

Usinage des composites à matrice polymère

par **Alain DESSARTHE**

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

1. Spécificités des composites à l'usinage	BM	7 425	-	2
1.1 Comportements du matériau			-	2
1.2 Spécificités des techniques d'usinage			-	2
2. Usinage par enlèvement de copeaux			-	4
2.1 Cisaillage et poinçonnage			-	4
2.2 Sciage			-	4
2.3 Tournage			-	5
2.4 Fraisage			-	6
2.5 Perçage et alésage			-	6
2.6 Autres procédés			-	8
3. Découpe des matières premières			-	9
3.1 Nappes de fibres			-	9
3.2 Mousses plastiques			-	9
3.3 Nids-d'abeilles			-	9
4. Usinage des structures sandwich			-	9
5. Découpe au laser			-	10
5.1 Principe			-	10
5.2 Paramètres			-	10
6. Usinage par jet d'eau			-	11
6.1 Principe			-	11
6.2 Paramètres			-	13
Pour en savoir plus				

Doc. BM 7 425

Dans cet article, on entend, conformément à son titre, par « matériaux composites » ceux dont la matrice est un polymère, et non pas les composites céramiques ou métalliques. Les matériaux composites se mettent en œuvre plutôt par moulage ; cependant, des usinages sont assez souvent pratiqués pour différentes raisons comme par exemple :

- perçage pour assemblage par boulonnage ou rivetage ;
- détourage de pièces moulées ;
- fabrication de petites séries ;
- obtention de cotes extrêmement précises ;
- découpe de préforme à mouler ;
- découpe à grandes cadences du type « emporte-pièce ».

Le lecteur se reportera aux articles spécialisés de la rubrique « Composites » du traité Plastiques et Composites pour de plus amples renseignements sur leurs caractéristiques et méthodes de moulage. De même, il se reportera aux articles spécialisés de la présente rubrique du traité Génie mécanique pour une

présentation plus détaillée des procédés d'usinage utilisés pour les composites, notamment :

- *Matériaux pour outils de coupe.*
- *Coupage thermique et coupage au jet d'eau.*
- *Usinage par ultrasons.*
- *Tournage.*
- *Outils coupants. Brochage. Taillage.*
- *Outils coupants. Taillage des roues cylindriques.*
- *Outils coupants. Taillage des roues coniques.*

1. Spécificités des composites à l'usinage

1.1 Comportements du matériau

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

■ **Hétérogénéité** : les matériaux composites sont constitués d'un polymère contenant un réseau de fibres en nappe, éventuellement tissées. Il faut donc usiner simultanément deux matières de natures différentes (résine et fibres), voire trois si la matrice contient en plus des charges minérales. Avec ce type de matériau, l'usinage dit « par enlèvement de copeaux » se traduit en fait par une création de poudre et non pas par la formation d'un copeau. Ces poudres sont souvent propulsées dans l'air autour de l'outil de coupe avant de retomber. Il faut alors penser que ces poudres peuvent être abrasives (fibres de verre) ou conductrices d'électricité et susceptibles de générer un court-circuit (fibres de carbone).

■ **Anisotropie** : dans le cas de composites à fibres orientées, on peut aussi avoir une structure anisotrope (comportement différent selon la direction envisagée), ce qui s'ajoute aux difficultés d'usinage. La rigidité, par exemple, sera plus grande dans le sens longitudinal des fibres que dans le sens perpendiculaire, ce qui peut, à l'usinage, générer des déformations non souhaitées.

■ **Conductivité thermique** : ce sont des matériaux isolants sauf ceux chargés de particules métalliques ou renforcés de fibres de carbone. La chaleur créée par l'opération d'usinage restant concentrée sur la zone usinée peut entraîner une déformation thermique importante et un risque de dégradation thermique.

■ **Usure des outils** : la présence de fibres de verre engendre une usure très rapide des outils traditionnels (acier rapide). Les outils au carbure, voire diamantés, sont impératifs.

1.2 Spécificités des techniques d'usinage

Usiner des composites signifie usiner des matériaux différents, en même temps : résine ou plastique plutôt mou et fibres souvent plus dures (le verre surtout). Il faut donc optimiser les paramètres pour cela, voire choisir une des techniques qui se sont développées justement à cause des difficultés rencontrées avec les moyens classiques : le **laser** ou le **jet d'eau**.

De plus, l'opération elle-même peut impliquer des endommagements aux abords de la zone usinée tels que arrachement de fibres, délamination visible (arrachement de couche), délamination interne (dissociation entre deux couches du matériau), dégradation thermique (échauffement trop important), obtention d'une surface rugueuse car les charges ou les fibres ont été arrachées et non pas coupées, etc.

Il faut noter au préalable que les données pratiques énumérées dans ce qui suit émanent pour la plupart de documents techniques publiés par des sociétés spécialisées, mais 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 les réajuster à l'application prévue.

Les composites à matrice polymère ne sont généralement pas conducteurs d'électricité, l'électroérosion est donc impossible, ce qui limite les procédés utilisables à, essentiellement, l'usinage conventionnel, parfois qualifié d'usinage par enlèvement de copeaux, l'usinage par laser, par jet d'eau et par ultrasons.

Les ultrasons ne sont que rarement utilisés, car ils sont plutôt adaptés aux matières dures. On peut noter quelques applications pour la découpe de tissu de verre par exemple.

L'usinage conventionnel est toujours très utilisé, mais on peut remarquer un fort développement des deux méthodes laser et surtout jet d'eau qui, pour la découpe et le perçage, présentent de gros avantages avec les matériaux composites, hétérogènes et relativement « tendres » par rapport aux métaux usuels (tableau 1).

Pour l'**usinage par enlèvement de copeaux**, on peut faire les remarques générales suivantes.

■ Outils

- **En acier rapide** : ils sont les moins chers à l'achat mais ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibres de verre. Leur qualité de coupe est bonne à moyenne. L'acier rapide est un acier allié comportant du carbone, du chrome et du tungstène, parfois du molybdène, du vanadium et du cobalt.

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

Tableau 1 – Comparaison des procédés d’usinage pour composites

Paramètres	Usinage par outil classique	Usinage par jet d'eau	Usinage par laser
Possibilités	Toutes	Découpe et perçage traversant	Découpe et perçage traversant
Thermique	Échauffement possible	Pas d'échauffement	Dégradation thermique
Résidu	Copeaux et poussières	Poussières emportées par l'eau	Pas de résidus (matière vaporisée)
Fixation	Solide	Légère	Légère
Usure	L'outil	La buse (10 à 200 h)	
Épaisseur	Limitée par la géométrie de l'outil et la puissance de la machine	Limitée par la divergence et la perte de puissance du jet	Limitée par la puissance du rayon et la dégradation thermique du matériau
Machines	Toute une gamme, de l'outil portable manuel à la machine-outil à commande numérique	Compresseur hydraulique et table de découpe avec portique	Générateur laser dans un local clos
Réglages	Puissance de la machine Outil (matériau, géométrie) Avance Vitesse de coupe	Nature du fluide (eau, abrasifs) Diamètre de la buse Pression Distance d'attaque Vitesse de déplacement	Puissance du rayon laser Vitesse de déplacement Gaz d'appoint
Alimentation	Énergie électrique	Pompe HP (énergie électrique, air comprimé) et eau	Énergie électrique, fluide de refroidissement du générateur, gaz d'assistance éventuel
Hygiène et sécurité	Bruit et utilisation de machine (outil classique)	Bruit de groupe hydraulique Sécurité de pompes haute pression	Danger du rayon Gaz毒ique Risque d'incendie Réglementation très stricte
Maintenance	Machine-outil (électricité, entretien, graissage...)	Maintenance électrique et hydraulique (pompe, joint...)	Maintenance très spécialisée du générateur laser

● **Diamantés** : ce sont les plus chers mais pour certains usinages, par exemple une grande série de pièces en composites fortement renforcés en fibres de verre qui génèrent une usure rapide d'outil, le coût global de l'usinage peut être inférieur à celui d'un usinage avec une autre nature d'outil. Ils sont souvent constitués de grains de diamants fixés sur un support. Les dimensions et la concentration des grains ainsi que la nature du support sont à prendre en compte dans le choix d'un outil. La granulométrie est souvent définie par un nombre :

- 40 à 60 sont des valeurs courantes ;
- 100 à 200 et plus sont des granulométries fines à extrafines pour des finitions.

Ces nombres correspondent à une norme américaine. En fait, il existe plusieurs normes pour définir la granulométrie parmi lesquelles celle de la Fédération européenne des producteurs d'abrasifs (FEPA) et la mesure américaine en mesh, qui correspondent, de la manière suivante, à la grosseur du grain abrasif :

- FEPA - D602 = 30 à 40 mesh = grain d'environ 0,5 mm ;
- FEPA - D252 = 60 à 80 mesh = grain d'environ 0,2 mm ;
- 100 à 200 mesh = grain d'environ 0,1 mm ;
- 200 à 400 mesh = grain d'environ 0,05 mm.

Les normes ISO 565, NFX 11-504, ASTME 11, WS Tyler Cleveland 14 et BS410 concernent également la granulométrie.

Selon le mode de fixation des grains sur le support, on distingue :
 — les **outils à grains fixés** par dépôt électrolytique sur un support métallique à revêtement généralement au nickel : il en résulte un outil comportant une simple couche de grains très abrasifs car très en relief sur la surface, ce qui implique, en contrepartie, une durée de vie assez courte car les grains sont plus facilement arrachés lors des usinages ; cependant, l'outil peut être reconstitué par un nouveau dépôt ;

— les **outils à grains compactés** à l'aide d'un liant sur un support métallique : ceux-ci sont plus résistants car ils comportent plusieurs couches de grains de diamants, mais ils nécessitent un refroidissement en cours d'usinage ;

— les **outils en diamant massif** fixés sur un support métallique.

Les outils diamantés sont utilisés à des vitesses supérieures à celles employées avec les aciers rapides ou les carbures.

● **Revêtements spéciaux anti-usure** : de nombreux développements sont en cours pour mettre au point des outils plus résistants à l'usure. Il existe ainsi des revêtements déposés sur les outils en acier qui prolongent la durée de vie de manière très sensible. Ce sont des revêtements à base de nitrure de titane, par exemple, qui multiplieraient par 2 à 5 (selon les sources d'information et le type d'utilisation) la durée de vie d'un outil de fraisage.

■ Fluide de refroidissement

Cela peut être :

- l'eau : sous forme de jet liquide continu ou vaporisé en fines gouttelettes ;
- un mélange eau-huile soluble : dans la mesure où celle-ci ne réagit pas avec le matériau ;
- l'air : soit sous forme d'air comprimé soufflé, soit par aspiration ; dans ce 2^e cas, s'il s'agit d'usinage créant de la poudre ou des copeaux très petits, on a l'avantage de les récupérer dès leur formation par l'usinage.

■ Comportement des composites

● La **conductibilité thermique** des composites, inférieure à celle des métaux, oblige à **limiter** le plus possible la **chaleur engendrée** en diminuant la friction de l'outil.

● La **respiration de la poussière** issue de l'usinage de composites à base de fibres de verre est nuisible à la santé. Il faut donc prévoir des installations d'aspiration efficaces sur les machines et veiller à un nettoyage méticuleux après le travail.

● Des **différences de comportement** sont constatées selon la **nature des fibres**.

Ainsi, par exemple, les **paramètres** sont différents selon que le composite est à base de fibres d'aramide (Kevlar[®] de Du Pont de

Nemours par exemple) ou de polyéthylène, puis de fibres de carbone et de fibres de verre.

On peut noter, par exemple, que l'effort nécessaire de perçage est plus élevé pour le composite à base d'aramide, un peu moins pour le composite contenant des fibres de carbone et plus faible pour le composite renforcé de fibres de verre.

Par contre, que le stratifié soit à base de résine polyester, ou époxydé, ou phénolique, etc., influe très peu sur les caractéristiques d'usinage. Des détails sont donnés ci-après en fonction de la nature des fibres. Le cas de la fibre de verre peut être considéré comme le cas général de l'usinage des stratifiés. Les paragraphes concernant les autres fibres ne donnent que des recommandations vraiment particulières.

- Il faut éviter toute **déformation due au dispositif de fixation** sur le bâti de machine.

- **Stratifiés en fibres de verre** : le verre est très abrasif aussi bien sous forme de fibres, courtes ou longues, que sous forme de microbilles.

L'emploi d'*outils* en acier rapide est par conséquent déconseillé en raison de leur usure très rapide, les carbures sont préférables et les outils diamantés sont quasiment indispensables pour les grandes séries et les stratifiés à taux de fibres élevé.

Il est recommandé d'utiliser un *fluide de refroidissement* pour réduire l'usure de l'outil et évacuer les fines particules de verre résultant de l'usinage et qui peuvent être dangereuses pour le personnel de l'atelier (inhalation, contact avec les yeux). Dans certains cas, on peut se contenter d'aspirer la poudre causée par l'usinage.

- **Stratifiés en fibres de carbone** : les opérations d'usinage recommandées pour ces matériaux sont semblables à celles conseillées pour les composites verre-résine.

Cependant, en raison du coût de ces produits, il est essentiel d'utiliser des *outils* bien affûtés qui assureront une meilleure qualité et éviteront des délamnages impliquant une baisse des performances du matériau. Les fibres de carbone usent moins vite les outils que les fibres de verre.

- **Stratifiés en fibres d'aramide** : la fibre d'aramide est très difficile à couper car, contrairement aux fibres de verre et de carbone, elle n'est pas fragile ou cassante. Elle « fuit » devant l'outil et il faut soit la maintenir latéralement, soit donner des mouvements à l'outil pour agir par cisaillement pur, sinon de nombreuses fibres sont arrachées et laissent un aspect pelucheux. Pour s'en rendre compte, il suffit d'essayer de couper une mèche ou un tissu de fibres avec une paire de ciseaux classique. L'usinage (découpe ou perçage par exemple) d'un stratifié Kevlar® se traduit par un bord de coupe recouvert de « peluches » constituées par les extrémités de fibres « arrachées » plutôt que découpées nettement (un perçage Ø10 mm avec un outil conventionnel peut conduire à l'obtention d'un trou rendu invisible après enlèvement du foret à cause des peluches qui recouvrent le trou percé). Des *outils spécifiques* « Kevlar » ont donc été développés.

- **Stratifiés cellulosiques** : les résines renforcées de fibres cellulaires (bois, papier, coton) sont fréquemment usinées à partir de demi-produits (plaqué, tube...). Ce sont, en effet, les stratifiés industriels, les placages pour mobilier de bureau, établi, mobilier de cuisine, etc. Leur usinage s'apparente un peu à de la menuiserie.

Ils s'usinent au moins aussi facilement que les métaux avec des *outils conventionnels* standards.

L'usinage peut généralement être fait *sans liquide de refroidissement*, mais il est recommandé d'assurer dans tous les cas l'évacuation des copeaux à l'aide d'air comprimé. Pour une utilisation de ces matériaux dans une application décorative, électrique ou frottante, il faut noter que l'usinage détruit la peau recouvrant le matériau à la suite de la mise en œuvre, ce qui nuit à l'esthétique, mais peut aussi occasionner des reprises d'humidité diminuant les qualités électriques ou frottantes.

2. Usinage par enlèvement de copeaux

L'expression « enlèvement de copeaux » est impropre dans le cas des composites où l'usinage produit plus de la poudre que du copeau.

2.1 Cisaillage et poinçonnage

Le cisaillage et le poinçonnage, ou la découpe à l'emporte-pièce, sont applicables aux matériaux composites en épaisseur mince (jusqu'à 2,5 mm). L'outil coupant doit être particulièrement bien affûté. Utiliser une cisaille du type « guillotine » à descente verticale avec lame supérieure en acier traité ayant une pente d'attaque d'environ 0,7 % par rapport à la lame inférieure, jeu réglé au minimum. La société Ertal (marque *Tufnol*) recommande une pente d'outil de 2 % pour le cisaillage de plaque jusqu'à 2,5 mm.

2.2 Sciage

Pour les opérations de sciage, on peut utiliser la plupart des types de scies, mais la denture de la lame doit comporter une voie suffisante pour garantir :

- que le risque d'obstruction des dents par les copeaux soit supprimé ou au moins réduit ;
- que le frottement soit réduit au minimum, surtout dans le cas des scies électriques à grande vitesse.

Il faut proscrire l'emploi de lames de scie usées.

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.

On peut utiliser avantageusement des disques lisses diamantés pour la découpe de stratifiés.

Découpe à la scie à main de stratifié verre-résine

On utilisera une scie à métaux à denture fine (24 à 32 dents par pouce – 25,4 mm). La lame standard de scie à main convient (longueur = 300 mm, largeur = 13 mm, épaisseur = 0,65 mm) ; cependant une lame bimétal HSS - acier rapide supérieur donne de meilleurs résultats.

Découpe à la scie circulaire de stratifié verre-résine

On utilisera une scie avec les caractéristiques suivantes :

- disque Ø20 cm, diamanté de granulométrie 60 à 80 ;
- vitesse supérieure à 1 000 tr/min ;
- avance : inférieure à 7/e m/min (e étant l'épaisseur du matériau) ;
- effort de l'outil sur le matériau = 2 à 3 daN.

L'utilisation d'une meule à tronçonner de qualité spéciale peut donner de bons résultats. Dans ce cas, il faut régler la vitesse de rotation pour avoir une vitesse linéaire périphérique de 2 400 m/min.

Découpe à la scie à ruban de stratifié verre-résine

Ce procédé n'est à employer que pour des découpes d'ébauches et de petites séries. On utilisera une lame en acier rapide de 18 à 24 dents par pouce et une vitesse de coupe de 40 à 100 m/min.

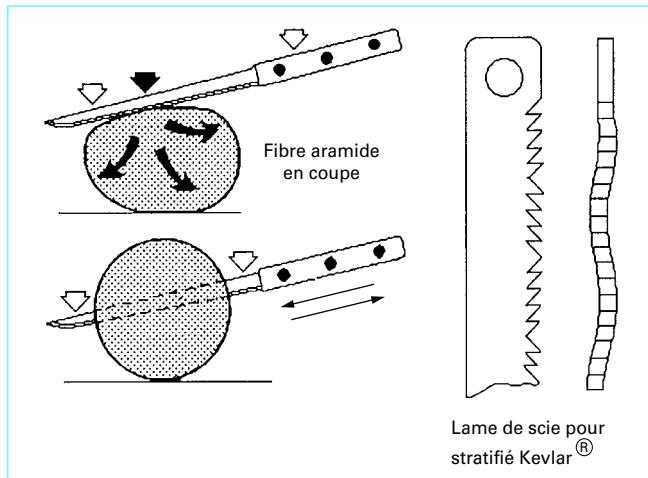


Figure 1 – Découpe de composites Kevlar® (doc. Du Pont de Nemours)

Un chromage dur (5 à 6 µm) peut accroître la durée de vie de l'outil de 5 à 10 fois. Il est possible d'améliorer l'aspect des bords de coupe en utilisant une lame diamantée de grain 120 avec une vitesse de coupe de 1 000 m/min environ.

Découpe à la scie sauteuse de stratifié aramide-résine

D'après Du Pont de Nemours, une scie sauteuse avec lames à dents alternées :

- chargées de grains de carbure de tungstène (moyen ou grossier),
 - de vitesse : 10 000 à 20 000 coups/min,
 - d'avance jusqu'à 1 m/min (selon l'épaisseur)
- donne des résultats acceptables (figure 1).

Découpe à la scie circulaire de stratifié aramide-résine

La documentation Du Pont de Nemours propose des outils en acier rapide de diamètre 25 cm et épaisseur 3 mm avec 64 dents, alternées et en biais (hauteur d'une dent : 6 mm, angle de bec : 12°, angle de face : 15° et angle de dépouille : 5°). Le sens de coupe doit être inversé (dos de la dent en premier), avec une vitesse de la lame de 1 300 à 3 500 tr/min et une avance jusqu'à 1 m/min selon l'épaisseur.

La découpe peut être réalisée à sec mais un refroidissement avec un mélange eau-huile soluble est préférable. Répétons que la lame doit tourner dans le sens inverse du sens conventionnel, c'est-à-dire de telle sorte que la base de la dent entre en premier dans le composite (figure 2).

Découpe à la scie à ruban de stratifié aramide-résine

L'utilisation d'une lame en acier rapide à denture fine (7 dents par centimètre), avec un profil semblable à celui de la lame de scie circulaire, est recommandée avec une vitesse de coupe de 1 300 à 2 000 m/min et un défilement de la lame dans le sens inverse du sens conventionnel : le dos de la dent entre en contact avec le matériau avant la pointe.

Découpe à la scie circulaire de stratifié cellulosique

L'emploi de lames en acier rapide à denture couchée au pas de 8 à 12 mm, d'épaisseur 1,5 à 2,2 mm est conseillé. Les vitesses périphériques d'outils doivent être de :

- 2 400 à 3 300 m/min si l'épaisseur est inférieure à 5 mm ;
- 1 500 à 2 400 m/min si l'épaisseur est comprise entre 5 et 10 mm ;
- 800 à 1 500 m/min si l'épaisseur est supérieure à 10 mm.

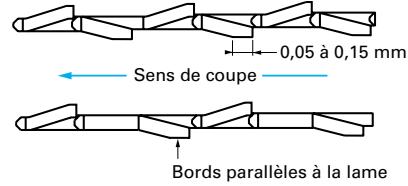


Figure 2 – Scie circulaire pour composites Kevlar®[®]
(doc. Du Pont de Nemours)

L'avance peut être d'environ 20/e m/min (avec e = épaisseur).

Une faible vitesse de coupe et l'emploi de lames parfaitement affûtées améliorent la qualité.

Découpe à la scie à ruban de stratifié cellulosique

Des lames en acier avec une vitesse de 1 000 à 3 000 m/min et une avance de 7/e m/min (e étant l'épaisseur) sont recommandées. Il faut noter que la précision ne sera guère inférieure à 1 mm avec ce procédé.

2.3 Tournage

Les figures 3 et 4 définissent les différents paramètres géométriques d'un outil de tour. On trouve souvent un vocabulaire légèrement différent selon les documentations.

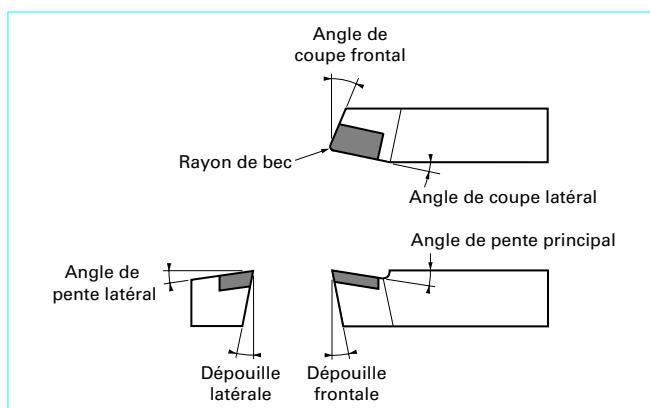


Figure 3 – Géométrie type d'un outil de tournage

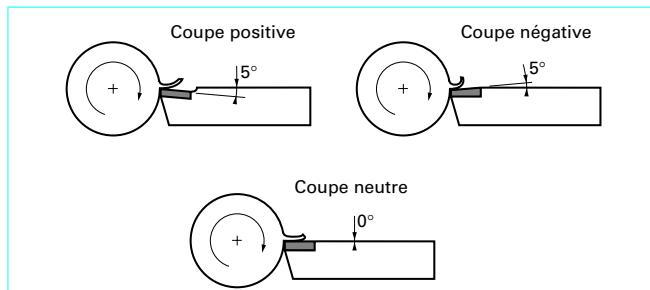


Figure 4 – Types de coupe

Les autres paramètres d'usinage sont (tableau 2) :

- l'avance : déplacement de l'outil en millimètre 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 égale à $\pi D N$ en mètres par seconde (avec D diamètre de la pièce en mètres et N vitesse de rotation de la broche en tours par minute).

Tableau 2 – Tournage : paramètres d'usinage

Paramètre	Unité	Verre-résine	Aramidé-résine	Stratifié cellulosique
Dépouille	degré	10 à 15	5 à 7	15
Angle de coupe	degré	8 à 10	5 à 7	5
Profondeur de passe	mm		0,25 à 0,5	1 à 3
Avance	mm/tr	0,05 à 0,2	0,04 à 0,06	0,1 à 0,5
Vitesse de coupe	m/min	60 (acier rapide) à 200 (carbure)	75 à 150	10 à 100 (500 carbure)

Il est fortement recommandé de prévoir quelques essais avant de se lancer dans l'usinage en série. Un refroidissement est souvent inutile. Il suffit, le cas échéant, de souffler de l'air comprimé sur le point de coupe. La recommandation générale est d'utiliser des outils en carbure pour une meilleure qualité et une usure moindre de l'outil.

2.4 Fraisage

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 les suivants :

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

Les fraises à main du commerce, à commande électrique ou pneumatique, sont utilisables pour le fraisage et la gravure de caractères sur des plaques multicouches par exemple. Les fraiseuses ou machines à graver, connues pour l'usinage des métaux, sont souvent utilisées de préférence pour des séries importantes. Il faut toutefois veiller à ce que les outils employés soient affûtés correctement pour les plastiques et puissent recevoir un volume de copeaux suffisant. Les machines utilisées doivent en outre permettre des vitesses de coupe suffisamment élevées.

Fraisage de stratifié verre-résine

Les paramètres d'usinage sont indiqués dans le tableau 3.

Dans le domaine des stratifiés, on utilise souvent des fraises pour découper un pourtour (détourage) de manière à enlever le contour résultant de la technique de moulage. C'est le cas des techniques de moulage au contact, par projection et par injection de résine basse pression par exemple, où il est souvent nécessaire de détourer une épaisseur de 1 à 2 mm de stratifié. Cela ne peut pas se faire par des techniques d'ébavurage classique, mais plutôt par usinage à l'aide de fraises à détourer par exemple.

Tableau 3 – Paramètres de fraisage de stratifié verre-résine

Paramètre	Unité	Valeur
Dépouille	degré	12 à 15
Angle de coupe	degré	7 à 10
Avance	mm/tr	0,01 à 0,03
Vitesse de coupe	m/min	60 (acier rapide) à 200 (carbure) et 1 500 (diamanté 40)

Le détourage peut également être prévu par « coupe en gel ». Pendant la réaction de polymérisation, la résine passe de l'état liquide, dans lequel on l'a déposée ou introduite dans le moule, à l'état dur et rigide de fin de polymérisation.

Entre ces deux états, il y a une très courte période (de l'ordre de la minute) où la résine est dans un état caoutchouteux, et pendant laquelle il est très facile de la découper à l'aide d'une lame (cutter). En prévoyant des réglettes dans le moule définissant la zone de coupe et résistant à la lame du cutter, on peut ainsi rapidement ébavurer la pièce avant démolage.

Fraisage de stratifié carbone-résine

On obtient un détourage d'épaisseur 5 mm, avec un outil cylindrique à grains de diamant :

- vitesse de coupe : 750 m/min ;
- avance : 0,05 à 0,2 mm/tr ;
- travail « en avalant » ;
- refroidissement avec fluide de coupe aqueux pour désenrasser l'outil.

Même détourage à l'aide d'une fraise 2 dents, à plaque diamant (droite, sans hélice) :

- à sec ;
- vitesse de coupe : 400 m/min ;
- avance < 0,05 mm par tour et par dent.

Fraisage de stratifié aramide-résine

Le fraisage est vraiment déconseillé, les bords de coupe obtenus étant particulièrement peluches avec les outils traditionnels. Par contre, il existe des outils de fraisage (fraises à pilote rapporté pour rivets et vis) qui donnent d'assez bons résultats. Ces outils sont en carbure de tungstène ou à plaquettes diamant. Il existe également des fraises à trépaner en acier rapide, à 2 dents, spéciales pour les stratifiés Kevlar® ($\varnothing 10$ à 50 mm).

Pour le détourage par fraisage, une détoureuse manuelle avec fraise à détourer spéciale et guide permettant de suivre un contour à l'aide d'un gabarit existe dans le commerce (épaisseur maximale de stratifié : 3 mm).

Fraisage de stratifié cellulosique

Il est conseillé d'utiliser des fraises à grosse denture en acier rapide, avec des angles de coupe et de dépouille d'environ 5 à 15°, une avance de 1 à 3 mm par tour, une vitesse de coupe de 50 à 300 m/min. Pour le surfacage, des vitesses supérieures, 1 000 à 1 500 m/min, sont nécessaires.

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. Ses principaux **paramètres** sont (figure 5 a) :

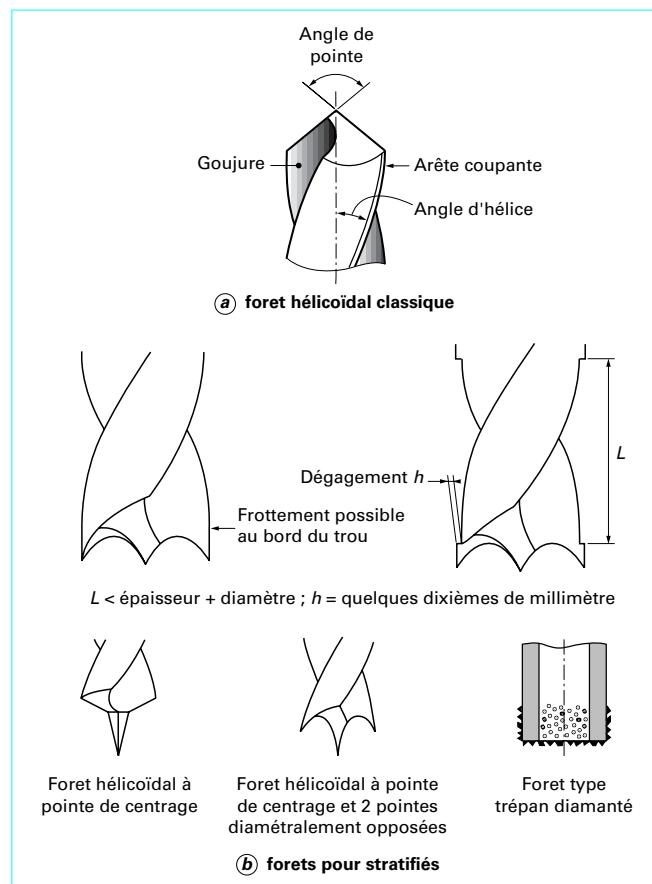


Figure 5 – Types de forets

- 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) : 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.

Pour les matériaux stratifiés, il existe d'autres types de foret utilisés (figure 5 b) :

- foret cylindrique diamanté ;
- foret avec pointe de centrage (de principe similaire à la mèche à bois).

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

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 ($< 30^\circ$).

Le foret hélicoïdal utilisé pour le perçage de l'acier satisfait à ces conditions pour un diamètre supérieur à 5 mm. L'inclinaison de l'arête tranchante légèrement inférieure de ces forets, comprise entre 25 et 30°, n'est pas gênante et réduit la tendance du foret au grippage lors du retrait hors du trou percé. 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.

Pour le perçage de grands diamètres, il est préférable de procéder en plusieurs étapes. Par exemple, pour un perçage $\varnothing 50$ mm, il faut percer d'abord $\varnothing 15$ mm, puis $\varnothing 35$ mm et enfin $\varnothing 50$ mm. 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 deux 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 suivre.

Les fraises coniques sont également souvent utilisées pour le perçage de plaques en plastique. Elles sont caractérisées par deux 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 avantageusement avec des forets spéciaux ou des outils de type trépan.

Le perçage de trous profonds s'accompagne facilement d'une accumulation de chaleur. Il est recommandé de refroidir le foret par soufflage d'air comprimé. Si, à cet effet, le foret est fréquemment sorti du trou, le soufflage améliore simultanément l'évacuation des copeaux et poussières.

Pour l'alésage, l'alésoir à coupe descendante convient. 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 mm/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.

Les paramètres de perçage sont indiqués dans le tableau 4.

Tableau 4 – Paramètres de perçage des stratifiés

Paramètre	Unité	Verre-résine	Carbone-résine		Cellulosique
			Foret carbure	Trépan diamanté	
Angle de coupe	degré	8 à 10			4 à 8
Angle d'hélice	degré	25			10
Angle de pointe	degré	120	118		70 à 120
Avance	mm/tr	$\leq 0,2$	$\leq 0,03$	$0,01 \text{ à } 0,05$	0,2 à 0,5

Tableau 4 – Paramètres de perçage des stratifiés

Paramètre	Unité	Verre-résine	Carbone-résine		Cellulosique
			Forêt carbure	Trépan diamanté	
Vitesse de coupe	m/min	60 à 70	15 à 20	50 à 70	30 à 80

Tableau 5 – Données DSM - E.P.P. pour le perçage du Tufnol

Diamètre de forêt mm	Vitesse tr/min	Avance mm/tr
1,5	7 500	0,15 à 0,20
5	2 500	
6,4	2 000	
12,7	1 000	
19	700	
25,4	500	

■ Perçage de stratifié verre-résine et carbone-résine

Un forêt en acier rapide peut convenir, mais la qualité est améliorée avec un forêt au carbure. Il est recommandé de maintenir l'arrière de la pièce et de ralentir l'avance avant de déboucher, afin d'éviter un délaminateur des dernières couches.

Pour le perçage des stratifiés tissés, la qualité de coupe et, notamment, l'absence de délaminateur, est améliorée si le forêt comporte une pointe centrale de guidage et un bord de coupe réduit pour diminuer le frottement sur le bord du trou (figure 5).

Les fabricants d'outils ont développé des outils spécifiques et préconisent quelquefois des paramètres de perçage adaptés aux composites (tableau 5).

■ Perçage de stratifié aramide-résine

Les forets utilisés pour le bois donnent d'assez bons résultats si l'on prend soin de soutenir le côté opposé au perçage pour éviter le délaminateur en fin d'opération. Une vitesse de coupe de 15 à 75 m/min est conseillée.

Du Pont de Nemours a longtemps proposé le forêt représenté sur la figure 6 a, mais des utilisateurs ont ensuite fait évoluer les forets pour aboutir à des solutions, maintenant tout à fait intéressantes.

Le forêt préconisé initialement par Du Pont de Nemours a la particularité de présenter deux hélices droite et gauche à la fois. Une vitesse de coupe de 8 à 60 m/min et un angle de pointe de 120° sont conseillés. Pour obtenir une surface de coupe propre, il faut, après perçage du trou, déplacer alternativement le forêt dans le sens axial pendant quelques secondes sur toute sa longueur. Cela a pour effet, à l'aide de la zone d'intersection entre les deux hélices, de cisailler les fibres qui resteraient sous forme de peluches.

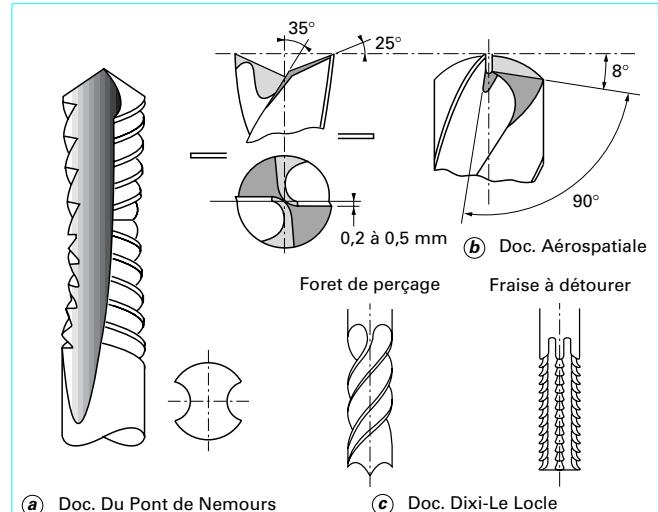
■ Depuis ces recommandations du producteur de Kevlar®, de nombreux essais ont été faits par plusieurs fabricants d'outils et utilisateurs (figures 6 b et 6 c) notamment parce que les stratifiés à base de Kevlar® sont très utilisés, dans les domaines des industries aéronautiques et de l'armement en particulier, et qu'il faut souvent les assembler par boulonnage ou rivetage à d'autres pièces d'une structure, donc percer des trous.

■ Perçage de stratifié cellulosique

Les paramètres de perçage sont indiqués dans le tableau 4.

Exemples de paramètres pour les stratifiés Kevlar®

- Détourage avec fraise en carbure de tungstène monobloc à 4 goujures : vitesse de coupe 250 à 500 m/min et avance 0,5 à 2,0 mm/min ;
- Perçage avec foret hélicoïdal en carbure de tungstène monobloc à 1 pointe centrale et 2 pointes extrêmes : vitesse de coupe 100 à 150 m/min et avance 0,05 à 0,15 mm/tr.

**Figure 6 – Forets et fraise à détouurer pour composites Kevlar®**

Des forets hélicoïdaux en acier rapide à spires allongées sont les plus appropriés. Il est recommandé de travailler en dégageant souvent pour éviter l'échauffement dû à la formation de copeaux dans l'hélice ; pour certains perçages profonds, un refroidissement à l'air comprimé est même nécessaire.

2.6 Autres procédés

■ Les opérations de **filetage** et de **taraudage** sont déconseillées dans les matériaux composites.

■ En ce qui concerne le **limage** ou le **rabotage**, de bons résultats ont été obtenus avec des limes à taille grossière ou des râpes à bois. 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.

Pour certaines pièces composites moulées au contact, par projection, par injection de résine, etc., le pourtour situé au niveau du plan de joint du moule ne peut être considéré comme une bavure, car l'épaisseur de matière peut être de quelques millimètres. La « bavure » sera dans ce cas découpée ou détournée par fraisage.

■ Les opérations de **sablage** ou **ponçage** détruisent la peau superficielle, à l'aspect souvent brillant, du composite et donne 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.

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.

Exemple de sablage à sec

- distance buse/pièce : 50 à 100 mm ;
- pression d'air chargé de particules de corindon (> 99 % d'alumine) : 0,1 à 0,3 MPa ;
- vitesse de balayage : 500 à 1 000 mm/min.

Le terme « sablage » vient de ce que l'on utilise souvent une poude 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.

Dans le cas d'une pièce en matériau composite à fibres longues (stratifié), l'usinage met les fibres à nu, or le **polissage** ne peut se faire que sur la résine. Il est donc nécessaire de réimprégnier la surface usinée d'une mince couche de résine (0,2 à 0,3 mm environ) et de pratiquer le polissage sur cette couche de résine après l'avoir éventuellement rectifiée pour assurer sa planéité.

Seul le polissage mécanique est applicable. Il s'effectue en appliquant légèrement la surface considérée avec un mouvement circulaire sur un disque rotatif constitué d'un empilement de disques de feutre, coton ou jumel, peau de chamois, tissu, 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.

On peut signaler la découpe possible **au fil chaud** pour une coupe assez grossière, dans le cas d'une mousse à base de thermoplastique (PVC, polystyrène...). Ce n'est pas possible avec une mousse thermodurcissable comme la plupart des mousse polyuréthanes rigides par exemple, puisqu'il n'y a pas de point de fusion de la matière. Le procédé consiste à utiliser un fil parcouru par un courant électrique, porté par effet Joule à une température compatible avec la nature du matériau de la mousse qui fond au contact du fil.

Tableau 6 – Découpe de tissu préimprégné résine-fibres à la scie sauteuse

Renfort	Nombre de plis	Épaisseur lame mm	Vitesse coups/min	Avance m/min
Verre	1	6,5	5 300	15
	4	6,5	3 100	15
Carbone	1	6,5	5 000	23
	5	6,5	5 000	23
	13	6,5	5 500	15
	21	6,5	5 500	15
Aramid	1	6,5	3 700	15
	6	6,5	500	15

3.3 Nids-d'abeilles

La difficulté principale de l'usinage de ce type de structure est la faiblesse de rigidité en flexion locale des parois des alvéoles. C'est un matériau ultraléger qui, après mise en œuvre entre deux parois stratifiées, confère une très grande rigidité globale à la structure, mais, ponctuellement, chaque paroi du nid-d'abeilles est fragile.

Il y a lieu par conséquent, surtout dans le cadre d'une opération de fraisage, de choisir des vitesses rapides pour découper la paroi plutôt que de l'arracher.

Les paramètres seront adaptés à la nature du matériau constituant le nid-d'abeilles. On trouve, en effet, dans le commerce, des nids-d'abeilles métalliques (alliage d'aluminium, acier...), plastiques (polypropylène...), en papier *Kraft*, en papier *Nomex*, etc.

4. Usinage des structures sandwich

La difficulté est encore accrue avec ce type de structure puisque, cette fois, il faut couper le stratifié de la peau (fibres et résine) et la mousse plastique ou le nid-d'abeilles métallique, voire le panneau de bois, en même temps.

Chaque type de matériau est particulier et il est plus que jamais recommandé de faire quelques essais préliminaires sur des échantillons de matières.

L'opération la plus fréquente est le **perçage** des structures sandwich. Dans ce cas, il faut percer successivement peau rigide, puis âme alvéolaire tendre, puis peau rigide. On peut, par exemple, conserver le même outil qui percera la peau stratifiée et l'âme alvéolaire, avec des efforts ou des vitesses et avances différentes, ou bien changer de foret, après avoir percé le stratifié, pour percer l'épaisseur alvéolaire. Au débouché de la 2^e peau, il faut faire attention à ne pas délaminer celle-ci, soit en soutenant la face arrière sur un support, soit en contreperçant à partir de la face arrière (à condition de

3. Découpe des matières premières

3.1 Nappes de fibres

La découpe de tissu préimprégné peut être faite à l'aide de ciseaux classiques, d'une lame coupante (type « cutter »), d'une scie sauteuse (tableau 6) ou à l'emporte-pièce.

3.2 Mousses plastiques

Ces matériaux alvéolaires, très peu denses (10 à 100 kg/m³), se découpent et s'usinent assez facilement, parfois même avec des **outils de type « menuiserie »**. L'un des inconvénients de la découpe de mousses à grande cadence est la gêne causée par les particules de matières qui se « collent » sur les surfaces métalliques par phénomène électrostatique. Des précautions doivent être prises pour isoler la zone d'usinage de mousse (les particules de mousse résultant de l'usinage sont très légères) du reste de l'atelier et à bien protéger l'opérateur (inhalation possible de poussières à éviter).

La découpe de certaines mousses à grande vitesse peut aussi créer une dégradation très locale du matériau par échauffement, donnant lieu à l'émanation de gaz toxiques (à base de chlore pour le polychlorure de vinyle (PVC), à base de dérivés cyanhydriques pour les polyuréthanes, par exemple), en très petites quantités mais qui, au fur et à mesure des mois, peuvent s'avérer toxiques pour le même opérateur.

pouvoir faire correspondre précisément l'axe de contreperçage avec celui du premier perçage.

■ Pour un **fraisage** ou un **détourage**, le même outil doit usiner les deux types de matériaux en même temps, ce qui ne donne généralement qu'un usinage grossier. Il est nécessaire de procéder à une finition pour rendre plus esthétique le bord de coupe si besoin est.

Ce type de structure se prête bien à un usinage par jet d'eau haute pression (§ 6) qui donne de très bons résultats, en particulier au niveau de l'aspect esthétique.

5. Découe au laser

On pourra se reporter à l'article [BM 7 280] *Coupage thermique et coupage au jet d'eau*.

5.1 Principe

Le principe du L.A.S.E.R. (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) est la décharge d'électricité de quelques millions de volts qui active, entre deux électrodes, un mélange gazeux (dioxyde de carbone CO₂ par exemple) à une pression de plusieurs millibars. Le dispositif (figure 7) est enfermé dans un tube en verre qui ne laisse sortir qu'un faisceau d'une longueur d'onde précise (10,6 μm dans le cas du laser CO₂).

Ce faisceau est renvoyé par un jeu de miroirs jusqu'à une tête de coupe mobile, puis focalisé par une lentille sur le matériau à usiner. La focalisation du rayon donne un diamètre de foyer d'environ 0,1 à 0,3 mm, correspondant approximativement à l'épaisseur du trait de coupe.

De manière générale, il y a les lasers à gaz carbonique (CO₂), à flux rapide, à flux lent ou à flux transversal, et les lasers YAG (cf. article *Lasers pour usinage* dans le traité Électronique). Pour la découpe, les caractéristiques importantes du laser sont le mode, la puissance, la stabilité et la polarisation.

Les variables les plus significatives sont la lentille de focalisation, la position focale, la vitesse et le gaz d'assistance.

Une installation complète comprend la source laser, la structure de support, le système de déplacement du faisceau, l'armoire de contrôle, le dispositif d'aspiration des fumées, les écrans de protection.

L'usinage résulte de l'action thermique du rayon qui vaporise la matière en quelques fractions 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 process. Dans cette zone intermédiaire, il peut y avoir une carbonisation partielle de la matière organique, en général sur les bords de découpe.

Ainsi, rester trop longtemps au même endroit, 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 d'une énergie et de la nature de la matière. 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 dans le cas d'un matériau sensible à l'oxygène de l'air et de l'utilisation d'un gaz inert (azote). Généralement, le rayon est dispersé après la découpe mais, dans

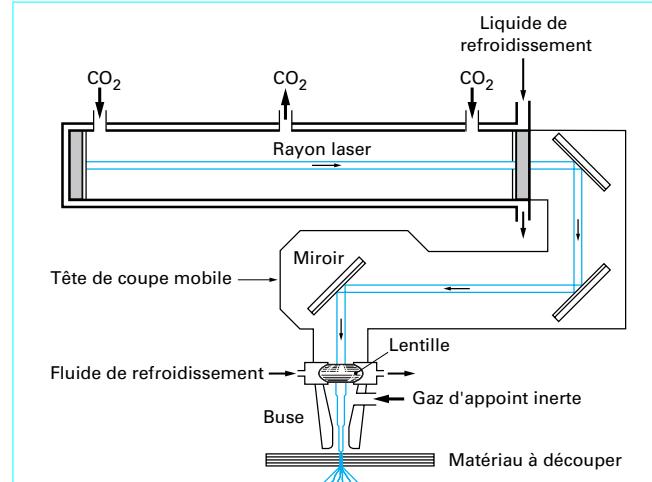


Figure 7 – Principe du laser CO₂

certains cas d'usinage, une protection arrière peut s'avérer nécessaire : elle est réalisée par des plaques de graphite.

Pour les risques liés à l'utilisation d'un laser, la norme NF C 43-801 établit la classification des lasers en cinq catégories correspondant à des classes de risques. Ceux utilisés pour la découpe sont de la classe 4. Une note de l'INRS (Institut national de recherche sur la sécurité) extraite du Cahier de notes documentaires n° 125, 4^e trimestre 1986, définit les niveaux de risques liés aux rayonnements en particulier.

Il est recommandé de travailler en cabine fermée en repérant les zones susceptibles d'être atteintes par le rayon.

5.2 Paramètres

De nombreux matériaux peuvent être découpés par laser (plastique, composite, caoutchouc, bois, papier, verre, métal, cf. tableaux 7 et 8) et les réglages sont faits en fonction de la réflexion du matériau, de la conductibilité et de la diffusion thermique, en particulier.

Tableau 7 – Découpe de tissus préimprégnés époxydes par laser CO₂ (250 W, focale : 63 mm, buse Ø 0,8 mm)

Renfort	Nombre de plis	Avance m/min	Pression du gaz
Verre	1	7,5	0,5 bar d'azote pour éviter l'oxydation
	2	3,8	
	4	1,5	
Carbone	1	7,5	0,5 bar d'azote pour éviter l'oxydation
	2	3,8	
	3	2,3	
Aramid	1	7,5	0,5 bar d'azote pour éviter l'oxydation
	2	7,5	
	8	2,5	

Tableau 8 – Découpe au laser CO₂

Stratifié en résine époxyde	Épaisseur mm	Puissance kW	Vitesse m/min
Fibres de verre	6,6	1,1	1,90
	6,35	5	7,87
	6,35	1	2,54
	6,35	5	5,08
Fibres de carbone	0,25	1,2	33,02
	0,25	1,2	15,24
	0,127	1,2	76,2
	0,50	1,2	25,4
Fibres d'aramide	0,9	0,25	3,75
Carbone/aramide	1,6	0,25	0,75
Aramidé	3	3	3,0
Carbone	1,7	8	3,0
	5	8	0,76

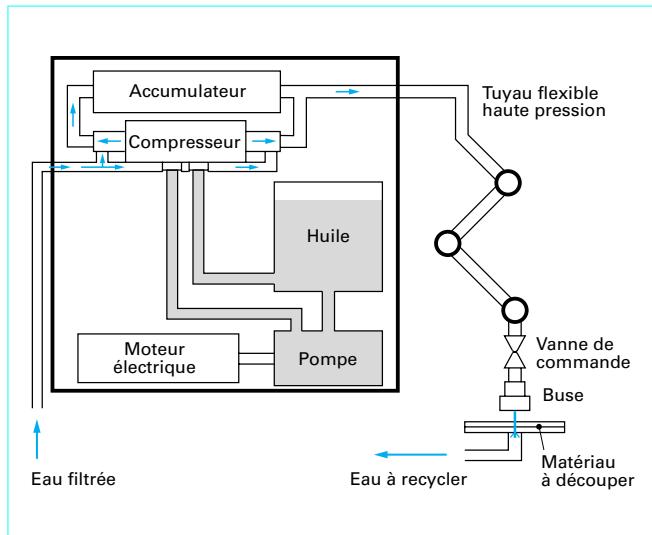


Figure 8 – Principe du jet d'eau haute pression

6. Usinage par jet d'eau

On pourra également se reporter à l'article [BM 7 280] *Coupage thermique et coupage au jet d'eau*.

6.1 Principe

Ce procédé est relativement récent puisque les premiers brevets, déterminants pour développer l'emploi d'un jet fluide hyperbare pour découper la matière, remontent aux débuts des années 1970 (sociétés américaines Flow Systems et Ingersoll Rand). Depuis, d'autres fournisseurs de pompes hyperbariques sont apparus et des constructeurs d'installation complète se sont développés en parallèle.

La principale caractéristique, par rapport aux autres procédés de découpe, est qu'il assure une découpe à froid, sans endommagement ni déformations thermiques du matériau. Le procédé a beaucoup évolué depuis son apparition et cette technique tend à se généraliser. En 1991, 3 000 installations étaient recensées dans le monde, dont 145 environ en France dans des secteurs variés pour des matériaux divers : alimentaire, bois, cartons, cuirs, textiles, métaux, plastiques, céramiques, etc.

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, le procédé ne permet que la **découpe** et le **perçage**. Cependant certains laboratoires se penchent sur des études de fraisage et tournage au jet d'eau.

■ La **machine** de découpe au jet d'eau se compose de (figure 8) :

- un multiplicateur hydraulique de pression d'eau (l'eau étant éventuellement traitée) ;
- une conduite de distribution à très haute pression ;
- une (ou plusieurs) tête(s) de travail comportant une buse ;

— un dispositif de récupération et de traitement de l'eau après découpe.

Le local est, en plus, muni d'un système d'aspiration des vapeurs d'eau, de l'équipement électrique nécessaire, d'une enceinte de confinement de bruit. Elle est reliée à une alimentation en eau du réseau standard.

La **pression** est générée par un système à deux étages :

— étage moyenne pression oléohydraulique dont l'huile est à une pression de 100 à 200 bar et agit sur une grande section du piston (puissance 30 à 75 kW) ;

— étage haute pression avec vérin double effet pour générer la pression voulue. Un rapport de surface de 40 avec une pression d'huile de 100 bar génère une pression d'eau de 4 000 bar. Le principe de cet étage est très simple mais la technologie très complexe notamment à cause des étanchéités nécessaires.

Il faut noter que la compressibilité de l'eau atteint environ 15 % à 4 000 bar.

L'eau est véhiculée par l'intermédiaire d'un tuyau flexible (à base d'acier et, parfois, de Kevlar[®]) ou d'éléments tubulaires rigides avec articulations à joints tournants. Les joints haute pression ont une durée de vie de 1 000 h en moyenne.

Le **bruit** d'une installation est de l'ordre de 90 dB à l'eau pure ou 120 dB quand l'eau est chargée d'abrasifs.

La **buse** est l'élément qui focalise le jet sur la pièce à découper. L'électronique de pilotage est du type CNC (commande numérique par calculateur) très rapide avec possibilité de couplage aux systèmes CAO-CFAO classiques.

Compte tenu de la finesse du jet (diamètres de 0,1 à 0,3 mm), le débit est relativement faible, de l'ordre de quelques litres par minute (par exemple, 2 L/min à 2 500 bar pour une buse Ø0,3 mm). Le faible débit entraîne de faibles pertes de charge dans le circuit et on peut se permettre des canalisations d'aménée d'eau à la buse assez longues, donc des tables de découpe assez grandes, voire une séparation du groupe hydraulique et des postes de découpe dans plusieurs locaux.

Un même groupe alimente donc éventuellement plusieurs buses.

■ **Exemple :** un débit de 4,5 L/min peut alimenter 2 buses Ø0,25 mm ou 8 buses Ø0,12 mm.

Dans le cas d'utilisation d'**abrasifs**, ceux-ci sont directement introduits au niveau de la buse qui comporte une chambre de mélange (fonctionnant par dépression) et un canon interne de focalisation du jet chargé d'abrasifs. Ce canon est fortement soumis à l'usure et doit être périodiquement changé.

Le **fluide** est essentiellement de l'eau filtrée (1 µm) pour ne pas endommager les différents circuits. Dans certains cas, il peut être nécessaire de traiter l'eau du réseau car il est préférable d'avoir une eau adoucie. Dans certains cas, on incorpore des dopants, huiles ou polymères à longues fibres, pour améliorer la cohérence du jet, c'est-à-dire reporter la divergence du jet à une distance plus grande. Cela réduit aussi l'usure de la buse et des joints tournants. Selon l'utilisation d'eau pure ou chargée, les paramètres typiques sont :

- découpe à l'eau pure ou chargée de polymères (poudre de Nylon par exemple) :

- 2 500 à 4 000 bar (vitesse de sortie de buse supersonique puisque généralement supérieure à 900 m/s) ;
- distance buse-pièce : 5 à 10 mm (jusqu'à 80 mm pour les matériaux fibreux) ;
- diamètre de buse : 0,1 à 0,3 mm ;
- découpe à l'abrasif :
- 2 000 à 3 000 bar ;
- diamètre de buse : 0,2 à 0,5 mm ;
- distance buse-pièce : 2 à 10 mm ;
- abrasif du type grenat ou olivine à 300 g/min et de granulométrie 0,1 à 0,5 mm.

Avec des abrasifs, la durée de vie des buses est de 80 à 150 h. Des recherches sont faites avec des buses en carbonitrure de bore pour augmenter la durée (elles sont souvent en saphir actuellement).

Si l'eau est chargée d'abrasifs, la découpe provient plus des nombreux impacts à grande vitesse des particules abrasives que de l'action de l'eau proprement dite qui, dans ce cas, ne sert plutôt qu'à véhiculer les abrasifs.

Un jet d'eau pure sortant de la buse est composé de plusieurs zones : celle travaillante où le jet est parfaitement continu et d'autres, périphériques, où le jet commence à se fragmenter puis d'autres, au bout d'une certaine longueur, où le jet d'eau devient un ensemble de gouttelettes.

L'eau ne « mouille » pas la matière, et ne l'écrase pas non plus, d'où son utilisation pour la découpe de textiles, cuirs, mousses, aliments surgelés, etc. Par contre, l'environnement de la machine est très humide et il est conseillé de ne stocker les pièces auprès de la machine que le temps juste nécessaire, sinon il y a risque d'absorption d'eau dans le cas d'un polymère.

La récupération de l'eau est faite sous la pièce en « cassant » le jet à l'aide parfois d'un lit de billes d'acier ou d'une tôle. La pièce est posée sur une table en structure alvéolaire, l'eau s'écoulant dans les alvéoles. Elle est ensuite recyclée après décantation et traitement.

Les **paramètres de réglage** sont :

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

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 com-

mence 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.

Les **phénomènes de coupe** ont été étudiés très précisément. Aussi rapide soit-elle, la coupe résulte d'une succession d'avancées du jet dans l'épaisseur de matière. Avant de découper complètement une épaisseur, le jet pénètre dans la matière mais les particules d'eau sont repoussées au fur et à mesure, d'où des bords de coupe qui ont parfois la forme de stries légèrement courbes.

D'autres analyses ont donné l'explication de certaines particularités comme, par exemple, le rétrécissement de la largeur de coupe entre la face d'attaque et le débouché du jet sur la face arrière. Il en résulte une conicité (ou pente) du bord de coupe, d'autant plus importante que l'épaisseur est plus faible. Elle peut être de 6 à 8° pour 1 mm d'épaisseur et inférieure à 1° à partir de 15 mm d'épaisseur.

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 (tableau 9).

Tableau 9 – Influence des paramètres de coupe
(d'après doc. Isin 1995)

Paramètre	Vitesse	Largeur de coupe	Rugosité des bords de coupe	Mouillage
Jet d'eau pure				
Pression ✓	✗		✗	
Ø buse ✓	✗	✗		
Distance buse-pièce pour matériaux durs ✓		✗	✗	✗
Vitesse de coupe ✓			✗	✗
Jet d'eau + abrasifs				
Pression ✓	✗		✗	✗
Ø buse saphir ✓	✗		✗	
Ø canon ✓	✗	✗	✗	
Granulométrie abrasif ✓	✗			✗
Débit abrasif ✓	✗	✗	✗	
Distance canon-pièce ✓	✗	✗		
Vitesse de coupe ✓		✗		✗

De plus, 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, découvant 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.

6.2 Paramètres

Ils sont indiqués dans le tableau 10.

Tableau 10 – Répertoire des paramètres pour l’usinage au jet d’eau de composites

	Épaisseur (mm)	Vitesse (m/min)	Pression (bar)
Préimprégné carbone, verre, Kevlar®	0,8	60	3 800
Sandwich carbone - nid-d’abeilles Nomex	3 6	5 2	3 800
Sandwich carbone nid-d’abeilles aluminium	25	0,1 à 0,5	
Sandwich Kevlar® nid-d’abeilles aluminium	6	0,5 à 2	
Sandwich verre-époxyde/bois	3/12/3	0,5	3 800
Stratifié carbone-résine	5 10 20 50	4 2,1 0,69 0,045	3 400
	2 20	3 2 à 3	2 500
	2 5 10 20	4,5 2 0,35 0,1	3 500
Stratifié silice-phénolique	1	1,5	3 800
Stratifié verre-époxyde	9 4	1 1,5	3 800
Stratifié verre-mélamine	1	15	3 800
Stratifié verre-résine	5 10 20 50	4 2,1 0,63 0,04	3 400
Stratifié verre-résine	4	5	2 500
Tissu de Kevlar®	1 à 2,5	6 à 1,5	
Tissu de verre	1	5	
Tissu de verre-silicone	1	60	3 800
Mousse polystyrène	150	6	3 800
Mousse polyuréthane	60 150	> 60 6	3 800
Mousse PVC	40	2	