

Chapitre IV : Autres Modèles d'usinage UGV

I- USINAGE DES MATERIAUX COMPOSITES :

Lors de l'assemblage des structures composites, il est souvent nécessaire d'utiliser des opérations de finition. Ces dernières sont des opérations d'enlèvement de matière par outils coupants. Il est à noter que l'usinage des matériaux composites et des CFRP en particulier est différent de celui des matériaux métalliques. Cela est dû principalement à la nature abrasive des renforts et à l'hétérogénéité des structures composites. En effet, lors de l'opération d'usinage, des dommages sont générés dans la pièce usinée tels que la rupture de la matrice, l'arrachement des fibres et le délaminage fibre/matrice. Pour éviter ou limiter ces endommagements, les procédés d'usinage sont souvent adaptés aux composites. Parmi les opérations d'usinage les plus utilisées on trouve le perçage et le fraisage pour des opérations de contournage ou détournage. D'autres procédés non conventionnels tels que, la découpe au jet d'eau à haute pression et la découpe laser sont également utilisés.

En comparaison avec les alliages métalliques conventionnels, l'hétérogénéité et la nature abrasive des fibres de carbone rendent l'usinabilité des composites CFRP plus difficile. Ainsi, l'usinage des matériaux composites est considéré aujourd'hui comme un véritable défi pour les industriels et les chercheurs. Plusieurs travaux de recherche ont été publiés visant à évaluer l'effet des paramètres de coupe sur l'usinage des composites renforcés par fibres de carbone, de verre ou des fibres d'aramide.

1- Le perçage :

Le perçage est l'opération d'enlèvement de matière la plus répandue dans le domaine de l'usinage des matériaux composites. Il est utilisé pour la réalisation des trous nécessaires à l'assemblage des structures composites par rivetage. L'outil utilisé lors des opérations de perçage (foret hélicoïdal) est caractérisé par un diamètre d , un angle de pointe et un angle de dépouille (figure 1). Le choix de la géométrie de l'outil de coupe influe considérablement sur les résultats de l'opération de perçage : Efforts de coupe, endommagement, usure des outils, etc.

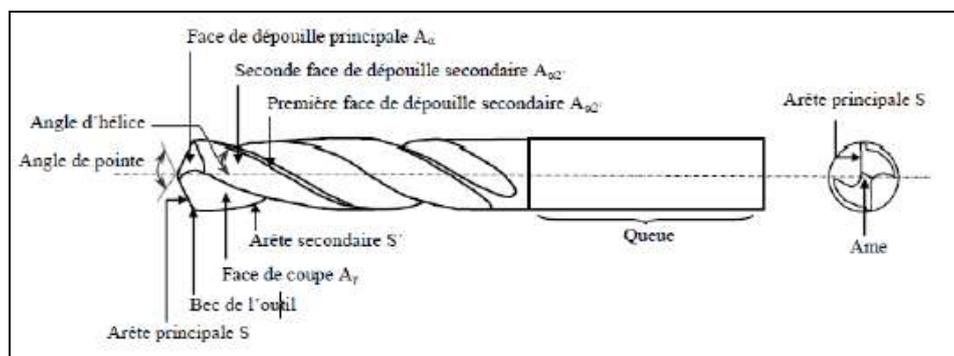


Figure 1: Arêtes et surfaces de la partie active d'un foret de perçage

Les conditions d'usinage jouent également un rôle important dans les résultats du perçage. Les principaux paramètres qui doivent être contrôlés sont la vitesse de coupe V_c et la vitesse d'avance V_f comme le montre la figure 2.

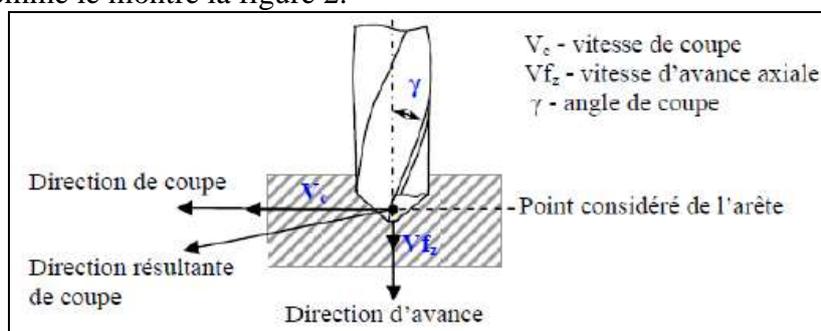


Figure 2 : Paramètres de coupe

Ces deux paramètres sont définis à partir des relations suivantes :

$$V_c = \frac{\pi N d}{1000}$$

$$V_f = f Z N$$

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

Plusieurs études ont été menées sur le perçage des composites à fibres longues (FRP). Avec un but principal qui est de trouver le bon compromis entre les conditions d'usinage et l'état d'usure des outils utilisés afin d'obtenir les pièces les plus saines possibles et réduire l'usure excessive des outils de perçage.

Les mécanismes d'endommagement rencontrés lors du perçage des FRP diffèrent de ceux rencontrés lors de l'usinage des matériaux homogènes, où, les défauts de perçage sont généralement liés à la rugosité de la surface du trou et à sa géométrie. En effet, la nature fibreuse et non homogène des FRP facilite l'apparition et la propagation de l'endommagement en perçage. La classification de ces défauts se fait selon le sens du perçage, de l'entrée vers la sortie de trou comme le montre la figure 3.

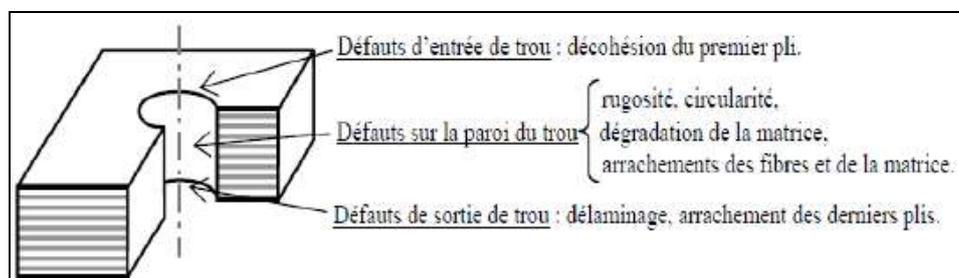


Figure 3 : Critères de qualité pour une opération de perçage

Parmi les défauts les plus récurrents qui se créent au niveau de la pièce usinée on trouve le délaminage en entrée et/ou sortie de trou, l'arrachement des fibres et la fissuration de la matrice. Le délaminage est l'un des défauts les plus critiques qu'il faut absolument éviter en perçage, (figure 4).

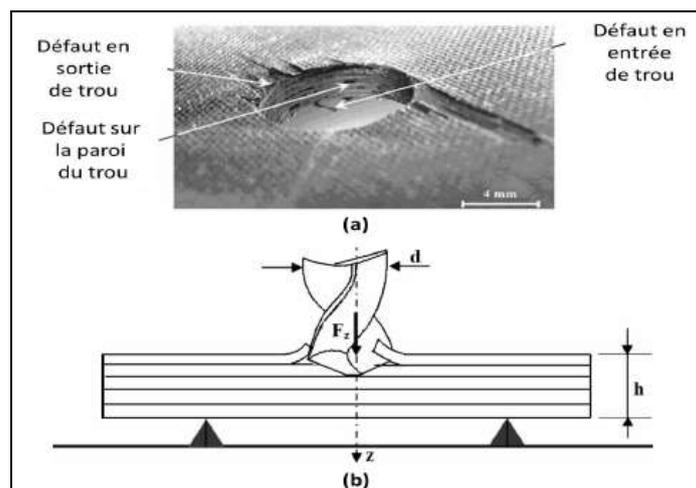


Figure 4 : Opération de perçage. (a) Localisation des principaux défauts générés lors du perçage des composites en carbone/époxy, (b) schématisation d'un défaut à l'entrée du trou

L'observation du délaminage en sortie du trou montre que ce défaut est beaucoup plus important qu'à l'entrée. En effet, le délaminage en sortie de trou est essentiellement dû à l'effort de poussée du foret (F_z) couplé à la vitesse d'avance ainsi que le type d'affutage et l'état d'usure des forets.

Le défaut en sortie de trou se produit généralement au niveau de l'interface qui sépare les deux derniers plis du stratifié. Les déformations sont assez importantes dans cette zone, qui est soumise à des sollicitations sous l'effet de la poussée de l'outil au cours de son avancement. Le délaminage est ainsi amorcé une fois l'effort critique de la poussée dépasse l'effort de cohésion de la matrice. Il est à noter que l'utilisation ou non d'un appui sur lequel repose la pièce joue considérablement sur la propagation du délaminage, figure 5.

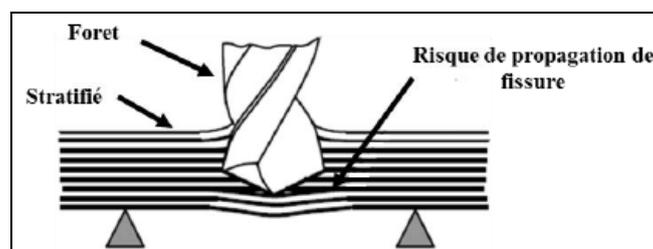


Figure 5 : Formation d'un défaut de sortie de trou sur un stratifié

La vitesse d'avance V_f a plus d'effet sur les défauts en sortie de trou que la vitesse de coupe V_c . En effet, une augmentation de la vitesse d'avance V_f génère une augmentation du délaminage car elle exerce un effort axial plus important. Parmi les solutions qui peuvent être apportées afin de limiter ce type de défaut, on retient l'utilisation d'avant trous qui font diminuer ces défauts de sortie. L'effort de poussée doit être maintenu au-dessous de l'effort critique, afin de limiter les défauts en sortie de trou. Cependant cela entraînera une usure rapide du foret.

Les défauts en entrée de trou sont quant à eux occasionnés par l'effet de pelage qu'engendre l'arête de coupe principale du foret. Comme le montre la figure 6, le défaut de pelage est amorcé principalement au niveau des interfaces se trouvant entre les premiers plis atteints par le bec du foret. Ce défaut s'accroît avec l'augmentation de l'angle de coupe (γ), l'angle d'hélice du foret, la vitesse d'avance V_f et la vitesse de coupe V_c .

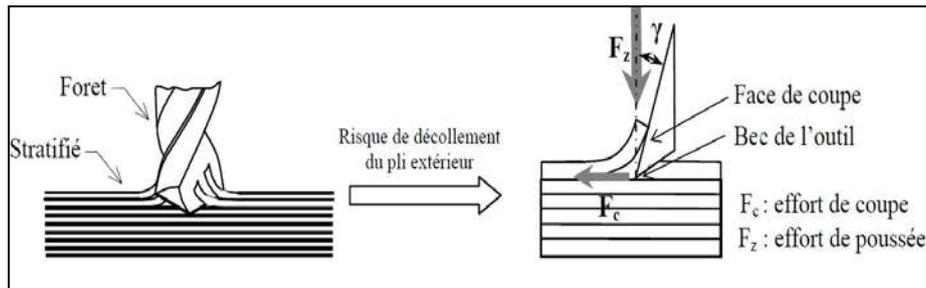


Figure 6 : Formation des défauts d'entrée du foret dans un composite stratifié

Un autre type d'endommagement, qui peut être généré par l'opération de perçage et qui peut jouer un rôle très néfaste sur la tenue mécanique du matériau, est l'arrachement de la matière au niveau des parois des trous. Cet endommagement se produit pour des angles particuliers entre l'arête de l'outil et l'orientation des fibres. Il se traduit par l'arrachement de fragments du matériau (figure 7).

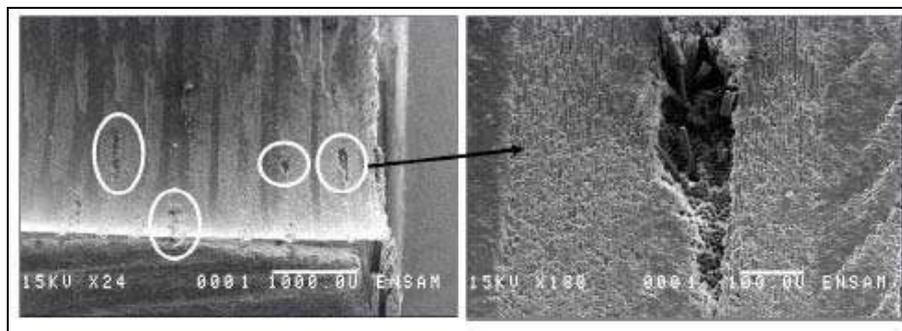


Figure 7 : Micrographies montrant les défauts d'entrée du foret dans un composite stratifié

La figure 8 présente l'évolution de l'angle que forme l'arête de l'outil avec l'orientation des fibres. La position angulaire de l'arête de coupe est égale à zéro lorsque l'arête de coupe est alignée avec les fibres, elle est égale à 90° lorsque l'arête de coupe est perpendiculaire aux fibres.

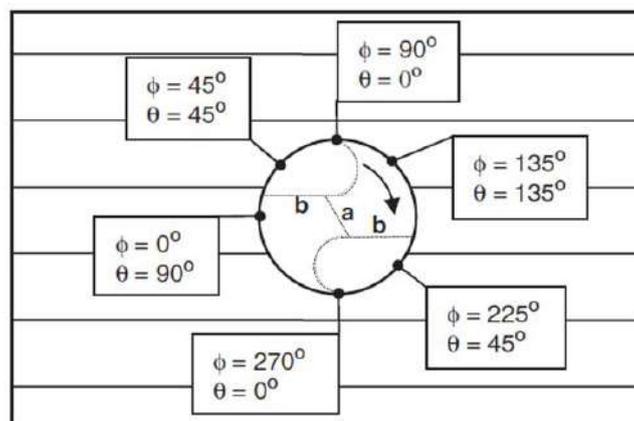


Figure 8 : Définition de l'orientation des fibres lors du perçage des composites unidirectionnels, (a) le bord tranchant (b) l'arête de coupe principale

Plusieurs études expérimentales se sont intéressées à l'effet des paramètres d'usinage et des outils sur les efforts d'avance lors du perçage des composites à fibres longues. On a étudié l'influence de la géométrie des outils et des vitesses d'avance sur les efforts d'avance. Les résultats de cette étude sont reportés sur la figure 9. Cette dernière montre que les efforts augmentent avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Ces résultats concluent que l'action

combinée de l'avance, de la vitesse de rotation, du diamètre de l'outil et de l'épaisseur de la plaque à percer sont les paramètres les plus influents sur l'effort axial F_z .

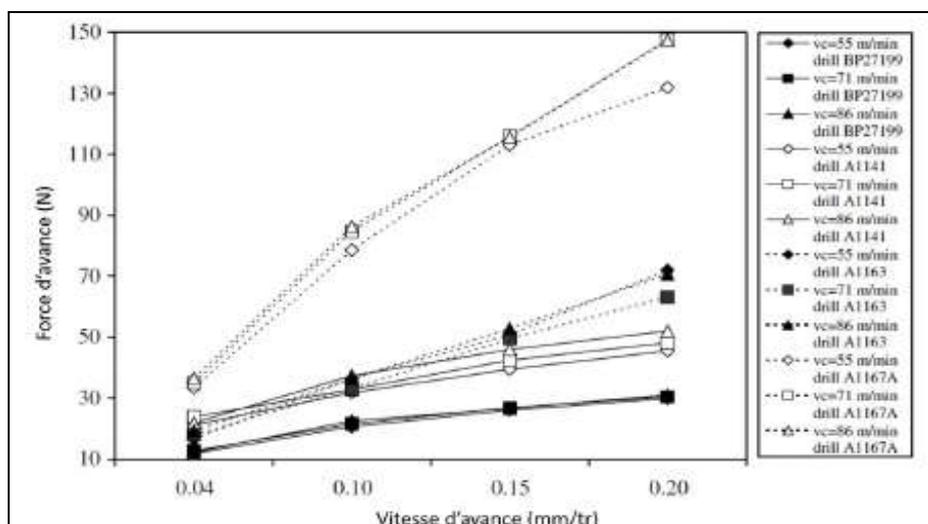


Figure 9 : Effet de la vitesse de coupe et d'avance sur l'effort axial pendant le perçage du GFRP. Dans cette étude, 4 forets différents ont été testés

2- Le détourage ou le fraisage de profil :

Le fraisage est l'un des procédés d'enlèvement de matière les plus utilisés dans la préparation des pièces en composite. Contrairement au fraisage des matériaux métalliques, le fraisage des composites FRP se distingue par un taux d'enlèvement de matière assez faible. En effet, les pièces fabriquées à partir des composites FRP, en utilisant le procédé de moulage, se retrouvent une fois démoulées sous une forme quasi finie, qui aura éventuellement besoin de quelques opérations de finition comme l'ébarbage et le rognage, figure 10.

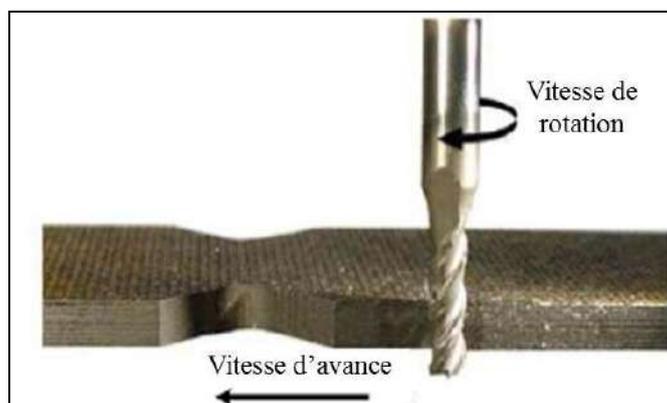


Figure 10 : Opération de détourage (fraisage de profil).

Les opérations de fraisage les plus récurrentes sont le détourage et le fraisage en bout comme le montre la figure 11. L'opération de détourage utilise les arêtes de coupe qui sont à la périphérie de l'outil et la surface usinée est parallèle à l'axe de rotation de la fraise. L'engagement dans la pièce à usiner est quant à lui dans la direction radiale de l'hélice (figure 11.b).

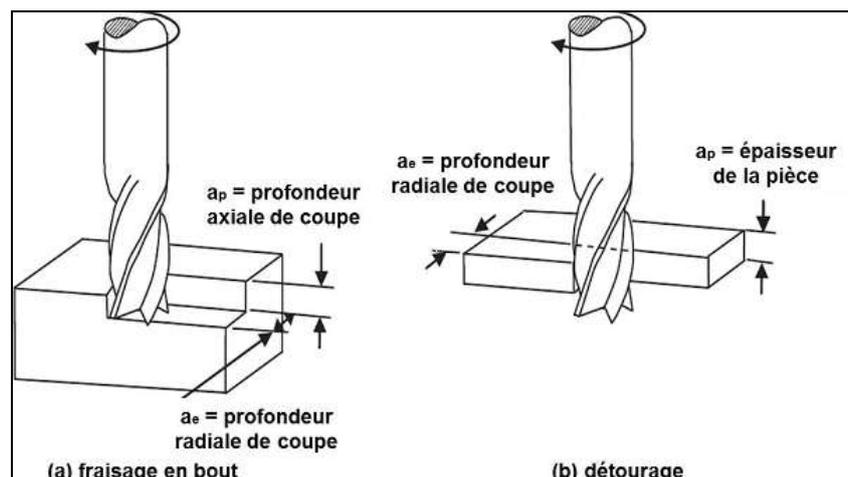


Figure 11 : Opération de fraisage (a) en bout et (b) de détourage (fraisage de profil).

Le second type de fraisage en bout est le fraisage en avalant, dans ce cas la pièce est attaquée par la partie épaisse du copeau. Le copeau formé dans les deux cas de figures a la forme d'une virgule (figure 12). Les forces d'engagement quant à elles, sont élevées ce qui provoque la poussée de la pièce contre les surfaces de serrage. Les forces de coupe évoluent selon la configuration du fraisage en bout. Dans le cas d'un fraisage en opposition les efforts sont nuls lors de l'engagement de l'outil et maximaux au moment où l'arête de coupe s'apprête à quitter la pièce. Le contraire se produit dans le cas d'un fraisage en avalant, les forces d'usinage sont maximales au moment où l'outil s'engage dans la pièce et minimale lorsque l'outil s'apprête à la quitter. Comme pour les autres opérations d'usinage, le fraisage engendre beaucoup d'usure sur les outils de coupe et cela est principalement dû à la nature abrasive des renforts fibreux. Par conséquent, le choix du matériau des outils de coupe doit être fait avec attention afin de minimiser l'usure. De plus, la nature des fibres et leur fraction volumique ainsi que celle de la matrice conditionnent le choix de l'outil de coupe et des paramètres d'usinage.

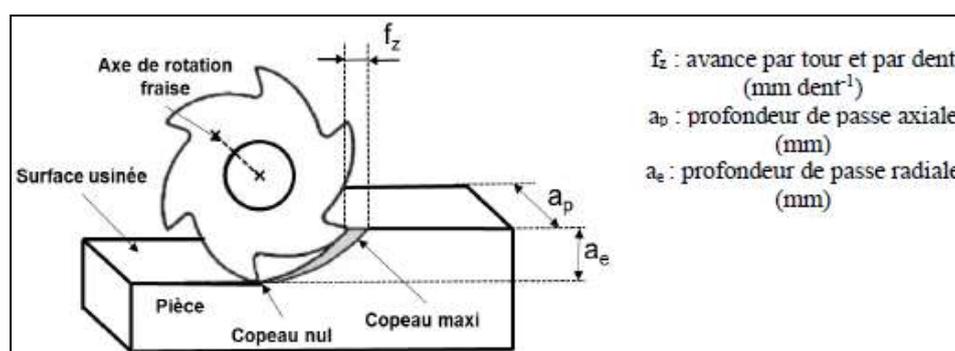


Figure 12 : Opération de contournage

Il existe deux types de fraisage en bout, en fonction de la manière dont l'arête de coupe se rapproche de la pièce à usiner. Le premier est le fraisage en opposition comme le montre la figure 12, où la pièce est attaquée par la partie nulle du copeau.

3- Opération de coupe orthogonale :

La coupe orthogonale est la plus simple des opérations d'usinage. Elle était souvent utilisée dans les recherches académiques ou travaux R&D des grands groupes industriels. Malgré sa simplicité, elle permet d'étudier de manière efficace certains phénomènes physiques tels que la formation de copeaux et l'endommagement. Cette configuration simple permet de mener

des études très pertinentes sur les phénomènes cités précédemment et a l'avantage de réduire le nombre de paramètres qui interviennent en usinage industriel (fraisage, perçage) en simplifiant la cinématique de la coupe et les géométries de l'outil et de la pièce. Lors de la coupe orthogonale, l'arête de coupe de l'outil est perpendiculaire à la direction de la vitesse de coupe. Les principaux paramètres sont présentés sur la figure 13 : l'angle d'inclinaison de l'outil par rapport à la surface de contact de la pièce dénoté γ et appelé angle de coupe.

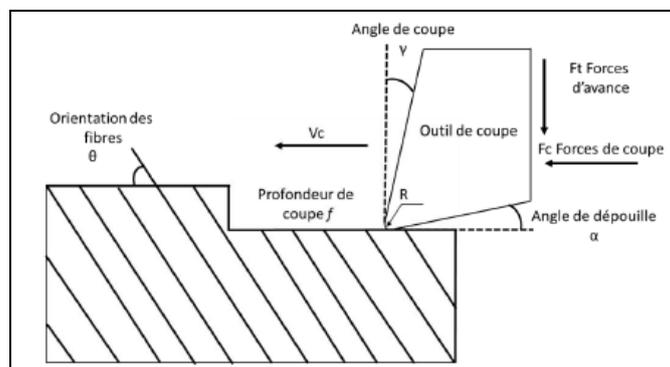


Figure 13 : Schématisation de la coupe orthogonale.

Quant à l'angle α que forme l'outil avec la surface usinée, il est appelé angle de dépouille. L'outil se déplace suivant la direction de coupe avec une vitesse V_c appelée vitesse de coupe. Dans cette configuration, l'arête de l'outil de coupe est perpendiculaire aux directions de coupe et d'avance. L'orientation des fibres comme le montre la figure 13 est donnée par l'angle θ . Ce dernier est l'angle que fait l'orientation des fibres avec la direction de la coupe. Par conséquent, l'angle θ sera de 90° dans le cas où les fibres sont perpendiculaires à la direction de la coupe, et de 0° dans le cas où les fibres sont orientées dans la même direction que celle de la coupe.

4. Analyse du processus de formation des copeaux

Durant l'usinage des matériaux métalliques, la formation des copeaux est principalement gouvernée par la déformation plastique, tandis que lors de l'usinage des matériaux composites CFRP, elle se fait par compression et rupture des fibres et de la matrice.

Des études expérimentales sur les mécanismes de formation des copeaux dans les composites ont été menées sur la coupe orthogonale des composites unidirectionnels à fibres longues et matrice polymère CFRP-UD en utilisant le dispositif d'arrêt rapide et la méthode du macro-copeau. Le dispositif d'arrêt rapide (Quick-Stop) était largement utilisé dans l'étude de l'usinage des métaux.

Concernant la méthode du macro-copeau, elle consiste à poser une couche de colle sur la surface libre de la pièce dans la direction parallèle au plan de coupe. Cela permet de garder les copeaux collés à la couche adhésive au cours de l'opération d'usinage. Cette technique s'est révélée très pertinente. Grâce à elle, les copeaux peuvent être mesurés et examinés au microscope afin de comprendre le processus de leur formation et l'identification de leur morphologie. La principale conclusion de ce travail est que l'orientation des fibres joue un rôle déterminant dans la formation des copeaux.

Quatre types de mécanismes de formation de copeaux ont été observés par différents auteurs, figure 14 :

- pour le cas des fibres orientées à 0° , le copeau est formé par une succession de ruptures. La première se fait horizontalement dans la direction d'avance de l'outil et elle est causée par la

décohésion fibre/matrice, combinaison d'une ouverture (chargement en mode I), figure 15, et d'un glissement droit dans la direction d'avance de l'outil (chargement en mode II). La séparation du copeau du reste de la pièce est engendrée par la rupture des fibres dans la direction perpendiculaire à la direction d'avance de l'outil, figure 14.a;

- pour une orientation positive des fibres allant jusqu'à 75° , la formation des copeaux est produite par une succession de deux ruptures. La première est appelée «rupture primaire » et elle est provoquée par la compression induite par le cisaillement perpendiculaire à l'axe de la fibre. La seconde rupture est appelée rupture secondaire. Elle se produit le long de l'interface fibre/matrice jusqu'à atteindre la surface libre de la pièce et par conséquent la formation totale du copeau, figure 14.b;

- pour une orientation des fibres de 90° , la formation des copeaux est aussi produite par une succession de deux ruptures. La rupture primaire est engendrée par l'arrachement des fibres sous l'avancement de l'outil. Alors que la rupture secondaire est provoquée par la décohésion fibre/matrice sous l'effet des contraintes de cisaillement. Elle se propage jusqu'à la surface libre de la pièce, donnant lieu à la formation totale du copeau, figure 14.c;

- Pour une orientation des fibres de -45° , la formation des copeaux est produite par une rupture primaire se propageant le long de l'interface fibre/matrice vers l'intérieur de la pièce. Etant orientées négativement les fibres fléchissent sous l'effet de l'avancement de l'outil. Par conséquent une rupture secondaire apparaît et prend la direction de la surface libre de la pièce. La formation totale du copeau se fait au moment où la rupture secondaire atteint la surface libre de la pièce, figure 14.d.

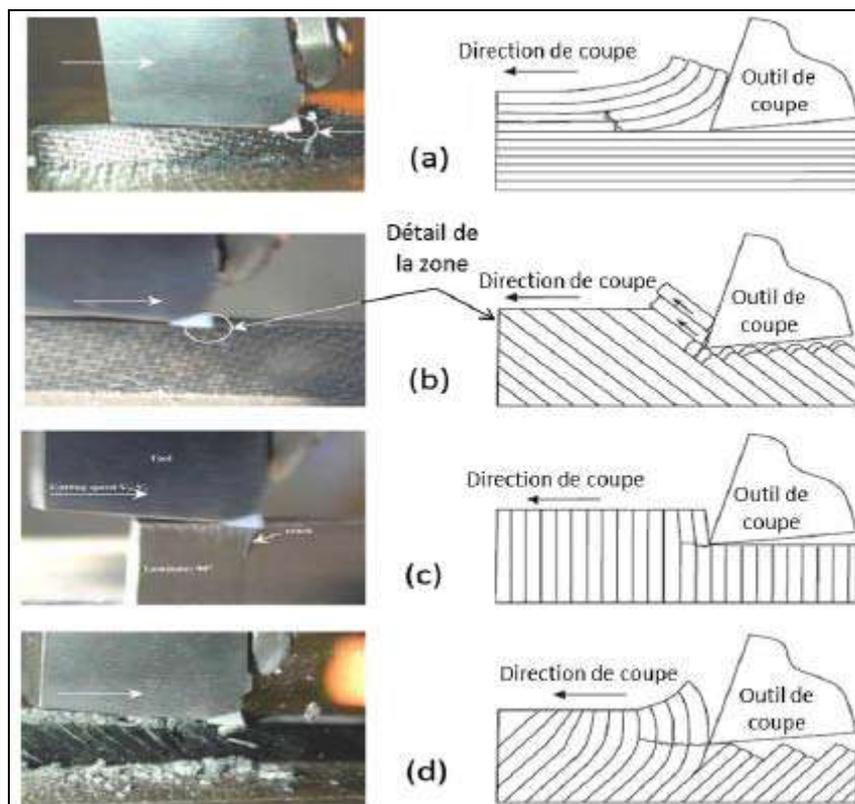


Figure 14 : Etude expérimentale de la formation de copeaux pour : (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = +45^\circ$, (c) $\theta = +90^\circ$, (d) $\theta = -45^\circ$

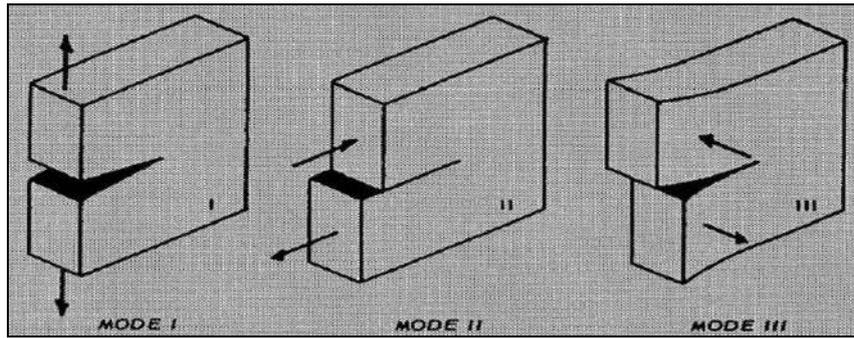


Figure 15 : Différents modes de chargement

II- USINAGE-DES-MATIERES-PLASTIQUES

Dans le domaine des matières plastiques, le plus gros volume de pièces est généralement réalisé par injection. Toutefois cette technologie est mal ou peu adaptée à la réalisation de pièces mécaniques de l'unité à la petite et moyenne série, voire pour des grandes séries de pièces dont la géométrie ou les caractéristiques recherchées ne permettent pas le moulage. D'autre part, certains matériaux comme les matériaux à base de PTFE, les polyéthylènes à très haut poids moléculaire, le polyimide (PI), le polybenzimidazole (PBI) ne sont pas ou très difficilement injectables.

Les matières plastiques techniques s'usinent facilement avec les machines-outils conventionnelles pour l'usinage des métaux et l'usinage du bois. Cependant, il est nécessaire d'observer certaines précautions et d'adapter les outils et paramètres afin d'obtenir les meilleurs résultats. Par rapport aux métaux, on notera plus particulièrement des coefficients de dilatation thermique très supérieurs, la reprise d'humidité de certains matériaux, la faible conductibilité thermique qui ne permet pas un bon refroidissement et peut engendrer contraintes internes et déformations.

1- **Recommandations :**

1.1- **Outils :**

On peut utiliser des outils en acier au carbone, en acier rapide et en acier dur. Cependant, en général, et en particulier pour les grandes séries, on préférera des outils à pastille carbure de tungstène ou diamant. Ils seront indispensables pour l'usinage des matériaux renforcés fibres de verre ou fibres de carbone. Les outils doivent être en permanence lisses et bien affûtés. Ils doivent avoir suffisamment de dépouille pour que seule l'arête de coupe soit au contact du matériau. Une bonne évacuation régulière des copeaux doit être assurée, surtout lors des perçages. Une vitesse de coupe et une avance adaptées et régulières doivent être respectées pour assurer les conditions optimum et la meilleure finition.

1.2- **Refroidissement :**

Un refroidissement doit être appliqué lors d'un usinage délicat et/ou créant un développement de chaleur important (surtout perçage). Les liquides type huiles solubles conviennent généralement très bien. Toutefois, ils ne doivent pas être utilisés lors de l'usinage de matériaux sensibles à la fissuration sous contrainte tels que PC, PEI, PSU. Dans ces cas, les réfrigérants les mieux adaptés sont l'eau pure ou l'air comprimé.

1.3- **Tolérances d'usinage :**

Les tolérances d'usinage pour les matériaux thermoplastiques sont largement plus importantes que celles normalement appliquées pour les métaux. Ceci est dû à l'élasticité de la matière, au coefficient de dilatation thermique plus élevé, à la reprise d'humidité et aux déformations éventuelles liées à la libération de contraintes internes lors de l'usinage. Ce dernier phénomène se produit généralement lors d'usinages asymétriques ou avec des changements de section importants. Dans ces cas, il est conseillé de procéder à un traitement thermique de stabilisation après ébauche et avant usinage de finition.

En raison de ces caractéristiques, à la conception des pièces, il est nécessaire de déterminer les dimensions et tolérances en fonction des conditions normales d'utilisation – température, humidité du milieu de fonctionnement. Il ne sert à rien de rechercher des précisions dimensionnelles qui peuvent s'avérer souvent inutiles et surtout coûteuses.

IMPORTANT :

Les dimensions et tolérances des pièces doivent être mesurées sur des pièces à température ambiante en cours de fabrication, au contrôle final et au contrôle de réception. Pour éviter des contestations entre le donneur d'ordre et l'usineur, des conventions de contrôle doivent être établies définissant les appareillages et les conditions de mesures.

Fraisage :

Pour réaliser un bon fraisage, il est conseillé d'utiliser des fraises à plaquettes rapportées qui favorisent l'évacuation des copeaux et restent affûtées et opérationnelles plus longtemps.

Perçage :

Le perçage est une opération délicate car il entraîne un échauffement rapide du matériau avec la génération de contraintes internes. Les forets en acier rapide conviennent pour le perçage des matériaux synthétiques mais génèrent rapidement un échauffement important. Pour limiter cet échauffement, il est nécessaire d'utiliser un réfrigérant et de dégager régulièrement le foret (débouillage) pour évacuer les copeaux, surtout dans le cas de perçage profond. Pour le forage de trous de grand diamètre, il est conseillé :

- d'utiliser un foret à lame affinée pour limiter la friction en fond de perçage, et par conséquent l'échauffement qui peut être à l'origine de la création de contraintes internes jusqu'à l'éclatement des ébauches,
- de procéder par étape en réalisant un avant trou (maxi 15 mm), puis en agrandissant progressivement avec des forets de diamètres de plus en plus gros et/ou avec un grain d'alésage 1 point à col de cygne jusqu'au diamètre final.

Pour des matériaux comme le PA66GF30, le PETP, le PEEK, le PPS, il est recommandé de percer par carottage avec un outil à lame plate et rigide dont l'arête de coupe est exactement à hauteur du centre.

Sciage :

Pour le sciage, il est possible d'utiliser des scies à ruban, des scies circulaires (de préférence) ou des scies alternatives. Les dents doivent être bien espacées et la voie suffisante pour permettre la bonne évacuation des copeaux. Elles doivent être bien affûtées pour réduire la friction et l'échauffement consécutif, pour éviter le serrage à l'arrière de l'arête de coupe causant un échauffement pouvant entraîner le blocage de la scie. Pendant l'opération de sciage, la pièce doit être convenablement maintenue pour éviter les vibrations.

Tournage :

Le tournage ne présente pas de difficultés particulières. Comme pour les autres techniques d'usinage, il faut veiller au choix des outils, à leur bon affûtage, au respect des vitesses de coupe et d'avance. Dans la majorité des cas, pour les matériaux thermoplastiques, les copeaux sont longs et doivent être rapidement dégagés pour éviter qu'ils s'enroulent sur les pièces. Pour les matériaux thermodurcissables, les copeaux sont courts avec de la poussière de résine. Dans ce cas, une aspiration efficace est nécessaire, voire obligatoire.

Autres recommandations :

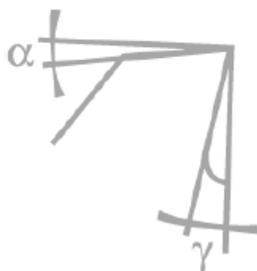
- limiter les efforts de fixation qui pourraient contraindre et déformer la pièce,
- éviter les angles vifs dans les usinages intérieurs (rayon de raccordement 1 mm mini),
- pour les usinages de précision, il peut être judicieux de procéder à une stabilisation thermique des ébauches, et de laisser reposer la pièce avant la finition,

- réaliser des chanfreins sur les arêtes vives,
- éviter les filetages à arêtes triangulaires qui sont source d'amorce de rupture; leur préférer les filets ronds,
- éviter l'usage d'outils à fileter et les tarauds, en particulier ces derniers qui engendrent des contraintes excessives et peuvent ainsi entraîner des fissurations internes,
- stocker les pièces finies dans des sachets de PE avec un produit siccatif.

USINAGE DES THERMODURS :

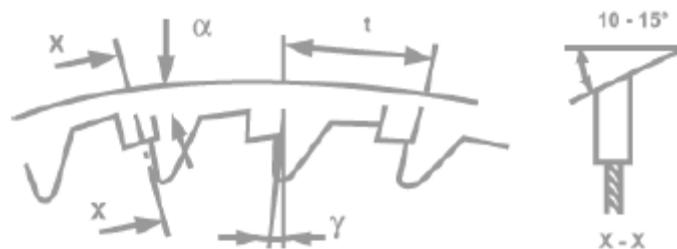
La plupart des recommandations pour les thermoplastiques s'appliquent à l'usinage des thermodurs. On notera plus particulièrement :

- Les outils doivent être et rester parfaitement affûtés.
- Les angles de dépouille doivent être importants pour garantir que seul le tranchant de l'outil est au contact de la pièce.
- Les thermodurs s'usinent généralement à sec. Toutefois, pour des finitions fines, il est possible d'utiliser modérément une huile minérale légère. La lubrification n'est pas recommandée dans le cas d'usinage de composants « électriques ».
- L'usinage à sec entraîne la génération de poussières. Aussi pour assurer les meilleures conditions de travail possibles, et être en conformité avec les législations et réglementations, il est nécessaire d'aspirer les poussières et copeaux au plus près de la source et de les évacuer dans les conditions requises pour la préservation des personnels et de l'environnement.
- Avec les thermodurs, il faut aussi tenir compte de l'orientation des renforcements et des risques potentiels de délaminage.

Fraisage :

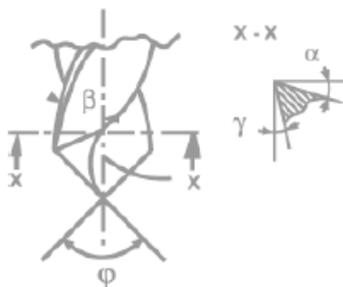
	Angle de dépouille α	Pente d'affûtage γ	Vitesse de coupe V(m/mn)	Avance S(mm/Rev)
PA 6 / PA 66	5 - 15	0 - 15	200 - 500	$\leq 0,05$
PA 66 GF30	5 - 15	0 - 15	50 - 150	$\leq 0,05$
PA 12	5 - 10	10 - 15	200 - 400	$\leq 0,05$
PA 4-6	5 - 15	0 - 15	200 - 500	$\leq 0,05$
POM / POM H-TF	5 - 15	0 - 15	200 - 400	$\leq 0,05$
POM-GF30	5 - 15	0 - 15	50 - 150	$\leq 0,05$
PETP PET-SL	5 - 15	0 - 15	150 - 300	$\leq 0,05$
PE HD/PE HMW/PP PEHD500	5 - 15	0 - 15	200 - 500	$\leq 0,05$
PE UHMW PEHD1000 PE8000	5 - 15	0 - 15	200 - 500	$\leq 0,05$
PEEK	5 - 15	0 - 15	150 - 300	$\leq 0,05$
PEEK-SL, GF30, CA30	5 - 15	0 - 15	50 - 150	$\leq 0,05$
PI Vespel®	5 - 15	0 - 15	50 - 100	$\leq 0,05$
PAI	5 - 15	0 - 15	150 - 300	$\leq 0,05$
PAI-SL	5 - 15	0 - 15	50 - 150	$\leq 0,05$
PTFE	5 - 15	3 - 30	100 - 1000	90 - 130
PVDF	5 - 15	0 - 15	200 - 500	$\leq 0,05$
PPS-SL	5 - 15	0 - 15	50 - 150	$\leq 0,05$
PEI	5 - 15	0 - 15	200 - 400	$\leq 0,05$
PSU / PPSU	5 - 15	0 - 15	200 - 400	$\leq 0,05$
PVC	5 - 10	0 - 10	1000	
PC	5 - 15	0 - 15	200 - 400	$\leq 0,05$
PMMA	2 - 10	2 - 10	2000	
PUR 90 sh	15 - 30	5 - 20	> 300	$\leq 0,05$
Toile bakérisée	12 - 15		200	$\leq 0,05$

Scie circulaire



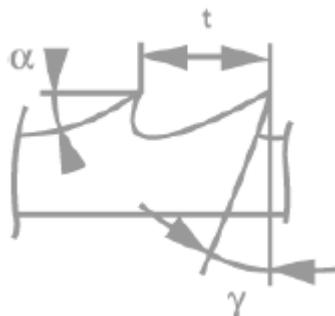
	Ange de dépouille α	Pente d'affûtaqe γ	Vitesse de coupe V (m/mn)	Pas de denture t (teeth/mm)
PA 6 / PA 66	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45
PA 66 GF30	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PA 12	30 - 40	5 - 8	600 - 1200	6 - 10
PA 4-6	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45
POM / POM H-TF	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45
POM-GF30	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PETP PET-SL	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PE HD/PE HMW/PP	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45
PE UHMW PEHD1000	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45
PEEK	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PEEK-SL, GF30, CA30	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PI Vespel®	10 - 15	0 15	1000 - 3000	8 - 25
PAI	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PAI-SL	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PTFE			1000 - 3000	8 - 45
PVDF	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45
PPS-SL	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PEI	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PSU / PPSU	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PVC	5 - 10	0	3000 - 4000	3 - 5
PC	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PMMA	5 - 10	0	1500 - 2000	3 - 5

Perçage



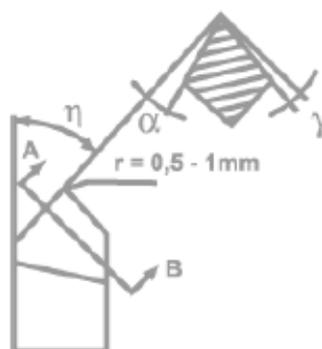
	Angle de déouille α (°)	Pente d'affûtage γ (°)	Vitesse de coupe V (m/mn)	Avance S (mm/Rev)	Angle de pointe ϕ (°)
PA 6 / PA 66	10 - 15	3 - 5	50 - 100	0,1 - 0,3	90 - 120
PA 66 GF30	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PA 12	10 - 20	3 - 5	20 - 50	0,1 - 0,3	90 - 120
PA 4-6	10 - 15	3 - 5	50 - 100	0,1 - 0,3	90 - 120
POM / POM H-TF	5 - 10	3 - 5	50 - 100	0,1 - 0,3	90 - 120
POM-GF30	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PETP PET-SL	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PE HD/PE HMW/PP	5 - 15	15 - 25	40 - 70	0,1 - 0,3	70 - 90
PE UHMW	5 - 15	15 - 25	40 - 70	0,1 - 0,3	70 - 90
PEEK	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PEEK-SL, GF30, CA30	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PI Vespel®	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PAI	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PAI-SL	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PTFE	10 - 15	3 - 5	100 - 300		130
PVDF	10 - 15	3 - 5	50 - 100	0,1 - 0,3	90 - 120
PPS-SL	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 - 0,3	90 - 120
PEI	5 - 10	3 - 5	50 - 100	0,1 - 0,3	90 - 120
PSU / PPSU	5 - 10	3 - 5	50 - 100	0,1 - 0,3	90 - 120
PVC	5 - 10	3 - 5	30 - 120	0,1 - 0,5	60 - 100
PC	5 - 10	10 - 20	50 - 100	0,2 - 0,3	90 - 120
PMMA	5 - 10	0 - 4	20 - 60	0,1 - 0,5	60 - 90
PUR 90 sh	5 - 10	20 - 30	25 - 60	0,02 - 0,4	> 90
Toile bakéalisée	12 - 15		15 - 120	0,1 - 0,5	60 - 100

Scie à ruban



	Angle de dépouille α	Pente d'affûtage γ	Vitesse de coupe V (m/mn)	Pas de denture t (teeth/mm)
PA 6 / PA 66	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10
PA 66 GF30	25 - 40	0 - 8	50 - 200	4 - 6
PA 12	30 - 40	5 - 8	500 - 1500	4 - 10
PA 4-6	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10
POM / POM H-TF	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10
POM-GF30	25 - 40	0 - 8	50 - 200	4 - 6
PETP PET-SL	25 - 40	0 - 8	50 - 400	4 - 10
PE HD/PE HMW/PP	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10
PE UHMW PEHD1000 PE8000	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10
PEEK	25 - 40	0 - 8	50 - 400	4 - 10
PEEK-SL, GF30, CA30	25 - 40	0 - 8	50 - 200	4 - 6
PI Vespel®	25 - 40	0 - 8	50 - 150	4 - 10
PAI	25 - 40	0 - 8	50 - 400	4 - 10
PAI-SL	25 - 40	0 - 8	50 - 200	4 - 6
PTFE	25 - 40	0 - 8	50 - 500	3 - 12
PVDF	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10
PPS-SL	25 - 40	0 - 8	50 - 200	4 - 6
PEI	25 - 40	0 - 8	50 - 400	4 - 10
PSU / PPSU	25 - 40	0 - 8	50 - 400	4 - 10
PVC	30 - 40	0 - 5	1200	3
PC	25 - 40	0 - 8	50 - 400	4 - 10
PMMA	30 - 40	0 - 5	1200	3
PUR 90 sh	20 - 40	5 - 10	> 200	5 - 10
Toile bakélisée				

Tournage



	Angle de dépouille α (°)	Pente d'affûtage γ (°)	Vitesse de coupe V (m/mn)	Avance S (mm/Rev)	Angle d'arête η (°)
PA 6 / PA 66	5 - 15	0 - 10	50 - 150	0,05 - 0,5	0 - 45
PA 66 GF30	5 - 15	0 - 10	100 - 200	0,05 - 0,3	0 - 45
PA 12	10 - 20	5 - 8	400 - 500	0,08 - 1	10 - 20
PA 4-6	5 - 15	0 - 10	50 - 150	0,05 - 0,5	0 - 45
POM / POM H-TF	5 - 15	0 - 10	200 - 500	0,05 - 0,5	0 - 45
POM-GF30	5 - 15	0 - 10	100 - 200	0,05 - 0,3	0 - 45
PETP PET-SL	5 - 15	0 - 10	200 - 400	0,05 - 0,5	0 - 45
PE HD / PE HMW / PP	5 - 15	0 - 10	50 - 150	0,05 - 0,5	0 - 45
PE UHMW PEHD1000 PE8000	5 - 15	0 - 10	50 - 150	0,05 - 0,5	0 - 45
PEEK	5 - 15	0 - 10	200 - 400	0,05 - 0,5	0 - 45
PEEK -SL, GF30, CA30	5 - 15	0 - 10	100 - 200	0,05 - 0,3	0 - 45
PI Vespel®	5 - 10	3 - 5	50 - 150	0,05 - 0,3	0 - 45
PAI	5 - 15	0 - 10	200 - 400	0,05 - 0,5	0 - 45
PAI-SL	5 - 15	0 - 10	100 - 200	0,05 - 0,3	0 - 45
PTFE	10 - 15	15 - 20	100 - 300	0,05 - 0,25	0 - 45
PVDF	5 - 15	0 - 10	50 - 150	0,05 - 0,5	0 - 45
PPS-SL	5 - 15	0 - 10	100 - 200	0,05 - 0,3	0 - 45
PEI	5 - 15	0 - 10	200 - 400	0,05 - 0,4	0 - 45
PSU / PPSU	5 - 15	0 - 10	200 - 400	0,05 - 0,4	0 - 45
PVC	8 - 10	0 - 5	200 - 750	0,3 - 0,5	50 - 60
PC	5 - 15	0 - 10	200 - 400	0,05 - 0,4	0 - 45
PMMA	5 - 10	0 - 4	200 - 300	0,1 - 0,2	15
PUR 90 sh	10 - 15	15 - 25	100 - 300	0,1 - 0,3	
Toile bakélisée	10 - 15		90 - 300	0,05 - 0,5	20 - 35