composites par Koplev et al. [29] et Wang et al. [51]. La formation effective du copeau ainsi que la rugosité de surface qui en découle sont particulièrement dépendantes de l'orientation des fibres par rapport à la direction de coupe. L'influence de la détérioration de l'acuité de l'arête de coupe de l'outil est immédiatement visible sur l'évolution de l'état de surface du côté -45°c, alors qu'elle n'est pas

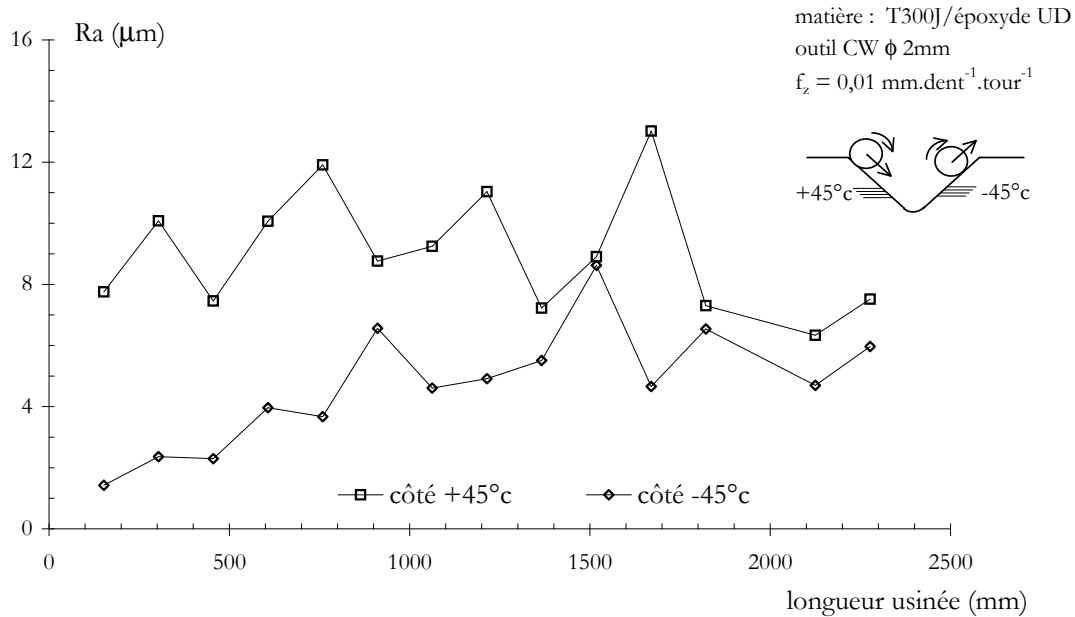
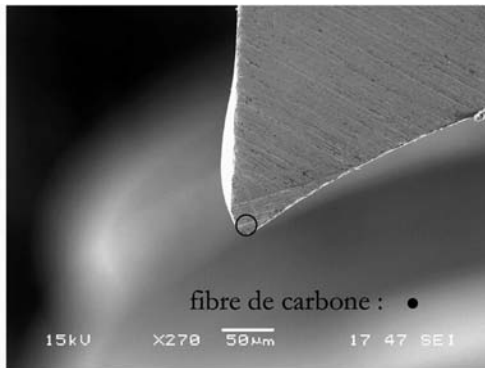
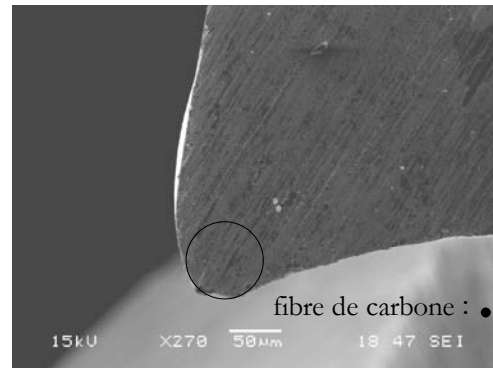


Figure 3.3 – Rugosité dans l'entaille en fonction de la longueur usinée par les outils (épreuves Iosipescu, composite C1).

encore détectée du côté $+45^\circ\text{c}$, du fait du niveau médiocre de la rugosité de ce côté dès le début du travail de l'outil. Le diamètre moyen des fibres de carbone dans ce stratifié est de $8 \mu\text{m}$. Le rayon de l'arête de coupe de l'outil neuf est du même ordre de grandeur (cf. figure 3.4(a)). Les fibres sont donc sectionnées franchement. Lorsque l'outil s'use, le rayon de l'arête tranchante atteint environ $40 \mu\text{m}$ (cf. figure 3.4(b)).



(a) arête de coupe neuve



(b) arête de coupe usée

Figure 3.4 – Comparaison de l'arête de coupe des fraises CW ϕ 2 mm neuve et usée.

Observations macro et microscopiques

La figure 3.5 montre une vue globale au MEB de l'entaille réalisée par fraisage dans les éprouvettes carbone/époxy C1.

La différence entre les aspects des deux côtés des entailles est évidente et rejoint les mesures d'état de surface du paragraphe précédent : rugosité importante côté $+45^\circ\text{c}$ et faible côté -45°c . La comparaison détaillée des surfaces fraisées du carbone/époxy (cf. figure 3.6) permet l'analyse des modes d'action de l'arête de coupe pour chacune des deux orientations des fibres $+45^\circ\text{c}$ et -45°c . Les observations des surfaces avec la configuration -45°c montrent des fibres sectionnées régulièrement mais dépassant légèrement de la matrice, ceci d'autant plus que la vitesse de coupe augmente.

Pour une vitesse de coupe constante, la découpe des fibres à -45°c est nettement plus régulière qu'à $+45^\circ\text{c}$ (cf. figure 3.5). Ceci confirme qu'à $+45^\circ\text{c}$ les fibres ont d'abord été redressées puis sectionnées. La surface est très rugueuse et constituée de couches de fibres découlant des arrachages successifs par les arêtes de coupe. Il faut noter la présence d'un dépôt sur la presque totalité de la surface, souligné également par Wang et al. [51] et Koplev et al. [29, 28]. Les surfaces du côté $+45^\circ\text{c}$ n'évoluent pas en fonction du régime de coupe (cf. figures 3.6(c) et 3.6(d)).

D'autre part, l'analyse visuelle au MEB des éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy C1 a

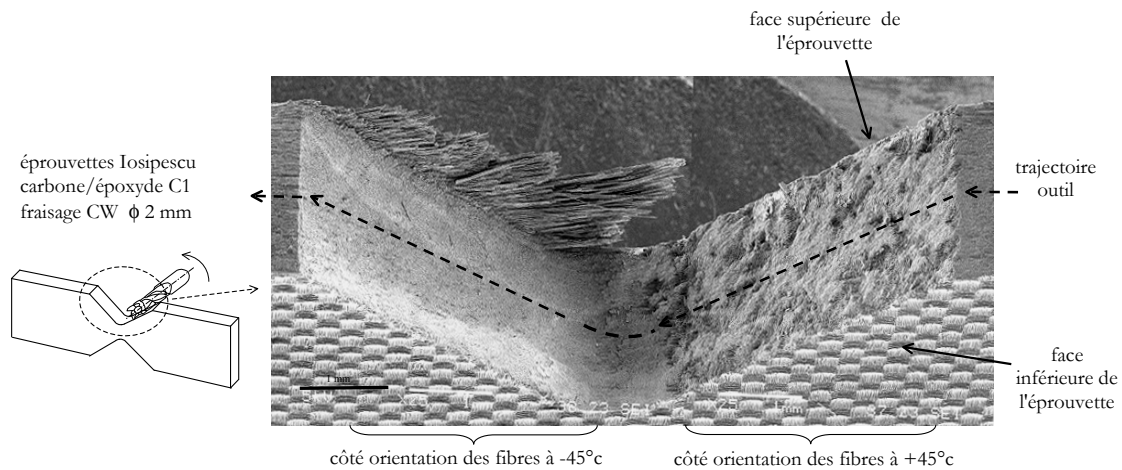


Figure 3.5 – Observation des deux faces des entailles (éprouvettes Iosipescu, composite C1).

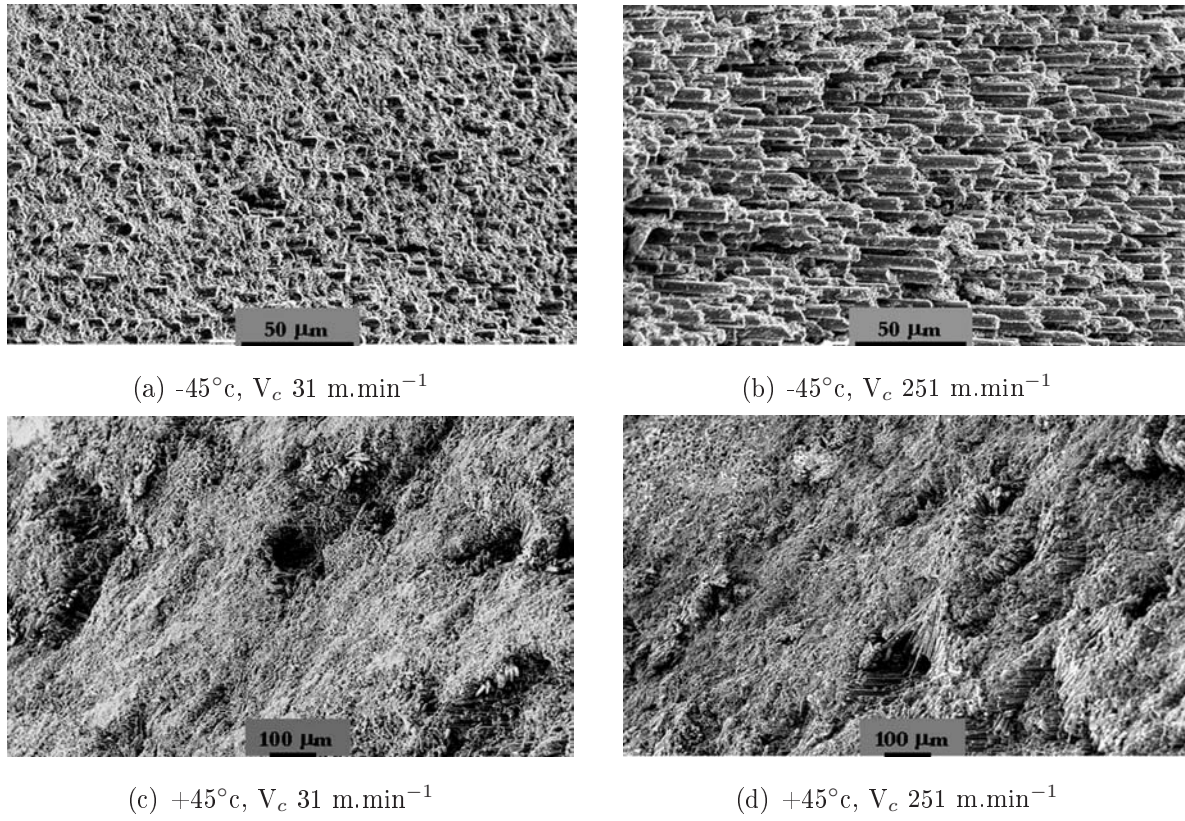


Figure 3.6 – Aspect micrographique des surfaces usinées en fonction des conditions de coupe. Éprouvettes type Iosipescu, composite C1.

révélé la présence de bavures uniquement sur les faces des entailles où les fibres sont orientées à -45°c et très majoritairement du côté de la surface libre supérieure de l'éprouvette (cf. figure 3.5). Elles sont constituées de fibres mal coupées, parce que mal maintenues par la matrice (cf. figure 3.5). La dissymétrie entre les bavures des faces supérieures et inférieures de l'éprouvette est expliquée par l'action de l'hélice de la fraise combinée à son sens de rotation. Ajoutée à l'action de cisaillement de l'arête de coupe, cette action de "vissage" tend à courber les fibres parallèlement à l'axe de la fraise. Ainsi les fibres du côté de la face inférieure subissent une action de cisaillement entre l'arête de coupe et le matériau, tandis que les fibres face supérieure subissent un décollement vers le dessus de l'éprouvette et sont moins bien sectionnées. De plus, ces bavures sont très majoritairement du côté où les fibres sont dans la configuration -45°c . Dans la configuration $+45^\circ\text{c}$, les fibres sont soulevées par l'arête de coupe avant d'être coupées (ouverture en mode I puis cisaillement), tandis que dans la configuration -45°c , elles sont comprimées entre l'arête de coupe et la surface usinée puis sectionnées. Mais à proximité des surfaces libres du composites, les fibres des plis extérieurs sont moins bien maintenues par la matrice que celles des plis internes du stratifié. La compression des fibres entre l'arête de coupe et la surface usinée dans la configuration -45°c est absente et les fibres sont soumises majoritairement à de la traction par l'interface fibre/matrice.

Efforts de coupe

L'analyse des composantes de l'effort de coupe au cours des usinages des éprouvettes ne sera réalisée que pour les fraisages des entailles puisque les premières fissures apparaissent dans ces zones. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.1 pour les composantes normales et tangentielles à la surface usinée. Les graphiques 3.7 et 3.8 visualisent les résultats. L'étude bibliographique a montré l'influence prépondérante de l'orientation des fibres sur la formation du copeau [29, 51]. Cette influence est également confirmée dans cette étude. Une orientation des fibres de $+45^\circ\text{c}$ engendre un effort normal de coupe plus important (de l'ordre de 25 N) qu'une orientation de -45°c (de l'ordre de 10 N). La tendance est la même pour les composantes tangentielles de l'effort de coupe dans le sens de l'avance de la fraise (effort de 45 N et de 30 N pour respectivement des orientations de fibres de $+45^\circ\text{c}$ et -45°c). Cette différence d'intensité des composantes de l'effort de coupe rejoint les observations de Wang et al. [29, 51] sur les différents modes de formation des copeaux suivant l'orientation des fibres. Pour une orientation des fibres de $+45^\circ\text{c}$, les arêtes de

vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	inclinaison des fibres +45°c						inclinaison des fibres -45°c					
	effort normal (N)			effort tangentiel (N)			effort normal (N)			effort tangentiel (N)		
	moyenne	mini	maxi	moyenne	mini	maxi	moyenne	mini	maxi	moyenne	mini	maxi
31	23	16	28	41	37	47	13	11	15	21	19	23
63	25	17	31	43	37	49	8	6	10	28	26	30
94	25	20	29	47	42	52	8	7	10	35	33	37
126	20	13	25	38	29	47	10	9	11	20	14	24
157	29	27	31	51	49	53	10	10	11	29	9	31
188	29	21	35	54	46	46	12	10	13	35	31	38
220	25	20	29	51	45	45	12	11	13	43	39	46
251	25	22	27	54	51	51	13	12	15	50	44	54

Tableau 3.1 – Composantes de l'effort de coupe (normale et tangentielle à la surface usinée) lors de l'usinage des entailles des éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy. Composite C1.

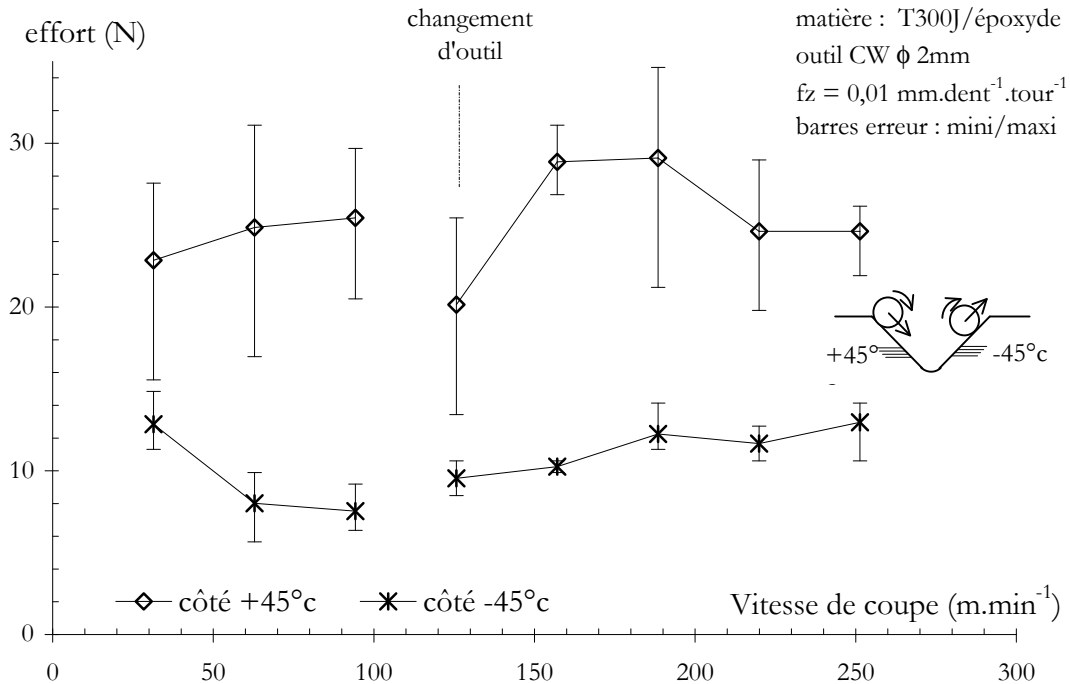


Figure 3.7 – Composante normale à la surface usinée de l'effort de coupe dans l'entaille en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu carbone/époxy. Composite C1.

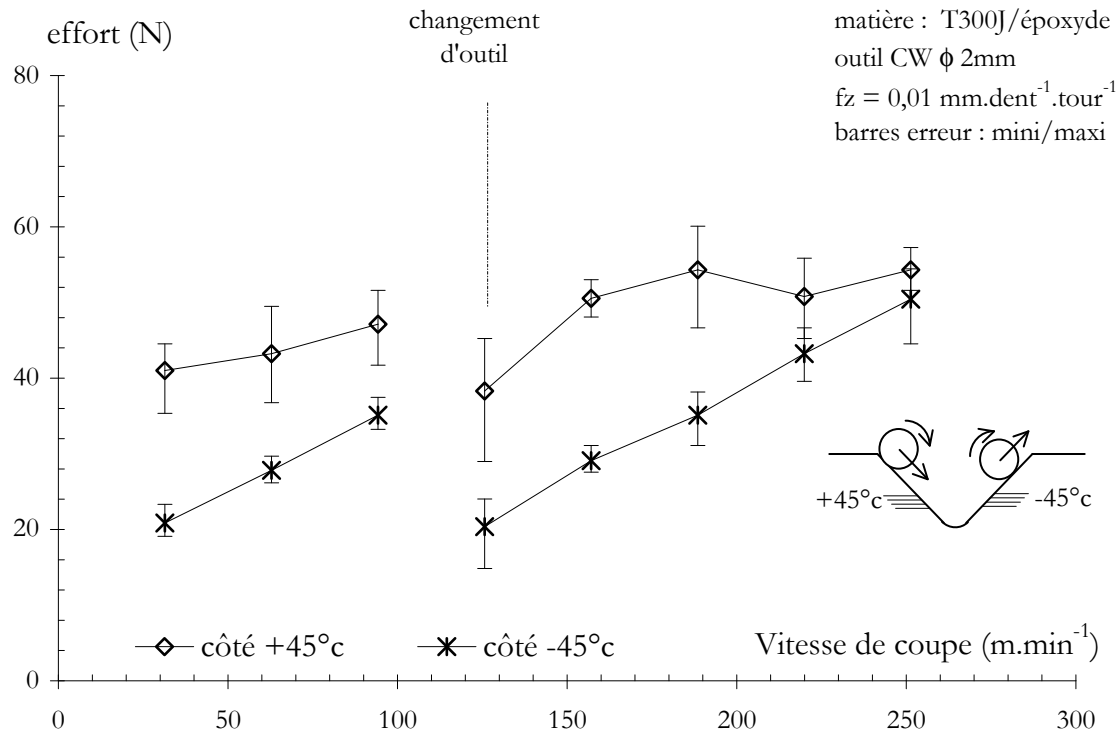


Figure 3.8 – Composante tangentielle à la surface usinée de l'effort de coupe dans l'entaille en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu carbone/époxy, composite C1

coupe arrachent les fibres suivant la configuration à -45° sur la figure 1.3 page 4 [29, 51]. Les composantes normales et tangentielles de l'effort de coupe par rapport à la surface usinée sont donc significativement plus importantes dans ce cas.

Il faut noter également la quasi indépendance de l'intensité de la composante normale à la surface usinée par rapport aux conditions de coupe. Par contre, l'augmentation de la composante tangentielle est significative, mais revient au même niveau pour les deux vitesses de coupe de 31 m.min^{-1} et 125 m.min^{-1} . C'est à ces vitesses de coupe que les changements d'outils ont été effectués. À ces deux vitesses, les arêtes de coupe sont donc neuves. Une influence de l'usure des outils et de l'émoussage des arêtes de coupe est à prendre en considération. L'évolution des composantes de l'effort de coupe dans le repère local lié à la surface usinée en fonction de la longueur usinée par les outils (cf. figures 3.9 et 3.10) permet de confirmer cette hypothèse, malgré la précaution d'utiliser deux outils dans cette campagne d'essais pour limiter leur niveau d'usure. La composante normale à la surface usinée est sensiblement indépendante de la longueur usinée (figure 3.9). Par contre la composante tangentielle augmente significativement avec la longueur

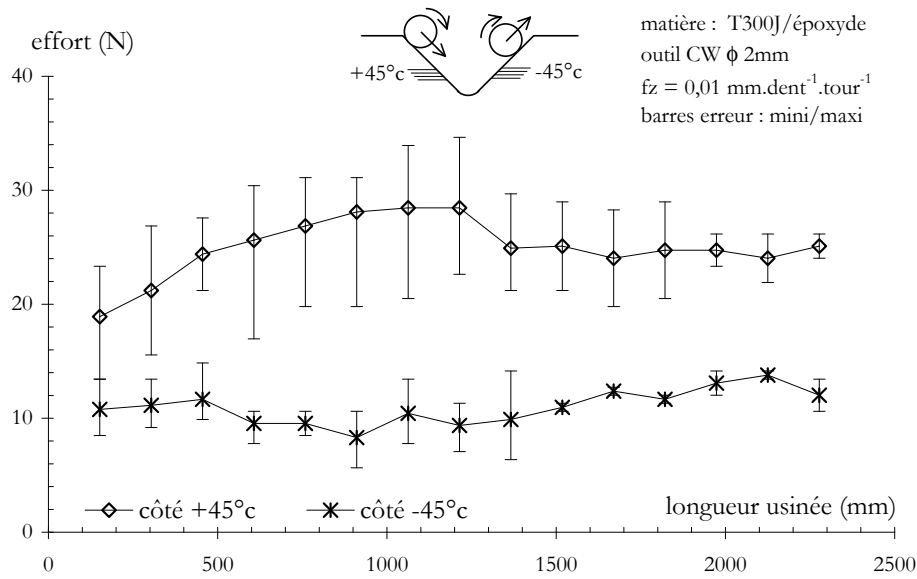


Figure 3.9 – Composante normale de l'effort de coupe dans le repère lié à la surface usinée en fonction de la longueur usinée. Éprouvettes Iosipescu carbone/époxy, composite C1

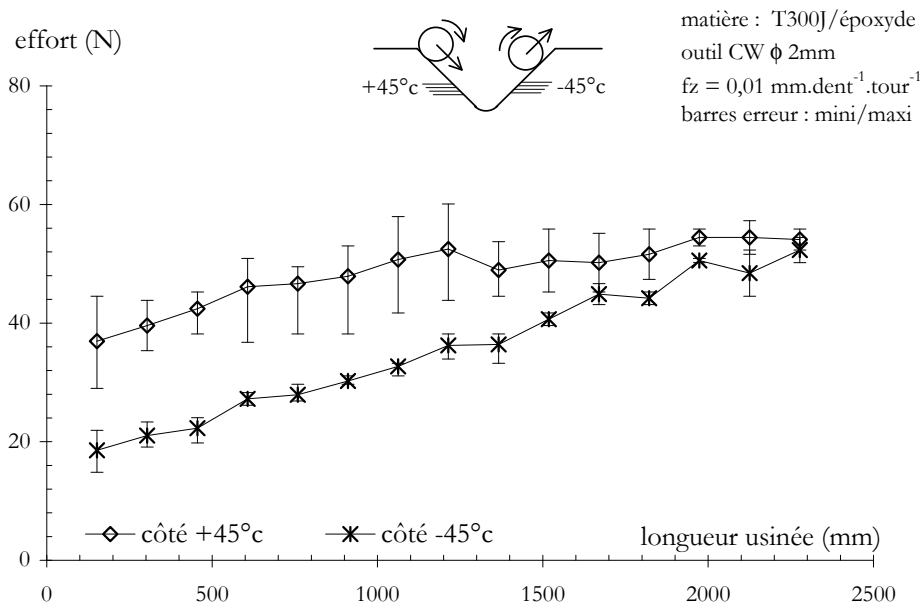


Figure 3.10 – Composante tangentielle de l'effort de coupe dans le repère lié à la surface usinée en fonction de la longueur usinée. Éprouvettes Iosipescu carbone/époxy, composite C1.

usinée (figure 3.10). De plus l'intensité de cette composante tangentielle atteint la même valeur (environ 50 N) pour les deux orientations de fibres ($+45^\circ\text{c}$ et -45°c). L'influence de l'usure des outils -émoissage de l'acuité des arêtes de coupe- est progressive et quasiment linéaire. L'impact de cette usure des arêtes tranchantes est plus accentué pour une orientation de fibres de -45°c . Il faut rappeler que les fibres de carbone sont d'un diamètre moyen d'environ $8\text{ }\mu\text{m}$. En se référant à l'étude bibliographique sur les modes de formation du copeau [29, 51], un outil neuf -avec une excellente acuité d'arête de coupe- permet un bon sectionnement des fibres et induit une effort de coupe restreint, tandis qu'un outil usé -avec des arêtes de coupe émoissées- se contente de comprimer les fibres les unes sur les autres et de les arracher (cf. figure 3.4 page 62).

3.1.2 Éprouvettes Iosipescu verre/époxy (Composite C3)

Rugosité de surface

Les états de surface relevés dans les entailles des éprouvettes en verre/époxy sont tracés dans les figures 3.11 et 3.12. Ils évoluent différemment de ceux mesurés sur les éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy. Il n'y a pas d'influence significative de la vitesse de coupe, sauf pour les séries effectuées à grande vitesse de coupe et d'avance. En effet, la figure 3.12 montre une augmentation significative de la rugosité pour les surfaces où les fibres sont orientées à $+45^\circ\text{c}$ uniquement pour les conditions de coupe extrêmes (grande vitesse de coupe : au delà de $150\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, et grande avance : $0,02\text{ mm}\cdot\text{dent}^{-1}\cdot\text{tr}^{-1}$).

L'évolution de la rugosité des surfaces usinées en fonction de la longueur usinée par les outils (donc l'influence de l'usure des arêtes de coupe) est représentée sur les figures 3.13, 3.14, 3.15 et 3.16. Aucune influence significative de l'usure des outils n'est constatée, sauf pour les orientations des fibres de $+45^\circ\text{c}$ aux conditions de coupe sévères. Comme pour les éprouvettes type Iosipescu en composite C1 (carbone/époxy), on retrouve une tendance d'une plus grande rugosité lorsque les fibres sont orientées à $+45^\circ\text{c}$.

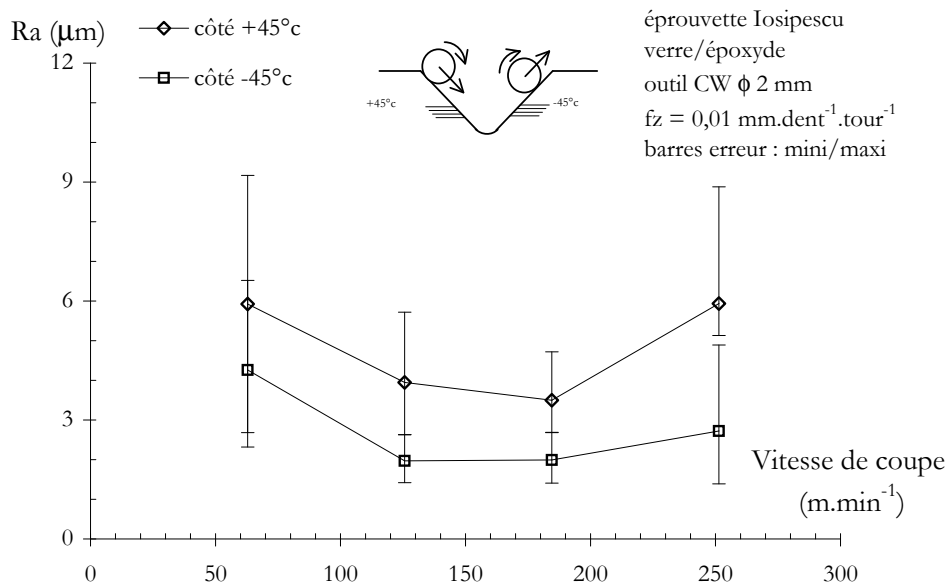


Figure 3.11 – Rugosité Ra dans l'entaille (éprouvettes Iosipescu, composite C3, $f_z = 0,01 mm.dent^{-1}.tr^{-1}$).

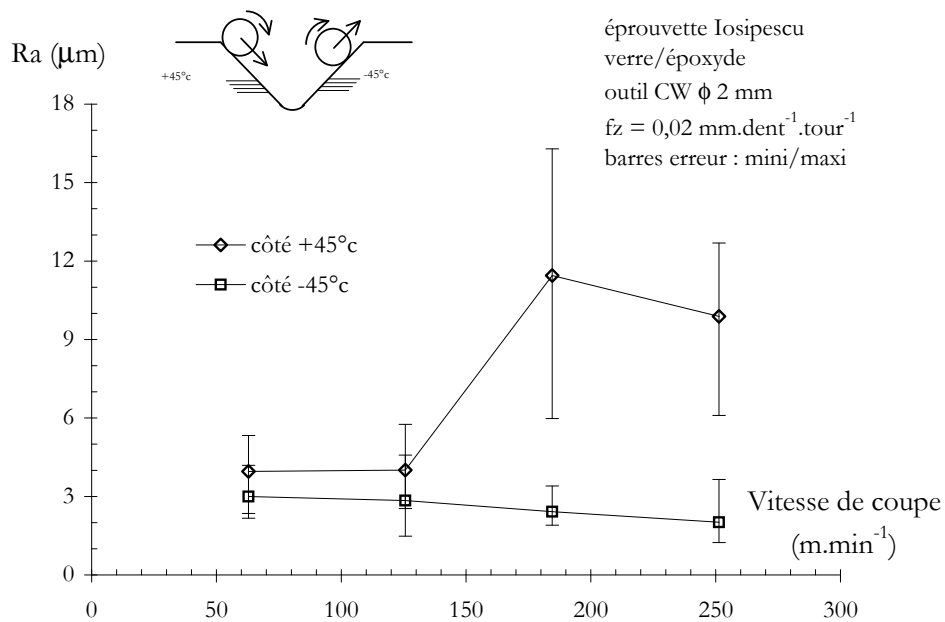


Figure 3.12 – Rugosité Ra dans l'entaille (éprouvettes Iosipescu, composite C3, $f_z = 0,02 mm.dent^{-1}.tr^{-1}$).

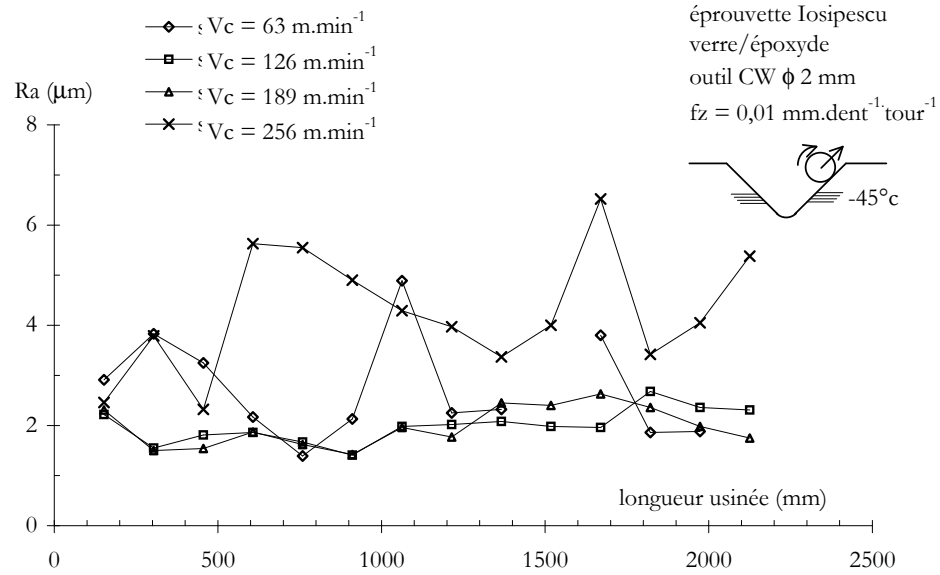


Figure 3.13 – Rugosité Ra dans l'entaille côté $-45^\circ c$ en fonction de la longueur usinée par les outils pour une avance $f_z = 0,01 mm.dent^{-1}.tr^{-1}$ (éprouvettes Iosipescu, composite C3).

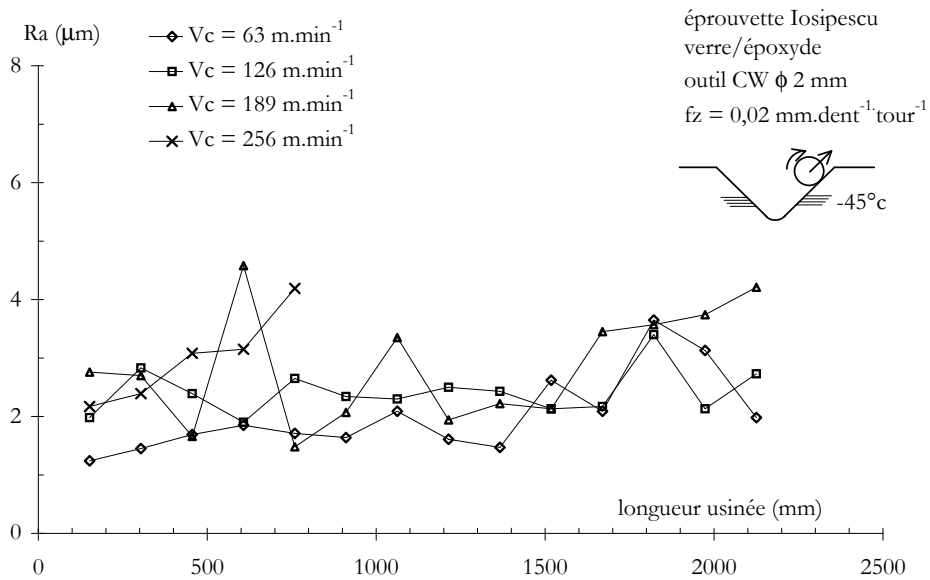


Figure 3.14 – Rugosité Ra dans l'entaille côté $-45^\circ c$ en fonction de la longueur usinée par les outils pour une avance de $f_z = 0,02 mm.dent^{-1}.tr^{-1}$ (éprouvettes Iosipescu, composite C3).

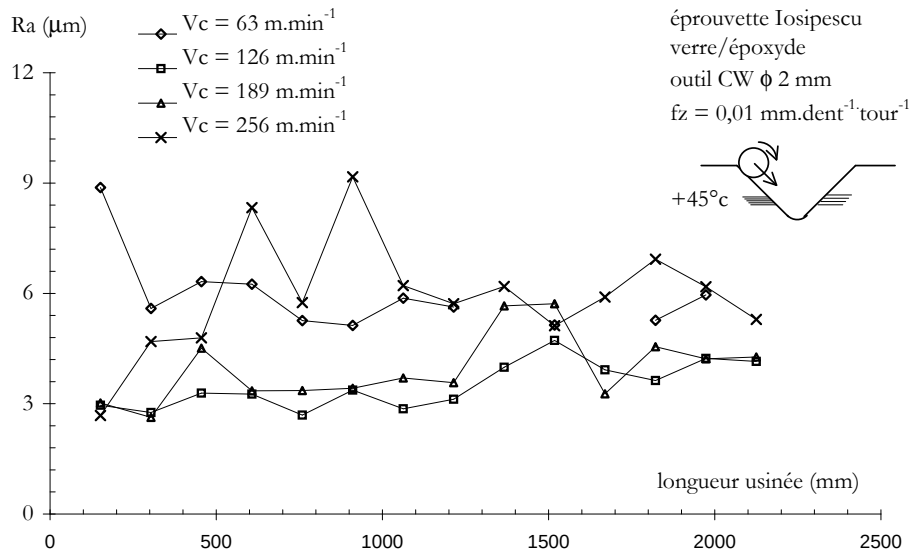


Figure 3.15 – Rugosité Ra dans l'entaille côté $+45^\circ\text{c}$ en fonction de la longueur usinée par les outils pour une avance $f_z = 0,01 \text{ mm}\cdot\text{dent}^{-1}\cdot\text{tr}^{-1}$ (épreuvettes Iosipescu, composite C3).

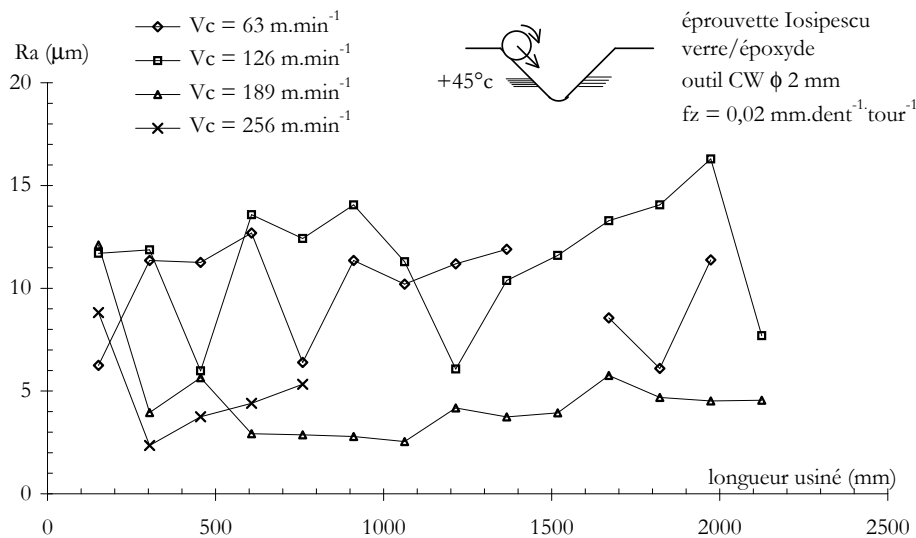


Figure 3.16 – Rugosité Ra dans l'entaille côté $+45^\circ\text{c}$ en fonction de la longueur usinée par les outils pour une avance de $f_z = 0,02 \text{ mm}\cdot\text{dent}^{-1}\cdot\text{tr}^{-1}$ (épreuvettes Iosipescu, composite C3).

Observations macro et microscopiques

La figure 3.17 montre une vue globale de l'entaille. Les constatations faites par analyse microscopique sur les surfaces usinées des éprouvettes Iosipescu en verre/époxy (matériau C3) sont analogues à celles faites pour le matériau C1.

Des bavures de tailles différentes au niveau des surfaces libres inférieure et supérieure des éprouvettes (cf. figure 3.17) sont également présentes. Les différences de comportement des fibres sont très nettement constaté en observant chacun des côtés des entailles de l'éprouvette (cf. figure 3.18). Avec une orientation des fibres à $+45^\circ$, l'action de l'arête de coupe tend à relever les fibres en les soumettant à une flexion importante puis à les sectionner. Une telle surface présente ainsi un aspect rugueux avec des ruptures fragiles de fibres (cf. figure 3.18a). À l'inverse, avec une orientation des fibres à -45° , l'action de l'arête de coupe tend à coucher les fibres les unes sur les autres en les soumettant à une traction avant de les sectionner. Une telle surface usinée présente donc une forme pratiquement lisse avec les fibres sectionnées régulièrement mais dépassant légèrement de la surface usinée (cf. figure 3.18b).

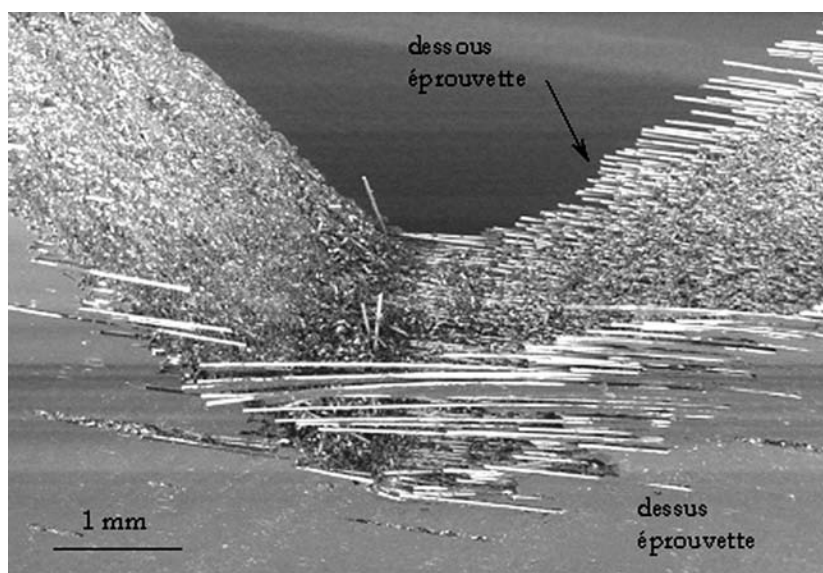


Figure 3.17 – Vue globale de l'entaille sur éprouvettes Iosipescu, composite C3

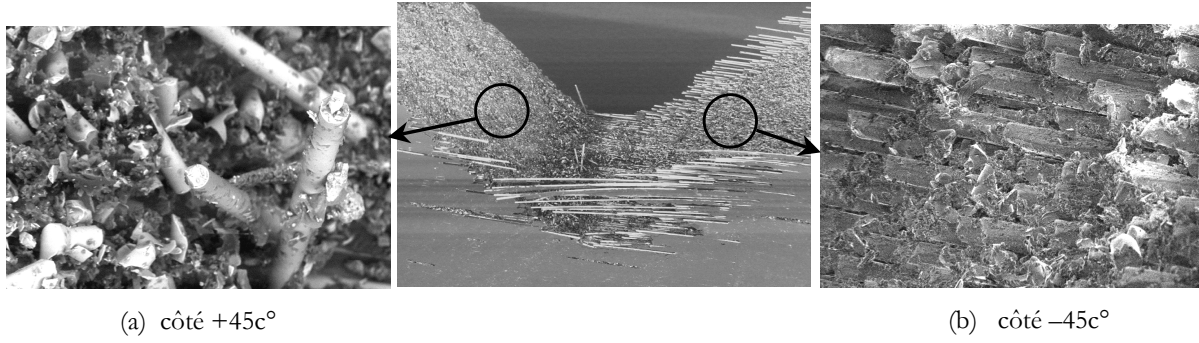


Figure 3.18 – Observations microscopiques des surfaces usinées des éprouvettes Iosipescu, composite C3.

Efforts de coupe

Les mesures des composantes de l'effort de coupe pour les séries usinées en fraisage, ramenées dans le repère local d'usinage (c'est à dire normal et tangent à la surface usinée au niveau de l'axe de la fraise), sont données dans les figures 3.19, 3.20, 3.21 et 3.22. Ces efforts de coupe normaux et tangentiels sont tous stables sauf pour les séries correspondant aux conditions de coupe sévères (V_c de 189 et 251 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ avec f_z à $0,02 \text{ mm} \cdot \text{dent}^{-1} \cdot \text{tr}^{-1}$). L'influence de l'usure des outils intervient dans les accroissements des composantes des

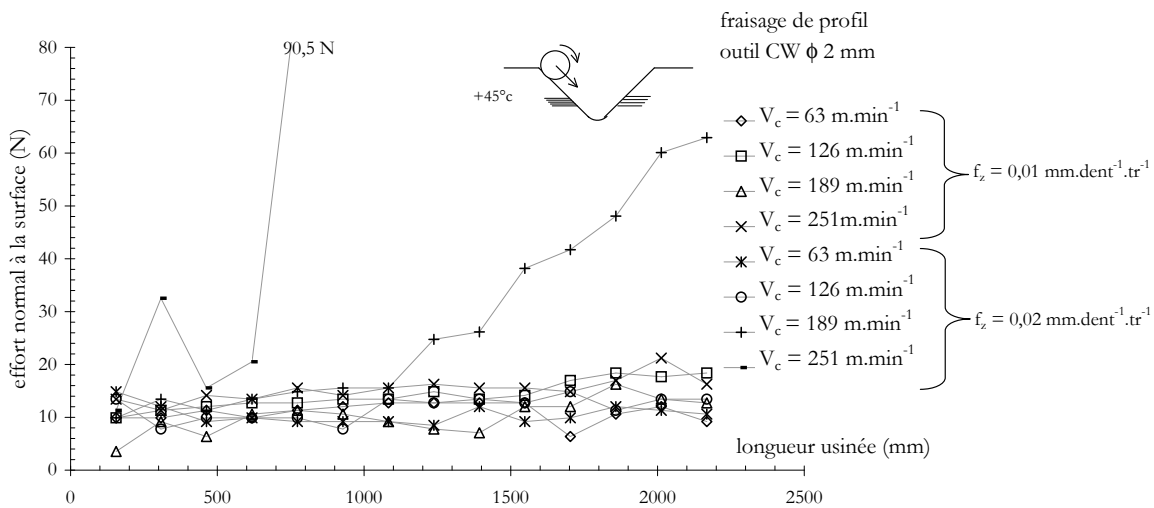


Figure 3.19 – Effort normal à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté $+45^\circ c$ (éprouvettes Iosipescu composite C3).

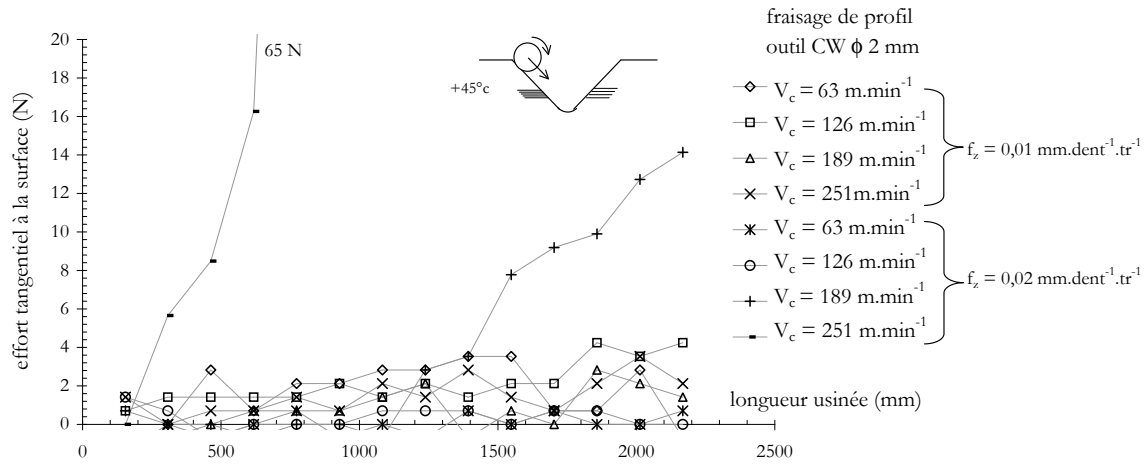


Figure 3.20 – Effort tangentiel à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté +45°c (éprouvettes Iosipescu composite C3).

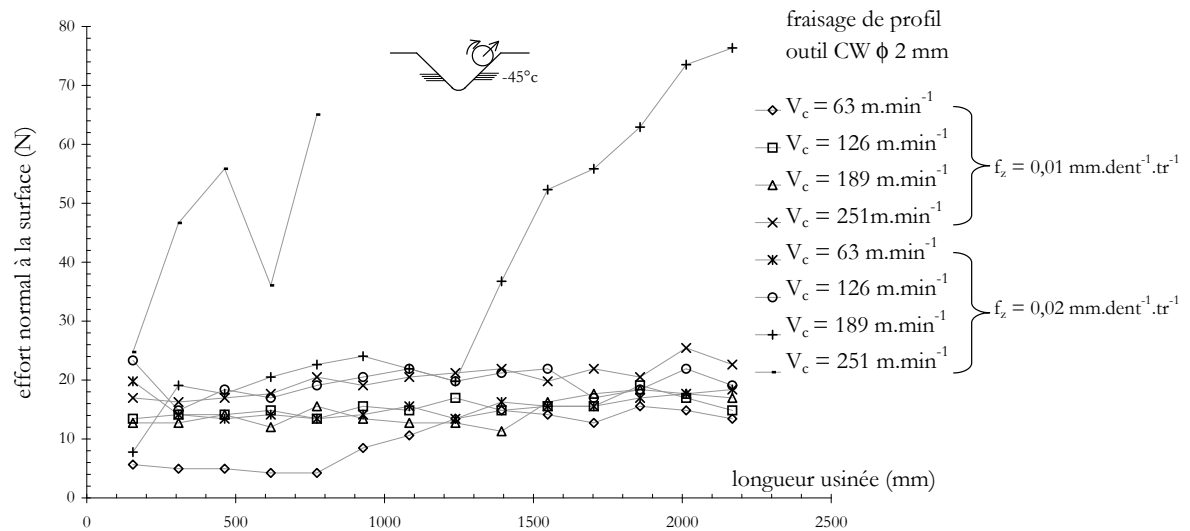


Figure 3.21 – Effort normal à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté -45°c (éprouvettes Iosipescu composite C3).

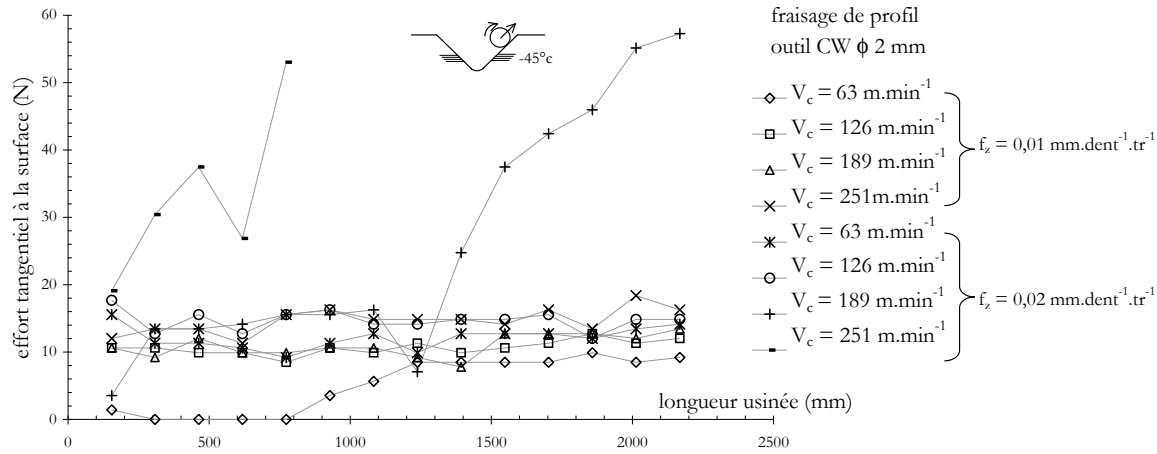


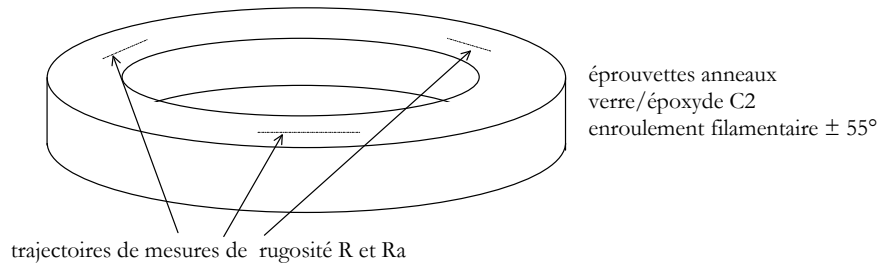
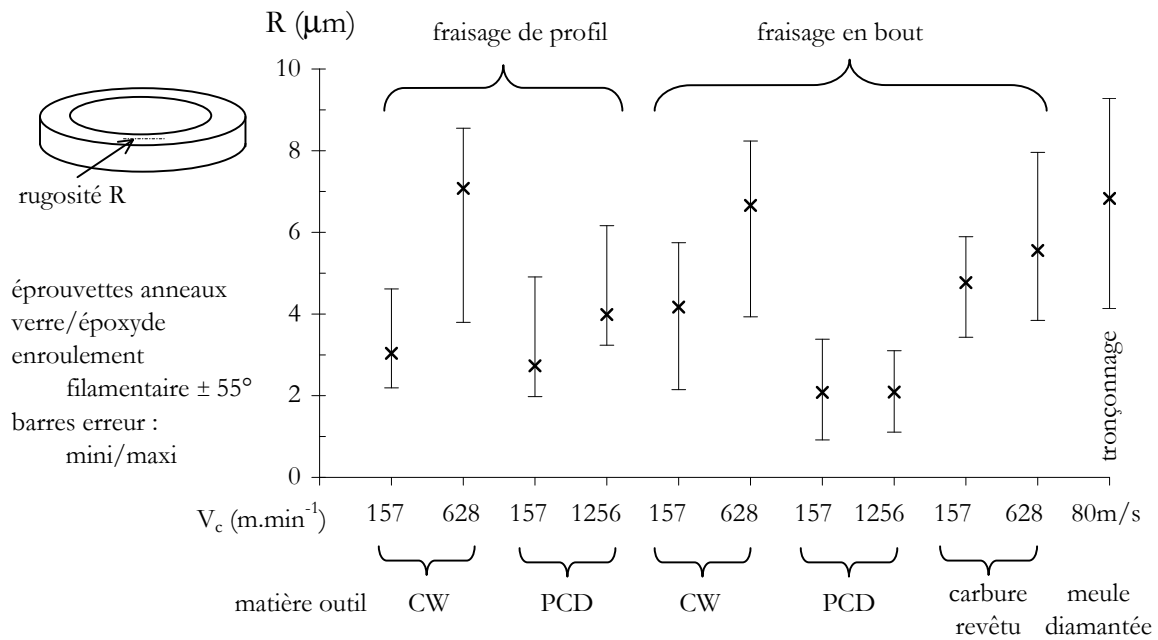
Figure 3.22 – Effort tangentiel à la surface usinée dans l'entaille en fonction de la longueur usinée côté -45° (éprouvettes Iosipescu composite C3).

efforts de coupe. En effet, un outil neuf a été utilisé à chacune des séries. Les efforts de coupe sont à ce moment sensiblement identiques quelque-soient les conditions de coupe pour une même orientation de fibres. L'augmentation constatée des composantes des efforts de coupe n'est pas détectée pour les faibles conditions de coupe. Elle intervient seulement après 1300 mm de longueur usinée pour une vitesse de coupe de 189 m.min^{-1} avec une avance f_z de $0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$, et dès les premières éprouvettes usinées aux plus grandes conditions de coupe ($V_c = 251 \text{ m.min}^{-1}$ et $f_z = 0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$).

3.2 Éprouvettes anneaux (Composite C2)

Rugosité de surface

En ce qui concerne les éprouvettes en anneaux, trois mesures de rugosité ont été faites au milieu de chaque face usinée et ce pour chaque éprouvette (cf. figure 3.23). La localisation de la zone de palpé de l'état de surface a été choisie d'après les constatations faites par notamment Wu et al. [53] (voir paragraphe 2.1.2 page 36). La figure 3.24 traduit les résultats de ces mesures en fonction des conditions de coupe par série d'éprouvettes. Le recoupement avec le tableau 2.4 page 47 (conditions de coupe des éprouvettes anneaux) montre que le fraisage en bout avec les outils PCD induisent les rugosités les plus faibles (rugosité R de l'ordre de $2 \mu\text{m}$) et ce pour toute la plage de vitesse de coupe étudiée (157

Figure 3.23 – Mesures de la rugosité R sur les éprouvettes anneaux, composite C2.Figure 3.24 – Rugosité R des éprouvettes en anneau, composite C2.

à 1256 m.min^{-1}). Les surfaces usinées avec les mêmes outils mais en fraisage de profil ont des rugosités légèrement supérieures (de 3 à $4 \mu\text{m}$).

Les outils CW donnent des résultats différents : rugosité moyenne (de 3 à $4 \mu\text{m}$) à faible vitesse de coupe ($V_c = 157 \text{ m.min}^{-1}$), rugosité élevée (6 à $7 \mu\text{m}$) à haute vitesse coupe ($V_c = 1256 \text{ m.min}^{-1}$). Il n'y a pas de différence significative entre les deux types d'usinage pour ce type d'outil. La remarque vaut pour les outils en CW revêtus diamant.

Il faut noter également que les rugosités des éprouvettes anneaux tronçonnées avec une meule diamantée sont parmi les plus élevées.

Observations macroscopiques

En ce qui concerne les éprouvettes-anneaux, seules des observations macroscopiques ont été réalisées. Elles ont montré que les surfaces usinées en roulant (fraisage de profil) présentent des surfaces régulières sans bavures ni délaminages (cf. figure 3.25(a)).

Par contre, les surfaces usinées en bout ont visuellement des endommagements très sévères et ce quel que soit le type d'outil utilisé (cf. figure 3.25(b)). Ces détériorations se caractérisent par les forts délaminages des plis à proximité des surfaces libres (diamètre intérieur ou extérieur suivant le sens d'attaque des dents de la fraise) observés dans le cas du fraisage en bout.

Ces délaminages n'apparaissent pas dans les résultats de mesures de rugosité de la figure 3.24. En effet, les mesures de rugosité correspondent aux états de surface dans la partie centrale de l'épaisseur des anneaux (cf. figure 2.5(a) page 37), puisque comme souligné par Wu et al. [53] (voir paragraphe 2.1.2 page 36), les délaminages se produisent dans cette partie centrale. Les observations sont donc restreintes à cette zone.

Les éprouvettes en anneaux meulées présentent une surface usinée très régulière. Toutefois, une bavure correspondant à la fin du tronçonnage apparaît systématiquement (cf. figure 3.25(c)). Cette dernière est due à l'effort du disque à tronçonner qui éjecte l'éprouvette avant que la section complète ne soit coupée.

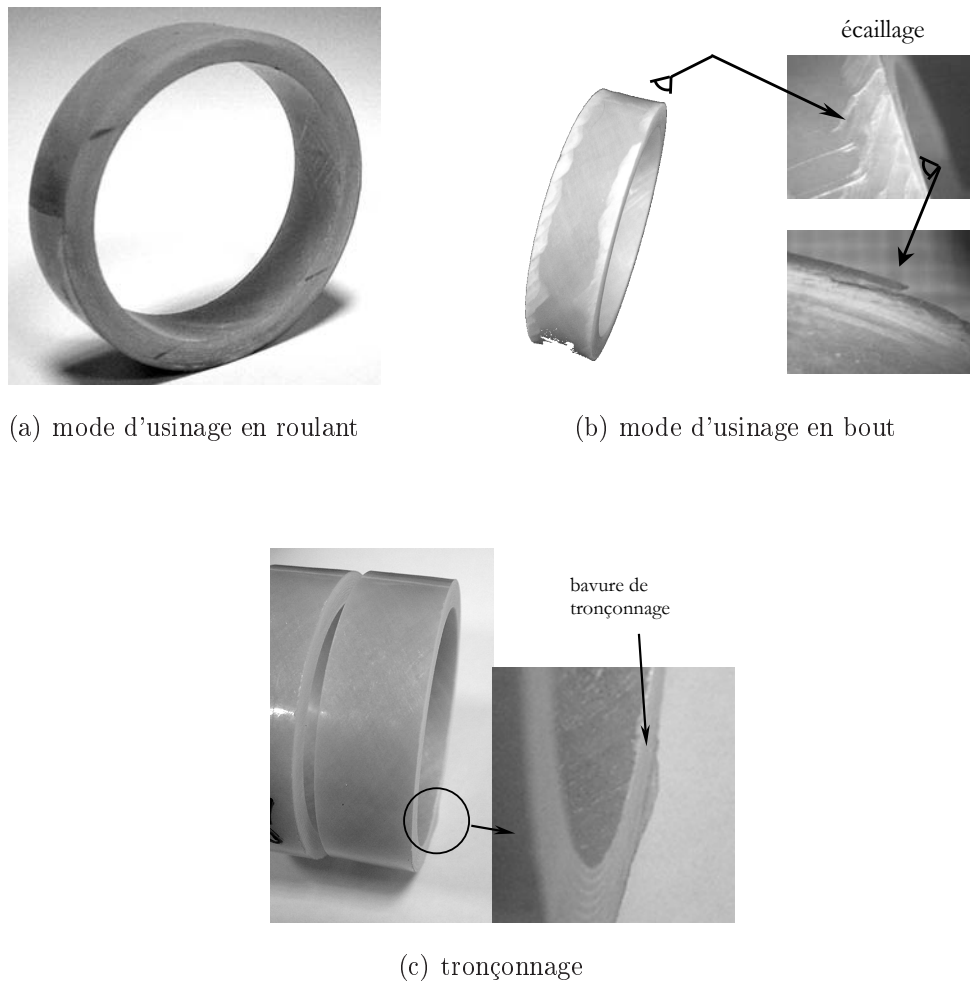


Figure 3.25 – *Endommagements macroscopiques en fonction du mode d'usinage (épreuves anneaux, composite C2).*

3.3 Éprouvettes de traction hors axes (Composite C4)

L'étude sur ce type d'éprouvettes a été réalisée en deux campagnes d'essais : une 1^{ère} de 120 éprouvettes (avec des orientations de fibres de $+15^\circ$, $+30^\circ$ et $+45^\circ$), puis une seconde de 4 séries de 80 éprouvettes avec des orientations de fibres de $+15^\circ$, -15° , $+15^\circ$, -15° , $+45^\circ$, -45° , $+45^\circ$ et -45° .

3.3.1 1^{ère} analyse : influences des paramètres de coupe

Cette première analyse concerne la 1^{ère} série de 120 éprouvettes afin de déterminer les paramètres de coupe les plus influents sur les endommagements.

Rugosité de surface

Les résultats des mesures de rugosité de surface pour les orientations de fibres de $+15^\circ$, $+30^\circ$ et $+45^\circ$ sont donnés :

- pour l'outil PCD dans la figure 3.26 ;
- pour l'outil CW dans la figure 3.27.

La rugosité moyenne Ra des surfaces usinées est particulièrement influencée par l'orientation des fibres. C'est avec une orientation des fibres de $+15^\circ$ et particulièrement avec un outil PCD que cette rugosité est la plus faible (inférieure à $6 \mu\text{m}$). Pour cette orientation de fibres, la rugosité reste du même niveau sauf pour les grandes avances par dent (correspondant aux vitesses d'avance de 1070 et 5370 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

La rugosité pour les autres orientations des fibres ($+30^\circ$ et $+45^\circ$) est nettement plus élevée (de l'ordre de 10 à 28 μm) sauf dans le cas de faibles vitesses d'avance (correspondantes aux faibles vitesses de coupe V_c et avances par dent et par tour f_z). Ce résultat concorde avec les observations de Guégan [23] qui constate également les plus faibles rugosités en perçage pour les orientations de fibres proches de 0° et 90° , et les plus grandes pour des orientations proches de 45° et 135° .

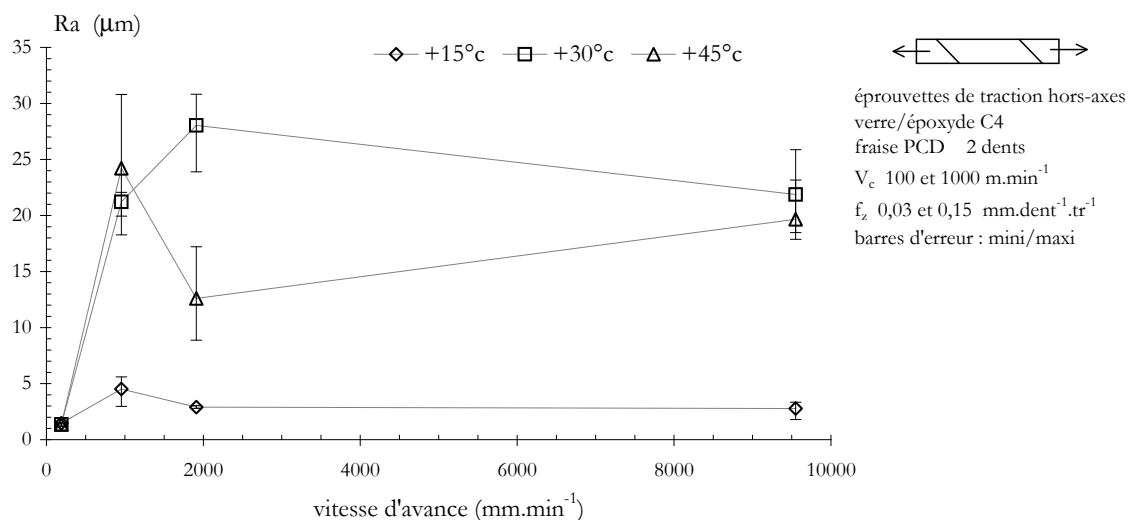


Figure 3.26 – Rugosité en fonction de la vitesse d'avance, 1^{ère} série d'éprouvettes de traction hors-axes, composite C4, outil PCD.

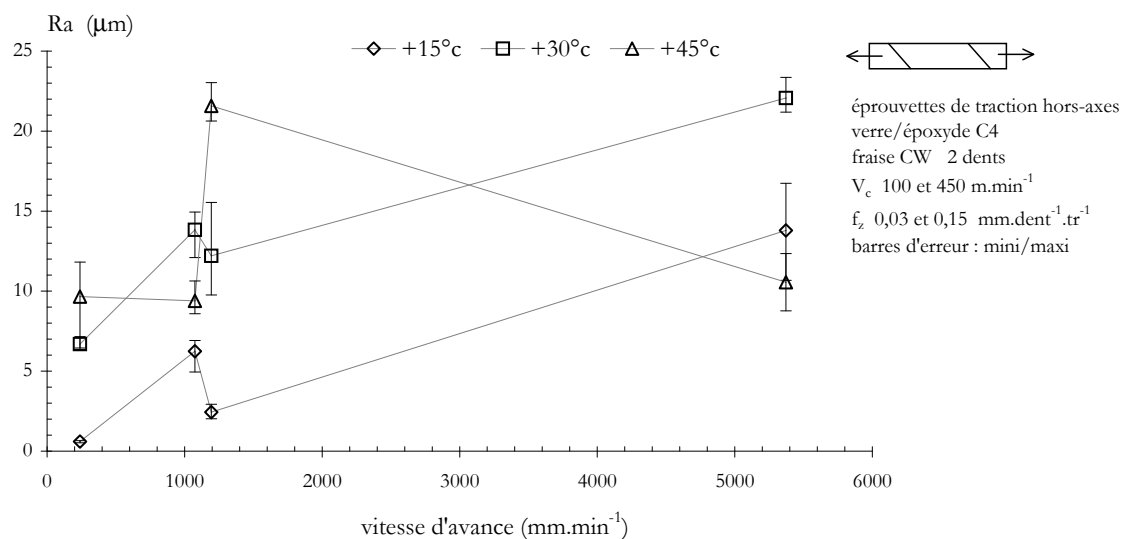


Figure 3.27 – Rugosité en fonction de la vitesse d'avance, 1^{ère} série d'éprouvettes de traction hors-axes, composite C4, outil CW.

Température de surface usinée

Les températures maximales mesurées sur la surface usinée au niveau de l'interface arête de coupe/matériau composite sont indiquées dans les figures 3.28 et 3.29.

Malgré les dispersions sur les résultats signalés dans la bibliographie (cf. paragraphe 2.4.2 page 54), l'analyse des résultats de mesure de température par caméra infra-rouge permet d'observer que les températures maximales atteintes par les surfaces fraisées sont globalement inférieures à la température de transition vitreuse de la résine époxy ($T_g = 142^\circ\text{C}$). Il faut noter une température globalement plus élevée pour une surface usinée avec l'outil CW que pour une surface usinée avec l'outil PCD. Ceci s'explique par la moins bonne d'acuité d'arête pour l'outil en CW que pour celui en PCD (cf. figure 3.30). Le médiocre tranchant de l'arête de coupe de l'outil CW crée des refoulements de matière usinée et des frottements plus importants (au niveau de l'arête de coupe mais aussi entre surface usinée et face de dépouille) qu'avec l'outil PCD (cf. figure 3.31). Combinés avec des faibles vitesses d'avance de l'outil dans la matière, ces frottements matériau composite/face de dépouille génèrent de la chaleur au niveau de la surface usinée.

D'autre part, les températures des surfaces usinées les plus faibles sont généralement obtenues pour une orientation de fibres de $+45^\circ$. Tous ces constats rejoignent ceux de Guégan [23] en fraisage.

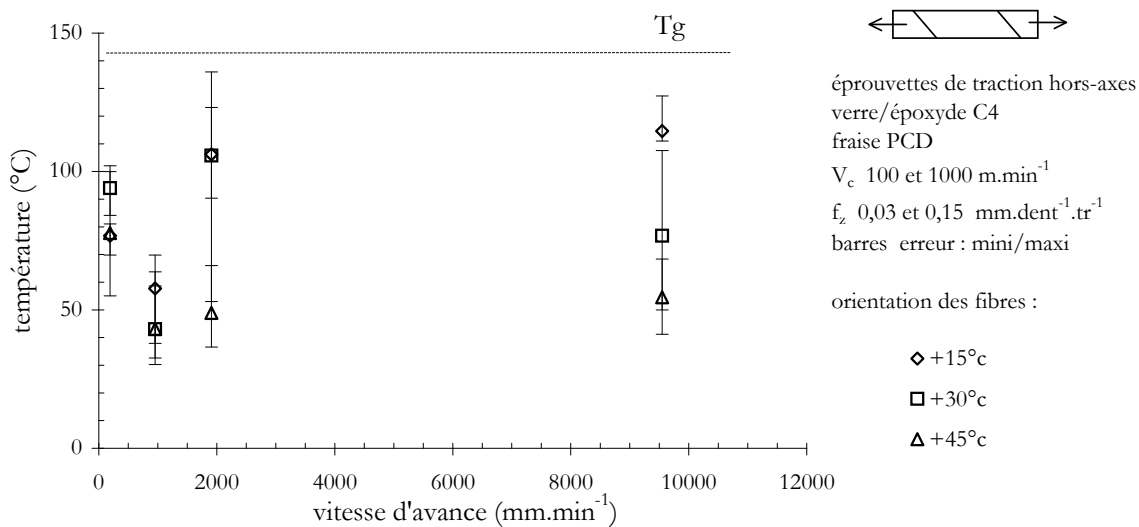


Figure 3.28 – Températures maximales atteintes par la surface usinée au passage de l'outil PCD, 1^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, composite C4.

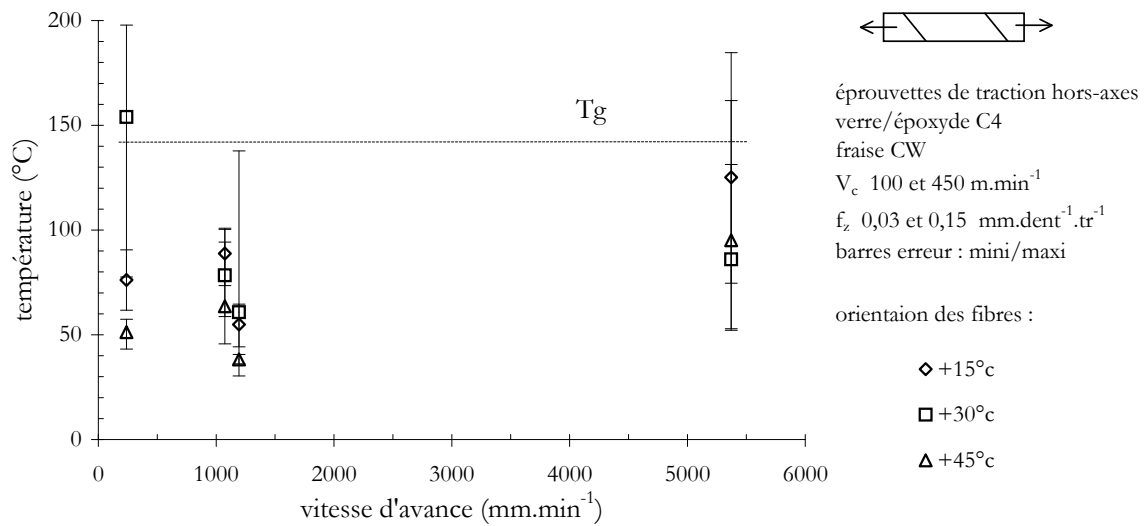


Figure 3.29 – Températures maximales atteintes par la surface usinée au passage de l'outil CW, 1^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, composite C4.

Plusieurs observations macro et microscopiques n'ont pas permis d'observer des traces de brûlure de la résine sur la surface usinée. Ces constatations confortent les niveaux des températures mesurés (largement inférieurs à la température de carbonisation de la résine) et la pertinence des choix des conditions de coupe faites pour les outils PCD et CW. En considérant que la suite de l'étude restera dans les mêmes plages de conditions de coupe et que seul l'outil PCD sera utilisé, la décision de ne plus mesurer les températures par caméra infrarouge dans les prochaines séries d'éprouvettes a été prise. Seules des observations optiques garantiront l'absence d'endommagements thermiques.

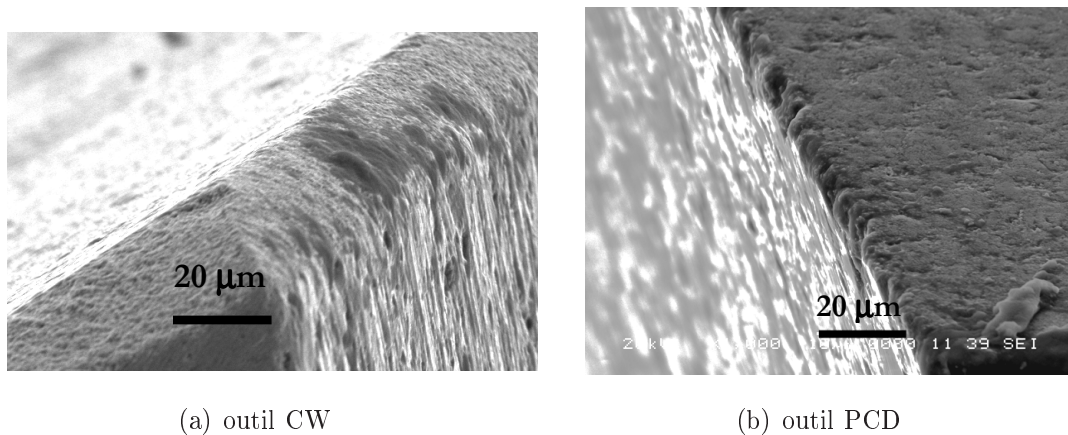


Figure 3.30 – Acuité des arêtes de coupe des outils d'éprouvettes de traction hors-axes.

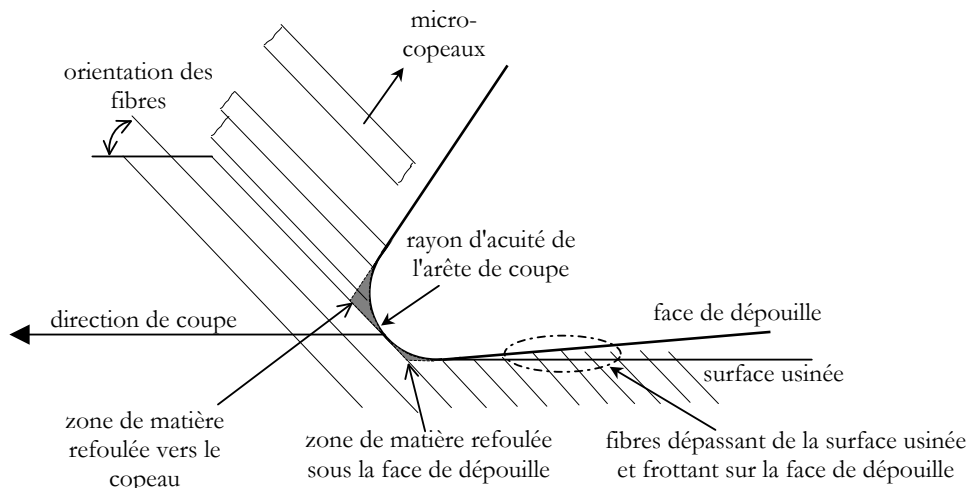


Figure 3.31 – Refoulement de matière usinée par l'arête de coupe et frottements à l'interface surface usinée/face de dépouille.

3.3.2 2^{ème} analyse : influences des configurations d'usinage

Cette 2^{ème} analyse présente de manière globale les résultats des deux séries d'éprouvettes (la 1^{ère} de 120 éprouvettes avec des orientations de fibres de $+15^\circ$, $+30^\circ$ et $+45^\circ$ avec des outils CW et PCD, et la seconde de 4 séries de 80 éprouvettes chacune avec des orientations de fibre de $+15^\circ$, -15° , $+15^\circ$, $+45^\circ$, -45° , $+45^\circ$ et -45° avec uniquement l'outil PCD). La fabrication des éprouvettes de la série -15° n'a pu être réalisée. Les endommagements induits par la coupe dans cette configuration conduisaient à leur destruction complète au cours de l'usinage. Ce constat a conduit à envisager une analyse complémentaire avec des conditions de coupe réduites pour cette configuration, exposée à la fin de ce paragraphe.

Les résultats sont présentés en fonction de la vitesse d'avance de l'outil pour chaque orientation de fibres : 15° (figure 3.32), 30° (figure 3.33) et 45° (figure 3.34).

Les niveaux de rugosité des surfaces usinées avec les configurations d'orientation de fibres de $+15^\circ$, -15° , $+45^\circ$ et -45° sont les plus faibles (de l'ordre de $2 \mu\text{m}$). La vitesse de coupe V_c (correspondant à la vitesse périphérique de l'arête de coupe) est de l'ordre de plus de cent fois la vitesse d'avance de l'outil dans le composite. En conséquence, ces

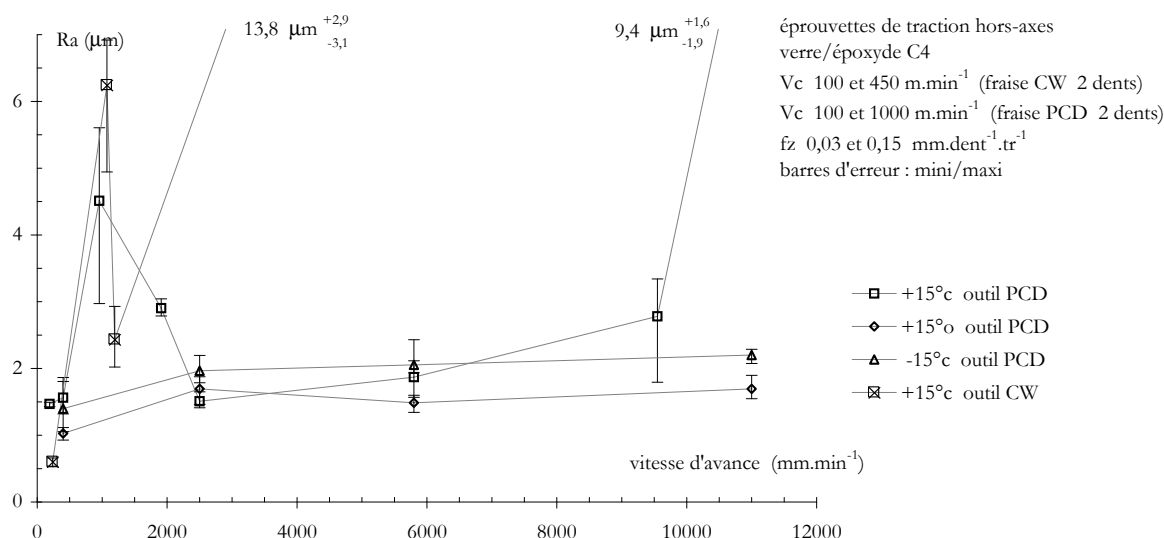


Figure 3.32 – Rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance. Épreuves de traction hors-axes, composite C4, orientation 15°.

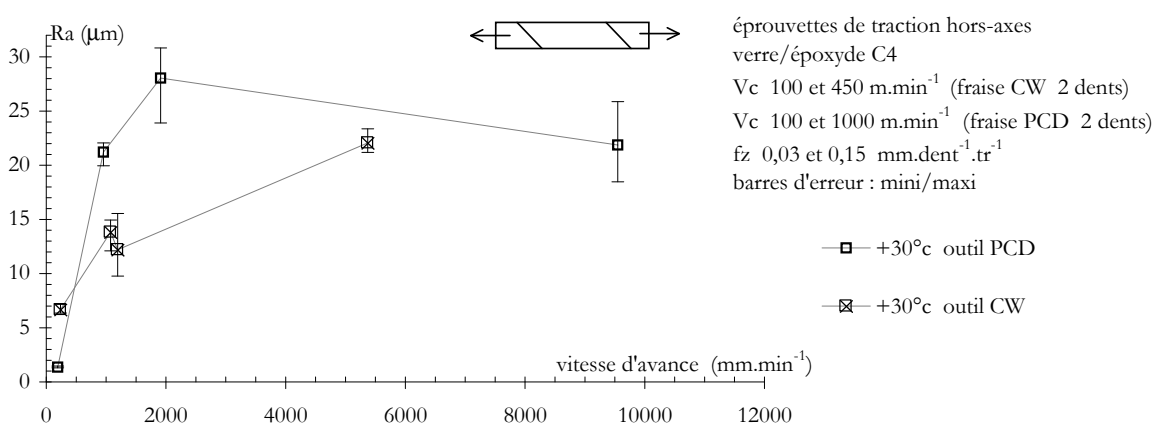


Figure 3.33 – Rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance. Épreuves de traction hors-axes, composite C4, orientation 30°.

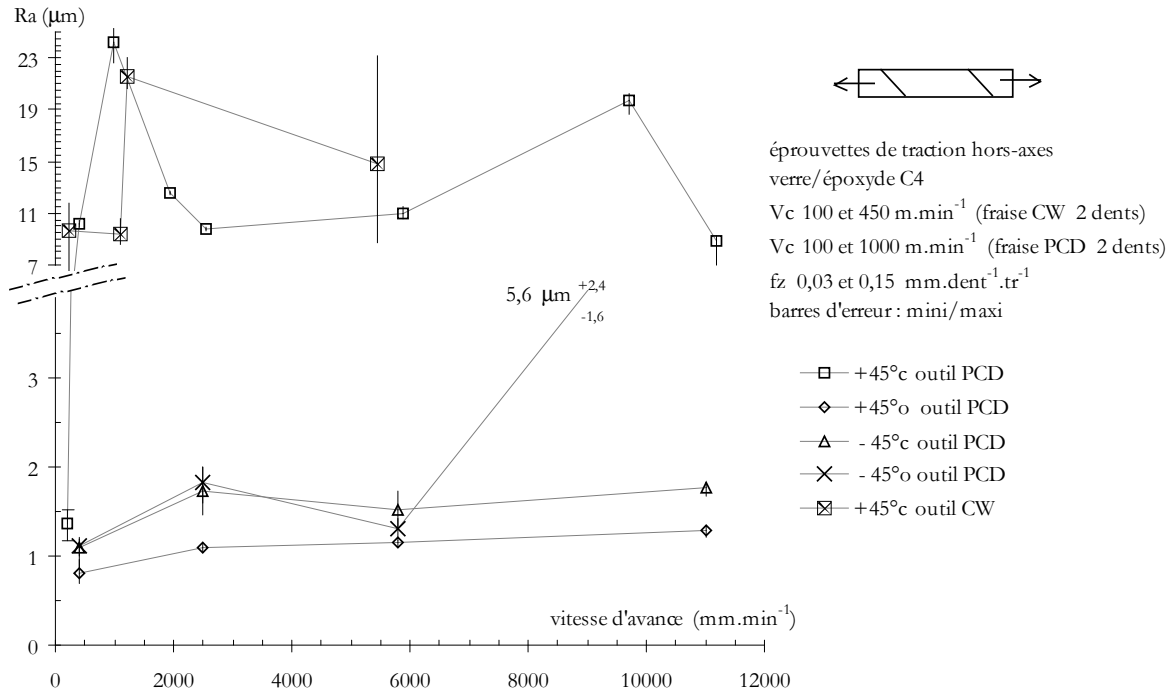


Figure 3.34 – Rugosité de surface en fonction de la vitesse d'avance. Échantillons de traction hors-axes, composite C4, orientation 45°.

configurations (+15°o -15°c, +45°o et -45°c) correspondent à une rupture des fibres par l'arête de coupe par compression sur la surface usinée puis cisaillement.

À l'inverse, les rugosités les plus grandes (de l'ordre de 10 à 25 μm) sont atteintes avec les configurations +30°c et +45°c, quelque soit le type d'outil. Elles correspondent à une attaque des fibres par l'arête de coupe par ouverture en mode I avant leur cisaillement, générant des fissurations et des arrachements en dessous du niveau de la surface usinée (cf. figure 1.8 page 14). Ces différences de niveaux de rugosité rejoignent les constations faites pour l'analyse des états de surface des échantillons Iosipescu entre les deux faces des entailles.

Dans le cas de la configuration -45°o, la rugosité est faible (de l'ordre de 2 μm) tant que la vitesse d'avance reste inférieure à 6000 mm.min⁻¹ (correspondant à une avance f_z inférieure à 0,1 mm.dent⁻¹.tr⁻¹). Dans cette configuration, l'arête de coupe attaque la section coupée par l'épaisseur nulle. Le soulèvement des fibres est dans ce cas quasiment inexistant tant que l'épaisseur de la section coupée (en forme de croissant, voir figure 1.2 page 3) n'atteint pas une valeur minimum. Celle-ci atteinte, les possibles décohésions fibres/matrice se créent dans le copeau mais au-dessus de la surface usinée qui garde

alors une rugosité correcte. Mais plus l'avance par dent augmente, plus ces décohésions se rapprochent de la surface usinée. Pour une avance f_z de $0,15 \text{ mm.dent}^{-1}$, les décohésions fibres/matrice commencent à se propager sous la surface usinée, d'où une rugosité croissante.

Il a été précisé en début de ce paragraphe que la fabrication des éprouvettes de la série de configuration -15° n'a pu être réalisée dans les mêmes conditions de coupe que les autres séries. En effet, les endommagements induits par la coupe dans cette configuration conduisaient à leur destruction complète au cours de l'usinage par apparition de longues fissures (supérieures à 10 mm) aux interfaces fibres/matrice (cf.figure 3.35). Elles travers-

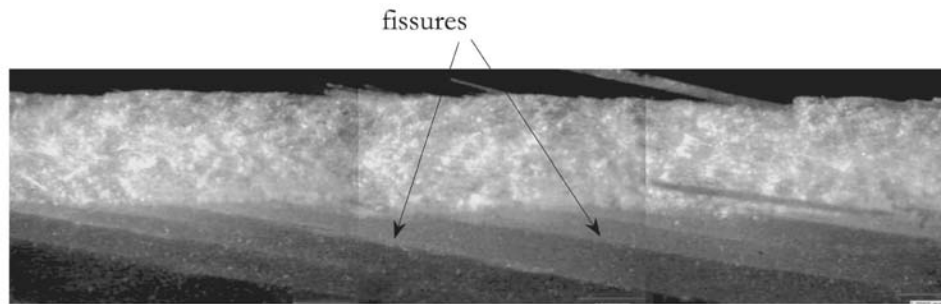


Figure 3.35 – Fissures créées pendant l'usinage. Éprouvettes de traction hors-axes, configuration -0° , $V_f = 400 \text{ mm.min}^{-1}$

saient la largeur des éprouvettes qui, sous l'action des efforts de coupe, se séparaient en plusieurs morceaux. Plusieurs essais de fraisage ont permis de constater que la fabrication d'éprouvettes était réalisable avec des avances f_z réduites à $0,01$ et $0,02 \text{ mm.dent}^{-1}$.

Observations macro et microscopiques

Les observations macro et microscopiques des surfaces usinées des séries $+15^\circ$, $+45^\circ$, -15° , -45° , et -45° n'ont pas fait apparaître d'endommagements visibles en surface. Il faut noter quelques fibres mal coupées des plis supérieurs et inférieurs du composite pour les orientations -45° , et -45° .

Par contre, les séries $+15^\circ$ et $+45^\circ$, comme soupçonné à l'analyse des états de surface, montrent des surfaces rugueuses (cf. figures 3.36 et 3.37).

Les endommagements des surfaces usinées avec les orientations de fibres de $+15^\circ$ se présentent sous la forme de cavités. Celles-ci correspondent aux "paquets" de fibres qui sont

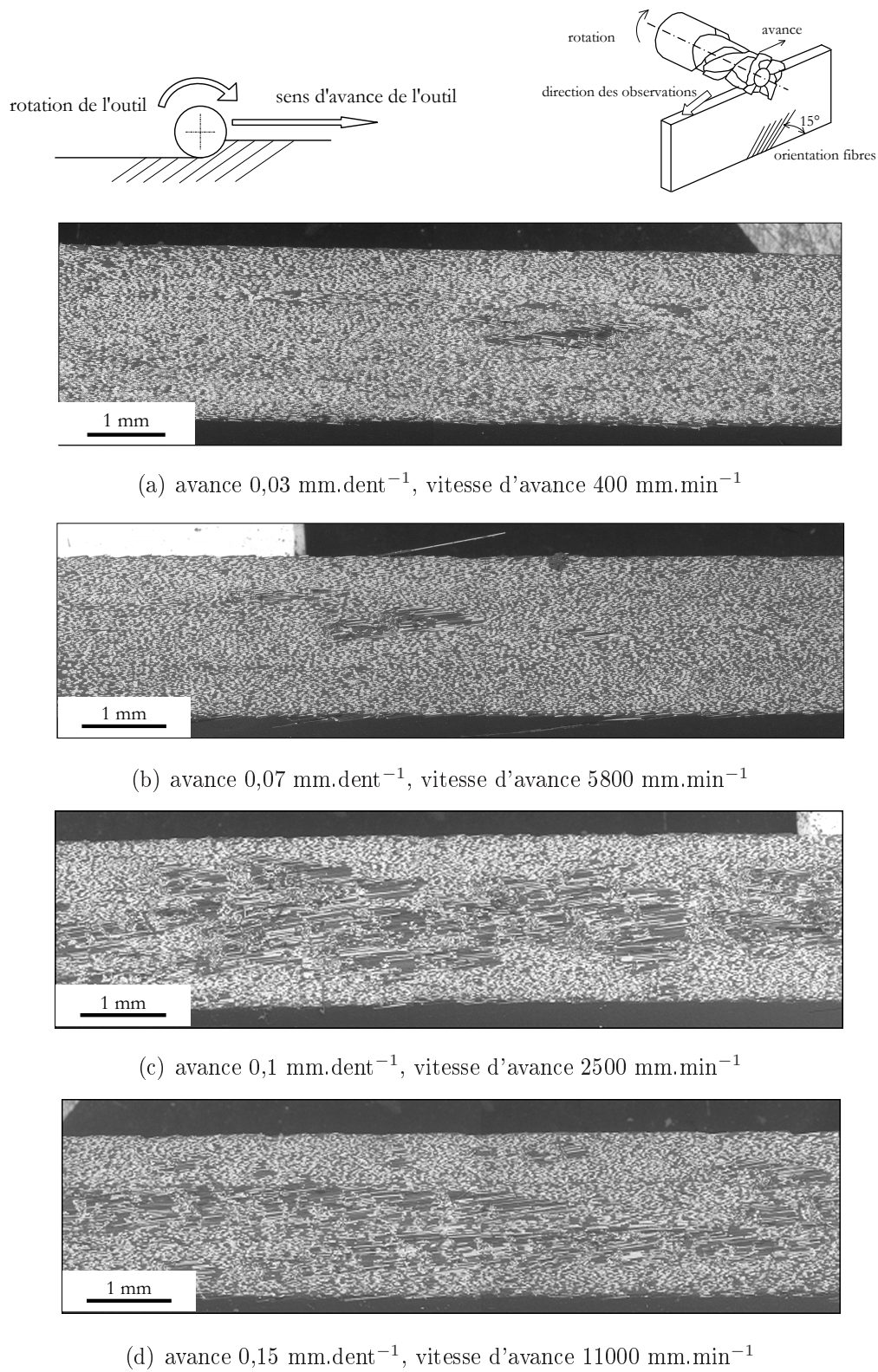


Figure 3.36 – Observations microscopiques des surfaces usinées, 1^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, orientation fibres $+15^\circ$, composite C4.

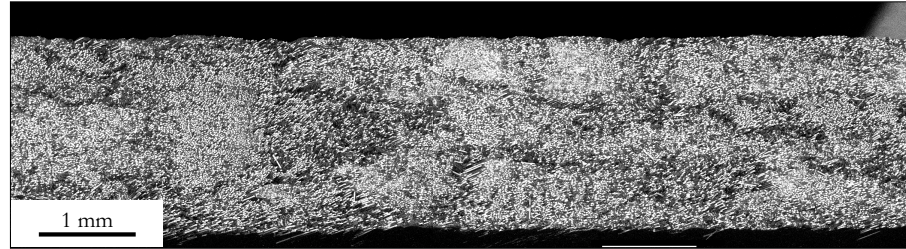
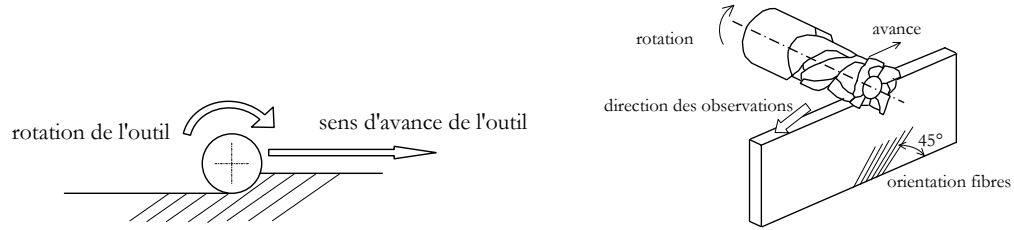
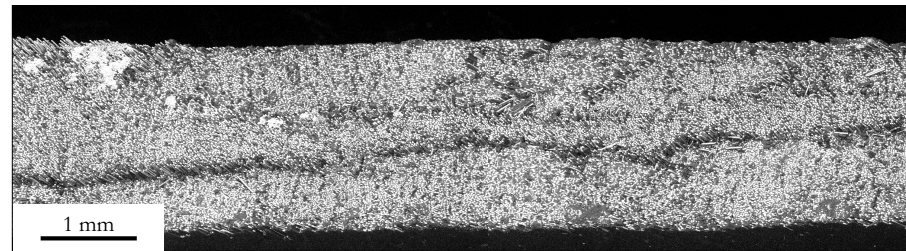
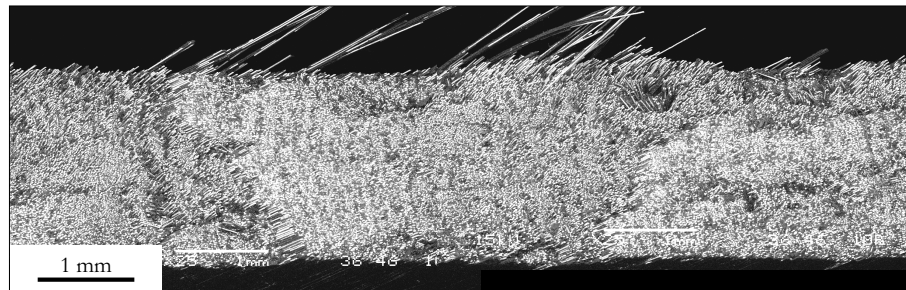
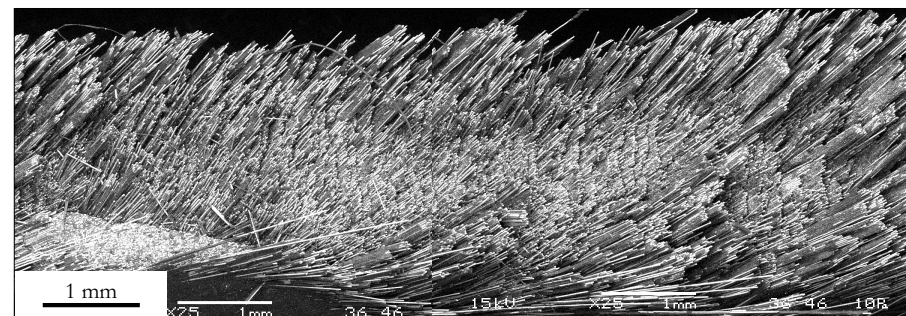
(a) avance 0,03 mm.dent⁻¹, vitesse d'avance 400 mm.min⁻¹(b) avance 0,07 mm.dent⁻¹, vitesse d'avance 5800 mm.min⁻¹(c) avance 0,1 mm.dent⁻¹, vitesse d'avance 2500 mm.min⁻¹(d) avance 0,15 mm.dent⁻¹, vitesse d'avance 11000 mm.min⁻¹

Figure 3.37 – Observations microscopiques des surfaces usinées, 1^{ère} série d'éprouvettes hors-axes, orientation fibres +45°c, composite C4.

arrachés irrégulièrement du matériau pendant l'action de coupe. Dans cette configuration, la vitesse relative de l'arête de coupe par rapport aux fibres tend à les soulever avant de les sectionner (cf. figure 3.38). Il se crée, à l'instar du modèle de formation du copeau développé par Wang et al. [51] et Arola et al. [17] (cf. figure 1.9 page 15), une 1^{ère} fissure qui pénètre plus ou moins loin le long des interfaces fibres/matrice pendant la formation du copeau. Les figures 3.36 montrent des endommagements, pour cette orientation des fibres de $+15^\circ$, croissants avec l'avance par dent. Rappelons que l'avance par dent correspond à l'épaisseur de la section de matériau composite coupé au niveau de l'axe de l'outil et dans la direction de la vitesse d'avance (cf. figure 1.2 page 3). C'est donc l'indicateur de l'épaisseur moyenne de la section coupée dans le cas général (f_z grand correspond à une épaisseur coupée importante). La 1^{ère} fissure indiquée précédemment pénétrera d'autant plus loin dans la matière usinée que l'épaisseur du copeau en formation sera grande.

Dans le cas d'une orientation de fibre de $+45^\circ$ (cf. figures 3.1 et 3.2 pages 60 et 61), les endommagements se présentent sous des formes différentes. À faible valeur de l'avance par dent ($f_z = 0,03 \text{ mm.dent}^{-1}$), la surface présente de très nombreux arrachements. Mais dès que l'avance prend des valeurs supérieures, la structure surfacique prend l'aspect de nombreuses zones de fibres mal coupées en surépaisseur. La formation du copeau dans cette configuration de $+45^\circ$ n'est pas identique à celle dans la configuration de $+15^\circ$. L'inclinaison plus importante des fibres par rapport à l'action de l'arête de coupe ($+45^\circ$ par rapport à $+15^\circ$) semble limiter la formation de fissures aux interfaces fibres/matrice.

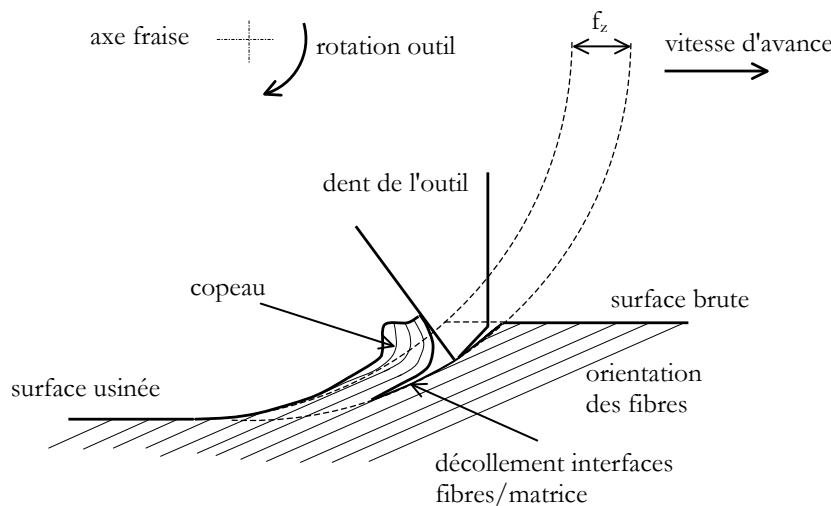


Figure 3.38 – Action de la dent de l'outil dans les configurations $+\theta^\circ$

Il faut noter également des différences entre les résultats des mesures de rugosité et les observations visuelles des surfaces. La rugosité R_a des surfaces dans la configuration $+15^\circ\text{c}$ (cf. figure 3.32) ne semble pas suivre la détérioration progressive constatée dans les observations visuelles (cf. figure 3.36). Mais le calcul du critère de rugosité R_a (norme ISO 12085 [11]) et R (norme ISO 11562 [10]) ne tient compte que des irrégularités de faibles pas d'un profil de la surface palpée. Certains défauts constatés lors des observations visuelles des surfaces usinées ne sont pas pris en compte dans les calculs des critères de rugosité. Les évolutions des mesures d'état de surface peuvent donc être différents des observations visuelles.

3.4 Conclusion

Les usinages réalisés pour la fabrication des éprouvettes Iosipescu comme pour les éprouvettes de traction hors-axes conduisent aux mêmes constatations :

- la configuration d'usinage (angle d'orientation des fibres et mode d'action de l'outil -usinage en concordance ou en opposition-) est un paramètre majeur sur le niveau d'endommagement créé par la coupe. La rugosité de la surface usinée est dans tous les cas médiocre pour des orientations positives des fibres, comparée aux orientations négatives ;
- l'acuité de l'arête de coupe est un paramètre important. L'usure rapide de l'arête de coupe des outils CW augmente significativement la rugosité de la surface usinée. Une bonne acuité d'arête (outil PCD) sectionne les fibres au plus près de la surface usinée théorique. Une acuité d'arête médiocre (outil CW usé) laisse des fibres à nu dépasser de la surface usinée ;
- l'avance par dent en fraisage (directement liée à l'épaisseur moyenne de la section coupée par l'arête de coupe) influe sur le niveau d'endommagement de la surface dans les configurations $+\theta^\circ\text{c}$ et $-\theta^\circ\text{o}$;
- les critères de rugosité habituels (R_a , R) ne corrèlent pas toujours avec les aspects géométriques des surfaces usinées. Les dimensions des endommagements, leur répartition sur la surface peuvent ne pas être pris en compte dans les mesures de la rugosité.

Les contrôles visuels des surfaces usinées préconisés dans les normes ne permettent pas de quantifier pleinement et de manière fiable les niveaux d'endommagement, notamment ceux en sub-surface soupçonnés lors de la formation du copeau.

En conclusion, la quantification des endommagements est délicate avec les procédures

habituelles. Des travaux complémentaires sont nécessaires, d'abord pour vérifier leurs impacts sur le comportement mécanique des éprouvettes, puis pour déterminer quelles caractéristiques de ces endommagements sont influentes, notamment par des analyses des sous-couches de la surface usinée.

Chapitre 4

Essais mécaniques : résultats expérimentaux

4.1 Essais de cisaillement Iosipescu

4.1.1 Éprouvettes carbone/époxy (Composite C1)

Les conditions de préparation des éprouvettes sont indiquées dans le tableau 2.2 (page 45). Les conditions d'essai sont celles du laboratoire, c'est à dire une température ambiante d'environ 21°C et une humidité relative d'environ 50%.

Les résultats des essais mécaniques sont donnés dans le tableau 4.1. L'évolution de la contrainte à rupture en fonction de la vitesse de coupe des éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy est reportée sur la figure 4.1. Il semble que la vitesse de coupe a une influence significative sur le comportement en cisaillement et en traction transverse du composite carbone/époxy. En effet, une chute de cette contrainte moyenne d'environ 25 % est observée quand la vitesse de coupe augmente de 31 m.min⁻¹ à 126 m.min⁻¹. Au-delà de 126 m.min⁻¹, l'influence de la vitesse de coupe n'est plus significative et ce pour des vitesses jusqu'à 251 m.min⁻¹. Néanmoins, le faible nombre d'éprouvette testées ne permet pas de dégager des résultats significatifs. Des analyses statistiques devront être utilisées à l'avenir. Dans cette campagne d'essais, une avance constante à la dent de l'outil de 0,01mm.dent⁻¹.tr⁻¹ a été programmée. Il faut souligner que la vitesse d'avance de la fraise dans la matière est fonction linéaire de la vitesse de rotation, donc de la vitesse

référence éprouvette	vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	comportement mécanique		
		contrainte d'apparition de la 1 ^{ère} fissure (MPa)	écarts par rapport à la moyenne (MPa)	
			inférieur	supérieur
CW1 à CW3	31	59,5	1,45	1,45
CW4 à CW6	63	54,9	0,48	0,32
CW7 à CW9	94	52,9	3,36	1,90
CW10 à CW12	126	48	5,31	6,58
CW13 à CW15	157	51,2	4,52	4,70
CW16 à CW18	188	42,5	2,19	1,57
CW19 à CW21	220	46,7	2,86	3,09
CW22 à CW24	251	47,3	2,52	2,52

Tableau 4.1 – Contrainte d'apparition de la 1^{ère} fissure pour les éprouvettes en carbone/époxy. Essai Iosipescu, composite C1.

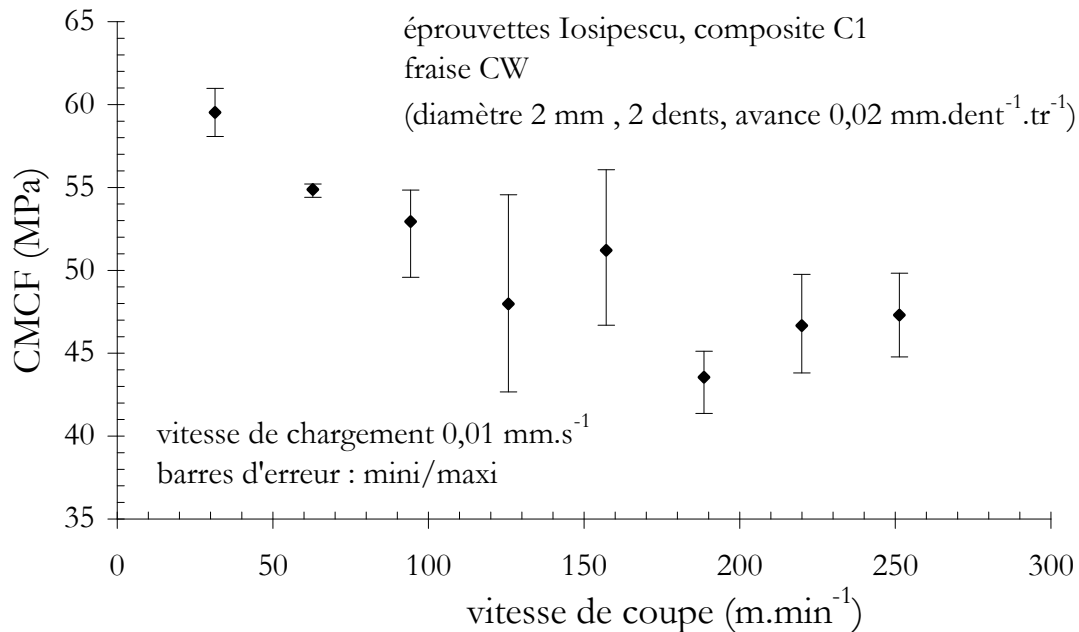


Figure 4.1 – Contrainte moyenne d'apparition de la 1^{ère} fissure en fonction de la vitesse de coupe. Éprouvettes Iosipescu carbone/époxy, composite C1.

de coupe (voir paragraphe 1.1.1). Par conséquent, les influences respectives de ces deux conditions de coupe sur le comportement mécanique de ce type d'éprouvette ne peuvent être séparées.

L'étude bibliographique a souligné le risque d'usure d'outil en CW [44, 5]. La figure 4.2 permet de constater ce phénomène. La contrainte moyenne de cisaillement à l'apparition de la première fissure (CMCF) n'est pas influencée par la longueur usinée par l'outil, donc par le niveau d'usure des arêtes de coupe (dans la limite de la campagne d'essais). La vitesse de coupe et la vitesse d'avance en fraisage par détournage de composite en carbone/époxy unidirectionnel ont bien une influence significative sur le comportement mécanique en cisaillement intralaminare .

La figure 4.3 confirme également la non-influence de la rugosité de surface sur les performances mécaniques des éprouvettes. L'usure de l'arête de coupe est fonction croissante de la longueur usinée. L'acuité de l'arête de coupe s'émousse progressivement et par là même sa capacité à sectionner par cisaillement les fibres. L'état de surface tend alors à se détériorer. Mais la figure 4.3 semble démontrer que cette capacité de cisaillement progressivement détériorée n'a pas d'influence sur le comportement mécanique des éprouvettes

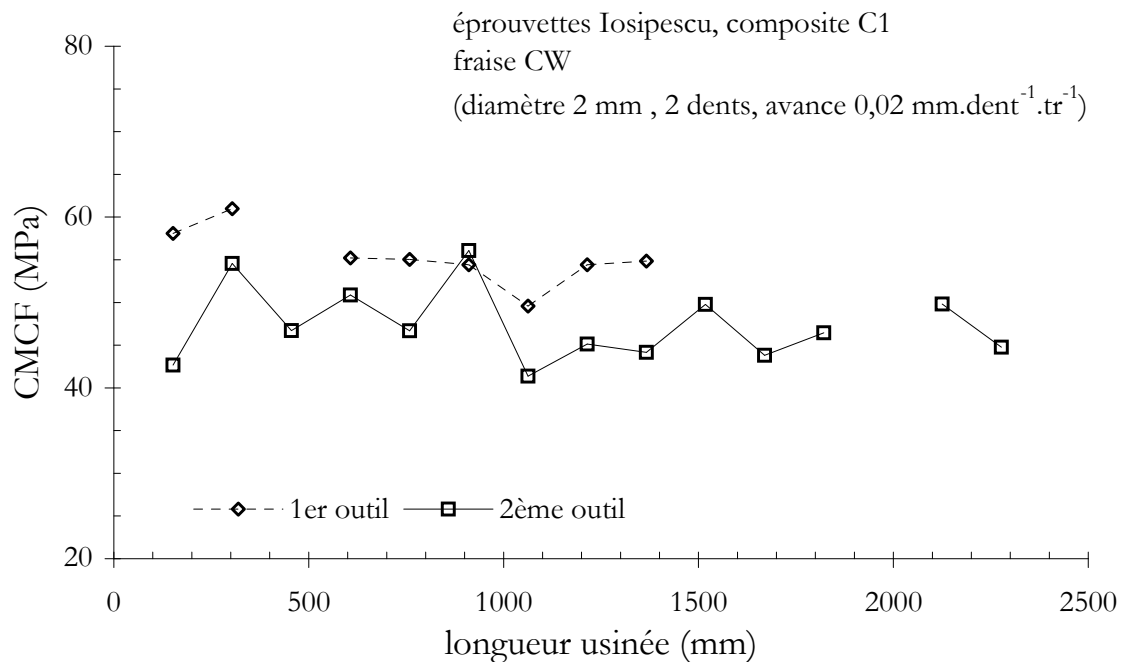


Figure 4.2 – Contrainte moyenne d'apparition de la 1^{ère} fissure en fonction de la longueur usinée par l'outil- éprouvettes Iosipescu carbone/époxy. Composite C1.

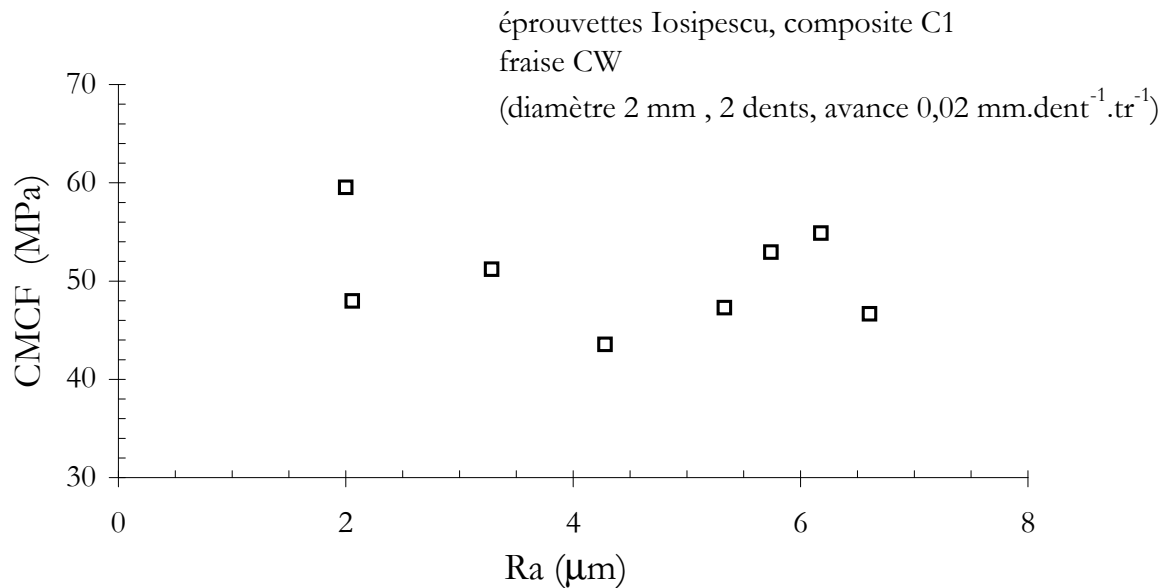


Figure 4.3 – Contrainte moyenne d'apparition de la 1^{ère} fissure en fonction de la rugosité des surfaces usinées - épreuves Iosipescu carbone/époxy.

usinées (tout au moins dans le domaine de couple outil/matière étudié). Pour le moment, le mode de rupture des fibres n'a apparemment qu'une influence restreinte sur les performances mécaniques des pièces usinées. Les dégradations de ces performances constatées dans la figure 4.1 sont pour l'instant d'une origine encore à déterminer, en tout cas non visibles par l'analyse des paramètres de rugosité habituels (paramètres R_a et R).

4.1.2 Épreuves verre/époxy (Composite C3)

Les résultats des neuf séries d'épreuves usinées sont reportés dans le tableau 4.2. Pour chaque série, (composée de 14 épreuves sauf les séries H et M de 5 épreuves chacune), les comparaisons des comportements mécaniques en cisaillement Iosipescu vont être effectués à partir des moyennes et des écart-types des résultats. Cela suppose qu'ils suivent, pour chaque série, une distribution normale, hypothèse qu'il est indispensable de vérifier. Pour cela, un test de normalité a été réalisé (test de Shapiro Wilk, [8, 35]) afin d'évaluer la normalité des populations de résultats d'essais mécaniques. Le paramètre de comparaison, W , est le rapport entre deux estimations de la variance à partir des effectifs de chaque population. La distribution sera considérée suivant une loi normale si W est supérieur à $W_{5\%}$ (risque de 5% de rejeter une hypothèse vraie) et à $W_{1\%}$ (risque de 1%).

référence éprouvette	conditions de coupe		comportement mécanique	
	avance (mm.dent ⁻¹ .tr ⁻¹)	vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	contrainte moyenne d'apparition de la 1 ^{ère} fissure (MPa)	
			moyenne	Cv (%)
A ₁ à A ₁₄	0,01	63	51,2	15
B ₁ à B ₁₄	0,01	126	57,7	12
C ₁ à C ₁₄	0,01	189	60,9	7
D ₁ à D ₁₄	0,01	251	58,6	10
E ₁ à E ₁₄	0,02	63	55,4	12
F ₁ à F ₁₄	0,02	126	51,9	12
G ₁ à G ₁₄	0,02	188	53,5	16
H ₁ à H ₅	0,02	251	57	5
M ₁ à M ₅	0,1 mm.tr ⁻¹	47	57,1	12
M ₆ à M ₁₀	0,1 mm.tr ⁻¹	647	51,5	6

Tableau 4.2 – Contrainte à rupture de la 1^{ère} fissure de pour les éprouvettes en verre/époxy. Essai Iosipescu, composite C3.

Les résultats sont reportés dans le tableau 4.3. Ces résultats indiquent (avec un risque de 1%) que les distributions suivent toutes une loi normale. On pourra donc les caractériser à leur 2 paramètres : moyenne et écart-type.

Comme dans l'étude précédente avec le composite carbone/époxy, et afin de limiter l'influence de l'usure des outils, une fraise neuve à été utilisée pour chacune des séries d'éprouvettes Iosipescu en verre/époxy, soit 8 fraises (pour les séries A à H), référence JH 40-HEMI à deux dents de diamètre 2 mm en carbure de tungstène micrograin K10 de la société JABRO TOOLS. La confirmation de la maîtrise d'usure des outils est donné en figure 4.4. En considérant que la longueur usinée par chaque outil est en relation directe avec l'usure des arêtes de coupe, elle n'a pas (dans la limite de notre étude) d'influence sur la contrainte à l'apparition de la première fissure (CMCF).

Les résultats du tableau 4.2 sont mis sous forme graphique pour une première analyse : CMCF en fonction de la vitesse de coupe (figure 4.5(a)), et CMCF en fonction de la vitesse d'avance (figure 4.5(b)). Ainsi et en tenant compte des dispersions, aucune différence significative ne peut être tirée des résultats des essais mécaniques. Il semble donc, pour ce matériau composite, que ni le mode d'usinage (fraisage de profil ou meulage des entailles),

série éprouvettes	W	W _{5%}	W _{1%}
A	0,885	0,866	0,814
B	0,958	0,874	0,825
C	0,970	0,875	0,825
D	0,940	0,874	0,825
E	0,956	0,874	0,825
F	0,959	0,874	0,825
G	0,933	0,874	0,825
H	0,910	0,762	0,686
M ₁ à M ₅	0,877	0,762	0,686
M ₆ à M ₁₀	0,955	0,762	0,686

Tableau 4.3 – Étude de la normalité des distributions des contraintes à l'apparition de la 1^{ère} fissure - éprouvettes Iosipescu verre/époxy, composite C3.

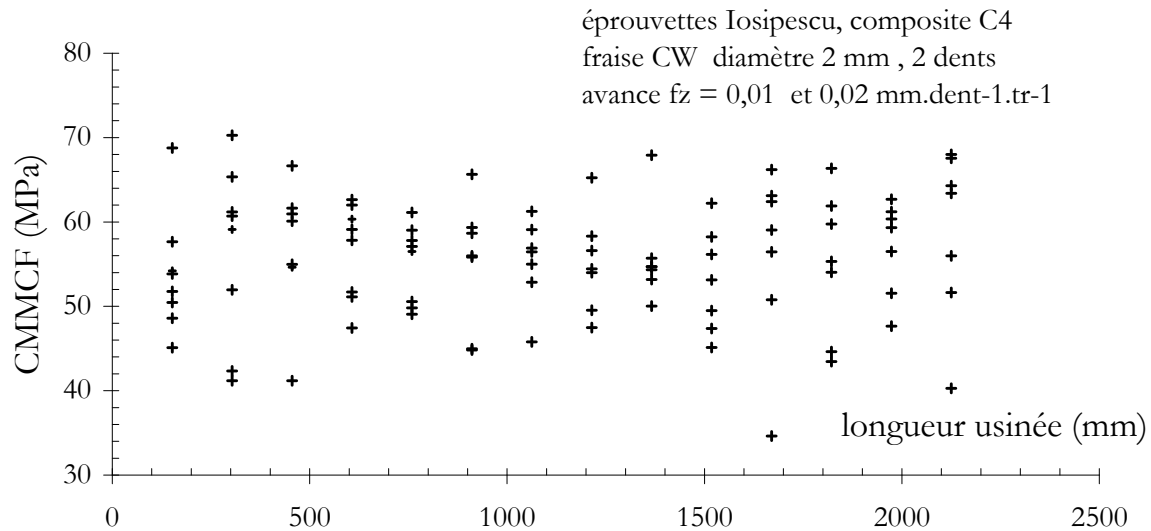
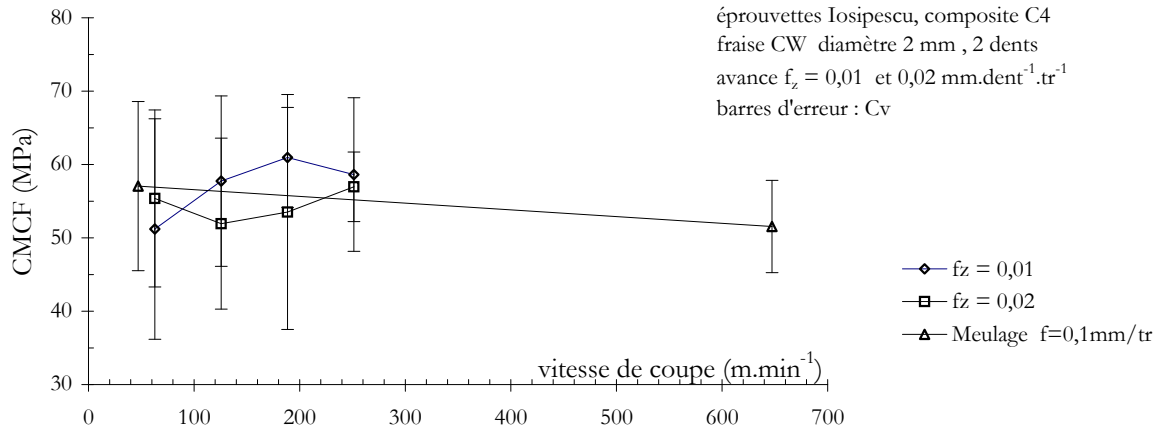
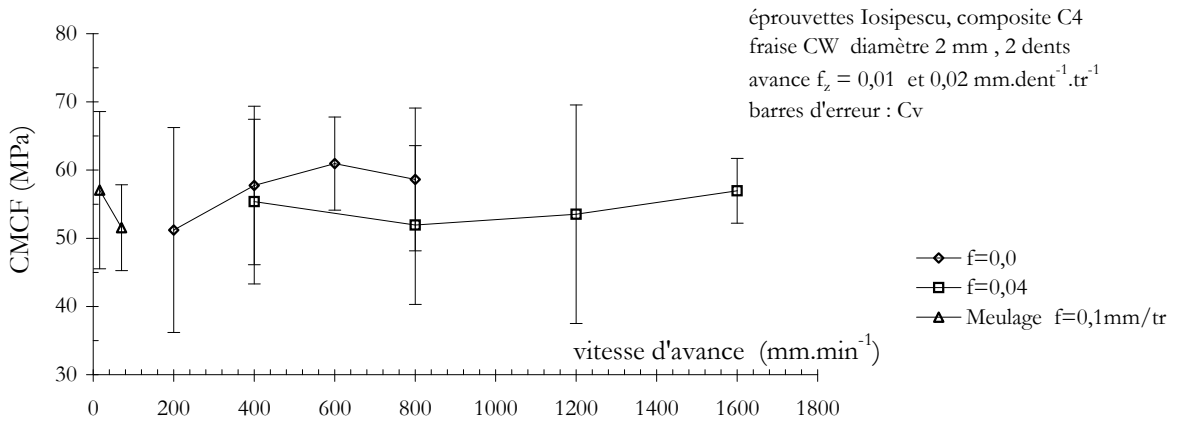


Figure 4.4 – Contrainte d'apparition de la 1^{ère} fissure en fonction des longueurs usinées par outil. Éprouvettes Iosipescu en verre/époxy, composite C3



(a) CMCF fonction de la vitesse de coupe



(b) CMCF fonction de la vitesse d'avance

Figure 4.5 – Moyenne des contraintes d'apparition de la 1^{ère} fissure de cisaillement (CMCF). Essai Iosipescu, composite C3.

ni les conditions de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance) ne soient des paramètres influents sur son comportement mécanique en cisaillement. Il est néanmoins important de noter que les dispersions observées sur la valeur de la contrainte à rupture sont beaucoup plus importantes ici que pour les éprouvettes Iosipescu en carbone/époxy. Ceci peut être dû à la plus grande ductilité du verre/époxy mais aussi éventuellement à des défauts de fabrication (porosités, ...) plus critiques. L'investigation sur le matériau composite en verre/époxy a donc été poussée. L'analyse du taux volumique de fibres des éprouvettes a

été réalisée par calcination (norme NFT 57-102 [7]). Les résultats sont donnés dans la figure 4.6. Le constat montre une très grande dispersion du taux volumique de fibre, de 39% à 57%, sur les 5 mesures réalisées par série d'éprouvettes. Ainsi, les résultats précédents du comportement mécanique en cisaillement des éprouvettes Iosipescu en verre/époxy ne peuvent être correctement interprétés. La grande dispersion des taux volumiques de fibres masque les possibles influences des endommagements dues aux conditions de coupe dans cette campagne d'essais. Cette campagne d'essais perturbée par la mauvaise maîtrise du cycle de fabrication du matériau composite a conduit à réétudier un moule de fabrication de plaques sur la presse à plateaux chauffants du laboratoire.

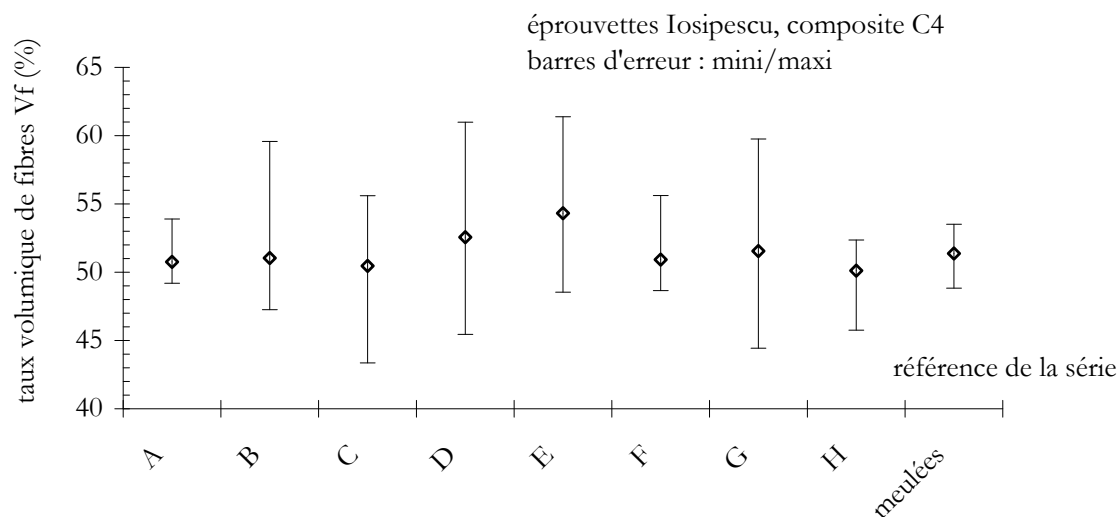


Figure 4.6 – Taux volumique de fibre des éprouvettes Iosipescu en verre/époxy. Composite C3. Barres d'erreur mini/maxi.

4.2 Essais de traction sur anneaux (Composite C2)

Comme prévu, les essais mécaniques sur anneaux ont montré que toutes les éprouvettes subissent une rupture fragile par délaminage. Cette macro-fissure se crée à 90° par rapport à l'axe de traction et se propage ensuite dans la direction orthoradiale.

Afin de traiter les résultats de chaque série par leur moyenne et écart-type, il importe auparavant de vérifier qu'ils respectent le test de normalité de Shapiro-Wilk [8, 35]. Cette vérification donne les résultats indiqués dans le tableau 4.4. Toutes les distributions des

résultats d'essais suivent une loi normale à l'exception des séries 4 et 9. Néanmoins, en analysant mieux les résultats de la série 9 défaillante, une valeur est nettement inférieure aux autres. En ne tenant pas compte de cette valeur, le test de normalité devient positif ($W = 0,984$, $W_{5\%} = 0,687$ et $W_{1\%} = 0,748$). La série n°9 sera donc analysée à partir de ses 4 résultats conservés. Par contre, la série n°4 pose plus de problème. Trois résultats d'effort de traction à rupture sont à 4,73 kN, un à 4,74 kN et le cinquième à 4,61 kN. Le test de Shapiro-Wilk ne permet pas d'accepter cette distribution des résultats comme distribution normale, même en ne tenant pas compte des résultats extrêmes. Pour cette raison, les analyses qui suivent ne tiendront pas compte de cette série n°4.

Les résultats expérimentaux sont donnés dans le tableau 4.5. Ces résultats portés sur la figure 4.7 permettent de distinguer trois familles de comportement des éprouvettes, confirmés par le test statistique d'Aspin Welch (norme NF-X-06-065 [6], cf. tableau 4.6) permettant la comparaison de deux moyennes dans le cas de distributions avec écart-types inconnus et inégaux. De ce test émergent trois comportements significativement différents, à des performances mécaniques décroissantes de traction à la rupture :

- séries n°s 1, 2 et 3 (mode d'usinage en roulant) ;
- séries n°s 5, 6, 7, 8, 9 (mode d'usinage en bout) et 11 (tronçonnage au disque diamanté) ;
- série n° 10 (mode d'usinage en bout, outil revêtu diamant, grande vitesse de coupe).

n° de la série d'éprouvette	W	$W_{1\%}$	$W_{5\%}$
1	0,841	0,686	0,762
2	0,899	0,686	0,762
3	0,899	0,686	0,762
4	0,631	0,686	0,762
5	0,827	0,686	0,762
6	0,886	0,686	0,762
7	0,864	0,686	0,762
8	0,975	0,686	0,762
9	0,607	0,686	0,762
10	0,795	0,686	0,762
11	0,941	0,686	0,762

Tableau 4.4 – *Résultats des tests de normalité des essais de traction des éprouvettes anneaux. Composite C2.*

n° de la série	effort de traction à la 1 ^{ère} fissure (kN)			
	moyenne	minimum	maximum	écart- type
1	4,61	4,57	4,61	0,05
2	4,63	4,55	4,67	0,08
3	4,71	4,52	4,84	0,14
4	distribution non normale			
5	4,52	4,45	4,57	0,05
6	4,45	4,37	4,51	0,08
7	4,51	4,38	4,59	0,08
8	4,49	4,37	4,59	0,08
9	4,50	4,48	4,52	0,02
10	4,25	4,06	4,34	0,11
11	4,46	4,38	4,51	0,06

Tableau 4.5 – Moyennes des efforts de traction à rupture (en kN) supportés par chacune des séries d’éprouvettes anneaux en verre/époxy. Composite C2.

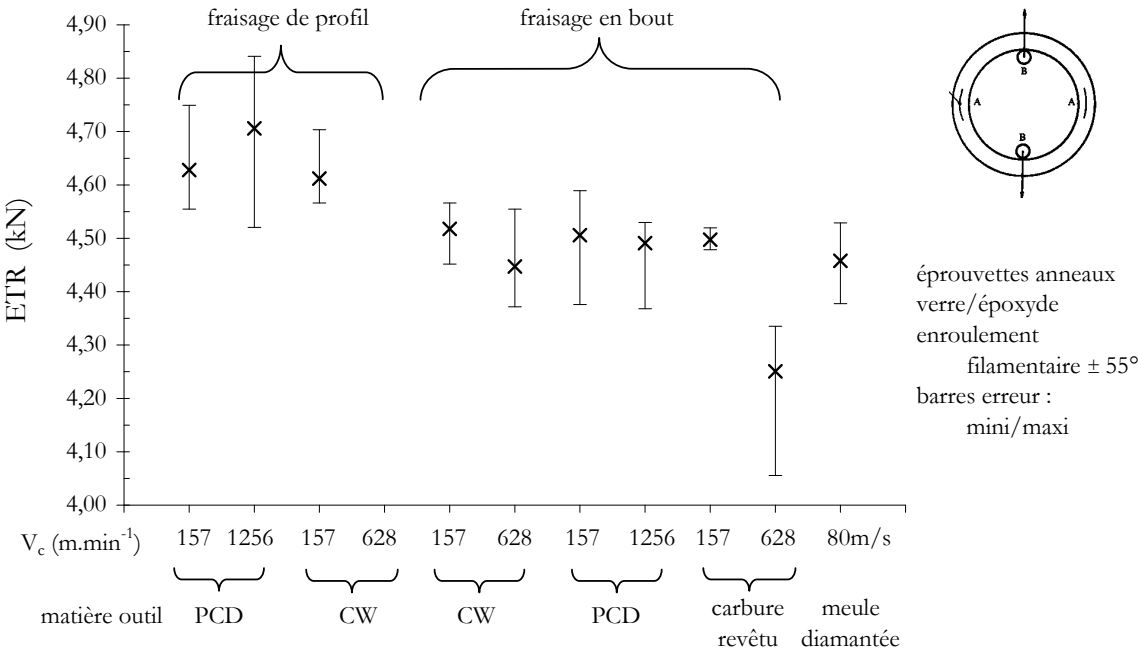


Figure 4.7 – Moyenne des efforts de traction à rupture des éprouvettes anneaux en verre/époxy. Composite C2

$n^{\circ} \text{ série}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		$\equiv$	$\equiv$		$\neq$	$\neq$	$\approx$	$\approx$	$\neq$	$\neq$	$\neq$
2			$\equiv$		$\approx$	$\neq$	$\approx$	$\approx$	$\approx$	$\neq$	$\neq$
3					$\approx$	$\neq$	$\approx$	$\approx$	$\approx$	$\neq$	$\neq$
4											
5						$\equiv$	$\equiv$	$\equiv$	$\equiv$	$\neq$	$\equiv$
6							$\equiv$	$\equiv$	$\equiv$	$\neq$	$\equiv$
7								$\equiv$	$\equiv$	$\neq$	$\equiv$
8									$\equiv$	$\neq$	$\equiv$
9										$\neq$	$\equiv$
10											$\neq$

Tableau 4.6 – *Test d'Aspin-Welch (norme NF-X-06-065 [6]) sur les distributions des résultats mécaniques des éprouvettes anneaux. Composite C2.*

Le recoupement de ces comportements avec le tableau 2.4 montre que le fraisage en bout et le tronçonnage réduisent la tenue mécanique des éprouvettes d'environ 4 % par rapport au fraisage en roulant. Cette réduction passe à 9% lorsque le fraisage en bout s'effectue à grande vitesse de coupe avec des fraises en carbure revêtu. Ce résultat a été confirmé par l'observation des arêtes de coupe de ce type de fraise. Il a montré des endommagements importants du revêtement sous forme d'écaillage. La mauvaise tenue du revêtement (écaillage) n'a d'ailleurs pas permis de procéder à des essais en fraisage de profil avec ce type de fraise.

Les mêmes différences se retrouvent entre le fraisage de profil et le fraisage en bout. La série d'éprouvettes réalisées par tronçonnage a volontairement été écartées pour ne comparer que les deux modes de fraisage. Hormis la série n°10 (Vitesse de coupe = 628 m.min⁻¹, ETR = 4,20 kN) fraisée par l'outil revêtu diamant pour laquelle des problèmes de tenue de revêtement ont été rencontrés, la vitesse de coupe pour les deux modes de fraisage n'a pas d'influence significative. De plus, les comportements mécaniques ne sont pas affectés par la nature du matériau d'outil (carbure de tungstène ou diamant polycristallin). Il faut néanmoins rappeler, notamment pour les fraises en carbure de tungstène, que les niveaux d'usure des outils ont toujours été maintenus négligeables.

Il faut noter également que les éprouvettes réalisées par meulage ne mènent pas à des résultats mécaniques supérieurs aux autres. L'aspect de la surface meulée est pourtant exempt de tout endommagement. En comparant avec les éprouvettes fraisées en bout,

pour lesquelles des délaminages spectaculaires ont été observés, on peut conclure que l'aspect "visuel" utilisé comme critère et recommandé dans les normes n'est pas déterminant. La localisation et l'étendue de l'endommagement doivent être considérées en tenant compte du type d'essai auquel l'éprouvette est soumise.

4.3 Essais de traction hors-axes (Composite C4)

4.3.1 1^{ère} campagne d'essais

Afin de traiter statistiquement les résultats, le test de normalité de Shapiro-Wilk [8, 35] a été appliqué à chacune des séries de 5 éprouvettes testées. Chaque réponse positive à ce test permettra de traiter les séries par leurs moyennes et écarts-type. Les résultats de ces traitements statistiques sont indiqués dans le tableau 4.7. La distribution ne sera pas considérée comme normale en tenant compte des 5 résultats mécaniques de la série d'éprouvettes de traction si $W < 0,762$. Cette limite de W induit un risque de 5% de refuser l'hypothèse de la normalité alors qu'elle est exacte. Dans le cas contraire, le test de Dixon [35] permettra de trouver d'éventuelles valeurs aberrantes de la série. Un nouveau calcul de W avec les 4 résultats restants (W qui devra être supérieur à 0,748 dans ce cas) validera ou non l'hypothèse de normalité. Dans le cas d'une nouvelle invalidation du test de Shapiro-Wilk, des éprouvettes seront refaites pour ne pas traiter les résultats à partir de trop peu de valeurs. Les résultats des performances mécaniques sont visualisés dans les figures 4.8.

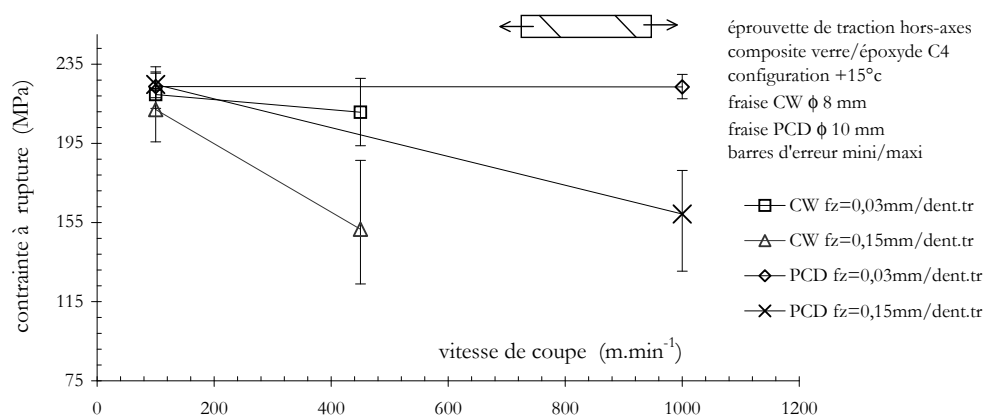
Les performances mécaniques des différentes séries d'éprouvettes hors-axes sont influencées différemment suivant l'orientation des fibres. Dans le cas des fibres orientées à $+15^\circ$, la vitesse de coupe a une influence négative sur la résistance mécanique du composite lorsqu'elle est accompagnée d'une grande vitesse d'avance. La réduction de la résistance dans les cas d'une avance de $0,15 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ est de 28% pour les éprouvettes usinées avec un outil en carbure de tungstène quand la vitesse de coupe passe de 100 à 450 m.min^{-1} . De même, la chute de résistance est de 29% pour les éprouvettes usinées avec un outil en diamant polycristallin quand la vitesse passe de 100 à 1000 m.min^{-1} .

Par contre, ce phénomène n'est plus constaté de manière significative dans le cas des fibres orientées à $+30^\circ$. Mais les dispersions des résultats des essais de traction sont plus importantes et ne permettent pas par conséquent de conclure.

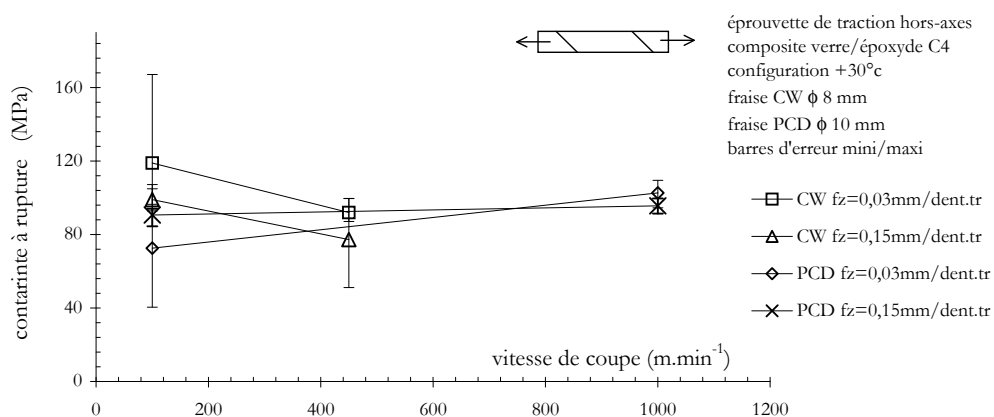
Enfin, dans le cas d'une orientation des fibres à $+45^\circ$, le phénomène constaté pour les

orientation des fibres	conditions de coupe			test de normalité			résultats mécaniques	
	matière outil	vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	avance par dent (mm.dent ⁻¹ .tr ⁻¹)	W	W _{5%}	W _{1%}	moyenne (MPa)	Cv (%)
+15°c	PCD	100	0,03	0,891	0,762	0,686	224	3
			0,15	0,963	0,762	0,686	225	4
		1000	0,03	0,956	0,762	0,686	224	2
			0,15	0,945	0,762	0,686	160	12
	CW	100	0,03	0,901	0,748	0,687	220	1
			0,15	0,981	0,762	0,686	212	6
		450	0,03	0,995	0,762	0,686	211	6
			0,15	0,962	0,767	0,753	152	21
+30°c	PCD	100	0,03	0,942	0,762	0,686	72,6	38
			0,15	0,839	0,762	0,686	90,6	5
		1000	0,03	0,951	0,748	0,687	103	7
			0,15	0,984	0,762	0,686	95,6	3
	CW	100	0,03	0,795	0,762	0,686	119	23
			0,15	0,970	0,748	0,687	99	5
		450	0,03	0,927	0,762	0,686	92	5
			0,15	0,875	0,762	0,686	77,3	29
+45°c	PCD	100	0,03	0,932	0,762	0,686	32,1	11
			0,15	0,899	0,762	0,686	59,9	8
		1000	0,03	0,907	0,762	0,686	43,9	12
			0,15	0,879	0,762	0,686	46,5	20
	CW	100	0,03	0,791	0,748	0,687	42,5	13
			0,450	0,942	0,762	0,686	61,8	3
		4500	0,03	0,952	0,762	0,686	53,4	8
			0,15	0,807	0,762	0,686	52,7	11

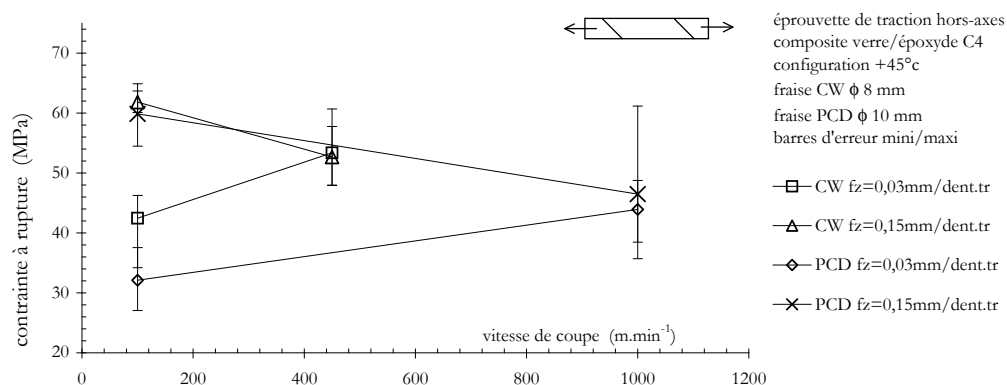
Tableau 4.7 – Résultats des tests de normalité de la 1^{ère} campagne d'essais de traction hors-axes.
Composite C4



(a) configuration +15°C



(b) configuration +30°C



(c) configuration +45°C

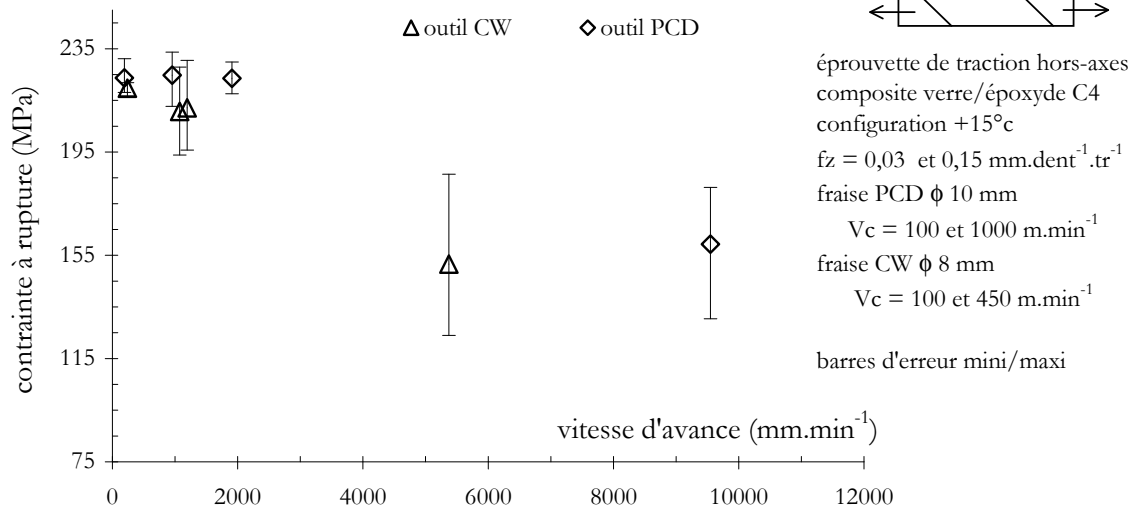
Figure 4.8 – Contrainte à rupture des éprouvettes de traction hors-axes en fonction de la vitesse de coupe. 1^{ère} campagne d'essais. Composite C4

fibres à $+15^{\circ}\text{c}$ s'inverse et se complique. Une faible avance par dent dégrade la résistance mécanique du matériau. La réduction, à la vitesse de coupe de 100 m.min^{-1} , est de 32% dans le cas d'un usinage avec l'outil en carbure de tungstène et de 46% avec l'outil en diamant polycristallin. Par contre, l'augmentation de la vitesse de coupe gomme les écarts constatés aux basses vitesses. Les résistances mécaniques des éprouvettes atteignent un niveau médian de ceux constatés aux basses vitesses, aussi bien avec l'outil en carbure de tungstène qu'avec celui en diamant polycristallin. Afin de valider ces différences de comportements mécaniques, le test d'Aspin-Welch et de Student (norme NF-X-06-065 [6]) a été pratiqué sur certaines séries présentant des écarts importants de leur moyenne. Les résultats de ce test sont indiqués dans le tableau 4.8. Ce test confirme que les distributions des résultats mécaniques de ces séries sont bien différentes avec au plus 5% de risque de se tromper.

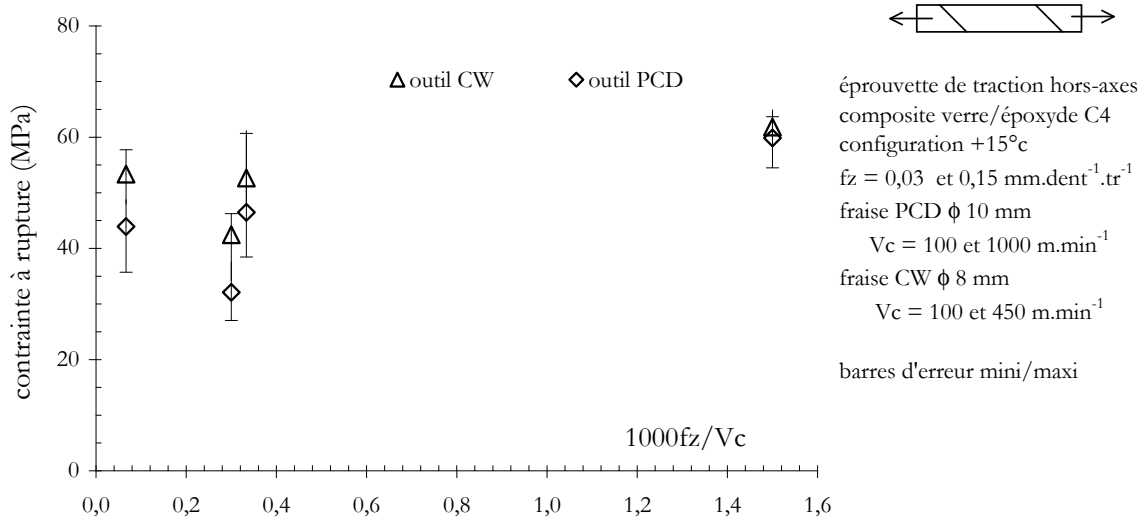
L'analyse de ces résultats pour la configuration $+15^{\circ}\text{c}$ en fonction de la vitesse d'avance et pour la configuration $+45^{\circ}\text{c}$ en fonction du critère f_z/V_c (cf. figure 4.9) précise encore les comportements différents en fonction des orientations des fibres. L'influence de la vitesse d'avance est significative avec une orientation de fibres de $+15^{\circ}\text{c}$. Il existe une similitude des comportements et des performances mécaniques des éprouvettes pour les deux types d'outils : une chute des performances mécaniques pour les grandes vitesses d'avance. Ces similitudes laissent supposer des modes d'action identiques des arêtes de coupe des deux types d'outils. Pour la configuration à $+45^{\circ}\text{c}$, c'est le critère f_z/V_c qui semble distinguer les distributions des résultats mécaniques. Les performances mécaniques des deux séries d'éprouvettes usinées par le deux types d'outil convergent lorsque le critère f_z/V_c augmente. Ces deux paramètres influents (vitesse d'avance pour la configuration $+15^{\circ}\text{c}$ et f_z/V_c pour celle de $+45^{\circ}\text{c}$) laissent supposer des mécanismes de formation du copeau différents pour ces deux orientations des fibres.

orientation des fibres	série	contrainte à rupture (MPa)	test de Student			conclusion
			critère	t _{5%}	t _{1%}	
+15°C	outil CW (Vc = 450 m.min ⁻¹ f _z = 0,03 mm.dent ⁻¹ .tr ⁻¹)	211	3,08	2,92	6,97	séries probablement différentes (risque de 5%)
	outil CW (Vc = 450 m.min ⁻¹ f _z = 0,15 mm.dent ⁻¹ /tr ⁻¹)	152				
	outil PCD (Vc = 1000 m.min ⁻¹ f _z = 0,03 mm.dent ⁻¹ /tr ⁻¹)	223,5	7,47	2,02	3,37	séries certainement différentes (risque de 1%)
	outil PCD (Vc = 1000 m.min ⁻¹ f _z = 0,15 mm.dent ⁻¹ /tr ⁻¹)	159,3				
+45°C	outil CW (Vc = 100 m.min ⁻¹ f _z = 0,15 mm.dent ⁻¹ /tr ⁻¹)	61,8	6,70	2,35	4,54	séries certainement différentes (risque de 1%)
	outil CW (Vc = 100 m.min ⁻¹ f _z = 0,03 mm.dent ⁻¹ /tr ⁻¹)	42,5				
	outil PCD (Vc = 100 m.min ⁻¹ f _z = 0,15 mm.dent ⁻¹ /tr ⁻¹)	59,9	10,53	1,86	2,90	séries certainement différentes (risque de 1%)
	outil PCD Vc (Vc = 100 m.min ⁻¹ f _z = 0,03 mm.dent ⁻¹ /tr ⁻¹)	32,1				

Tableau 4.8 – *Test d'Aspin-Welch sur les séries d'éprouvettes de traction hors-axes présentant les plus grands écarts. 1^{ère} campagne d'essais, composite C4.*



(a) orientation fibres 15°



(b) orientation fibres 45°

Figure 4.9 – *Contrainte à rupture des éprouvettes de traction hors-axes. 1^{ère} campagne d'essais. Composite C4*

4.3.2 Seconde campagne d'essais

Cette seconde campagne d'essais se compose de 4 séries de 80 éprouvettes chacune (voir paragraphe 2.3.4). Le test de normalité de shapiro-Wilk [8, 35] a été appliqué à chacune des séries. L'acceptation à ce test permettra de traiter les séries par leurs moyennes et écart-types. Si nécessaire, le test de Dixon [35] permet d'éliminer la ou les valeurs aberrantes de la série. Les résultats traités statistiquement sont donnés dans le tableau 4.9. Comme cela a déjà été souligné au paragraphe 3.3, la fabrication des éprouvettes de la série avec une orientation des fibres de -15° n'a pu être réalisée. Les endommagements très sévères induits par la coupe dans cette configuration conduisaient à leur destruction complète au cours de l'usinage. La décision a été prise, pour ces cas particuliers, d'usiner des éprouvettes de traction hors-axes (dans le même composite C4) avec des conditions de coupe moins sévères. Les résultats mécaniques de ces éprouvettes sont données dans le tableau 4.10. Les performances mécaniques des 4 séries sont visualisées :

- en fonction de la vitesse de coupe V_c (figure 4.10) ;
- en fonction de l'avance par dent f_z (figure 4.11).

La série -15° a un comportement particulier. L'avance par dent de la fraise dans la matière semble le critère caractéristique de la chute des caractéristiques mécaniques. Pour des avances inférieures à $0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$, les contraintes à rupture sont du niveau des autres séries (environ 200 à 220 MPa). Elles tombent à 24 MPa pour une avance égale à $0,02 \text{ mm.min}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ associée à une grande vitesse de coupe. Il faut rappeler qu'il a été impossible de réaliser les éprouvettes dans les conditions de coupe initialement prévues pour cette série, conditions qui aboutissent à des avances par dent encore supérieures. Dans le cas d'une orientation de fibres de $+15^\circ$, les performances mécaniques sont plus faibles (moyenne de 196 MPa) que pour les séries avec une orientation des fibres de $+15^\circ$ (moyenne de 214 MPa) et -15° (moyenne de 218 MPa), sans pour autant que cette tendance soit significative.

Les séries avec des orientations de fibres de -45° , $+45^\circ$ et -45° ne semblent pas être influencées significativement par les conditions de coupe. Par contre, les performances mécaniques de la série $+45^\circ$ (moyenne 42,5 MPa) sont très nettement en dessous de celles des séries $+45^\circ$ (moyenne 67,7 MPa) et -45° (moyenne 71,2 MPa). Le comportement de la série -45° semble être influencé par l'avance f_z de l'outil (cf. figure 4.11). Des avances par dent jusqu'à $0,07 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ conduisent à des contraintes à rupture de l'ordre de 70 MPa. Mais elles chutent à 47,9 MPa pour une avance de $0,1 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ et à 40,8 MPa pour une avance de $0,15 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$.

orientation fibres	conditions de coupe		résultats mécaniques	
	vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	avance (mm.dent ⁻¹ .tr ⁻¹)	moyenne (MPa)	Cv (%)
+15°c	209	0,03	203	8
	393	0,1	193	10
	1301	0,07	204	11
	1153	0,15	182	13
+45°c	209	0,03	39,6	2,7
	393	0,1	49	2,6
	1301	0,07	45,2	11
	1153	0,15	36,1	19
+15°o	209	0,03	216	5
	393	0,1	210	7
	1301	0,07	215	6
	1153	0,15	213	8
+45°o	209	0,03	60,5	5,6
	393	0,1	65,5	8,8
	1301	0,07	66,2	9,3
	1153	0,15	66,8	12
-15°c	209	0,03	214	4
	393	0,1	216	7
	1301	0,07	228	4
	1153	0,15	215	4
-45°c	209	0,03	69,9	11,3
	393	0,1	72,2	5,8
	1301	0,07	74,6	10
	1153	0,15	68,2	5,4
-15°o	209	0,03	détériorées en cours d'usinage	
	393	0,1		
	1301	0,07		
	1153	0,15		
-45°o	209	0,03	71,0	4,5
	393	0,1	47,9	10,8
	1301	0,07	67,6	15,9
	1153	0,15	40,8	18,1

Tableau 4.9 – Résultats mécaniques de la seconde campagne d'essais de traction hors-axes. Composite C4.

orientation fibres	conditions de coupe		résultats mécaniques	
	vitesse de coupe (m.min ⁻¹)	avance (mm.dent ⁻¹ .tr ⁻¹)	moyenne (MPa)	Cv (%)
-15°o	209	0,01	220	3
	393	0,01	201	9
	1301	0,072	214	6
	1153	0,02	24	49

Tableau 4.10 – *Résultats mécaniques complémentaires à la seconde campagne d'essais de traction hors axes. Composite C4*

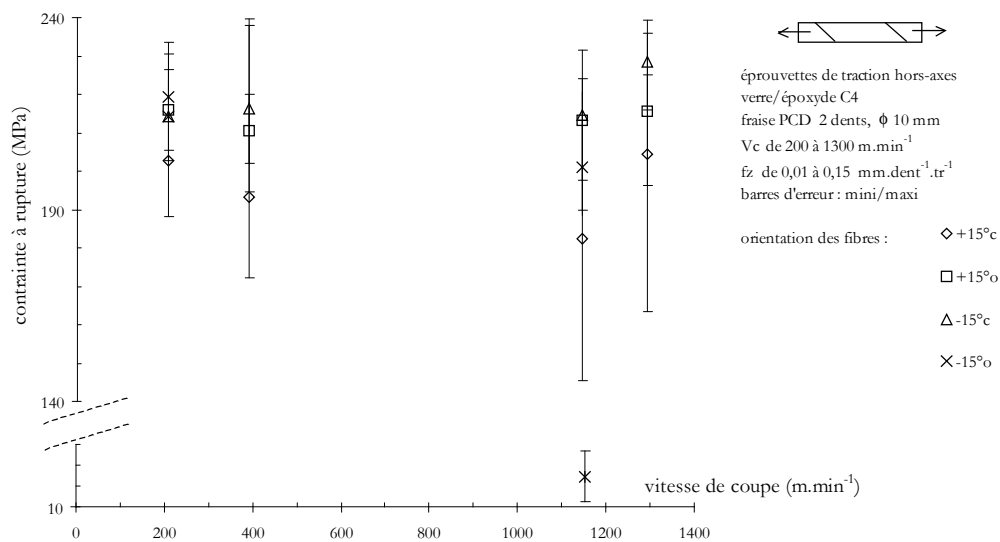


Figure 4.10 – *Contrainte à rupture des échantillons de traction hors-axes en fonction de la vitesse de coupe. Seconde campagne d'essais, orientation des fibres de 15°, composite C4.*

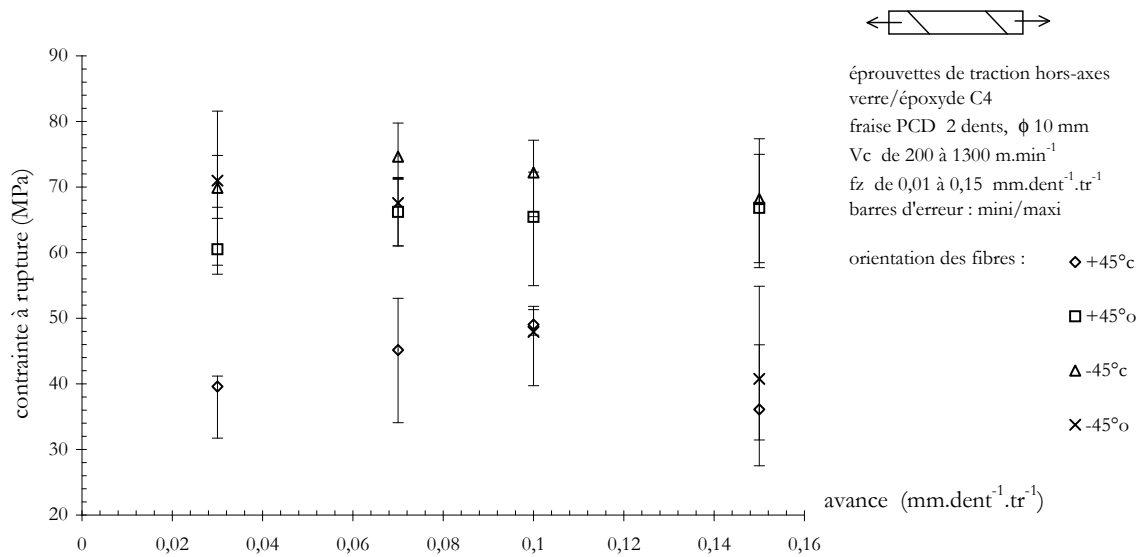


Figure 4.11 – *Contrainte à rupture des éprouvettes de traction hors-axes en fonction de l'avance. Seconde campagne d'essais, orientation des fibres de 45°, composite C4.*

4.4 Les recommandations normatives

Les normes d'essais des matériaux composites [1, 3, 9, 12, 13] utilisent comme critère de qualité d'usinage d'éprouvettes l'aspect visuel des surfaces usinées, sous un agrandissement de 5.

Les campagnes d'essais réalisées ont montré des variations ou des similitudes significatives :

- des performances mécaniques des éprouvettes (chapitre "Essais mécaniques : résultats expérimentaux" page 93) ;
- des endommagements de surface (rugosité et analyse visuelle) dans le chapitre "Qualification des endommagements dus à la coupe" (page 59).

Les préconisations normatives concernant les observations visuelles des surfaces usinées sont contredites par les recoupements entre endommagements de surfaces constatés et performances mécaniques :

- éprouvettes Iosipescu : les 1^{ère} fissures apparaissent côté +45°c à des niveaux de contrainte différents suivant les conditions de coupe. Pourtant les observations visuelles (cf. figure 3.6 page 64) à fort grossissement relativement à la norme ISO [9] ne présentent pas de différences importantes ;
- éprouvettes anneaux : les surfaces usinées présentent des endommagements sévères

lorsqu'elles sont fraisées en bout (cf. page 78). Les performances mécaniques sont similaires au mode d'usinage par meulage réalisant des surfaces conformes aux préconisations des normes ;

- éprouvettes hors-axes : la configuration $+45^\circ$ présente des surfaces usinées très rugueuses (cf. figures 3.37). La contrainte moyenne à rupture de cette série ne diffère pas significativement de celle avec l'orientation des fibres de -45° dès que l'avance f_z est supérieure à $0,1 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$. Pourtant, la rugosité des surfaces usinées dans la configuration -45° est nettement inférieure à celle à $+45^\circ$ (cf. figure 3.34).

Au regard de ces constatations expérimentales, le critère de caractérisation des surfaces usinées par outil coupant préconisé dans la normalisation doit être complété.

4.5 Conclusion

Sans être exhaustive, cette étude expérimentale a constaté des variations importantes et significatives des performances mécaniques d'éprouvettes d'essais. Les influences des conditions de coupe et des configurations d'usinage sont certaines. L'influence de la localisation de l'endommagement par rapport au type de sollicitation a également été constatée. Les recommandations normatives concernant les analyses visuelles des surfaces usinées sont insuffisantes.

Le chapitre suivant approfondi la recherche d'autres critères représentatifs des endommagements dus à la coupe. Le critère de rugosité de surface peut être un de ceux-ci. Mais à l'instar de Wang [51], la formation du copeau peut provoquer des endommagements sous la surface, sources de performances mécaniques dégradées. L'étude des endommagements en "sub-surface" prolongera l'analyse de la rugosité.

Chapitre 5

Analyse des résultats

5.1 Introduction

Le chapitre précédent a montré que les comportements mécaniques des éprouvettes testées sont effectivement affectés par leurs conditions de préparation par usinage. L'objectif de ce chapitre est de relever les possibles couplages entre les endommagements dus à la coupe et les performances mécaniques des éprouvettes. Dans ce travail, trois types d'essais ont été étudiés :

1. l'essai de cisaillement Iosipescu (cf. paragraphe 2.1.1 page 34) : dans cet essai, les premières fissures sont localisées au fond de chaque entaille coté $+45^\circ$. Cette localisation limite le champ d'observation microscopique et rend difficile la quantification des dommages dans cette zone ;
2. l'essai de traction sur anneau épais (cf. paragraphe 2.1.2 page 36) : la configuration de cet essai conduit à une répartition hétérogène du champ de contrainte. D'autre part, l'enroulement filamentaire rend la configuration d'orientation des fibres complexe ;
3. l'essai de traction hors-axes (cf. paragraphe 2.1.3 page 38) : par l'intermédiaire de talons obliques, cet essai soumet une éprouvette de géométrie simple à un champ de contrainte relativement homogène.

Au regard de ces considérations, l'étude des couplages entre dommages inhérents à la coupe et performances mécaniques a été restreinte aux essais de traction hors-axes. Dans ce cas, l'analyse microscopique des éprouvettes après usinage s'étend de l'échelle méso (les plis) à l'échelle micro (les fibres).

5.2 États de surface

Le niveau des contraintes à rupture admissibles par les éprouvettes de traction hors-axes varie dans une large gamme suivant les orientations des fibres. Ceci a conduit à analyser les couplages entre rugosité de surface et performances mécaniques pour chaque classe d'orientation des fibres : 15° , 30° et 45° . Rappelons que dans chaque classe, une série correspond à un ensemble de 5 à 10 éprouvettes usinées dans les mêmes conditions. Les résultats des performances mécaniques moyennes par série en fonction des rugosités de surfaces sont reportés sur les figures 5.1 (orientation des fibres de 15°), 5.2 (orientation des fibres de 30°) et 5.3 (orientation des fibres de 45°).

Pour une orientation des fibres de 15° (cf. figure 5.1), les séries sont majoritairement localisées dans une zone de contrainte à rupture comprise entre 190 et 210 MPa et une rugosité R_a des surfaces usinées entre 0,5 à $4\text{ }\mu\text{m}$. Les pertes de performances mécaniques concernent la configuration $+15^\circ\text{c}$ usinée aussi bien avec l'outil PCD que CW. Si l'on se réfère à l'évolution de la contrainte à rupture en fonction de la rugosité, celle-ci ne représente pas un critère prédictif de la dégradation du comportement mécanique. En effet, les deux séries d'éprouvettes dont les contraintes à rupture sont les plus faibles (160 et

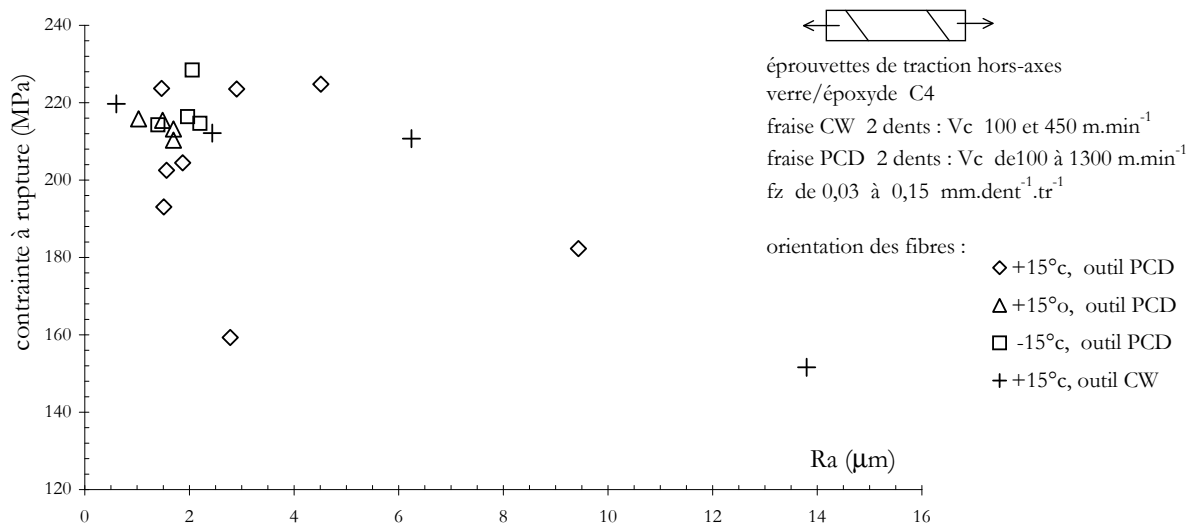


Figure 5.1 – Influence de la rugosité R_a sur la contrainte maximum à rupture. Éprouvettes de traction hors-axes, orientation des fibres de 15° , composite C4.

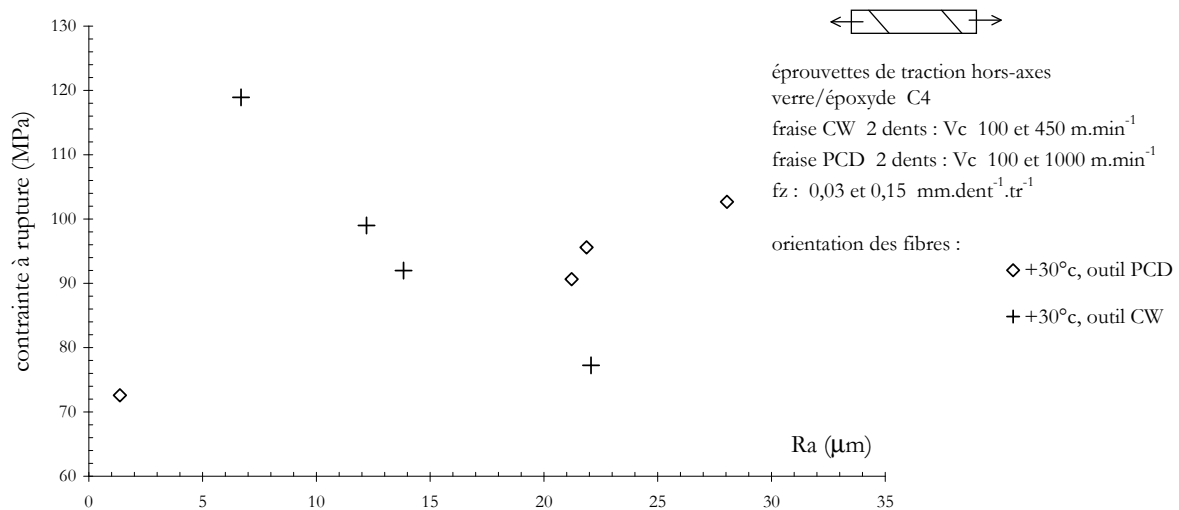


Figure 5.2 – Influence de la rugosité Ra sur la contrainte maximum à rupture. Éprouvettes de traction hors-axes, orientation des fibres de 30°, composite C4.

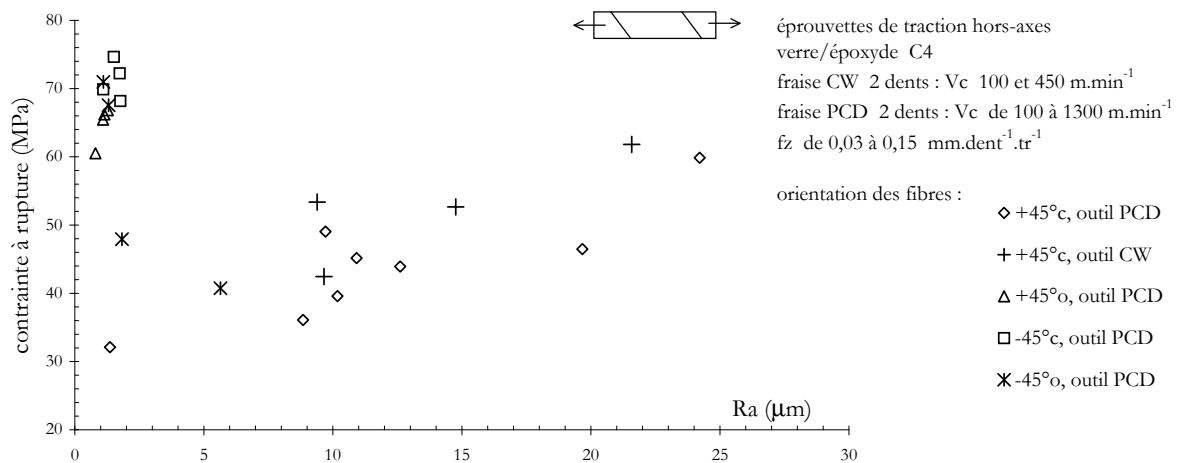


Figure 5.3 – Influence de la rugosité Ra sur la contrainte maximum à rupture. Éprouvettes de traction hors-axes, orientation des fibres de 45°, composite C4.

150 MPa) ont des rugosités de surface respectivement de 3 et 14 μm .

Pour une orientation des fibres de 30° (cf. figure 5.2), les faibles contraintes à rupture correspondent à des rugosités de surface totalement opposées (1,5 μm et 22 μ). Là aussi, aucune tendance ne peut se dégager et les séries se répartissent sur tout le domaine de contrainte à rupture et de rugosité.

Pour une orientation des fibres de 45° (cf. figure 5.3), les résistances mécaniques dégradées concernent les séries dans la configuration $+45^\circ\text{c}$ et la moitié de celles dans la configuration -45°o . Ces séries ont des rugosités de surface réparties dans un large éventail (R_a entre 1,5 et 25 μm). Les contraintes à rupture maximales sont obtenues pour les configurations $+45^\circ\text{o}$ et -45°c , avec une rugosité de surface inférieure à 3 μm .

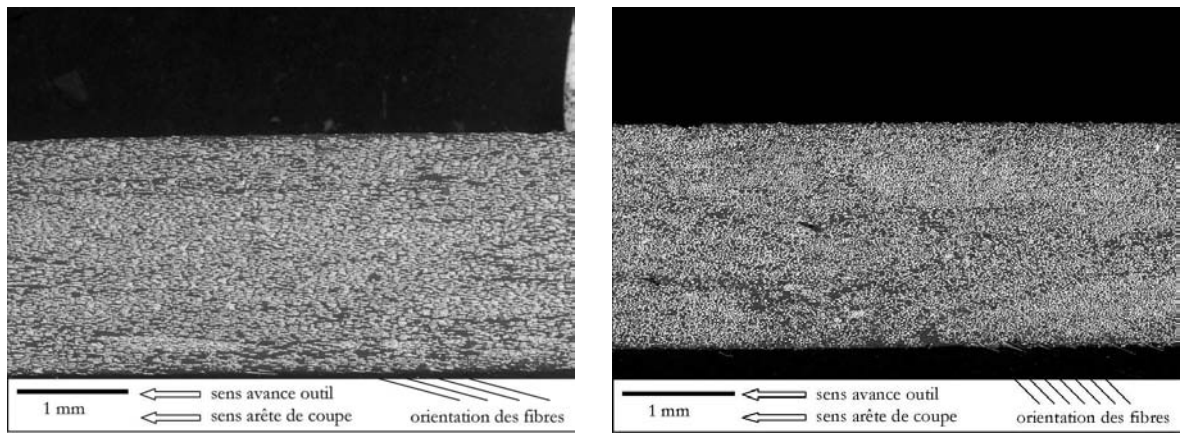
La conclusion de cette analyse est que le critère de rugosité n'est pas le bon indicateur de l'interdépendance entre découpe d'éprouvettes et tenue mécanique. Mais il est important de souligner que les critères de rugosité normalisés (comme par exemple le R_a) ne quantifient que les irrégularités de surface dont le pas est inférieur à 500 μm (cf. norme ISO 12085 [11] et ISO 11562 [10]). De fait, ce critère élimine ainsi les défauts de surface à l'échelle "méso" (les plis du stratifié) et ne tient pas compte d'éventuels endommagements en sub-surface. Des observations microscopiques deviennent donc indispensables.

5.3 Observations microscopiques

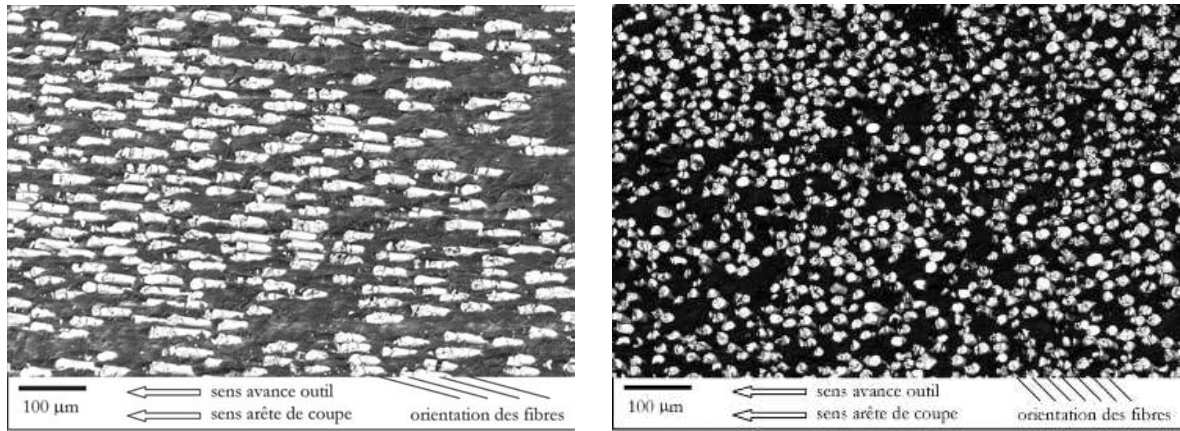
L'analyse consiste à prendre comme référence les aspects des surfaces usinées des éprouvettes dont les performances mécaniques sont les meilleures (configurations $+\theta^\circ\text{o}$ et $-\theta^\circ\text{c}$). Ensuite, la comparaison avec les observations microscopiques des éprouvettes présentant des performances mécaniques dégradées (configurations $+\theta^\circ\text{c}$ et $-\theta^\circ\text{o}$) permettra de préciser les dommages les plus influents.

Les photographies caractéristiques des surfaces usinées sont présentées dans les figures 5.4 pour la configuration $+\theta^\circ\text{o}$ et 5.5 pour la configuration $-\theta^\circ\text{c}$.

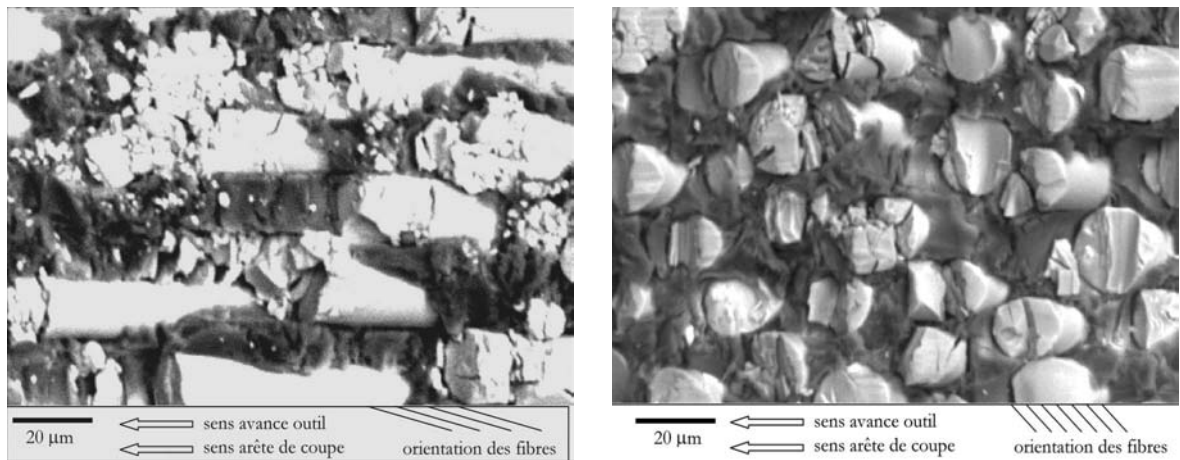
Dans ces deux cas, les surfaces usinées présentent à faible grossissement un aspect visuel régulier (cf. figure 5.6(a)). Hormis quelques fibres non-sectionnées sur les surfaces libres des éprouvettes, aucun délaminage n'est observé sur toute l'épaisseur du composite usiné et ce quelque soit le taux de fibre volumique local à l'intérieur du composite. À fort grossissement, les fibres sont rompues à leur extrémité et marquées par un écrasement dans la configuration $+15^\circ\text{o}$ (cf. figure 5.4(b,c)). L'action de l'arête de coupe dans ce cas d'orientation des fibres est ainsi confirmée : les fibres sont sectionnées sous l'action combinée de



(a)



(b)



(c)

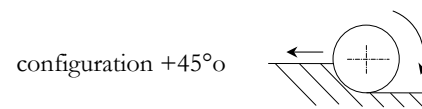
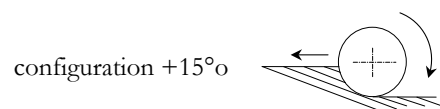


Figure 5.4 – *Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration $+\theta^\circ$. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.*

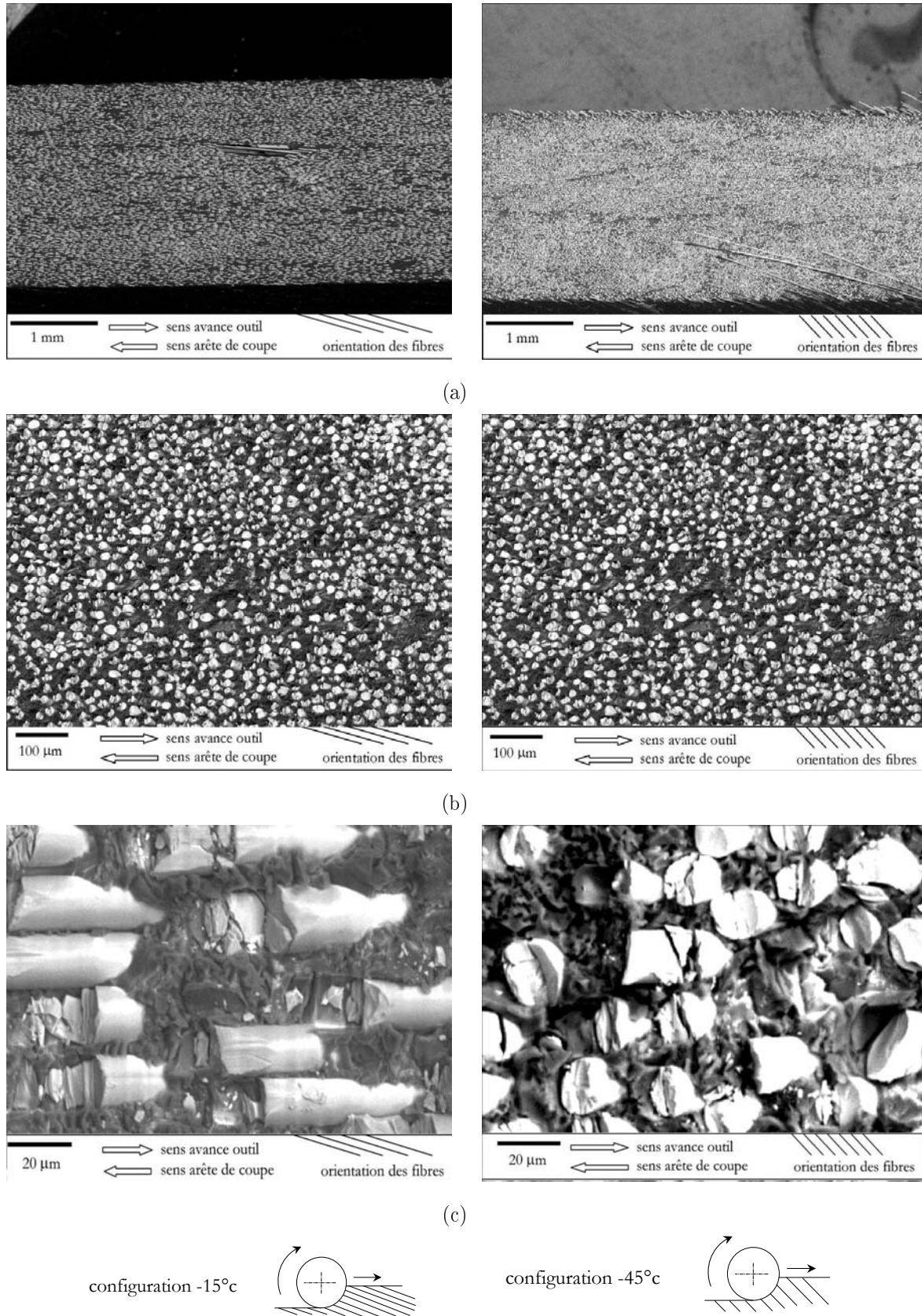


Figure 5.5 – *Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration $-\theta^\circ c$. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.*

compression transverse (écrasement contre la surface usinée) et de cisaillement. Les interfaces fibres/matrice ne présentent pas de fissuration visible à ce grossissement ($20\text{ }\mu\text{m}$). Cependant, la matrice présente un aspect rugueux. Il faut noter également l'absence de longues fissures susceptible de se propager en sub-surface.

Les aspects macroscopiques des surfaces usinées de la configuration $+\theta^\circ\text{c}$ ont déjà été illustrées par les figures 3.36 et 3.37 (pages 88 et 89). À présent, les observations microscopiques des configurations $+\theta^\circ\text{c}$ et $-\theta^\circ\text{o}$ sont présentées respectivement dans les figures 5.6 et 5.7.

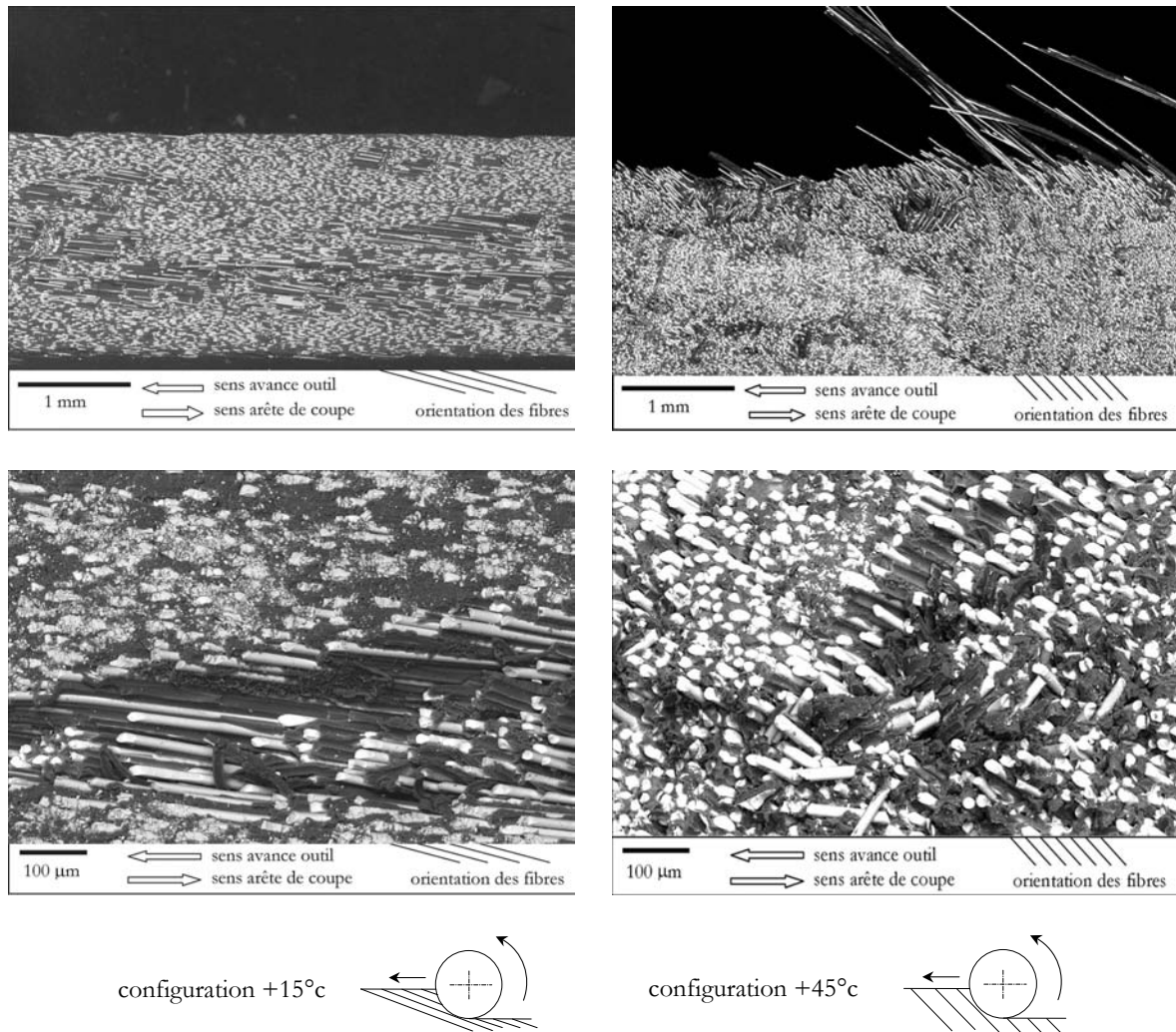


Figure 5.6 – Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration $+\theta^\circ\text{c}$. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.

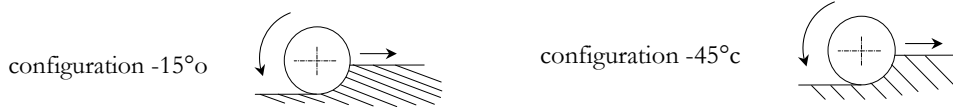
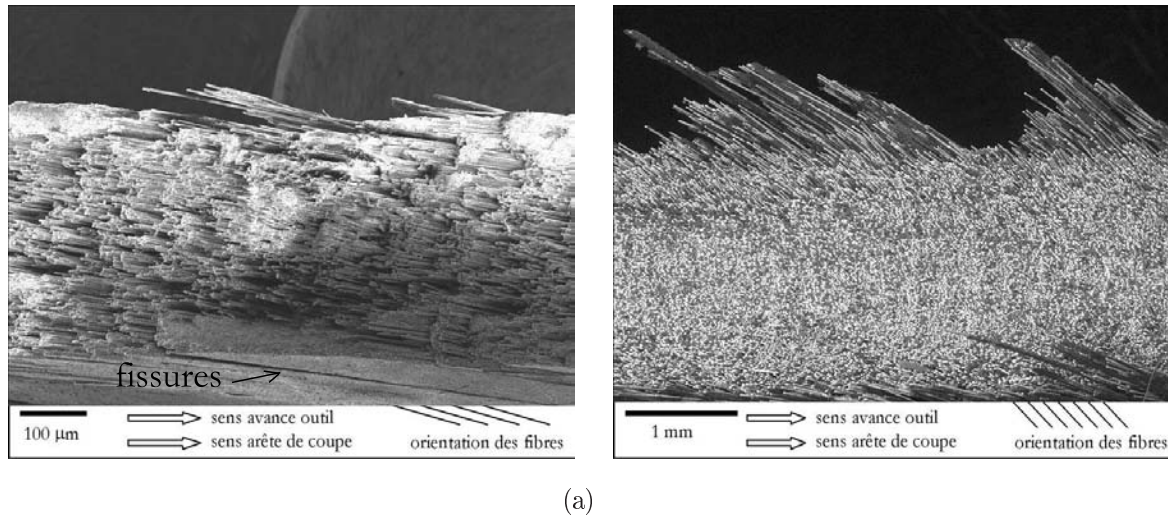


Figure 5.7 – *Aspects microscopiques typiques des surfaces usinées dans la configuration $-\theta^\circ$. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.*

Les surfaces usinées présentent des aspects très différents d'une configuration à l'autre :

- configuration $+15^\circ$: les endommagements ont majoritairement la forme de "trous" (cf. figure 5.8) correspondants aux micro-copeaux enlevés. Ces dommages, d'après Arola et Ramulu [17], sont formés lors de la génération des micro-copeaux par fissuration dans la direction des fibres sous la surface usinée puis cisaillement des fibres jusqu'à la surface ;
- configuration $+45^\circ$: les surfaces sont très irrégulières et présentent des zones où les fibres sont profondément déchaussées et dépassent de la surface usinée (cf. figure 5.9) ;
- configuration -15° : dans ce cas les éprouvettes usinées avec des avances faibles ($f_z = 0,01$ et $0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$) sont exemptes de dommages. À l'opposé, celles usinées avec une avance $f_z = 0,03 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ montrent un fort déchaussement de fibres avec des fissures dans la direction des fibres se propageant sur 5 à 10 mm. Au delà de cette avance, ces fissures entraînent l'éclatement des éprouvettes en cours d'usinage ;
- configuration -45° : les surfaces usinées avec une avance $f_z = 0,15 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$

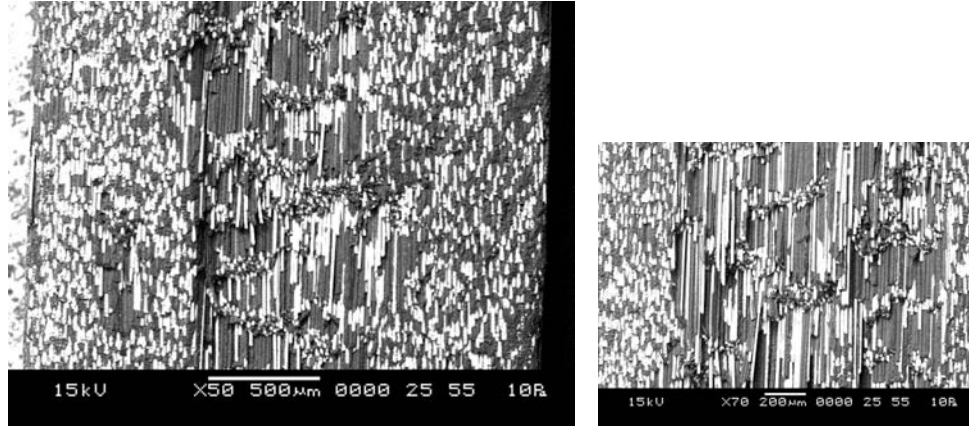


Figure 5.8 – *Trous dans la surface usinée dans la configuration +15°c, V_f 11000 mm.min⁻¹. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.*

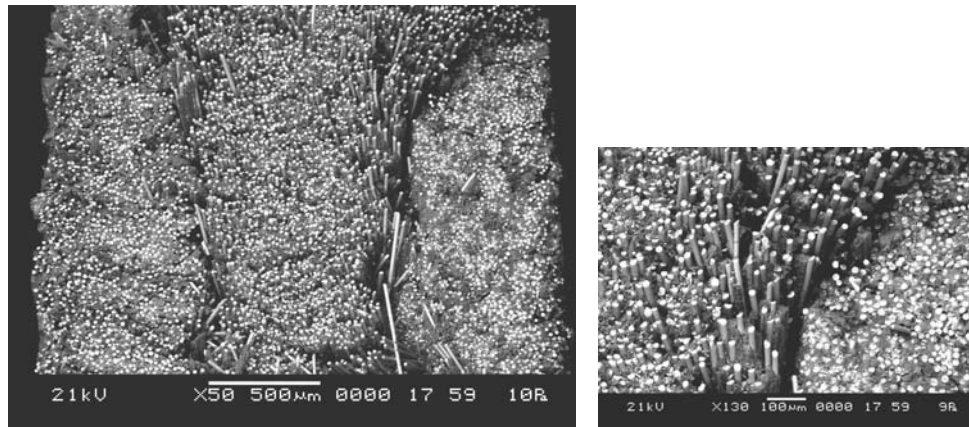


Figure 5.9 – *Fibres dépassant de la surface usinée dans la configuration +45°c, V_f 11000 mm.min⁻¹. Éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.*

sont les seules de la configuration à présenter des déchaussements de fibres. Les autres éprouvettes sont exemptes d'endommagement à l'échelle micro.

Notons que ces endommagements se classent en deux grandes familles : les fissurations dans la direction des fibres avec arrachement de micro-copeaux (associés à une orientation de 15° , voir figure 5.10) et les déchaussements (associés à une orientation de fibres de 45°).

Ces observations relatives aux dommages en surface des éprouvettes usinées ont été prolongées par des analyses en sub-surface. La procédure suivie se compose :

- d'un enrobage de l'éprouvette mise "à plat" (cf. figure 5.11);

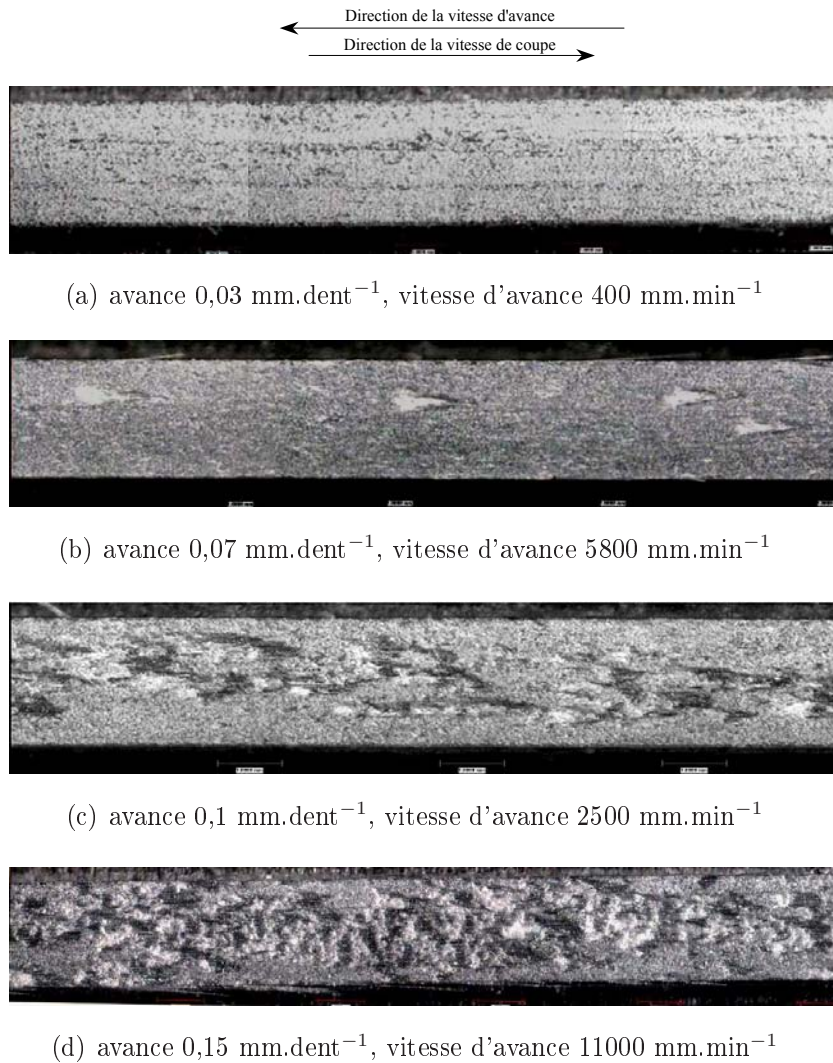


Figure 5.10 – *Observations macroscopiques des surfaces usinées. Éprouvettes de traction hors-axes, configuration $+15^\circ c$, composite C4.*

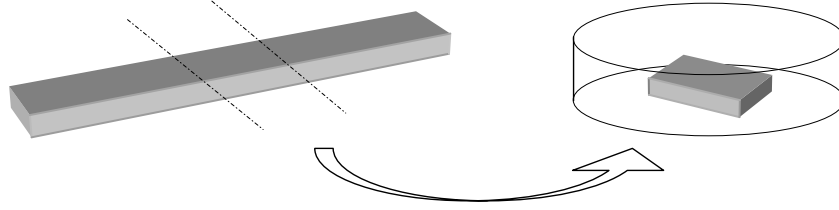


Figure 5.11 – *Enrobage en vue d'observation au MEB dans l'épaisseur des éprouvettes de traction hors-axes, composite C4.*

- d'un polissage sur une profondeur d'environ 1 mm (afin d'observer les endommagements dans le plan médian du stratifié);
- d'observations au MEB après un nettoyage aux ultra-sons.

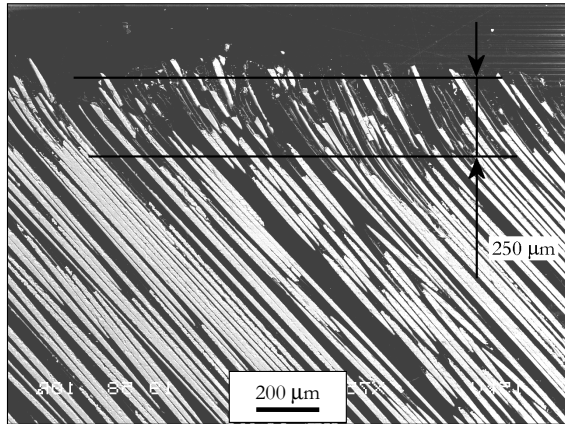
Cette démarche a été retenue afin de quantifier la profondeur des déchaussement des fibres. La figure 5.12 montre un exemple de l'évolution de celui-ci en fonction de l'avance f_z dans le cas du composite C4 avec une configuration de $+45^\circ$. La profondeur de fibres déchaussées en fonction de l'avance f_z a été quantifiée (cf. figure 5.14) pour les deux configurations $+45^\circ$ et -45° . Notons que ce dommage croît avec l'avance, avec un niveau d'endommagement plus grand pour la configuration $+45^\circ$.

Grâce à ces observations, deux critères ont été retenus pour quantifier les endommagements :

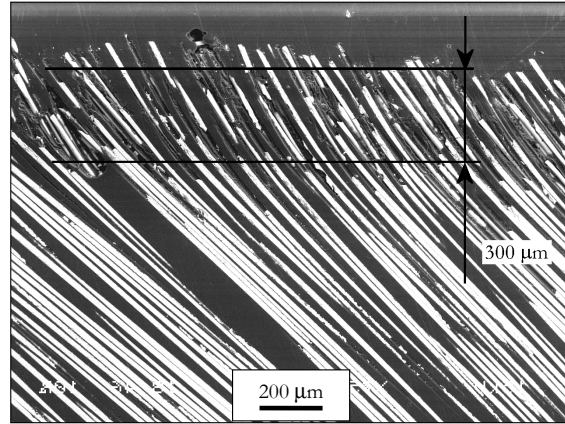
- le critère "pourcentage de surface endommagée" pour les orientations de fibres de 15° (cf. figure 5.13);
- le critère "profondeur de fibres déchaussées" pour l'orientation de fibres de 45° (cf. figure 5.14).

Les tracés des évolutions des performances mécaniques avec ces deux types d'endommagement (endommagements surfaciques sous forme de trous pour l'orientation des fibres de 15° et endommagements en sub-surface sous forme de déchaussement de fibres pour l'orientation des fibres de 45°), sont présentés figures 5.15 et 5.16.

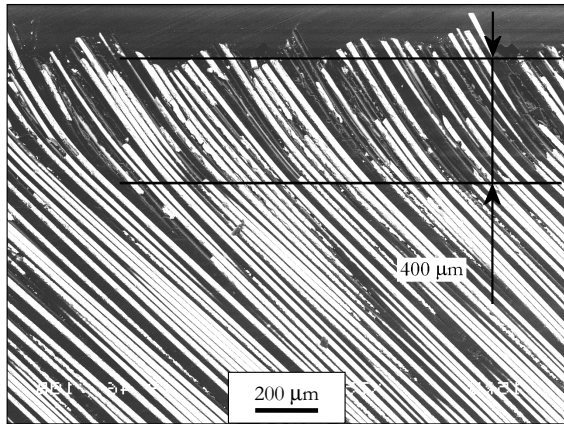
Pour l'orientation des fibres de $+15^\circ$ (cf. figure 5.15), le test d'Aspin-Welch (norme NFX 06-065 [6]) permet de comparer deux à deux les distributions des résultats mécaniques des séries testées. Il en résulte que les séries où $f_z = 0,03$ et $0,07 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ (notées respectivement 1 et 2 sur la figure 5.15) sont identiques et que la série où l'avance $f_z = 0,15 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ (notée 4 sur la figure 5.15) fait partie d'une population différente (cf. tableau 5.1) avec un risque de 5% (test de Student). Une baisse significative des



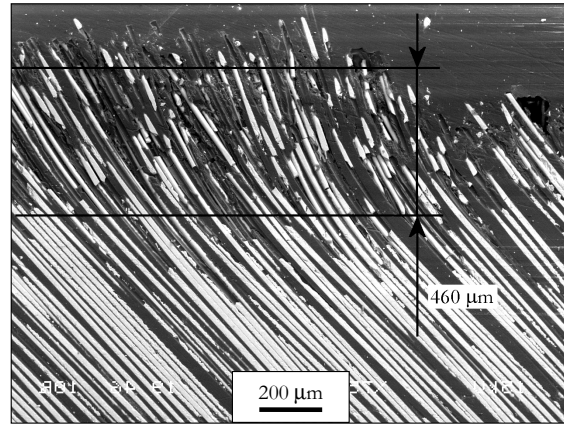
(a) éprouvette +45°C, $f_z = 0,03 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$



(b) éprouvette +45°C, $f_z = 0,07 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$



(c) éprouvette +45°C, $f_z = 0,1 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$



(d) éprouvette +45°C, $f_z = 0,15 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$

Figure 5.12 – Déchaussement des fibres en sub-surface sous l'action de l'arête de coupe. Éprouvettes de traction hors-axes, configuration +45°C, composite C4

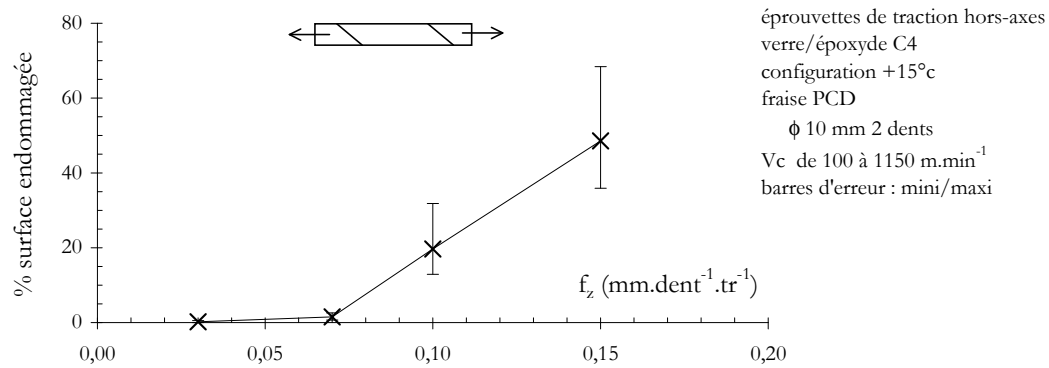


Figure 5.13 – *Pourcentage de surface usinée endommagée des éprouvettes de traction hors-axes. Orientation fibres +15°c, composite C4.*

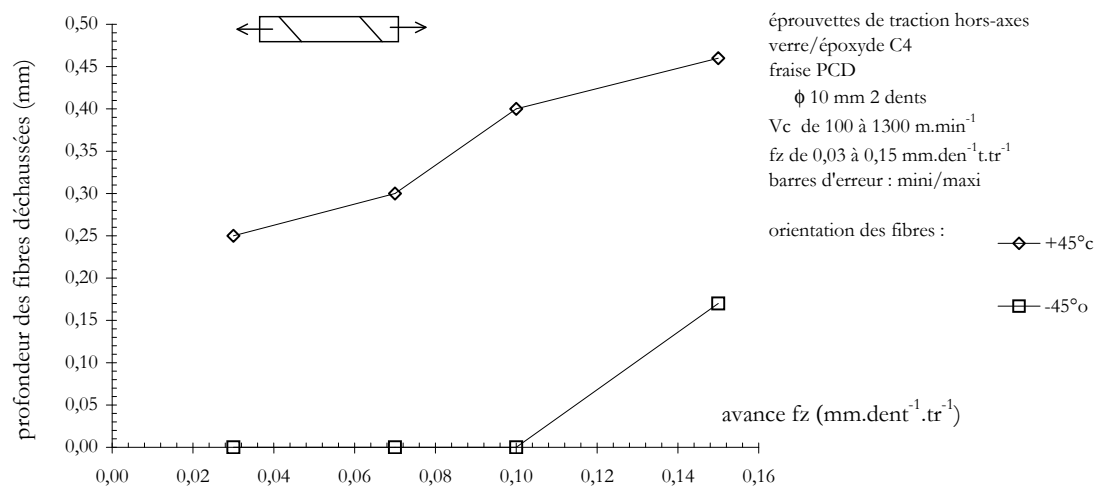


Figure 5.14 – *Profondeur totale de fibres déchaussées des éprouvettes de traction hors-axes. Orientation fibres +45°c et -45°o, composite C4.*

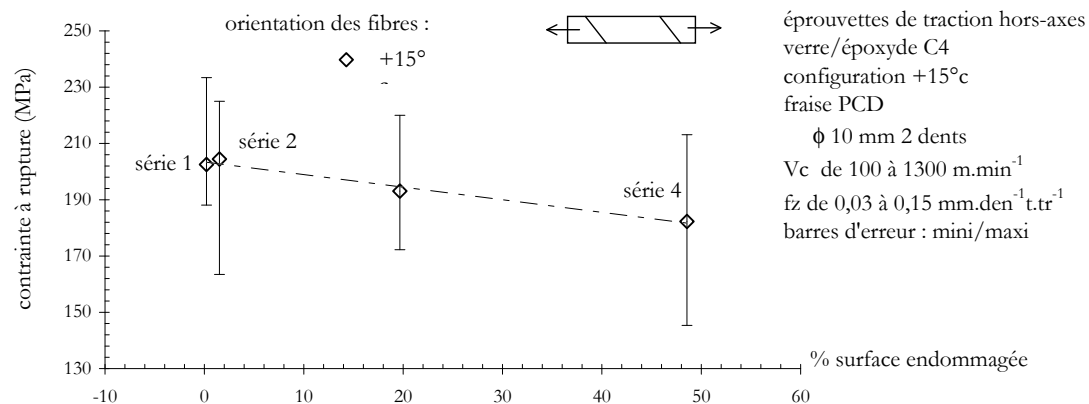


Figure 5.15 – Contrainte à rupture en fonction du pourcentage de surface endommagée. Échantillons de traction hors-axes, composite C4.

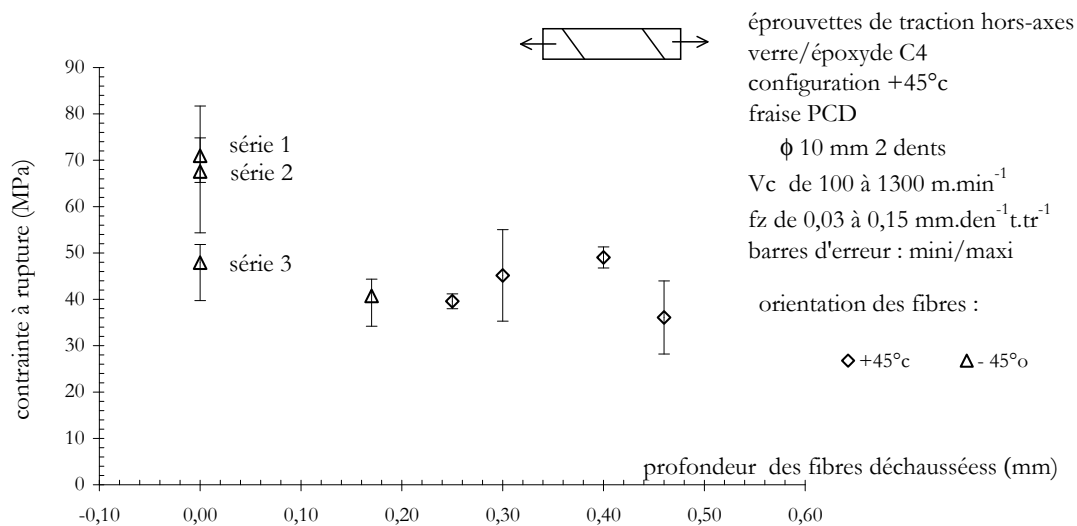


Figure 5.16 – Contrainte à rupture en fonction de la profondeur endommagée. Échantillons de traction hors-axes, composite C4.

série	contrainte à rupture		test de Student		conclusion
	moyenne (MPa)	Cv (%)	variable de Student	$t_{5\%}$	
n° 1	203	8	1,93	1,80	séries différentes au risque de 5%
n° 4	182	13			
n° 2	204	11	1,82	1,80	séries différentes au risque de 5%
n° 4	182	13			

série 1 : $V_c = 209 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,03 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$

série 3 : $V_c = 1300 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,07 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$

série 4 : $V_c = 1150 \text{ m.min}^{-1}$, $f_z = 0,15 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$

Tableau 5.1 – *Test d'Aspin-Welch sur les séries d'éprouvettes de traction hors-axes présentant les plus grands écarts. Configuration +15°c, composite C4.*

performances mécaniques des éprouvettes usinées avec une configuration +15°c peut donc être caractérisée par le critère "pourcentage de surface endommagée" défini plus haut.

Les séries dans lesquelles les fibres sont orientées à +45°c et -45°o montrent des écarts plus importants. Le test de comparaison d'Aspin-Welch [6] indique que les deux séries usinées dans la configuration -45°o avec des avances $f_z = 0,03$ et $0,07 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ (contraintes à rupture respectivement de 71 et 68 MPa et notées respectivement série 1 et série 2 sur la figure 5.16) proviennent de distributions différentes de toutes les autres avec un risque de 1%. Notons que sur ces deux séries, aucun déchaussement de fibres n'a été visualisé. La figure 5.16 montre une baisse significative des performances mécaniques avec la profondeur de déchaussement de fibres mesurée sur les éprouvettes des autres séries. Par contre la série -45°o (notée série 3 sur la figure 5.16) avec $f_z = 0,1 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$ voit sa contrainte à rupture diminuée à 48 MPa sans pour autant présenter de dommage en sub-surface.

5.4 Conclusion

L'exploitation quantitative des résultats des performances mécaniques des éprouvettes se heurte à l'utilisation d'un seul paramètre d'influence.

Le critère de rugosité R_a habituellement utilisé dans les matériaux métalliques ne peut caractériser sûrement l'état d'endommagement des éprouvettes usinées par outil coupant. Par définition, il ne peut quantifier tous les types d'irrégularités présentes sur les surfaces usinées. D'autre part, il ne peut être représentatif des endommagements en sub-surface. Les analyses des observations au MEB ont montré des dommages générés par la coupe uniquement dans les configurations $+\theta^\circ$ c et $-\theta^\circ$ o. Les résultats des essais mécaniques corrélient ces observations microscopiques. En effet, les performances mécaniques des éprouvettes de traction hors-axes chutent pour ces deux configurations d'usinage.

L'orientation des fibres favorise deux types d'endommagement : les déchaussements de fibres pour l'orientation de 45° , les trous en surface usinée pour l'orientation de 15° .

Deux critères de quantification de l'endommagement inhérent à la coupe ont donc été visualisé pour quantifier les dommages subis par le matériau composite. Le "pourcentage de surface endommagée" corréle avec les pertes de performances mécaniques pour une orientation de fibres de 15° . Ce critère peut donc être retenu comme étant représentatif. Dans le cas de l'orientation des fibres de 45° , des analyses complémentaires sont nécessaires pour affiner la corrélation du critère représentatif "profondeur de déchaussement des fibres".

Chapitre 6

Conclusion générale et perspectives

Le but de cette étude était d'appréhender expérimentalement les influences des endommagements créés par l'usinage sur les performances mécaniques d'éprouvettes en composite à matrice polymère renforcées de fibres.

Le mode d'usinage étudié est le fraisage par contournage car c'est ainsi que sont préparées la plupart des éprouvettes d'essais. L'étude bibliographique a montré que ce mode d'usinage dans les matériaux composites n'était abordé que sous les aspects "état de surface" et "durée de vie des outils", approches issues de l'usinage des matériaux métalliques. À part quelques travaux parfois contradictoires, rares sont les contributions à l'étude de l'influence des dommages inhérents à la coupe sur les performances mécaniques des éprouvettes usinées.

La démarche suivie a consisté à sélectionner trois essais mécaniques pour lesquels les premières fissures s'initient sur les surfaces usinées.

Les essais de cisaillement Iosipescu et de traction d'anneaux épais ont permis de valider l'influence des conditions de coupe sur les performances mécaniques. L'essai de traction hors-axes a quant à lui fait l'objet de travaux expérimentaux plus approfondis. D'autres paramètres tels que les configurations d'usinage et les orientations de fibres ont été pris en compte. Des observations fines aussi bien à l'échelle des plis qu'à celle des fibres ont été réalisées.

La qualification des endommagements a permis de révéler les influences prépondérantes de l'orientation des fibres et du mode de fraisage (concordance ou opposition) sur l'état des surfaces usinées. Il a été mis en évidence que le critère de rugosité R_a n'était pas représentatif de l'ensemble des endommagements, en particulier des dommages en sub-surface (déchaussement des fibres, fissures). Grâce aux traitements statistiques des résultats des essais mécaniques, l'influence prépondérante de l'avance par dent et par tour (directement représentative de l'épaisseur de matière coupée par l'arête de coupe) a été démontrée pour certaines configurations d'usinage. Il est donc possible de proposer une procédure pour obtenir des éprouvettes en composite à matrice époxy renforcées de fibres longues exemptes d'endommagements dus à l'usinage.

Pour finir, le couplage entre endommagements et performances mécaniques a permis d'analyser les influences respectives de la rugosité de la surface usinée et des endommagements en sub-surface (aux interfaces fibres/matrice). Deux critères d'endommagement directement liés aux performances mécaniques des éprouvettes ont été mis en évidence. Il s'agit du pourcentage de surface endommagée et de la profondeur de déchaussement des fibres. Ces critères permettent de compléter utilement les recommandations normatives sur la préparation des éprouvettes par usinage.

Ainsi, cette contribution a permis de :

- montrer que le couplage endommagements/performances mécaniques dépend à la fois de la sévérité des endommagements et de leur localisation ;
- montrer que les critères de rugosité ne permettent pas d'anticiper le comportement mécanique de l'éprouvette ;
- déterminer deux nouveaux critères d'endommagements liés à la résistance mécanique ;
- mettre au point une procédure expérimentale (décrite ci-près) de fabrication d'éprouvettes d'essais par fraisage.

A partir de ce travail, des hypothèses sur les modes de rupture du composite lors de la formation du copeau peuvent être émises. Les observations microscopiques laissent à supposer que l'initiation du copeau se créerait sous l'action des modes de rupture I et II dans des proportions variables suivant l'orientation des fibres. Des essais instrumentés en

coupe orthogonale permettront simplifier le mode d'usinage et de quantifier les sollicitations mécaniques élémentaires subies par les constituants du matériau. La détermination d'un critère local de rupture et son utilisation dans un code d'éléments finis conduiront à la simulation de la formation du copeau dans des modes d'usinage plus complexes comme le fraisage.

Recommandations de préparation par fraisage d'éprouvettes en matériau composite unidirectionnel à matrice polymère

1. Éprouvettes Iosipescu

Afin de garantir la géométrie de l'entaille, son usinage nécessite une fraise de diamètre 2 mm pour générer par contournage le rayon de 1,3 mm (cf. figure 6.1). Le matériau des outils de ce diamètre sont, dans l'état actuel de la technologie, en CW.

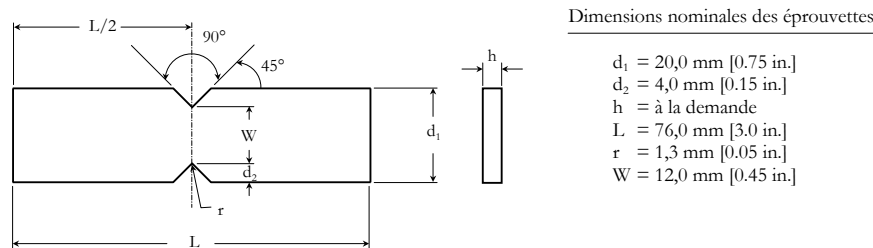


Figure 6.1 – Géométrie des éprouvettes Iosipescu.

Les recommandations pour que les performances mécaniques des éprouvettes Iosipescu soient optimales sont :

- l'acuité des arêtes de coupe doit rester du même ordre de grandeur que le diamètre des fibres (dans cette étude : $8 \mu\text{m}$) ;
- la vitesse de coupe recommandée est $V_c = 30 \text{ m.min}^{-1}$, avec une avance par dent et par tour $f_z = 0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$.

2. Éprouvettes anneaux

Les performances mécaniques optimales sont obtenues par fraisage de profil. Les fraises en PCD garantissent des résultats fiables sur toute la durée de vie de l'outil. Les conditions de coupe préconisées sont :

- vitesse de coupe V_c de 160 à 1250 m.min^{-1} ;

- avance $f_z = 0,02 \text{ mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$.

3. Éprouvettes de traction hors-axes

Les meilleures performances mécaniques sont atteintes avec les configurations d'orientation des fibres de $+\theta_0$ et $-\theta_c$.

Les outils en PCD présentent une grande acuité de l'arête de coupe (de l'ordre de $10 \mu\text{m}$) très stables pendant toute la durée de vie de l'outil. Les conditions de coupe préconisées sont :

- V_c peut être comprise entre 100 et 1300 m.min^{-1} ;
- dans ces configurations, f_z peut varier de 0,03 à 0,15 $\text{mm.dent}^{-1}.\text{tr}^{-1}$.

3. Contrôle des endommagements des éprouvettes fabriquées par usinage

- aspect visuel (norme NF EN ISO 2818 [9]) : état de surface régulier sans aspérités ni trous sous faible grossissement ($\times 30$);
- observation microscopique (grossissement jusqu'à $\times 400$) : vérifier l'absence de déchaussements de fibres et/ou de fissures pénétrant sous la surface usinée.

Nomenclature

a_e	Profondeur de passe radiale (mm)
a_p	Profondeur de passe axiale (mm)
$CMCF$	Contrainte moyenne de cisaillement correspondante à l'apparition de la première fissure (MPa) des éprouvettes Iosipescu. Composite C1 et C3
CMR	Contrainte maximum à rupture (MPa) des éprouvettes de traction hors-axes. Composite C4
Cv	Coefficient de variation (%)
CVD	Chemical Vapor Deposition (déposition chimique en phase vapeur). Procédé de dépôt de matériau dur sur le substrat de l'outil.
CW	Carbure de tungstène
D	diamètre de la fraise (mm)
ETR	Effort de traction à la rupture (N) des éprouvettes en anneau. Composite C2
f_z	Avance par dent et par tour de l'outil ($\text{mm.dent}^{-1}.\text{tour}^{-1}$)
N	Vitesse de rotation de la fraise (tour.min^{-1})
PCD	Diamant polycristallin
PVD	Physical Vapor Deposition (déposition physique en phase vapeur). Procédé de dépôt de matériau dur sur le substrat de l'outil.
Q	débit de matière usinée ($\text{mm}^3.\text{min}^{-1}$)
T	durée de vie d'un outil de coupe (min)
V_c, V_r	Vitesse de coupe en m.min^{-1} (vitesse périphérique de la fraise)
V_f, V_t	vitesse d'avance de l'outil dans la matière (mm.min^{-1})
Z	Nombre de dents de la fraise

Bibliographie

- [1] ASTM D 3039/D 3039M. « Standart Test Method for Tensile properties of polymer matrix composite materials », 2000.
- [2] ASTM D 3410. « Standart Test Method for unidirectional or crossply fiber-resin composites », 1987.
- [3] ASTM D 3518. « Standart Test Method for inplane shear stress-strain response of unidirectional reinforced plastics », 1982.
- [4] ASTM D 5379/D 5379M. « Standart Test Method for shear properties of composites materials by the V-Notched beam method », 1998.
- [5] S. ABRATE et D.A. WALTON. « Machining of composite materials : Part I: Traditional methods ». *Composites Manufacturing*, 3:75–83, 1992.
- [6] AFNOR. « NF-X-06-065 : Introduction à l'utilisation des tests statistiques : Comparaison de deux échantillons ». Norme AFNOR, 1971.
- [7] AFNOR. « NF-T-57-102 : Matières plastiques renforcées au verre textile : Détermination de la perte au feu ». Norme AFNOR, 1977.
- [8] AFNOR. « NF-X-06-050 : Étude de la normalité d'une distribution ». Norme AFNOR, 1991.
- [9] AFNOR. « NF-EN-ISO-2818 : Plastiques : Préparation des éprouvettes par usinage ». Norme AFNOR, 1997.
- [10] AFNOR. « NF-EN-ISO-11562 : État de surface : Méthode du profil. Caractérisation métrologiques des filtres à phase correcte ». Norme AFNOR, 1998.
- [11] AFNOR. « NF-EN-ISO-12085 : État de surface : Méthode du profil. Paramètres liés au profil ». Norme AFNOR, 1998.
- [12] AFNOR. « NF-EN-ISO-527-4 : Plastiques - Détermination des propriétés en traction - Partie 4 : conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes. ». Norme AFNOR, 1998.

- [13] AFNOR. « NF-EN-ISO-527-4: Plastiques - Détermination des propriétés en traction - Partie 5: conditions d'essai pour les composites plastiques renforcés de fibres unidirectionnelles. ». Norme AFNOR, 1998.
- [14] M. ARCAN, Z. HASHIN et A. VOLOSHIN. « A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials ». *Experimentals Mechanics*, 18(4):141–146, 1978.
- [15] D. AROLA et M. RAMULU. « Machining-induced surface texture effects on the flexural properties of a graphite/epoxy laminate ». *Composites*, 25(8):822–834, 1994.
- [16] D. AROLA et M. RAMULU. « Net shape Manufacturing and the performance of polymer composites under dynamic loads ». *Experimentals Mechanics*, 37(4):379–385, 1997.
- [17] D. AROLA et M. RAMULU. « Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis ». *International Journal of Mechanics Sciences*, 39(5):597–613, 1997.
- [18] D. AROLA et M. RAMULU. « Net-shape machining and the process dependent failure of fiber-reinforced plastics under static loads ». *Journal of Composites Technology and Research*, 20(4):210–220, 1998.
- [19] D. AROLA, M. RAMULU et D.H. WANG. « Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite ». *Composites: Part A*, 27(2):121–133, 1996.
- [20] N. BHATNAGAR, N. RAMAKRISHNAN, N.K. NAIK et R. KOMANDURI. « On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates ». *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 35(5):701–716, 1995.
- [21] E. CAPELLO et V. TAGLIAFERRI. « Drilling damage of GFRP and residual mechanical behavior - Part I: Drilling damage generation ». *Journal of Composites Technology and Research*, 23(2):122–130, 2001.
- [22] E. ERIKSEN. « The influence of surface roughness on the mechanical strength properties of machined short-fibre-reinforced thermoplastics ». *Composites Science and Technology*, 60:107–113, 2000.
- [23] P. GUEGAN. « Contribution à la qualification de l'usinage de matériaux composites à matrice organique ». PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 1994.
- [24] A. Di ILIO, V. TAGLIAFERRI et F. VENIALI. « Damage induced in unidirectional graphite fibre reinforced thermoplastics during drilling ». *Processing and Manufacturing of Composite Materials*, 49:149–157, 1991.

-
- [25] N. IOSIPESCU. « New accurate procedure for single shear testing of metals ». *Journal of Materials*, 2:537–566, 1967.
- [26] M. KAWAI, M. MORISHITA, H. SATOH et S. TOMURA. « Effects of end-tab shape on strain field of unidirectional carbon/epoxy composite specimens subjected to off-axis tension ». *Composite Part A*, 28:267–275, 1997.
- [27] K.S. KIM, D.G. LEE, Y.K. KWAK et S. NAMGUNG. « Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning ». *Journal of Materials Processing Technology*, 32:553–570, 1992.
- [28] A. KOPLEV. « Cutting of CFRP with single edge tools ». Dans *Third International Conference on Composite Materials*, pages 1597–1605, 1980. Paris.
- [29] A. KOPLEV, AA.LYSTRUP et T. VORM. « The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP ». *Composites*, 14(4):371–376, 1983.
- [30] S.C. LIN et I.K. CHEN. « Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed ». *Wear*, 194:156–162, 1996.
- [31] S.C. LIN et J.M. SHEN. « Drilling unidirectional glass fiber-reinforced composite materials at high speed ». *Journal of Composite Materials*, 33(9):827–851, 1999.
- [32] M. MAHDI et I. ZHANG. « A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials ». *Journal of Materials Processing Technology*, 113:373–377, 2001.
- [33] J.C. MARÍN, J. CAÑAS, F. PARÍS et J. MORTON. « Determination of G_{12} by means of off-axis tension test. Part I: review of gripping system and correction factors ». *Composites: Part A*, 33:87–100, 2002.
- [34] J.C. MARÍN, J. CAÑAS, F. PARÍS et J. MORTON. « Determination of G_{12} by means of off-axis tension test. Part II: a self-consistent approach to the application of correction factors ». *Composites: Part A*, 33:1001–111, 2002.
- [35] M. NEUILLY et Commission d'Établissement des Méthodes d'Analyses du Commissariat à l'Énergie ATOMIQUE. *Modélisation et estimation des erreurs de mesure*. Lavoisier, 1993.
- [36] G. ODEGARD et M. KUMOSA. « Determination of shear strength of unidirectional composite materials with the Iosipescu and 10° off-axis shear tests ». *Composites Science and Technology*, 60:2917–2943, 2000.
- [37] E. PERSSON, I. ERIKSSON et L. ZACKRISSON. « Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composites laminates ». *Composites: Part A*, 28:141–151, 1997.

- [38] F. PIERRON. « *L'essai de cisaillement plan d'Iosipescu : Modélisation et méthodologie expérimentale pour les composites* ». Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, 1994.
- [39] F. PIERRON, E. ALLOBA, Y. SURREL et A. VAUTRIN. « Whole-field assessment off the effects of boundary conditions on the strain field in off-axis tensile testing of unidirectional composites ». *Composites Science and Technology*, 58:1939–1947, 1998.
- [40] F. PIERRON et A. VAUTRIN. « The 10° off-axis tensile test: a critical approach ». *Composites Science and Technology*, 56:483–488, 1996.
- [41] R. PIQUET. « *Contribution à l'étude des réparations provisoires structurales aéronautiques ; Étude du perçage de plaques minces en carbone/époxy* ». Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse III, 1999.
- [42] R. PIQUET, B. FERRET, F. LACHAUD et P. SWIDER. « Experimental analysis of damage in thin carbon/epoxy plate using special drills ». *Composites: part A*, 31:1107–1115, 2000.
- [43] R. PIQUET, F. LACHAUD, B. FERRET et P. SWIDER. « Étude analytique et expérimentale du perçage de plaques minces en carbone/époxy ». *Mécanique et Industries*, 1:105–111, 2000.
- [44] M. RAMULU. Cutting-edge wear of polycrystalline diamond inserts in machining of fibrous composite material. Dans *Machining of Ceramics and Composites*, Manufacturing Engineering and Material Processing. Dekker, 1999.
- [45] M. RAMULU, D. AROLA et F. PIERRON. « Communication privée ».
- [46] H. SCHULZ. « *Fraisage grande vitesse des matériaux métalliques et non métalliques* », Chapitre 4.7, pages 175–201. Sofetec, 1997.
- [47] P.S. SREEJITH, R. KRISHNAMURTHY, K.NARAYANASAMY et S.K. MALHOTRA. « Studies on the machining of carbon/phenolic ablative composites ». *Journal of Materials Processing Technology*, 88:43–50, 1999.
- [48] C.T. SUN et I. CHUNG. « An oblique end-tab design for testing off-axis composite specimens ». *Composites*, 24:619–623, 1993.
- [49] V. TAGLIAFERRI, G. CAPRINO et A. DITERLIZZI. « Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites ». *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 30(1):77–84, 1990.
- [50] I. TODOROVIC. « Étude sur la résistance interlaminaire des composites épais courbes ». rapport de stage, École des Mines de Saint-Étienne, 1999.

-
- [51] D.H. WANG, M. RAMULU et D. AROLA. « Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy. Part I: Unidirectional laminate ». *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 35(12):1623–1638, 1995.
 - [52] M.C. WERN et M. RAMUMLU. « Machinig mechanics in fiber reinforced plastics ». Dans *Machinig of Advenced Materials*. ASME, 1995.
 - [53] Y.S. WU, A.J. LONGMUIR, H.W. CHANDLER et A.G. GIBSON. « Delamination of curved composite shells due to through-thickness tensile stress ». *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 19:39–46, 1993.

Publications et communications faites dans le cadre de cette thèse :

- P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Edge machining effects on th failure of polymer matrix composite coupons », *accepté par Composites part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003
- P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Influence de découpe d'éprouvettes en composite sur leur tenue mécanique », *Mécanique et Industries*, vol. 3, n°4, pp 361-378, 2002.
- P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Effect of specimen cutting on the mechanical response of composite coupons », ECCM10, 3-7 juin 2002 à Bruges, Belgique.
- P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Edge machining effects on the failure of polymer matrix coupons », COMPTEST 2003, 28-30 janvier 2003 à Chalons en Champagne, France.
- P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Edge machining effects on the failure of polymer matrix coupons », SEM Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, 2-4 juin 2003, Charlotte, U.S.A.
- P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Effets des endommagements induits

par le fraisage grande vitesse des composites sur leur comportement mécanique », CPI'2003, 22-24 octobre 2003 à Meknes, Maroc.

P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Étude expérimentale de l'opération de détournage de matériaux composites carbone/verre/époxyde », comptes rendus des 12èmes journées nationales des composites (JNC12), 15-17 novembre 2000 à Cachan.

P. GHIDOSSI, F. MAQUIN et F. PIERRON. « Étude expérimentale de l'opération de détournage de matériaux composites carbone/verre/époxyde », comptes rendus des 12èmes journées nationales des composites (JNC12), 15-17 novembre 2000 à Cachan.

P. GHIDOSSI, M. EL MANSORI et F. PIERRON. « Couplage des endommagements induits par la coupe des composites et leur comportement mécanique », comptes rendus des 13èmes journées nationales des composites (JNC13), 12-14 mars 2003 à Strasbourg.

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'EFFET DES CONDITIONS D'USINAGE D'ÉPROUVETTES EN COMPOSITES À MATRICE POLYMÈRE SUR LEUR RÉPONSE MÉCANIQUE

RÉSUMÉ : Pour déterminer les lois de comportement et les paramètres mécaniques des matériaux composites, des éprouvettes sont couramment fabriquées par fraisage. Ces opérations de coupe par enlèvement de matière génèrent des efforts et des gradients de température importants, d'où risques d'endommagements au niveau des surfaces usinées. Le but de cette étude est d'évaluer expérimentalement l'interdépendance qui peut exister entre la préparation d'éprouvettes en composites par usinage et leurs performances mécaniques. Quatre matériaux composites à matrice polymère renforcés de fibres sont étudiés dans trois types d'essais mécaniques. Les dommages inhérents à la coupe sont qualifiés suivant les orientations des fibres et les configurations d'attaque de l'outil. Le traitement statistique des résultats expérimentaux permet de dégager les paramètres de coupe significativement influents, d'abord sur les dommages créés, puis sur les performances mécaniques. Deux critères d'endommagement sont définis pour caractériser les pertes des performances mécaniques en fonction des configurations d'usinage. Une recommandation de préparation des éprouvettes guide la détermination des conditions de coupe des éprouvettes d'essais en composites à matrice époxyde renforcés de fibres.

Mots-clés : Usinage, Éprouvettes en composite, Endommagements, Essais mécaniques, Traitements statistiques

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE EFFECT OF POLYMER MATRIX COMPOSITE SPECIMEN MACHINING ON THEIR MECHANICAL PERFORMANCES

ABSTRACT: To determine the composite mechanical properties, small coupons are often used that require preparation including edge cutting/machining. This cutting operation generate heat and strains, and cut surfaces are often affected by damages. It is of primary importance to understand how the mechanical performances are affected by the cutting operations. This study aims at the influence of the machining procedure (routing, end milling) of carbon/epoxy and glass/epoxy composite coupons on their mechanical performances. Three mechanical tests are considered: Iosipescu shear test, ring tension test and off-axis tensile test. The cutting damages are detailed and evaluated by surface roughness measurements and microscopic observations with statistical treatments of the results. Two significant damage criteria are determined to explain low mechanical performances of composites coupons. Cutting recommendations advise in the choice of machining procedure on fiber reinforced composite coupons.

Keywords : Machining, Fiber composite coupons, Cut surface damage, Mechanical tests, Statistical treatment.