

Usinage des polymères

par **Alain DESSARTHE**

*Ingénieur responsable du service Conception-industrialisation des polymères
et composites au Centre technique des industries mécaniques (CETIM)*

1. Généralités.....	BM 7 426 - 2
1.1 Comportements vis-à-vis de l'usinage	— 2
1.2 Spécificité du procédé.....	— 2
2. Usinage par enlèvement de copeaux	— 3
2.1 Cisaillage, poinçonnage.....	— 3
2.2 Sciage	— 3
2.3 Tournage.....	— 4
2.4 Fraisage et gravure	— 5
2.5 Perçage et alésage.....	— 5
2.6 Filetage, taraudage.....	— 6
2.7 Limage, rabotage. Ébavurage.....	— 6
2.8 Meulage, ponçage, sablage.....	— 6
2.9 Polissage	— 6
3. Paramètres par famille de polymères	— 7
3.1 Polystyrène et ABS	— 7
3.2 Polyéthylène et polypropylène.....	— 8
3.3 PVC.....	— 8
3.4 Polymères cellulosiques	— 8
3.5 Polymères acryliques	— 9
3.6 Polycarbonates	— 9
3.7 Poly(oxyde de phénylène) (PPO).....	— 10
3.8 Polyoxyméthylènes ou acétals	— 11
3.9 Polyesters thermoplastiques (PET, PBT)	— 12
3.10 Polyamides et polyamides-imides (PAI)	— 12
3.11 Polymères fluorés (PTFE, PVDF).....	— 13
3.12 Polysulfones, polyétherimide et polycétones	— 13
3.13 Thermodurcissables.....	— 14
3.14 Polyuréthanes et caoutchoucs.....	— 14
4. Autres procédés	— 15
4.1 Découpe par laser.....	— 15
4.2 Découpe au jet d'eau.....	— 15
Pour en savoir plus	Doc. BM 7 426

Les polymères se mettent en œuvre le plus souvent par moulage ; cependant, des usinages sont assez souvent pratiqués pour différentes raisons comme :

- le perçage pour assemblage ultérieur par boulonnage ou rivetage ;
- le détourage de pièces moulées ;
- la fabrication de petites séries ;
- l'obtention de cotes extrêmement précises ;
- la découpe de préforme à thermoformer.

Pour cela, les **techniques d'usinage doivent être adaptées aux comportements spécifiques du polymère.**

Il faut noter, au préalable, que les données pratiques énumérées dans cet article émanent de documents techniques publiés par des sociétés spécialisées et qu'il est parfois apparu des indications contradictoires ; aussi est-il conseillé de retenir les valeurs proposées comme valeurs de base pour effectuer quelques essais préliminaires de manière à les confirmer ou à les réajuster à l'application prévue.

Pour l'usinage d'une matière donnée, il est conseillé de consulter à la fois le paragraphe correspondant à la technique d'usinage prévue (tournage, perçage, etc.) et celui correspondant à la nature de la matière.

Le lecteur se reportera au traité Plastiques et Composites pour de plus amples renseignements sur les caractéristiques et les méthodes de moulage des polymères.

1. Généralités

1.1 Comportements vis-à-vis de l'usinage

Les caractéristiques des polymères qui, de près ou de loin, ont une influence sur les opérations d'usinage, sont les suivantes :

- **le module d'élasticité et la dureté** : les plastiques sont très souples par rapport aux aciers (modules compris entre 1 000 et 20 000 MPa) et beaucoup moins durs, ce qui impose, par exemple, des précautions de serrage particulières pour ne pas déformer la pièce ni en marquer la surface ;

- **les contraintes internes** : les pièces en plastique contiennent souvent des contraintes internes après moulage, dues, en particulier, au retrait de la matière passant de l'état liquide à l'état solide. Il arrive fréquemment que l'usinage modifie la répartition de ces contraintes. Des précautions doivent par conséquent être prises pour qu'il n'y ait pas d'accumulation de contraintes susceptibles d'entraîner des fissurations. Un des remèdes peut être de pratiquer un recuit des pièces après moulage. La vitesse de refroidissement est un élément essentiel pour réduire les contraintes internes. Plus la température de recuit est élevée, plus la baisse de température doit être lente (tableau 1).

Parfois, l'usinage est réalisé après dégrossissage d'une ébauche. Dans ce cas, l'ébauche est généralement sans contraintes car celles-ci sont libérées lors du dégrossissage ;

- **la dilatation et la conductivité thermique** : les matières plastiques non chargées ont des coefficients de dilatation thermique généralement compris entre 50 et 200 $\mu\text{m}/\text{m.K}$. Ce sont des matériaux isolants, sauf ceux chargés de particules métalliques ou de fibres de carbone. La combinaison de ces 2 caractéristiques, grande dilatation thermique et faible conductivité, fait que la chaleur engendrée par l'opération d'usinage reste concentrée sur la zone usinée et entraîne une déformation thermique importante, voire un risque de dégradation thermique ;

Tableau 1 – Exemples de conditions de recuit sur plaques extrudées

Matériau	Température (°C)	Durée de chauffage selon épaisseur	Refroidissement
Polyéthylène – HD	120	2 h pour 20 mm à 7 h pour 120 mm	Baisse de 10 °C par heure et retirer les pièces à environ 25 °C
Polypropylène	140		
PVDF	150	1,5 h pour 10 mm à 2,5 h pour 30 mm	

- **l'usure des outils** : une grande partie des plastiques non chargés ont un comportement *autolubrifiant* et ne créent pas d'usure importante des outils. Par contre, ceux qui comportent des charges minérales (verre) ont tendance à accentuer l'usure des outils traditionnels d'usinage par enlèvement de copeaux ;

- **l'hygrométrie** : certains polymères absorbent un taux important d'humidité (polyamides, par exemple). Les phénomènes d'absorption ne sont pas instantanés mais se produisent au bout de quelques minutes, voire de quelques heures. Cela modifie les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles*. Il faut donc tenir compte du comportement du polymère en présence d'humidité, de la durée d'usinage, de la présence ou non d'un liquide de refroidissement, de l'ambiance hygrométrique de l'atelier, du fait que l'échauffement dû à l'usinage va *sécher* le matériau en surface, etc. ;

- **l'électrostatique** : certains plastiques développent des charges électrostatiques superficielles importantes par frottement, qui attirent les copeaux ou la poudre issus de l'usinage.

* Cette évolution intervient entre l'instant où on usine le polymère (échauffement donc séchage) et celui où on l'utilise (ambiance humide éventuellement donc dimensions différentes).

1.2 Spécificité du procédé

Les polymères ne sont généralement pas conducteurs d'électricité, l'usinage par électroérosion est donc impossible. D'autre part, l'usinage par ultrasons convient aux matériaux durs, ce qui n'est pas le cas des plastiques. Cela limite les procédés à l'usinage conventionnel, souvent qualifié d'usinage par enlèvement de copeaux et à la découpe par laser ou au jet d'eau.

L'usinage par **enlèvement de copeaux des plastiques** présente les caractéristiques générales suivantes.

■ Matériaux d'outils

- **Aciers rapides** : ce sont les moins chers à l'achat ; ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibres de verre. L'acier rapide est un acier allié comportant du carbone, du chrome et du tungstène (parfois du molybdène, du vanadium et du cobalt).

- **Carbures** : ils ont une plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides et sont d'un bon rapport prix/usure. L'outil peut être entièrement en carbure de tungstène (de cobalt, de titane ou de tantale parfois) ou plus souvent, car moins cher, constitué d'une plaquette rapportée et fixée sur un support métallique classique.

- **Diamants** : ce sont les plus chers et ils sont plutôt réservés à l'usinage de composites très abrasifs.

De nombreux développements sont en cours pour mettre au point des outils plus résistants à l'usure possédant des revêtements à base de nitrure de titane, par exemple.

■ Fluides de refroidissement

Ce sont :

- l'eau, sous forme de jet liquide continu ou vaporisé en fines gouttelettes ;
- le mélange eau-huile soluble (dans la mesure où l'huile est compatible avec le plastique) ;
- l'air, sous forme d'air comprimé soufflé ou par aspiration. Dans ce 2^e cas, il s'agit d'usinage créant de la poudre ou des copeaux très petits ; on a alors l'avantage de les récupérer dès leur formation.

Parfois, le refroidissement n'est pas nécessaire. C'est le cas de certains usinages de matières plastiques à faible coefficient de frottement (polyéthylène, par exemple). Dans ce cas très particulier, il peut être intéressant de prévoir quand même un soufflage d'air comprimé pour repousser le copeau et éviter qu'il ne vienne s'enrouler autour de l'outil. Il est en effet fréquent que le copeau ne se fragmente pas pendant l'usinage.

■ Fixation des pièces

La précaution essentielle consiste à éviter toute déformation. Il faut penser aussi que l'effort d'usinage est inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier ; il n'est donc pas nécessaire de serrer la pièce plastique avec le même effort.

Les plastiques sont plus souples que les métaux et fléchissent davantage que ces derniers ; c'est pourquoi les profondeurs de passe et les avances ne doivent pas être excessives. On obtient généralement les meilleurs résultats en travaillant à **très grande vitesse avec une faible avance et des outils bien affûtés et lisses**.

■ Tolérances dimensionnelles

Les mesures des cotes doivent toujours être effectuées après retour de la pièce à la température ambiante. Une tolérance de 0,1 à 0,2 % de la cote nominale est accessible sans précautions spéciales (tableau 2).

■ Hygiène et sécurité

L'usinage de certains plastiques peut créer un seul et unique copeau non fragmenté. À l'inverse, l'usinage de ceux très chargés en fibres de verre produit une poussière qui peut provoquer des risques pour l'opérateur et des dégradations sur les machines (rayures des glissières). D'autre part, l'échauffement des plastiques pendant l'usinage peut générer un dégagement de gaz, en très petite quantité, mais qui, à la longue, peut s'avérer nocif pour l'opérateur (exemple : le polyoxyméthylène dégage du formol, le PVC dégage des composés chlorés). Des aspirations efficaces sont alors impérativement recommandées. Il y a lieu, en cas de doute, de se renseigner sur les risques encourus et les précautions à prendre auprès de la Caisse régionale d'assurance maladie [1] ou de l'Institut national de recherche et sécurité [2].

Tableau 2 – Tolérances accessibles en conditions normales

Dimensions (mm)	Tolérance (mm)			
	tournage	fraisage	rabotage	perçage
≤ 25	0,04	0,05	0,1	0,05
25 à 50	0,05	0,08	0,15	–
50 à 100	0,08	0,1	–	–
100 à 300	0,1	0,15	–	–
> 300	0,15 à 0,3	0,18 à 0,25	–	–

2. Usinage par enlèvement de copeaux

2.1 Cisailage, poinçonnage

Le découpage et le poinçonnage de plaques en plastique d'une épaisseur pouvant aller jusqu'à 3,0 mm environ sont souvent possibles à la température ambiante ou en chauffant à environ 50 °C.

L'outil coupant doit être particulièrement bien affûté, non endommagé. Il doit y avoir un jeu maximal inférieur à 1 mm entre la partie coupante mobile et la partie fixe. L'angle de coupe doit être inférieur à 70°.

2.2 Sciage

On peut utiliser la plupart des types de scies (figure 1), mais la denture de la lame doit comporter une voie suffisante pour éviter l'obstruction des dents par les copeaux et réduire le frottement au minimum. Il faut proscrire l'emploi de lames de scie usées.

Les plastiques peuvent être découpés à l'aide d'une **scie égoïne à dents fines** ou d'une **scie à archet** pour métaux, mais les lames tendent à s'encrasser rapidement par suite de leur pas de denture trop faible.

Avec les **scies circulaires**, les surfaces de coupe sont très propres quand les dents de la lame de scie ne dépassent que faiblement (tableau 3) la plaque plastique à découper (plaque quasi tangentielle à la lame de scie). La formation de bavures, notamment, est réduite. Il est recommandé d'utiliser des lames de scie à dents légèrement avoyées, sinon on risque d'avoir des surfaces de coupe irrégulières et un grippage de la lame.

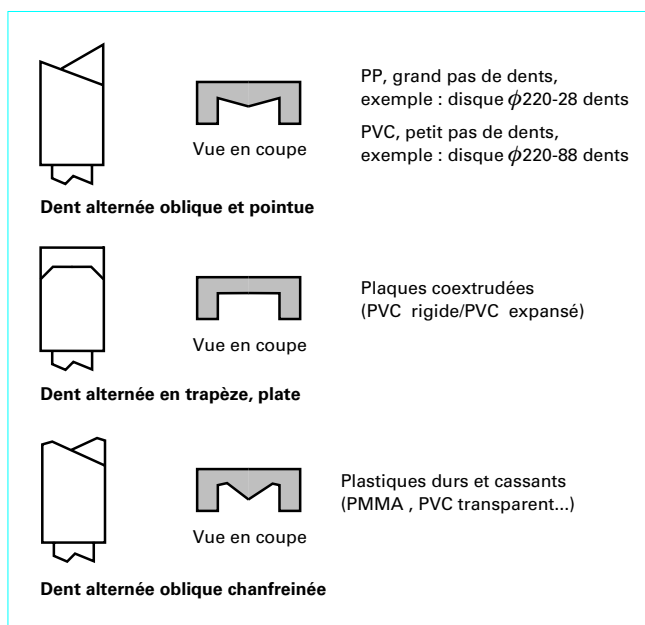


Figure 1 – Exemples de profils de dents de scie

Tableau 3 – Découpe de plastiques à la scie circulaire (1)

Nature du polymère	Dépouille (degré)	Pente d'affûtage (degré)	Pas de la denture (mm)	Vitesse de coupe (m/min)
Polystyrène et dérivés	10 à 20	0 à 15	5	800 à 3 000
Polyéthylène, polypropylène	5 à 20	0 à 15	1 à 3	600 à 3 000
PVC	5 à 20	0 à 15	0,05 à 5	2 500 à 4 000
Polycarbonates	10 à 40	0 à 15	2 à 10	50 à 4 000
Polyoxyméthylène (acétal)	10 à 40	0 à 15	1 à 45	1 000 à 3 000
PET – PBT	10 à 15	0 à 15	8 à 25	1 000 à 3 000
Polyamides	0 à 40	0 à 40	2 à 45	1 000 à 3 000
PTFE	10 à 20	0 à 20	3 à 45	1 000 à 3 000

(1) Synthèse bibliographique [3].

Tableau 4 – Découpe de plastiques à la scie à ruban (1)

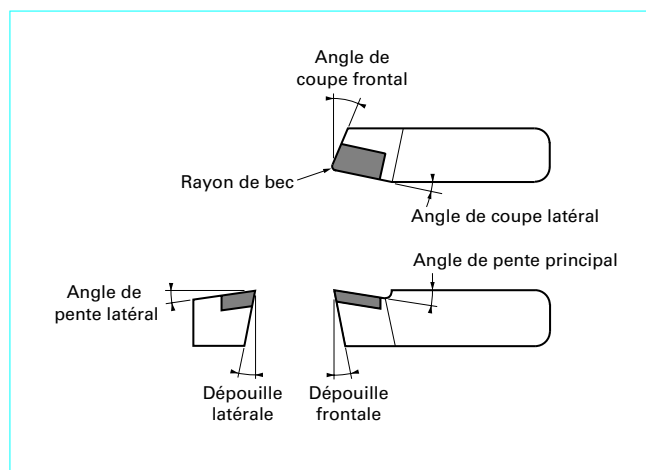
Nature du polymère	Dépouille (degré)	Pente d'affûtage (degré)	Pas de la denture (mm)	Vitesse de coupe (m/min)
Polystyrène et dérivés	15 à 30	0 à 8	5 à 8	300 à 1 500
Polyéthylène, polypropylène	15 à 40	0 à 8	2 à 12	50 à 3 000
PVC	15 à 40	0 à 8	2 à 10	500 à 2 000
Polycarbonates	10 à 40	0 à 15	1,5 à 25	600 à 3 000
Polyoxyméthylène (acétal)	10 à 40	0 à 8	2 à 12	50 à 3 000
PET – PBT	25 à 40	0 à 8	2 à 8	50 à 1 000
Polyamides	0 à 40	0 à 40	2 à 15	50 à 3 000
PTFE	20 à 40	0 à 8	1 à 12	50 à 500

(1) Synthèse bibliographique [3].

Ces travaux de découpage doivent toujours être effectués dans des locaux bien ventilés, car la surchauffe de la matière peut dégager des produits volatils toxiques, certes en petite quantité, mais qui, à la longue, peuvent s'avérer dangereux pour l'opérateur (acétal, PVC, polystyrène, notamment).

Une inversion de la lame de scie peut présenter des avantages pour le découpage de plaques d'une épaisseur inférieure à 1,5 mm, notamment dans le cas de matières plastiques dures. L'attaque par le flanc arrière des dents réduit la tendance à la déchirure et à l'écaillage.

Le découpage d'ébauches relativement épaisses dans des tubes, blocs et plaques, se fait à la scie à **ruban** (tableau 4). Cette dernière est utilisable aussi pour des coupes curvilignes. Les lames de scie (largeur de 15 à 20 mm et épaisseur d'environ 0,8 à 1,0 mm) doivent être avoquées, afin de permettre une coupe libre. Les surfaces de coupe résultantes sont rugueuses et rectifiées si nécessaire. Plus la pièce est épaisse, plus l'écart entre les dents doit être grand. En général, l'emploi d'un liquide de refroidissement n'est pas nécessaire, mais l'emploi de ces liquides permet des vitesses de coupe plus élevées. Un jet d'air dirigé vers la région de coupe disperse les copeaux et refroidit la lame.

**Figure 2 – Géométrie type d'un outil de tournage**

2.3 Tournage

La figure 2 définit les différents angles d'un outil de tour. On trouve souvent un vocabulaire légèrement différent selon les documentations.

Les autres paramètres d'usinage sont (tableau 5) :

- l'avance : déplacement de l'outil en millimètres par tour de rotation de la pièce ;
- la profondeur de passe : épaisseur de matière enlevée par l'outil en un passage ;
- la vitesse de coupe : vitesse linéaire de rotation de la pièce.

Les plastiques s'usinent bien avec des outils affûtés. Il faut s'efforcer d'obtenir une profondeur de passe aussi grande que possible avec une faible avance. Un léger arrondi du profil de l'arête de coupe évite la production de rainures à arête vive sur la surface de la pièce. Un refroidissement est souvent inutile. Il suffit, le cas échéant, de souffler de l'air comprimé sur le point de coupe. Les aciers rapides usuels satisfont à la plupart des exigences. L'emploi de plaquettes rapportées en métal dur fritté n'offre des avantages que dans des cas particuliers, notamment pour des quantités importantes, des tolérances serrées, ou des plastiques contenant des charges minérales ou des fibres de verre.

Tableau 5 – Tournage de plastiques (1)

Nature du polymère	Dépouille (degré)	Pente d'affûtage (degré)	Avance (mm)	Vitesse de coupe (m/min)
Polystyrène et dérivés	5 à 10	5 à 20	0,1 à 1,5	150 à 500
Polyéthylène, polypropylène	5 à 15	0 à 15	0,05 à 0,5	200 à 500
PVC	10 à 15	10	0,2 à 0,5	200 à 500
Polycarbonates	0 à 15	0 à 25	0,05 à 0,5	100 à 500
Polyoxyméthylène (acétal)	5 à 20	0 à 15	0,05 à 0,5	200 à 1 000
PET – PBT	0 à 15	0 à 15	0,05 à 0,4	90 à 500
Polyamides	0 à 15	0 à 50	0,05 à 0,5	50 à 1 000
PTFE	5 à 15	5 à 20	0,05 à 0,3	100 à 1 000

(1) Synthèse bibliographique [3].

Tableau 6 – Fraisage de plastiques (1)

Nature du polymère	Dépouille (degré)	Pente d'affûtage (degré)	Avance (mm)	Vitesse de coupe (m/min)
Polystyrène et dérivés	10 à 20	5 à 15	0,05 à 0,5	200 à 1 000
Polyéthylène, polypropylène	5 à 20	0 à 15	0,05 à 0,5	300 à 1 200
PVC	5 à 20	5 à 20	0,05 à 0,5	300 à 1 000
Polycarbonates	0 à 20	0 à 25	0,03 à 0,5	100 à 500
Polyoxyméthylène (acétal)	5 à 15	0 à 15	0,02 à 0,5	200 à 1 000
PET – PBT	0 à 15	0 à 25	0,02 à 0,5	150 à 1 000
Polyamides	5 à 30	0 à 25	0,3 à 0,5	200 à 1 000
PTFE	5 à 20	0 à 20	0,03 à 0,5	600 à 1 000

(1) Synthèse bibliographique [3].

Tableau 7 – Perçage des plastiques (1)

Nature du polymère	Dépouille (degré)	Pente d'affûtage (degré)	Angle de pointe (degré)	Avance (mm)	Vitesse de coupe (m/min)
Polystyrène et dérivés	8 à 15	10 à 20	60 à 140	0,1 à 0,7	5 à 100
Polyéthylène, polypropylène	5 à 16	3 à 30	60 à 120	0,1 à 0,5	50 à 200
PVC	6 à 10	3 à 30	80 à 120	0,1 à 0,5	30 à 80
Polycarbonates	5 à 16	0 à 20	60 à 130	0,1 à 0,5	5 à 100
Polyoxyméthylène (acétal)	5 à 15	3 à 30	60 à 120	0,1 à 0,5	50 à 200
PET – PBT	5 à 12	3 à 30	60 à 120	0,1 à 0,6	50 à 150
Polyamides	3 à 15	3 à 12	60 à 120	0,1 à 0,5	50 à 100
PTFE	5 à 15	3 à 30	90 à 130	0,1 à 0,5	100 à 1 000

(1) Synthèse bibliographique [3].

2.4 Fraisage et gravure

Les fraiseuses ou machines à graver pour métaux sont souvent utilisées. Il faut toutefois veiller à ce que les outils employés soient affûtés correctement et puissent recevoir un volume de copeaux suffisant. Les machines utilisées doivent, en outre, permettre des vitesses de coupe suffisamment élevées. On pourrait considérer approximativement qu'une fraise est constituée de plusieurs outils de tour fixés sur le bord d'un disque métallique. Au lieu de faire tourner la pièce devant un outil, on fait tourner le disque. Les paramètres sont (tableau 6) :

- la géométrie des arêtes de coupe (ou dents) ;
- le nombre de dents de la fraise ;
- la vitesse linéaire de coupe ;
- l'avance (déplacement relatif de la pièce par rapport à la fraise) ;
- la profondeur de passe : épaisseur de matière enlevée (qui varie éventuellement entre l'attaque et le débouché de l'outil dans la pièce) ;
- le sens de fraisage : normal ou « en avalant ».

2.5 Perçage et alésage

■ Il existe plusieurs types d'outils utilisables pour percer un matériau. Le foret hélicoïdal est sans doute le plus répandu. Les principaux paramètres sont (tableau 7 et figure 3) :

- l'angle de pointe : angle compris entre les projections des arêtes de coupe sur un plan parallèle à celles-ci, contenant l'axe de l'outil ;
- l'angle d'hélice : angle de l'hélice par rapport à l'axe ;
- l'angle de dépouille (non représenté sur la figure 3). On définit généralement une dépouille normale, mesurée au point considéré de l'arête de coupe dans le plan perpendiculaire à l'arête de coupe (angle du dièdre formé par le plan tangent à la face de dépouille et le plan tangent au cône usiné par la pointe du foret), et une dépouille latérale, mesurée dans le plan perpendiculaire au rayon joignant le point de l'arête de coupe à l'axe de l'outil ;
- la vitesse de rotation du foret, en liaison avec son diamètre, car le paramètre réel important est la vitesse linéaire de coupe au contact arête-matériau ;
- la vitesse d'avance, qui est la vitesse de pénétration de l'outil dans le matériau (souvent exprimée en mm/tr).

La goujure qui suit la forme hélicoïdale du foret *canalise* l'évacuation du copeau formé par l'arête coupante.

Il faut spécifiquement prévoir quelques essais préliminaires si le diamètre du perçage est très précis. À cause de l'échauffement au passage du foret, le trou finalement obtenu pourrait avoir un diamètre inférieur après refroidissement de la pièce.

De manière générale, les forets hélicoïdaux utilisés pour les métaux permettent de percer les plastiques sans aucun affûtage particulier.

Les conditions de coupe optimales, pour le perçage, sont sensiblement satisfaites dans la plupart des cas par un foret hélicoïdal standard avec un angle de coupe à contre-dépouille et un angle hélicoïdal réduit (< 30°).

Pour des profondeurs de perçage supérieures à 5 fois le diamètre, il faut retirer le foret plusieurs fois du trou pour bien dégager le copeau.

Abattre les arêtes de coupe du foret (angle de dépouille 0°) est avantageux uniquement pour le perçage de trous dans les plaques de faible épaisseur. Les forets ainsi corrigés ne grippent pratiquement plus.

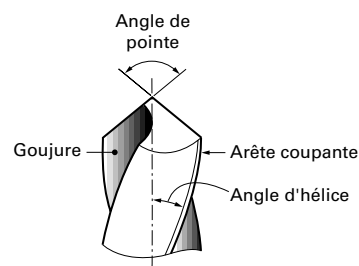


Figure 3 – Géométrie d'un foret hélicoïdal classique

Pour le perçage de grands diamètres, il est préférable de procéder en plusieurs étapes.

Exemple : pour un perçage Ø 50, il faut percer d'abord Ø 15, puis Ø 35 et enfin Ø 50.

Pour un perçage débouchant de grand diamètre dans une barre de 200 mm de longueur, on peut usiner à l'aide d'un outil de tour en 2 étapes : perçage d'une demi-longueur d'un côté, puis retournement de la pièce et perçage de la 2^e demi-longueur par l'autre côté. Les paramètres recommandés pour le tournage sont alors ceux à prendre en compte.

Les fraises coniques sont souvent utilisées aussi pour le perçage de plaques en plastique. Elles sont caractérisées par 2 gorges parallèles à l'axe, capables de contenir un volume important de copeaux.

Un avant-trou est recommandé pour des diamètres supérieurs à 10 mm. On utilise aussi des forets de lamage avec mèche pilote pour le perçage de trous d'un diamètre supérieur à 20 mm, alors que les trous d'un diamètre supérieur à 40 mm peuvent être réalisés avec des forets spéciaux ou des trépan.

■ **Pour l'alésage**, l'alésoir à coupe descendante convient pour les plastiques. La surépaisseur du trou à aléser doit être d'environ 0,2 à 0,4 mm. Dans le cas d'une surépaisseur plus faible, l'outil coupe encore le matériau mais la cote réelle du trou alésé peut présenter des fluctuations plus importantes. Il faut adopter une vitesse de coupe entre 10 et 60 m/min, avec une avance de l'ordre de 0,2 mm/tr. Un refroidissement intense de l'alésoir à coupe descendante est favorable. À cet effet, les émulsions d'huile de perçage usuelles conviennent mieux que l'air, dans ce cas.

2.6 Filetage, taraudage

Les opérations de filetage et de taraudage ne présentent aucune difficulté. L'emploi de filières, d'outils à fileter ou de tarauds identiques à ceux utilisés pour l'acier ou les alliages légers convient dans la plupart des cas. Cependant, l'emploi de forme de filets en pointe n'est pas adapté à la nature des plastiques, à cause de leur sensibilité à l'entaille et de leur faible résistance au cisaillement. Il faut au moins casser les angles au sommet des filets et prévoir des rayons suffisants au fond des filets pour éviter l'effet d'entaille.

L'outil à fileter doit être très affûté et légèrement arrondi pour éviter l'effet d'entaille. Des filets fins dont le pas serait inférieur à 0,5 mm environ ne sont pas recommandés.

Il ne faut pas effectuer d'aussi fréquents retours en arrière que pour les métaux ; par contre, il convient de sortir quand même de temps à autre le taraud au cours du travail afin de dégager les copeaux du trou quand la profondeur de taraudage est importante.

On rappelle que les filetages effectués dans un plastique ne permettent pas un fréquent vissage-dévisage, car le pas des filets se détériore facilement. On préfère généralement un vissage dans un insert métallique, douille taraudée pour recevoir une vis ou embout fileté pour recevoir un écrou, mis en place dans le plastique pendant ou après le moulage.

2.7 Limage, rabotage. Ébavurage

■ Limage, rabotage

De bons résultats ont été obtenus avec des limes à taille grossière ou des râpes à bois. L'emploi de limes spéciales ajourées ayant une taille très voisine de celle des râpes est toutefois plus avantageux encore. Les copeaux peuvent passer dans des ouvertures de ces limes et sont ainsi éloignés de la surface de la pièce. On évite alors un encrassement de la surface. Le nettoyage de cet outil est, en outre, très simple. Il suffit de taper légèrement sur la lime pour éliminer les copeaux.

Le rabotage peut se faire avec les outils usuels pour le travail du bois (riflard et guillaume, outils bien connus des menuisiers) et sur les types classiques de machines à dresser et de raboteuses à cylindres.

■ Ébavurage

Plus généralement, il peut être nécessaire de *casser les angles vifs*, de supprimer les bordures coupantes. Cette opération peut être effectuée avec une machine spéciale (ébavureuse) qui travaille par grenailage. Après moulage, les pièces passent dans une enceinte dans laquelle la grenaille, de granulométrie choisie, est projetée. Cela peut être une poudre de nylon ou de sable, par exemple. Des essais préalables sur les premières pièces moulées permettront de définir la nature de la grenaille, la granulométrie, la vitesse de projection. Il ne faut pas oublier que la matière est plus tendre que l'acier et qu'il ne faut pas endommager la surface en reprenant les mêmes paramètres de grenailage que pour une pièce en acier.

Il est possible également de placer la pièce dans un bac vibrant rempli d'abrasifs. Le frottement des abrasifs sur la pièce provoque un ébavurage et un rayonnage des arêtes vives. Une circulation d'eau dans le bac permet d'évacuer les particules de matière résultant de cette opération (cette méthode a été appelée *tribofinition* dans plusieurs articles).

La finition dite *au tonneau* est possible aussi. Les pièces à ébavurer sont placées dans un tonneau à facettes, en acier revêtu d'une matière souple (caoutchouc, PVC), que l'on fait tourner à environ 20 tr/min (cela dépend de ses dimensions) et qui contient des particules abrasives (sable, microbilles de verre, poudre de nylon, écorce de bois, etc.). L'opération est faite à sec ou en ambiance humide.

2.8 Meulage, ponçage, sablage

Il faut rappeler préalablement que ces opérations détruisent la peau superficielle à l'aspect souvent brillant du plastique et donnent un aspect de surface mat et parfois peu esthétique.

Le **meulage** doit être effectué avec une granulométrie adaptée à ce type de matériau (30 à 240), constituée, par exemple, de grains de carbure liés par une résine. La rugosité de surface dépendra directement de cette granulométrie.

Exemple : un plastique (PMMA, PVC rigide ou polycarbonate), meulé pendant 20 min à l'aide d'une bande abrasive passée à 2 000 m/min avec une pression de 0,5 bar, aura une rugosité de l'ordre de 35 à 40 µm si la bande a une granulométrie de 60 et moins de 3 µm avec une granulométrie de 240.

Dans le cas du PVC, il est possible de rectifier une surface encore trop rugueuse sur une ponceuse vibrante (papier émeri 220 à 400) puis de l'essuyer avec un solvant. On obtient alors une surface pratiquement brillante.

Le **sablage** peut donner les mêmes résultats avec une granulométrie identique et une pression de quelques bars. L'opération doit être faite à sec pour des granulométries jusqu'à 80, et humide, au-delà. Quelques essais préalables permettent rapidement de préciser les paramètres en fonction du résultat attendu.

Le terme *sablage* vient de ce que l'on utilise souvent une poudre ressemblant à du sable, mais on peut utiliser aussi, pour les plastiques, des grains moins abrasifs à base de polyamide (nylon), voire des particules végétales (poudre de maïs, par exemple).

2.9 Polissage

En rappelant que la plus belle surface est celle que l'on peut obtenir directement au moulage, il est néanmoins possible de polir la surface d'une pièce plastique, ne serait-ce que pour améliorer l'aspect d'une surface usinée. Cette opération est souvent néces-

saire également dans le cas de pièces en plastique transparent pour une application optique, par exemple, dont il faut usiner certaines cotes très précises *sur mesure* et retrouver la transparence ensuite. Sur une surface en plastique, on peut pratiquer les polissages mécanique, thermique ou chimique.

■ Polissage mécanique

C'est la technique classique par frottement. Il est possible d'obtenir des surfaces allant du mat satiné au poli spéculaire, à condition que les irrégularités superficielles à supprimer soient faibles et que ce travail soit effectué par du personnel qualifié. Le polissage s'effectue en appliquant légèrement la surface considérée avec un mouvement circulaire sur un disque rotatif constitué d'un empilage de disques de feutre, coton, peau de chamois, flanelle, etc., éventuellement enduit de suif ou de pâte à polir, jusqu'à obtention de la qualité superficielle requise. Cette opération doit être interrompue à plusieurs reprises, afin d'éviter un échauffement excessif.

Une pâte à polir du commerce peut, en outre, être appliquée sur le disque polisseur, tournant à une vitesse de 25 à 30 m/s, ou à des vitesses encore supérieures dans le cas des élastomères.

Exemple : une ancienne documentation sur le *Vulkollan* (élastomère de polyuréthane) cite des valeurs de 1 800 à 3 000 m/min (30 à 50 m/s) avec une meule en corindon à grain fin et un refroidissement à l'eau.

Il est recommandé de vérifier les conditions de polissage par des essais préliminaires, puis de déterminer les conditions optimales à partir des résultats ainsi obtenus. La pâte à polir doit être choisie de manière à ne pas attaquer le plastique : par exemple, pour polir du polycarbonate, il ne faut pas choisir une pâte de nature basique mais plutôt du vert d'oxyde de chrome. L'opération doit toujours se terminer par un polissage sans produit intermédiaire et à sec.

Exemple : pour un poli spéculaire de polypropylène (*Hostalen PP* de la société Hoechst), les grosses rugosités sont d'abord supprimées sur un disque en coton sur lequel est appliquée une cire de prépolissage (par exemple : cire de prépolissage 113 G 2 de Menzerna Werke). Le polissage de finition se fait ensuite sur un disque de molleton enduit de cire brillante telle que la cire brillante Menzerna AT6.

Exemple : pour un poli spéculaire de l'acétal (*Hostaform* de la société Hoechst), il faut utiliser un disque polisseur constitué par des anneaux de tissu L, matériau 101 de H. Lippert, sur lequel est appliquée de la pâte à polir telle que l'*Unipol 1967* de H. Höhne KG.

■ Polissage thermique

Possible avec certains plastiques, il consiste à passer une flamme à une certaine vitesse sur la surface. Une couche très mince de matière est fondue puis se refroidit avec un aspect de surface *poli*. Cette opération se pratique notamment sur du PMMA avec une flamme de 15 à 20 cm se déplaçant à environ 6 m/min.

Nota : dans le cas du flammage, on *attaque* la surface du plastique pour faciliter l'adhésion d'une peinture, par exemple. Ici, en polissage thermique, on se contente d'une fusion très superficielle (c'est plus *soft*). Mais le principe est le même.

On peut donc, par ailleurs, faire le parallèle entre polissage thermique et flammage, comme on peut le faire aussi entre polissage mécanique et meulage.

■ Polissage chimique

L'application d'un solvant sur une surface peut aussi la rendre polie. Néanmoins, cette opération est assez délicate et précise à définir, car il est possible aussi de *dépolir* avec le même principe. Un polymère acrylique peut ainsi être poli après une immersion de la pièce chauffée à 80 °C dans la vapeur de trichloréthylène durant 3 à 4 s, puis maintien de la pièce à 80 °C jusqu'à évaporation complète des traces de solvant en surface.

Inversement, on peut dépolir une surface en polycarbonate par immersion dans une solution à 50 % de soude caustique pendant 1 min à 100 °C, suivie d'un rinçage à l'eau additionnée d'acide acétique, d'abord, puis à l'eau pure ensuite.

3. Paramètres par famille de polymères

Rappel : ces données sont extraites de différentes sources, producteurs et fournisseurs de matières, usineurs ; elles ont été rassemblées par matière et type d'usinage.

3.1 Polystyrène et ABS

Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage du polystyrène et l'ABS sont rassemblés dans le tableau 8 ou décrits ci-dessous.

Tableau 8 – Paramètres préconisés pour l'usinage du polystyrène et de l'ABS

Procédé	Paramètres	Unité	Polystyrène	ABS
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	10 à 20	–
	Angle de pente d'affûtage	degré	5 à 15	0
	Pas de la denture	mm	–	5
	Vitesse de coupe	m/min	2 000	800 à 1 500
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	15 à 30	–
	Angle de pente d'affûtage	degré	5 à 8	0
	Pas de la denture	mm	5 à 8	5
	Vitesse de coupe	m/min	supérieure à 300	500 à 1 500
Tournage	Angle de dépouille	degré	5 à 10	5 à 25
	Angle de pente d'affûtage	degré	10	5 à 20
	Avance	mm/tr	0,2 à 0,5	0,1 à 1,5
	Vitesse de coupe	m/min	supérieure à 150	150 à 500
	Profondeur de passe	mm	–	1 à 2,5
Fraisage	Angle de dépouille	degré	10 à 20	10
	Angle de pente d'affûtage	degré	5 à 15	5 à 10
	Avance	mm/tr	0,05	0,5
	Vitesse de coupe	m/min	supérieure à 200	jusqu'à 1 000
Perçage (1)	Angle de dépouille	degré	8 à 15	–
	Angle de pente d'affûtage	degré	10 à 20	faible
	Angle de pointe	degré	60 à 90	60 à 120
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,4	0,1 à 0,7
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 100	15 à 50

(1) Pour les forets supérieurs à Ø8 mm, on utilise des coupants en métal dur. Les forets doivent avoir un diamètre supérieur de 0,05 à 0,1 mm à la dimension nominale.

■ Estampage de l'ABS

Les pièces d'une épaisseur inférieure à environ 3 mm se prêtent très bien à l'estampage. Le poinçon peut présenter ici un angle de coupe de 20 à 45°, le jeu de coupe devant alors être de 0,1 à 0,2 mm.

■ Polissage de l'ABS

Il s'effectuera de préférence avec des disques en feutre d'un diamètre d'environ 300 mm et tournant à une vitesse de 600 tr/min en utilisant de la cire à polir. Les pièces destinées à être métallisées ne doivent pas être traitées à la cire.

3.2 Polyéthylène et polypropylène

Avec ces plastiques, le refroidissement n'est généralement pas nécessaire.

Les paramètres préconisés pour l'usinage du polyéthylène et du polypropylène sont rassemblés dans le tableau 9.

Tableau 9 – Paramètres préconisés pour l'usinage du polyéthylène et du polypropylène			
Procédé	Paramètres	Unité	Polyéthylène Polypropylène
Sciage à la scie circulaire (1)	Angle de dépouille	degré	10 à 20
	Angle de coupe	degré	0 à 15
	Pas de la denture	mm	3 à 20
	Avance	mm/dent	0,1 à 0,3
	Vitesse de coupe	m/min	1 000 à 3 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	25 à 40
	Pente d'affûtage	degré	0 à 8
	Pas de la denture	mm	3 à 12
	Vitesse de coupe	m/min	500 à 1 000
Tournage	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Angle de coupe	degré	0 à 15
	Avance	mm/tr	0,05 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	200 à 500
Fraisage	Angle de dépouille	degré	5 à 20
	Angle de coupe	degré	0 à 15
	Avance	mm/dent	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	1 000
Perçage	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Angle de coupe	degré	25 à 30
	Angle de pointe	degré	60 à 120
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 200
Rabotage (2)	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Angle de coupe	degré	0 à 15
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	200 à 500

(1) Il est préférable d'utiliser des scies circulaires à lames non avoyées, mais évidées en arc de cercle en direction de leur centre. On peut employer aussi des lames de scie circulaire avec avoyage de 0,5 mm.

(2) Les raboteuses à cylindres et dégauchisseuses d'emploi courant pour le travail du bois conviennent aussi avec une vitesse de coupe élevée et un outil en alliage dur.

Après moulage, le polyéthylène peut voir sa structure se transformer (cristallisation) pendant quelques jours, notamment en surface. Dans le cas où des pièces sont usinées en finition immédiatement après un moulage effectué avec des paramètres assurant un démoulage rapide, donc une grande productivité mais au détriment d'une stabilité de la matière, les cotes peuvent ne plus être dans la tolérance prévue. Il faut alors :

- soit assurer une parfaite stabilité dès le moulage par un refroidissement plus lent et une attente suffisante avant démoulage ;
- soit attendre quelques jours (1 semaine environ) avant d'usiner ;
- soit effectuer un recuit des pièces sur conformateur pour figer la structure de la matière et assurer la stabilité dimensionnelle.

3.3 PVC

Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage du PVC sont rassemblés dans le tableau 10.

Tableau 10 – Paramètres préconisés pour l'usinage du PVC			
Procédé	Paramètres	Unité	PVC
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	5 à 20
	Angle d'affûtage	degré	0 à 5
	Pas de denture	mm/dent	1 à 5
	Vitesse de coupe	m/min	2 500 à 4 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	15 à 40
	Angle d'affûtage	degré	0 à 5
	Pas de denture	mm/dent	2 à 10
	Vitesse de coupe	m/min	500 à 2 000
Tournage	Angle de dépouille	degré	10 à 15
	Angle d'attaque	degré	10
	Avance	mm/tr	0,2 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	supérieure à 200
Fraisage	Angle de dépouille	degré	5 à 20
	Angle d'attaque	degré	5 à 20
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	300 à 1 000
Perçage	Angle de dépouille	degré	6 à 10
	Angle de l'hélice	degré	12 à 16
	Angle d'affûtage	degré	3 à 6
	Angle du sommet	degré	80 à 120
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	30 à 80

3.4 Polymères cellulosiques

Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage des polymères cellulosiques sont rassemblés dans le tableau 11 pour le poly (acétate de cellulose) ou décrits ci-après pour les autres procédés.

■ Taraudage

Un taraud à 2 gorges en acier fonctionnant à grande vitesse permet d'augmenter la vitesse et la durée de vie des tarauds. Un angle de 85° convient. On peut employer aussi des tarauds rapides ordinaires du type à trois cannelures, avec une vitesse de coupe de 0,2 à 0,25 m/s. La lubrification se fait à l'eau.

Tableau 11 – Paramètres préconisés pour l'usinage du poly(acétate de cellulose)

Procédé	Paramètres	Unité	Poly(acétate de cellulose)
Sciage à la scie circulaire ou à ruban (1)	Pas de denture	mm/dent	3 à 4
	Vitesse de coupe	m/min	1 000 à 1 200
Tournage	Angle de dépouille	degré	30
	Vitesse de coupe	m/min	70 à 80
Perçage	Avance	mm/tr	0,2 à 0,6
	Vitesse de coupe	m/min	30 à 60
	Angle de pointe	degré	60 à 90

(1) Plus la scie pénètre vite dans le plastique sans le fondre, plus la coupe est nette et plus la durée de vie de la scie est grande. Les vitesses peuvent être augmentées en refroidissant avec de l'eau claire ou savonneuse (à éviter si l'on veut recycler la sciure).

Tableau 12 – Paramètres préconisés pour l'usinage du poly(méthacrylate de méthyle) (PMMA)

Procédé	Paramètres	Unité	PMMA
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	4 à 10
	Angle de coupe	degré	négatif
	Pas de denture	mm	3 à 12
	Vitesse de coupe	m/min	2 000 à 3 600
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	4 à 8
	Angle de coupe	degré	1 à 3
	Pas de denture	mm	3 à 12
	Vitesse de coupe	m/min	600 à 1 800
Tournage	Angle d'incidence supérieur	degré	0
	Angle d'incidence avant	degré	20
	Profondeur de passe	mm	20
	Avance	mm/tr	0,1
	Vitesse de coupe	m/min	100 à 300
Perçage	Angle de dépouille	degré	15 à 20
	Angle de coupe	degré	0
	Angle de pointe	degré	60 à 140
	Vitesse de coupe	m/min	40 à 100

■ Polissage

Se servir d'un buffle en disques de coton de 10 cm de large et de 25 à 30 cm de diamètre, tournant de 1 000 à 1 500 tr/min, en appliquant une légère pression. Commencer avec une poudre à poncer humide, grosseur 120, sécher, continuer avec du tripoli (éviter l'emploi du rouge) et, pour terminer, passer au buffle en flanelle fine. On peut aussi polir les petits articles moulés au tonneau pendant 24 heures en tout dans un tonneau octogonal, en employant des qualités de poudre à polir de plus en plus fines.

3.5 Polymères acryliques

Le refroidissement par jet d'air ou huile soluble est recommandé.

Les paramètres préconisés pour l'usinage des polymères acryliques sont rassemblés dans le tableau 12 pour le PMMA, ou décrits ci-dessous.

■ Ponçage

Pour un ponçage grossier, utiliser un grain 60 à 280, à sec, puis pour un ponçage fin, utiliser un grain 400, légèrement humide.

■ Polissage :

- mécanique avec disque de tissu Ø15 – 30 cm, pâtes à base de cire et d'abrasif doux (*Kisselguhr*, rouge à polir), vitesse de 1 200 à 2 800 tr/min ;
- à la flamme de 15 à 20 cm se déplaçant à environ 6 m/min ;
- au solvant, par immersion de la pièce chauffée à 80 °C dans la vapeur de trichloréthylène durant 3 s et séchage à 80 °C pour évaporer toute trace de solvant.

3.6 Polycarbonates

Il faut usiner des pièces dépourvues de tensions internes, donc effectuer un recuit à 130/135 °C durant 30 min pour chaque tranche d'épaisseur de 5 mm. Ne pas utiliser les émulsions et huiles de coupe habituelles, refroidir à l'air ou à l'eau claire.

Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage des polycarbonates sont rassemblés dans le tableau 13 ou résumés ci-après pour les autres procédés.

■ Taraudage

Il est recommandé d'utiliser des tarauds convenant pour l'acier, mais n'ayant jamais servi pour un métal et qui donnent un filet légèrement arrondi. Comme lubrifiant, on peut utiliser du bisulfure de molybdène ou une huile machine légère, mais pas d'huile de coupe ni d'émulsions huileuses (attention à la sensibilité des polycarbonates aux bases).

■ Ponçage :

- au papier abrasif à grain fin (1 100 à 500) sous l'eau ;
- au contact à vitesse de l'ordre de 20 à 30 m/s.

Possibilité d'utiliser une graisse à poncer non basique.

Le ponçage peut se faire sur machine à la bande abrasive à liant synthétique (grain 400 à 500), à l'eau, avec une vitesse de 20 à 30 m/s et une faible pression d'application.

Le ponçage manuel s'effectue à faible pression, avec des papiers de verre de grains 150, puis 240 et 400 successivement.

■ Polissage mécanique

Il s'effectue à l'aide d'un disque plissé avec pâte à polir non basique.

Après ponçage préalable, on peut polir la surface à l'aide d'une pâte à polir non alcaline (oxyde de chrome vert) puis, en finition, avec un disque à polir propre, sans pâte à polir, avec une vitesse de 20 à 30 m/s.

Tableau 13 – Paramètres préconisés pour l'usinage des polycarbonates

Procédé	Paramètres	Unité	Polycarbonates
Sciage à la scie circulaire (1)	Angle de dépouille	degré	10 à 30
	Pente d'affûtage	degré	0 à 15
	Pas de denture	mm/dent	2 à 20
	Vitesse de coupe	m/min	1 000 à 3 000
Sciage à la scie à ruban (1)	Angle de dépouille	degré	20 à 40
	Pente d'affûtage	degré	0 à 8
	Pas de denture	mm/dent	2 à 8
	Vitesse de coupe	m/min	400 à 1 000
Tournage	Angle de dépouille	degré	0 à 15
	Angle d'incidence	degré	20
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	100 à 500
Fraisage	Angle de dépouille	degré	5 à 20
	Angle d'incidence	degré	0 à 15
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	100 à 500
Perçage (2)	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Pente d'affûtage	degré	0 à 5
	Angle de pointe	degré	90 à 130
	Angle d'hélice	degré	30
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	30 à 100

(1) Pour les plaques d'épaisseur inférieure à 3 mm, les scies à ruban, scies sauteuses et cisailles sont préférables aux scies circulaires.

(2) Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant des forets possédant des rainures larges et polies. La rectification en pointe des forets est recommandée. Pour des perçages profonds, il est recommandé de refroidir à l'air comprimé et de dégager fréquemment pour améliorer l'évacuation de la chaleur et des copeaux. Pour de grands diamètres, les trépan du commerce conviennent également.

Le dépolissage s'effectue par doucissage ou par voie chimique (immersion 1 min dans une solution à 50 % de soude caustique portée à 100 °C, puis rinçage à l'eau additionnée d'acide acétique, et enfin rinçage à l'eau pure).

Cette opération est possible en ménageant des réserves de surface.

■ Poinçonnage

Jusqu'à 3 mm d'épaisseur, une plaque peut être poinçonnée facilement avec des coupes nettes. Il faut pour cela un bon tranchant de lame, un angle de coupe maximal de 45° et un jeu entre lame et banc de 0,01 à 0,03 mm (figure 4).

■ Cisailage

On peut cisailier une plaque jusqu'à 2 mm. Comme couteau (lame), on utilise une bande en acier, pliée ou cintrée en forme souhaitée et fixée dans une plaque en bois ou en panneau de fibres. Les couteaux, d'une épaisseur de 1 mm (affûtés symétriquement des deux côtés), donnent de bons résultats avec des plaques d'épaisseur mince. Il faut des couteaux asymétriques pour cisailier des plaques plus épaisses. On obtient des coupes perpendiculaires si on utilise des couteaux affûtés sur une face (angle au sommet : 30°) (figure 5).

Il est important d'utiliser un support de bonne qualité et bien aligné par rapport à l'outil de coupe. Cette plaque support peut être en

polyamide ou en polyéthylène haute densité. Une coupe de bonne finition exige une puissance de coupe suffisante. On calcule la force nécessaire comme suit :

$$F \text{ (en N)} = \tau_1 \times t \times L$$

avec τ_1 résistance au cisaillement (en MPa),
 t épaisseur de feuille en mm,
 L contour de la découpe en mm.

Exemple : pour un polycarbonate de résistance au cisaillement 69 MPa, une longueur de découpe de 1 m (1 000 mm), d'épaisseur 1 mm, l'effort est $69 \times 1 \times 1\,000 = 69\,000$ N.

3.7 Poly(oxyde de phénylène) (PPO)

■ Découpage et poinçonnage

Le matériau se prête très bien au découpage. Un poinçon de $11 \times 4,5$ mm peut être utilisé avec succès pour le découpage du matériau, dans des épaisseurs allant de 1,5 mm à 3 mm. Le jeu d'estampage doit être de 0,025 mm pour un matériau très mince et de 0,04 mm pour un matériau plus épais. La distance minimale entre les deux trous doit, de préférence, être égale à deux fois l'épaisseur du matériau.

■ **Sciage à la scie circulaire :** vitesse de coupe de 300 m/min.

■ **Sciage à la scie à ruban :** lame 1/2 large de 5 à 6 dents par cm et une vitesse d'environ 300 m/min.

■ Taraudage

Les taraudeuses normales pour acier peuvent être employées. Le taraudage manuel est également possible, pourvu que l'on emploie des outils à 2 rainures en acier rapide.

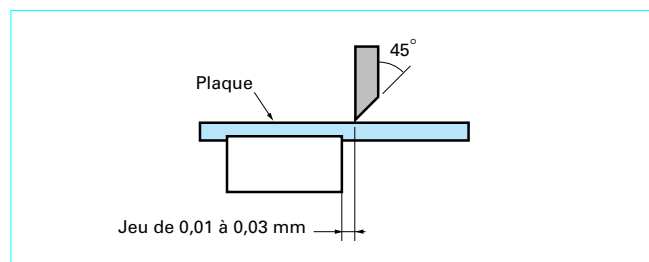


Figure 4 – Paramètres de poinçonnage pour un polycarbonate

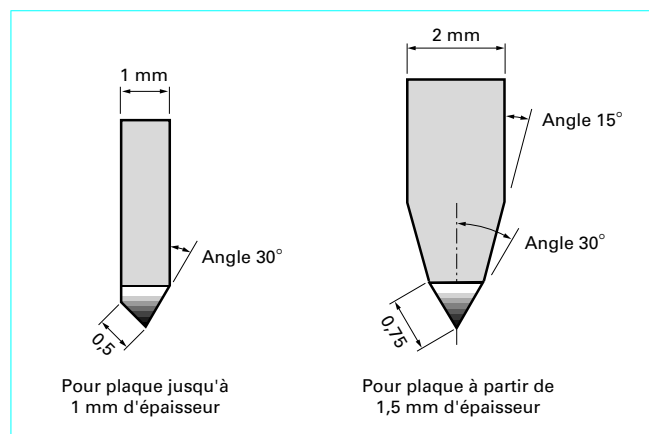


Figure 5 – Couteaux pour cisailage de plaques en polycarbonates

Les autres paramètres d'usinage sont résumés dans le tableau 14.

Les agents réfrigérants ou les lubrifiants sont inutiles et leur emploi est même déconseillé. Il vaut mieux refroidir avec un peu d'air froid, ce qui fait disparaître en même temps les copeaux enlevés par l'usinage.

Tableau 14 – Paramètres préconisés pour l'usinage du poly(oxyde de phénylène)

Procédé	Paramètres	Unité	PPO non chargé	PPO avec 30 % de fibres de verre
Tournage	Angle de dépouille	degré	15	15
	Profondeur de passe	mm	0,25 à 2,5	0,25 à 2,5
	Vitesse de coupe	m/min	200	150
Perçage	Angle d'inclinaison	degré	au moins 5°	–
	Angle de pointe	degré	118°	–
	Vitesse de coupe	tr/min	300 à 400	–

Tableau 15 – Paramètres préconisés pour l'usinage des acétals

Procédé	Paramètres	Unité	Résine acétal
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	10 à 40
	Angle de coupe	degré	0 à 5
	Écartement des dents	mm	1 à 5
	Vitesse de coupe	m/min	1 000 à 3 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	10 à 40
	Angle de coupe	degré	0 à 8
	Écartement des dents	mm	3 à 12
	Vitesse de coupe	m/min	100 à 3 000
Tournage	Angle de dépouille	degré	5 à 20
	Angle de coupe	degré	0 à 15
	Avance	mm/tr	0,05 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	200 à 1 000
Fraisage	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Angle de coupe	degré	0 à 15
	Avance	mm/tr	0,3 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	200 à 500
Perçage (1)	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Angle de coupe	degré	15 à 30
	Angle de pointe	degré	90 à 120
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 100

(1) Pour les forages de grand diamètre (supérieur à 20 mm), il est conseillé de faire un avant-trou et de dégager fréquemment le copeau.

3.8 Polyoxyméthylènes ou acétals

■ Découpage et poinçonnage

Les pièces plates d'épaisseur inférieure à 1,5 mm sont souvent produites économiquement par poinçonnage ou estampage avec des emporte-pièces traditionnels. Le préchauffage de la pièce évitera les risques de craquelures.

■ Taraudage

L'emploi d'un lubrifiant ou d'un liquide de coupe est souhaitable pour réaliser ces opérations, mais il n'est pas toujours nécessaire. Un taraud d'un diamètre supérieur de 0,13 mm au diamètre désiré est recommandé, à moins que l'on ne veuille obtenir un filetage à autofreinage.

■ Limage et meulage

L'outil le plus efficace est la fraise-lime *Vixen* à grosses entailles profondes, continues, coupantes, et à profil courbe. Ce type de lime comporte des entailles très vives qui réalisent une action d'arasage enlevant le matériau avec douceur et netteté. Sont également efficaces les fraises en acier et les disques abrasifs entraînés à grande vitesse par un moteur. Les rectifieuses ou les meules sans centre permettent également de lisser les surfaces.

Tableau 16 – Paramètres préconisés pour l'usinage des polyesters thermoplastiques

Procédé	Paramètres	Unité	PET, PBT (1)
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	10 à 15
	Angle de pente	degré	0 à 15
	Pas de denture	mm/dent	8 à 25
	Vitesse de coupe	m/min	1 000 à 3 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	25 à 40
	Angle de pente	degré	0 à 8
	Pas de denture	mm/dent	3 à 8
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 1 000
Tournage	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Pente d'affûtage	degré	0 à 10
	Angle d'arête	degré	0 à 45
	Avance	mm/tr	0,05 à 0,4
Fraisage	Vitesse de coupe	m/min	200 à 400
	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Pente d'affûtage	degré	0 à 15
	Angle d'arête	degré	–
	Avance	mm/tr	jusqu'à 0,5
Perçage	Vitesse de coupe	m/min	150 à 1 000
	Angle de dépouille	degré	5 à 10
	Pente d'affûtage	degré	3 à 15
	Angle de pointe	degré	60 à 120
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,3
Perçage	Vitesse de coupe	m/min	50 à 150

(1) PET : polyéthylènetéréphtalate.
PBT : polybutylènetéréphtalate.

Tableau 17 – Principaux paramètres préconisés pour l'usinage des polyamides et des polyamides-imides

Procédé	Paramètres	Unité	PA 6, PA 6-6	PA 11	PAI
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	10 à 40	10 à 15	15
	Angle de coupe	degré	4 à 8	0 à 15	15
	Pas de denture	mm/dent	5 à 10	–	–
	Avance	mm/tr	8	0,1 à 0,3	–
	Vitesse de coupe	m/min	jusqu'à 3 000	1 000 à 3 000	1 800 à 2 400
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	10 à 40	30 à 40	–
	Angle de coupe	degré	4 à 8	0 à 5	
	Pas de la denture	mm/dent	3 à 15	–	
	Avance	mm/tr	8	0,1 à 0,3	
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 1 000	500 à 1 500	
Tournage	Angle de dépouille	degré	0 à 15	6	5 à 15
	Angle de coupe	degré	négatif	8	7 à 15
	Profondeur de coupe	mm	0,5 à 10	–	0,6
	Avance	mm/tr	0,05 à 0,5	0,05 à 0,2	0,1 à 0,6
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 1 000	100 à 1 000	100 à 800
Fraisage	Angle de dépouille	degré	15 à 30	6	5 à 15
	Angle d'attaque	degré	5 à 15	15	7 à 15
	Avance	mm/tr	jusqu'à 0,5	–	0,15 à 0,9
	Vitesse de coupe	m/min	1 000	200 à 500	50 à 240

Tableau 18 – Paramètres pour le perçage des polyamides et des polyamides-imides

Paramètres	Unité	PA 6, PA 6-6	PA 11		PAI
			hélice courte	hélice longue	
Angle de dépouille	degré	3 à 20	12 à 18	7 à 12	0 à 5
Angle d'attaque	degré	10 à 12	43	15	–
Angle de pointe	degré	60 à 120	135 à 140	135 à 140	118
Avance	mm/tr	0,2 à 0,5	0,08 à 0,1	0,08 à 0,1	0,08 à 0,38
Vitesse de coupe	m/min	50 à 150	50 à 100	20 à 50	100 à 800

■ Ponçage et polissage

Pour supprimer des rayures, des éraflures ou des dégradations locales, on peut tout d'abord égaliser la surface avec un grattoir, en travaillant en passes croisées, et la passer ensuite au papier de verre de granulométrie 400, 600 et 800 humide. Pour la première phase du polissage, on peut appliquer de la cire dure n° 16 sur le disque de toile et polir selon un mouvement alternativement circulaire et de va-et-vient. Cela permet déjà d'obtenir un très bon état de surface. Un poli spéculaire peut être obtenu avec un disque molletonné ou recouvert d'une peau d'agneau.

Les autres paramètres préconisés pour l'usinage des acétals sont répertoriés dans le tableau 15 (page 11).

3.9 Polyesters thermoplastiques (PET, PBT)

Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage des polyesters thermoplastiques sont rassemblés dans le tableau 16 (page 11).

3.10 Polyamides et polyamides-imides (PAI)

Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage des polyamides et des polyamides-imides sont rassemblés dans les tableaux 17 et 18 ou décrits ci-dessous pour les autres procédés.

■ Taraudage

L'élasticité des polyamides conduit à prévoir un avant-trou de diamètre légèrement supérieur à celui adopté pour le métal. De façon générale, il convient d'employer un foret et un taraud d'une surcote de 0,05 à 0,1 mm.

Pour le polyamide 11, seul le taraud finisseur doit être utilisé. Il ne faut pas effectuer de fréquents retours en arrière comme dans le cas des métaux ; en revanche, il convient de sortir de temps à autre le taraud au cours du travail pour dégager les copeaux du trou quand la profondeur de taraudage est importante. Les tarauds pour acier ont l'avantage d'obtenir une plus grande résistance à l'arrachement que ceux pour alliages légers, qui donnent, par contre, un meilleur aspect de surface. Il est inutile d'utiliser des pas fins qui diminuent la force d'arrachement.

■ Ponçage

Au papier de verre ou au papier émeri avec refroidissement abondant à l'eau pour les polyamides 6 et 6-6.

Tableau 19 – Paramètres préconisés pour l’usinage des polymères fluorés

Procédé	Paramètres	Unité	PTFE	PVDF
Sciage à la scie circulaire (1)	Angle de dépouille	degré	10 à 15	5 à 15
	Pente d’affûtage	degré	0 à 15	0 à 15
	Pas de la denture	mm/dent	3 à 45	2 à 45
	Vitesse de coupe	m/min	1 000 à 3 000	1 000 à 3 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	25 à 40	25 à 40
	Pente d’affûtage	degré	0 à 8	0 à 8
	Pas de la denture	mm/dent	1 à 12	2 à 12
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 500	500 à 3 000
Tournage	Angle de dépouille	degré	7 à 15	5 à 15
	Pente d’affûtage	degré	10 à 20	0 à 10
	Angle d’arête	degré	0 à 45	0 à 45
	Avance	mm/tr	0,05 à 0,25	0,05 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	100 à 300	200 à 500
Fraisage	Angle de dépouille	degré	5 à 15	5 à 15
	Pente d’affûtage	degré	15 à 20	0 à 15
	Avance	mm/tr	jusqu’à 0,5	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	jusqu’à 1 000	200 à 1 000
Perçage (2)	Angle de dépouille	degré	5 à 15	10 à 16
	Pente d’affûtage	degré	3 à 5	3 à 5
	Angle de l’hélice	degré	12 à 16	12 à 16
	Angle de pointe	degré	90 à 130	90 à 130
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5	0,1 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	100 à 300	50 à 1 200

(1) Les dentures à large voie sont préférables aux lames à dents fines que le PTFE risque d’encrasser. Il est préférable d’utiliser une scie à ruban, car la longueur de la lame dissipe la chaleur dégagée.

(2) L’âme du foret doit être amincie pour obtenir une coupe franche jusqu’à la pointe. Pour les forages de diamètre supérieur à 20 mm, il est conseillé de faire un avant-trou et de dégager fréquemment le copeau. On se sert de forets ordinaires à grand dégagement. Toutefois, lorsque le bord d’attaque et les hélices de dégagement présentent une dépouille à angle aigu, celle-ci réduit l’échauffement créé par le frottement et améliore la précision du perçage. Les trous de perçage ou d’alésage ont tendance à se resserrer par la suite en raison du relâchement de l’effort créé par l’outil. Il est donc préférable, autant que possible, d’effectuer une coupe d’ébauche, suivie d’une coupe de finition en contrôlant les dimensions finales du trou après stabilisation durant 24 h à la température ambiante.

Le ponçage du polyamide 11 se réalise en milieu humide afin d’éviter les brûlures. Il peut se faire sur un ruban abrasif, à la vitesse de 1 000 m/min environ ou au disque de coton avec une granulométrie 000 ou plus fine. Les pâtes employées sont des pâtes claires à l’eau avec abrasifs durs (émeri, corindon, ponce, alumine...).

■ Meulage

Utiliser des meules tendres à structure aérée avec arrosage à l’eau. Les limes traditionnelles ne donnent pas satisfaction à cause de la ténacité et de la résistance à l’abrasion. Toutefois, les fraises-limes rotatives à moteur sont efficaces quand elles opèrent à grande vitesse. Les disques abrasifs montés sur axe flexible et les meules portatives enlèvent rapidement et efficacement de la matière. Ce type d’opération requiert habituellement un liquide de refroidissement.

■ Polissage

Utiliser un disque en feutre sur touret ou un disque en flanelle imbibée de pâte abrasive à base de suif. Ne pas appuyer excessivement sur la pièce pour éviter toute fusion locale. On peut poncer tous les grades de polyamides en utilisant les méthodes classiques. L’emploi d’un papier de verre fin ou d’une toile émeri fine donne un fini de surface satiné et on peut rendre la surface très brillante par lustrage au buffle dont les disques sont imprégnés d’une pâte à lustrer telle que celle qui sert au polissage des polymères acryliques.

Le polissage du polyamide 11 s’effectue à sec et doit être conduit prudemment pour éviter toute fusion superficielle. On polit au touret sur disque de coton avec une pâte abrasive très fine ou du suif.

3.11 Polymères fluorés (PTFE, PVDF)

Les principaux paramètres préconisés pour l’usinage des polymères fluorés sont répertoriés dans le tableau 19.

3.12 Polysulfones, polyétherimide et polycétones

Les principaux paramètres préconisés pour l’usinage de ces composés sont rassemblés dans le tableau 20.

Tableau 20 – Principaux paramètres préconisés pour l’usinage des polysulfones, polyétherimide et polycétones

Procédé	Paramètres	Unité	PSU, PES, PEI, PEEK (1)
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	10 à 15
	Angle de pente	degré	0 à 15
	Pas de denture	mm/dent	8 à 25
	Vitesse de coupe	m/min	1 000 à 3 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	25 à 40
	Angle de pente	degré	0 à 8
	Pas de denture	mm/dent	3 à 8
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 400
Tournage	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Angle d’affûtage	degré	0 à 10
	Angle d’arête	degré	0 à 45
	Avance	mm/tr	0,05 à 0,4
	Vitesse de coupe	m/min	200 à 400
Fraisage	Angle de dépouille	degré	5 à 15
	Angle d’affûtage	degré	0 à 15
	Avance	mm/tr	≤ 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	200 à 400
Perçage	Angle de dépouille	degré	5 à 10
	Angle de pointe	degré	90 à 120
	Angle de pente	degré	3 à 5
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,3
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 100

(1) PSU : polysulfone
PES : polyéthersulfone
PEI : polyétherimide
PEEK : polyétheréthercétone

3.13 Thermodurcissables

■ Filetage

Les tarauds standards utilisés pour les métaux conviennent très bien. Pour les travaux de filetage au tour, la profondeur de passe ne doit pas excéder 0,25 à 0,40 mm.

■ Rectification

Il est possible de meuler des pièces en respectant des tolérances très étroites à l'aide d'une planeuse d'atelier. La vitesse de la table est de 25 m/min pour des passes de dégrossissage et de 12 à 13 m/min pour les passes de finition. On peut utiliser l'eau comme fluide de refroidissement. Les pièces sont maintenues sur la table à l'aide d'un ruban adhésif double face.

■ Ponçage

Au papier abrasif grade 400.

■ Polissage

À la meule souple de diamètre 300 mm avec une pâte à polir, à des vitesses comprises entre 600 et 1 500 tr/min ou au buffle en disque de coton Ø25 à 30 cm, avec une poudre de ponce humide de grosseur 120 au début, puis tripoli (éviter l'emploi de rouge) et buffle en flanelle à des vitesses de 600 à 900 m/min.

Quelques autres paramètres préconisés pour l'usinage de ces composés sont rassemblés dans le tableau 21.

Tableau 21 – Paramètres préconisés pour l'usinage des thermodurcissables

Procédé	Paramètres	Unité	PF, MF, UF (1)	PI (2)
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	30 à 40	–
	Angle de coupe	degré	5 à 8	–
	Pas de la denture	mm	6 à 8	2 à 3
	Vitesse de coupe	m/min	2 000 à 4 000	1 800 à 2 500
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	30 à 40	–
	Angle de coupe	degré	5 à 8	–
	Pas de la denture	mm	5 à 10	2 à 3
	Vitesse de coupe	m/min	800 à 900	300 à 450
Tournage	Angle de dépouille	degré	12 à 15	25 à 30
	Angle de coupe	degré	20 à 35	–
	Avance	mm/tr	0,3 à 0,5	0,05 à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	90 à 300	100 à 2 500
Perçage	Angle de dépouille	degré	12 à 15	25 à 30
	Angle de pointe	degré	60 à 100	90 à 115
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,5	–
	Vitesse de coupe	m/min	15 à 120	–

(1) PF : phénols-formols
MF : mélamine-formol
UF : urée-formol

(2) PI : polyimides

3.14 Polyuréthanes et caoutchoucs

Il y a très peu de données bibliographiques sur l'usinage conventionnel de ce type de matériau. La pratique industrielle consiste à refroidir la pièce (cryogénie) pour rigidifier le matériau et le rendre plus apte à des opérations d'usinage. Sinon, la matière est trop souple pour s'usiner facilement. De plus, elle encrasse rapidement les outils. Il est souvent nécessaire de refroidir plusieurs fois à intervalles réguliers pendant une seule opération d'usinage car le matériau se réchauffe assez vite au contact de l'outil.

Pour ces matériaux *mous*, la technique du jet d'eau est intéressante. Cependant, elle ne permet pas tous les types d'usinage, comme le fraisage ou le tournage, par exemple. On pratique également l'usinage par abrasion (figure 6).

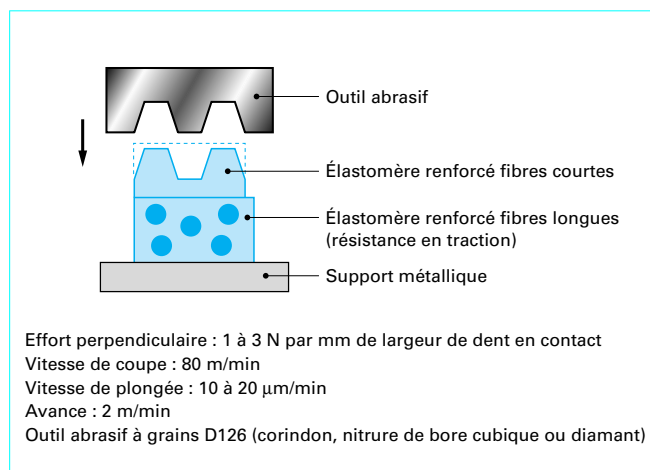


Figure 6 – Usinage par abrasion de courroies en élastomère

Tableau 22 – Principaux paramètres préconisés pour l'usinage du polyuréthane

Procédé	Paramètres	Unité	Polyuréthane
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	20 à 40
	Pente d'affûtage	degré	5 à 10
	Pas de la denture	mm/dent	5 à 10
	Vitesse de coupe	m/min	2 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	20 à 40
	Pente d'affûtage	degré	5 à 10
	Pas de la denture	mm/dent	5 à 10
	Vitesse de coupe	m/min	≥ 200
Tournage	Angle de dépouille	degré	10 à 15
	Pente d'affûtage	degré	15 à 25
	Avance	mm/tr	0,1 à 0,3
	Vitesse de coupe	m/min	≥ 150
Fraisage	Angle de dépouille	degré	15 à 30
	Pente d'affûtage	degré	5 à 20
	Avance	mm/tr	0,05
	Vitesse de coupe	m/min	≥ 300
Perçage	Angle de dépouille	degré	5 à 10
	Pente d'affûtage	degré	20 à 30
	Avance	mm/tr	0,02 à 0,4
	Vitesse de coupe	m/min	20 à 60
	Angle de pointe	degré	≥ 90

Les principaux paramètres d'usinage du polyuréthane sont rassemblés dans le tableau 22.

Pour tronçonner des pièces minces, il est recommandé d'utiliser un outil de coupe dont le tranchant est très effilé avec un angle d'attaque de 15°, c'est-à-dire pouvant être considéré comme un couteau avec un tel angle de coupe. En raison du fort dégagement de chaleur par le frottement, il convient de refroidir la pièce à l'eau.

4. Autres procédés

4.1 Découpe par laser

L'usinage résulte de l'action thermique du rayonnement qui vaporise la matière en une fraction de seconde. Entre la zone où la matière a été *vaporisée* et la zone restée *froide*, il y a une zone affectée thermiquement, plus ou moins large selon la nature de la matière et les paramètres du procédé. Dans cette zone intermédiaire, il peut y avoir une carbonisation partielle du plastique. Un mouvement d'avance trop lent, pour la découpe de fortes épaisseurs, par exemple, peut entraîner une carbonisation ou une inflammation de la matière sur les bords de la zone usinée. Il y a donc une vitesse d'avance minimale à respecter en fonction de l'énergie et de la nature de la matière. Bien souvent, les pièces plastiques de couleur claire nécessitent une finition après découpe car le laser laisse une trace de carbonisation visible sur les bords de coupe.

Avec les réglages optimaux, cette tendance à la carbonisation est :

- basse pour les ABS, les cellulositiques, le PMMA, les polyamides, le polyéthylène et le polypropylène, les polymères fluorés ;
- moyenne pour les polyesters, le polystyrène, les polycarbonates et le PVC ;
- élevée pour les époxydes et les phénoliques.

La dégradation thermique de la matière peut aussi dégager des vapeurs toxiques et corrosives (cas du PVC, par exemple).

Cet aspect *thermique* peut générer des problèmes de sécurité, comme des dangers pour les yeux et la peau, mais aussi des dangers électriques, des risques de toxicité et d'inflammabilité.

La puissance minimale nécessaire est d'environ 250 W. La projection d'un gaz d'appoint refroidit la pièce et permet d'obtenir des profils de coupe plus soignés et non oxydés [cas d'un matériau sensible à l'oxygène de l'air et de l'utilisation d'un gaz inerte (azote)]. Généralement, le rayonnement est dispersé après la découpe mais, dans certains cas d'usinage, une protection arrière peut s'avérer nécessaire : elle est réalisée par des plaques de graphite.

Exemple : découpe industrielle en plastique pour tapis de revêtement de plancher automobile, revêtement de coffre à bagages en ABS ou PVC, tableau de bord (multicouche à base de polyuréthane de densité variable).

4.2 Découpe au jet d'eau

La principale caractéristique de ce procédé, par rapport aux autres procédés de découpe, est qu'il assure une découpe à froid, sans endommagement thermique ni déformation thermique du matériau.

Cette technique utilise l'action mécanique d'un jet fin de liquide à forte pression et grande vitesse. Le matériau est découpé par dépassement de sa limite élastique. Industriellement, aujourd'hui, le procédé ne permet que la découpe et le perçage débouchant.

Les paramètres de réglage sont :

- pour l'eau pure : le diamètre de buse, la pression de travail, la distance buse – pièce, la vitesse d'avance ;
- pour l'eau avec polymère, il faut ajouter la nature du polymère et le taux de polymères ;
- pour l'eau additionnée d'abrasifs, il faut ajouter la nature d'abrasif, la granulométrie, le débit d'abrasifs, le diamètre du tube de focalisation des abrasifs dans le jet.

Tableau 23 – Paramètres pour l'usinage au jet d'eau de plastiques

Nature du polymère	Épaisseur (mm)	Vitesse (m/min)	Fluide	Pression (bar)
ABS	2	9	Eau + abrasifs	–
Caoutchouc	3 à 100	0,2 à 70	Eau pure	–
Époxyde	1,5	1	Eau + abrasifs	–
Phénolique (bakélite)	4	0,5	Eau pure	3 800
Phénolique chargé fibres (bakélite)	12	1 à 2	Eau + abrasifs	3 200
Polyéthylène haute densité	1	20	Eau pure	3 800
	2	5	Eau pure	3 800
Polypropylène	3	6	Eau + abrasifs	–
Polystyrène	8	0,2	Eau + abrasifs	–
Polystyrène choc	10	1	Eau pure	–
Polyuréthane 60 shore A	20	5	Eau pure	3 800
Polyuréthane 90 shore A	40	0,02	Eau pure	3 800
	15	1	Eau pure	3 800
PTFE (téflon)	3	10	Eau pure	3 800
PVC rigide	1	25	Eau pure	3 800
	3	6	Eau pure	3 800
	10	2	Eau pure	3 800
PVC souple	3	10	Eau pure	3 800
	50 × 0,3	1	Eau pure	3 800

Le fonctionnement le plus économique est le travail avec une buse de petit diamètre et à la pression la plus basse. Plus la puissance du jet au point d'impact est grande, plus l'arrachement de matière est brutal. C'est ainsi qu'une buse fine et une pression forte donnent un impact mieux localisé, mais l'utilisation d'une buse de plus grand diamètre et une pression moindre donneront, dans certains cas, une coupe plus nette.

En ce qui concerne l'incorporation d'abrasifs, on peut penser que plus le taux d'abrasifs est grand, plus la profondeur de coupe est grande, mais il y a une valeur au-delà de laquelle l'efficacité commence à diminuer car l'eau doit communiquer une partie de son énergie à l'abrasif. Or, si cette énergie est trop importante, le jet perd de sa puissance et devient trop faible.

La distance d'attaque influe sur la profondeur de coupe : les distances habituelles sont entre 5 et 20 mm. Une valeur trop éloignée de la valeur optimale implique une diminution de la qualité et une augmentation de la largeur de découpe. La qualité de coupe augmente également avec la pression du jet et le diamètre de la buse. Elle diminue, si on augmente la vitesse d'avance, l'épaisseur du matériau ou sa dureté.

D'autre part, la profondeur de coupe est directement proportionnelle à la pression de la pompe. Elle augmente généralement avec le diamètre du jet mais diminue si l'on accroît la vitesse d'avance.

La précision de l'usinage est donnée par le mécanisme porteur du jet. Ainsi, une machine classique à découpe plane (X-Y) donne une précision de l'ordre de 0,1 mm. Il existe des machines 6 axes, découpant en suivant un contour de pièces en 3D où la précision est plutôt de l'ordre de 0,5 mm.

Par contre, la répétitivité de découpe est de 0,1 à 0,2 mm sur la série de pièces identiques découpées avec les mêmes paramètres de réglage.

Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage au jet d'eau sont rassemblés dans le tableau 23.