

Fraisage

Principales opérations

par Société SANDVIK-COROMANT

1. Surfaçage et surfaçage-dressage	BM 7 083 - 3
1.1 Description des opérations	— 3
1.2 Applications des fraises à surfacer et à surfacer-dresser.....	— 3
1.2.1 Matière à usiner	— 3
1.2.2 Choix de l'angle d'attaque	— 4
1.2.3 Géométrie de coupe d'une fraise à surfacer	— 6
1.2.4 Diamètre de fraise	— 6
1.2.5 Utilisation des plaquettes de planage.....	— 6
1.2.6 Guide de choix	— 7
1.3 Plaquettes de surfaçage	— 8
1.3.1 Principes généraux de conception	— 8
1.3.2 Principales géométries.....	— 11
2. Surfaçage-dressage, rainurage et fraisage longitudinal.....	— 12
2.1 Diversité des opérations	— 12
2.1.1 Description des opérations	— 12
2.1.2 Conditions générales de coupe	— 12
2.2 Principales géométries de fraises	— 13
2.2.1 Fraises à rainurer	— 13
2.2.2 Fraises deux tailles	— 14
2.2.3 Fraises à pas fin	— 14
2.3 Compléments.....	— 14
2.3.1 État de surface, défauts de forme et applications spéciales	— 14
2.3.2 Apport des fraises à rainurer monoblocs en carbure et en <i>Coronite</i>	— 15
3. Autres opérations	— 16
3.1 Opérations de fraisage-perçage	— 16
3.1.1 Fraisage de poches et de cavités.....	— 16
3.1.2 Fraisage de profils	— 19
3.2 Fraisage de rainures.....	— 19
3.2.1 Présentation	— 19
3.2.2 Mise en œuvre des fraises trois tailles	— 21
3.2.3 Fraisage de surfaces circulaires	— 22
3.3 Fraisage de chanfreins	— 23
3.3.1 Description des opérations.....	— 23
3.3.2 Réalisation pratique.....	— 23
3.3.3 Utilisation de fraises-limes	— 23
Notations et symboles	[BM 7 082]

Cet article décrit les applications spécifiques au surfaçage et au fraisage circulaire, ainsi que les combinaisons possibles entre ces deux méthodes. Le surfaçage est généralement le plus efficace pour l'usinage de surfaces planes, tandis que le fraisage périphérique est mieux approprié pour les rainures et les profils ouverts d'une certaine longueur.

Les applications décrites figure **A** recouvrent la plupart des opérations rencontrées en fraisage. Les types de fraises indiqués sont habituellement le choix à considérer en priorité, leurs applications étant précisées d'une manière plus détaillée dans chacun des chapitres correspondants.

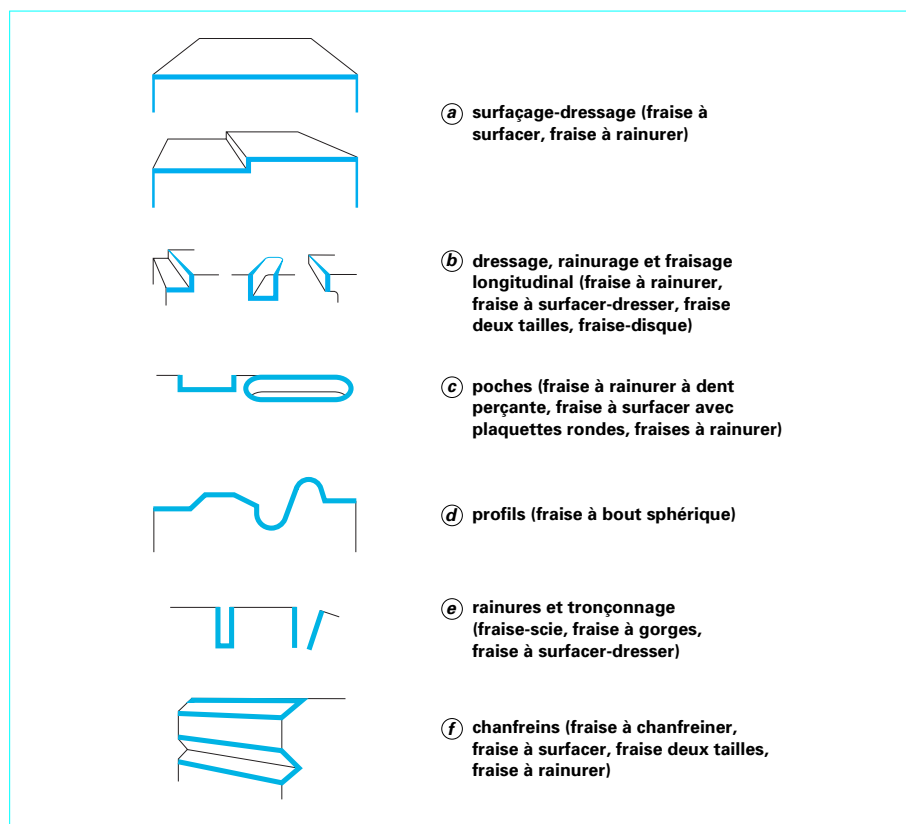


Figure A – Principales opérations rencontrées en fraisage

Le type de machine disponible, sa puissance et ses performances sont les critères décisifs pour le choix du type et de la taille de fraise à surfacer. Compte tenu de la gamme de machines existantes, allant des petits centres d'usinage aux fraiseuses à portique de très grande taille, et de la plage de puissances tout aussi étendue de ces machines, il convient de déterminer en premier lieu si la machine utilisée impose ou pas des limitations au niveau de l'opération envisagée. Une estimation des performances et de la puissance de la machine fournira ici une indication quant au besoin éventuel de choisir un plus petit diamètre ou quant au type de géométrie approprié.

La stabilité est essentielle pour obtenir de bons résultats. La machine a-t-elle une rigidité suffisante ? La broche est-elle suffisamment robuste ; ses paliers sont-ils en bon état ? Le mécanisme d'avance est-il également en bon état et les outils sont-ils solidement fixés ?

En revanche, si la machine est neuve ou en bon état et si la puissance disponible n'est pas limitée, l'objectif doit être alors de tirer parti au maximum des possibilités qui s'offrent et ainsi d'atteindre une efficacité élevée. Ici également, une évaluation de la puissance machine et des critères de rentabilité contribuera à guider notre choix.

Cette rubrique sur le fraisage se compose de trois articles :

[BM 7 082] Fraisage. Principes ;

[BM 7 083] Fraisage. Principales opérations ;

[BM 7 084] Fraisage. Étude de cas.

1. Surfaçage et surfaçage-dressage

Les notations et symboles utilisés dans cet article sont définis dans le tableau situé en fin d'introduction de l'article [BM 7 082].
Fraisage. Principes de ce traité.

1.1 Description des opérations

Ces deux types d'opération sont représentés sur la figure 1.

Une **fraise à surfaçer** moderne permet d'usiner dans les meilleures conditions d'efficacité des plats de dimensions variées. La réalisation de surfaces planes est au fraisage ce que la génération de surfaces rondes est au tournage. Le tournage est toutefois un processus faisant intervenir une seule pointe, tandis que, pour le fraisage, on utilise presque toujours des plaquettes multidents. Par le passé, l'usinage d'une surface plane s'effectuait avec un outil à dent unique à la phase de profilage. Aujourd'hui, le surfaçage est un processus considérablement plus efficace sur le plan à la fois des performances et des résultats.

Très souvent, une surface plane se termine par une surface perpendiculaire, ce qui oblige donc à exécuter un épaulement. Il faut alors une **fraise à surfaçer-dresser** avec angle d'attaque de 90° . Étant donné qu'un plus petit angle d'attaque est préférable en surfaçage, les fraises utilisées pour usiner des plats de grandes dimensions sont classées selon le cas en tant que fraises à surfaçer, lorsque leur angle d'attaque est inférieur à 90° , ou fraises à surfaçer-dresser.

Les plus récentes fraises à surfaçer-dresser actuelles sont cependant conçues pour une plus grande polyvalence en ce qu'elles ne sont pas seulement capables de réaliser des épaulements à 90° , mais sont, dans de nombreux cas, tout aussi efficaces pour le surfaçage proprement dit. Cela a rendu possible, pour de nombreux ateliers ayant à exécuter également des opérations de dressage, de n'utiliser qu'un seul type de fraise au lieu de deux.

Une fois établi s'il s'agit de surfaçage proprement dit ou de surfaçage-dressage, l'étape suivante consiste à choisir l'outil approprié. Ce choix est affecté par un certain nombre de facteurs.

■ La **matière à usiner** influe sur le choix de l'outil du fait que la conception de celui-ci est très largement basée sur l'usinabilité de la matière qu'il aura à travailler. La géométrie de l'outil est étudiée pour fournir les meilleures performances et les meilleurs résultats dans une certaine plage de matières. La nature, la dureté et la qualité de la matière usinée doivent toujours être prises en considération.

La largeur de la surface à usiner influe sur le choix du diamètre d'outil. D'autre part, en plus de la profondeur de coupe et de l'avance, le taux d'enlèvement de matière doit être évalué en fonction de la puissance de la machine.

La stabilité de la pièce et son mode de fixation sont des critères supplémentaires essentiels au niveau des résultats du fraisage et affectent également dans une certaine mesure le choix de la fraise. La direction des forces peut être modifiée, ainsi que la quantité de matière enlevée à chaque passe, selon les caractéristiques d'outil et les conditions de coupe choisies.

■ Le type de **machine-outil**, sa puissance, ses performances, les limitations qu'elle impose et sa stabilité doivent aussi être pris en compte. Le choix et le mode d'utilisation des outils peuvent décider de la pleine utilisation ou non des possibilités d'une machine.

Le type et la qualité du système de fixation des outils sur la machine sont désormais également des facteurs décisifs au plan de l'efficacité, aussi bien en ce qui concerne la capacité de la machine que le temps et l'équipement nécessaires pour la manutention, la préparation et la mise en place des outils.

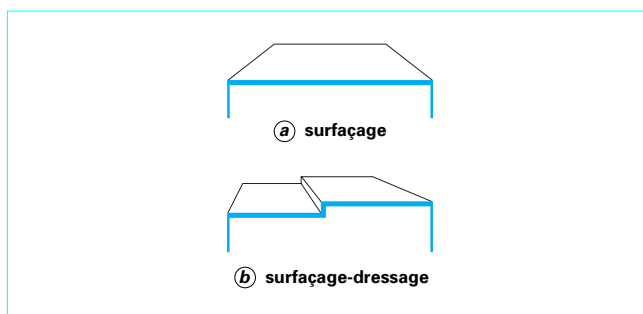


Figure 1 – Opérations de surfaçage et de surfaçage-dressage

■ En ce qui concerne l'**opération** elle-même, la surépaisseur d'usinage, la précision de cotes et la structure de surface sont déterminantes au niveau du choix et de l'utilisation des fraises à surfaçer. L'éventualité de coupe intermittente et les différentes possibilités d'engagement et de sortie de la fraise ont également leur importance. L'état de la machine affecte en outre le degré de finition réalisable ou la quantité de matière qu'il est possible d'enlever à chaque passe. Certaines fraises sont du type universel, tandis que d'autres sont plus spécifiquement prévues pour la finition ou l'ébauche.

■ Les différents facteurs à prendre en compte sont résumés dans le tableau 1.

Tableau 1 – Facteurs à prendre en compte lors d'une opération de surfaçage ou de surfaçage-dressage

Pièce à usiner	Machine	Opération
Matière	Type	Surépaisseur d'usinage
Dureté	Puissance	État de surface
Qualité	Capacité	Coupe interrompue
Stabilité	Limitations	Entrée
Largeur de coupe	État	Sortie
Profondeur de coupe	Stabilité	Nombre de passes

1.2 Applications des fraises à surfaçer et à surfaçer-dresser

1.2.1 Matière à usiner

Le type de **matière à usiner** peut restreindre le choix des outils envisageables. Il existe ainsi des fraises à surfaçer universelles, telles que les types 145 et 290 par exemple, capables d'usiner l'acier, l'acier inoxydable, la fonte, le titane et, dans une certaine mesure, les alliages d'aluminium ou de cuivre. Mais, selon le type de production ou d'opération considérée, ces outils ne sont pas toujours forcément les mieux adaptés. Ils peuvent être la formule idéale pour une production mixte sur des centres d'usinage ou des machines de petite taille, mais se révéler, par contre, inadéquats sur des machines spéciales ou pour l'usinage en grande série sur fraiseuses de grandes dimensions.

Sept types principaux de matières sont à prendre en considération pour le choix de l'outil (figure 2) :

- les matières à copeaux longs (aciers principalement) (figure 2a) ;
- l'acier inoxydable (figure 2b) ;

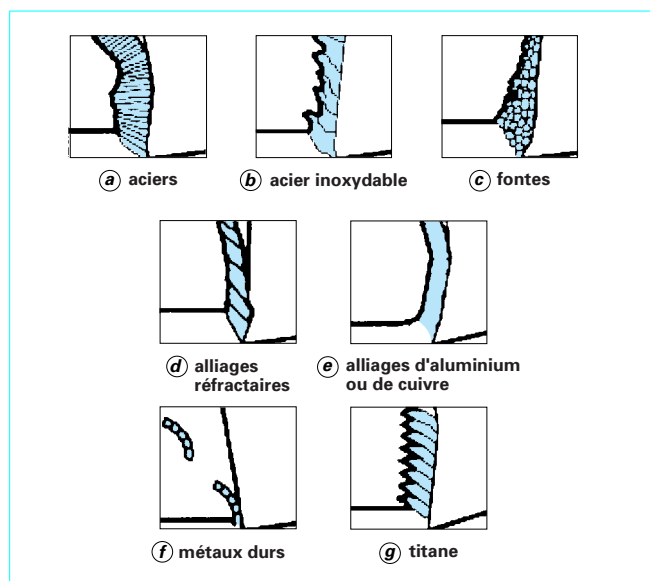


Figure 2 – Différentes morphologies de copeaux selon la matière usinée

- les matières à copeaux courts (fonte grise, fonte nodulaire, etc.) (figure 2c) ;
- les alliages réfractaires à haute limite d'élasticité (figure 2d) ;
- les matières douces (alliages d'aluminium ou de cuivre, etc.) (figure 2e) ;
- les matières dures (figure 2f) ;
- le titane (figure 2g).

Nota : les appellations des fraises utilisées dans cet article sont empruntées, la plupart du temps, à la nomenclature Sandvik-Coromant.

1.2.2 Choix de l'angle d'attaque

L'angle d'attaque est l'un des indicateurs essentiels en ce qui concerne les différents types de fraises à surfacer. C'est là également où le choix diverge entre fraise à surfacer proprement dite ou fraise à surfacer-dresser. S'il est nécessaire d'exécuter un dressage, la fraise choisie doit obligatoirement avoir un angle d'attaque de 90° (figure 3).

■ Surfacier-dresser

La fraise à surfacer-dresser type 290 présente l'avantage d'offrir à la fois un angle d'attaque de 90° et les performances d'une fraise à surfacer. C'est ici un choix adapté lorsqu'il est nécessaire de pouvoir exécuter des épaulements en plus d'opérations de surfacage proprement dit.

La fraise à surfacer-dresser U-Max est l'outil de base sur les centres d'usinage pour l'ébauche et la finition d'épaulements à 90°. Compte tenu de la plage de petits diamètres qu'elle couvre, elle est idéale dans les situations où l'on ne dispose que d'une faible puissance machine. Pour les matières à copeaux courts comme la fonte grise, la fraise Auto-F avec angle d'attaque de 90° et plaquettes carrées permet de réaliser des combinaisons avantageuses avec plaquette de planage pour l'obtention à la fois d'une bonne précision de cotes et d'un bon état de surface.

Il existe une formule de compromis à 88° selon la précision de l'angle droit à réaliser. Ce type d'outil, proche de la fraise à surfacer-dresser, est d'un choix intéressant car il permet d'utiliser des plaquettes carrées au lieu de triangulaires.

Dans le cas d'un angle d'attaque de 90°, l'effort imposé à chaque dent doit être toutefois égal à l'avance par dent, tout comme

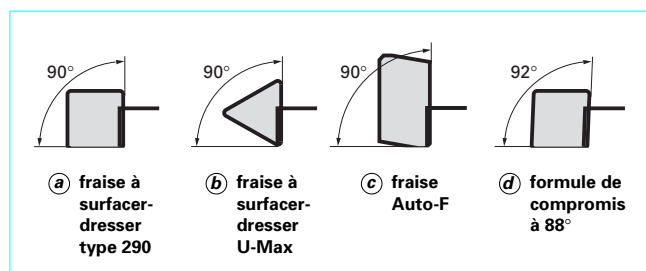


Figure 3 – Différentes façons d'usiner des épaulements (nomenclature de fraises Sandvik-Coromant)

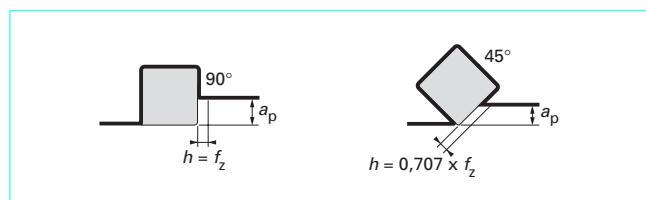


Figure 4 – Épaisseur des copeaux en fonction de l'angle d'attaque, de l'avance et de la profondeur de coupe

l'épaisseur des copeaux doit correspondre à l'avance. Les angles d'attaque plus petits font intervenir une charge par dent égale à l'avance multipliée par le sinus de l'angle d'attaque concerné.

Cela signifie donc que la charge proportionnelle par dent sur une plaquette à 45° est de 0,707 fois celle exercée dans le cas d'une plaquette à 90° (figure 4).

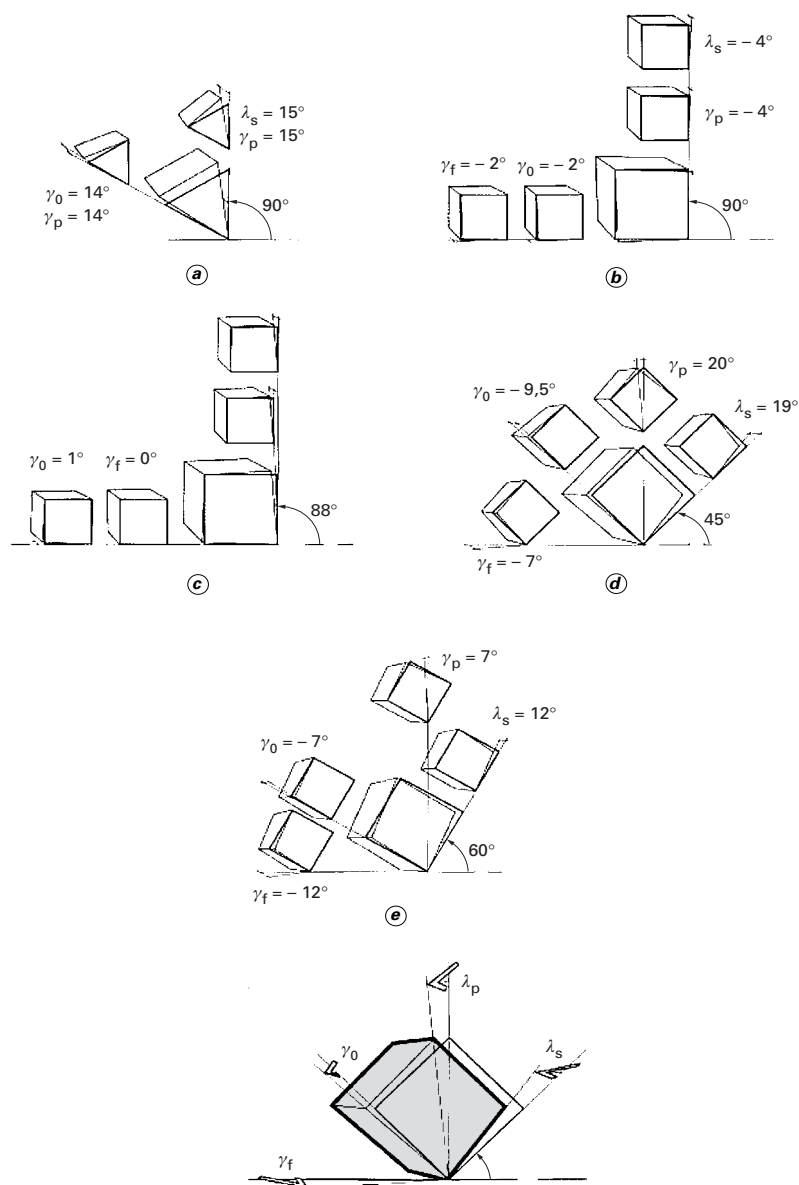
Alors que les fraises à surfacer-dresser ne génèrent que des forces axiales minimales, les fraises à surfacer avec de plus petits angles d'attaque, 60° ou 45° par exemple, donnent une coupe plus équilibrée et plus fluide. Les importantes forces radiales imposent par ailleurs de sérieuses contraintes à la broche de la machine et peuvent être à l'origine de vibrations. Les effets soudains d'une coupe à 90° ont, dans certains cas, des conséquences dommageables, sous forme entre autres de bavures sur la pièce selon la matière dont celle-ci est faite. Le flux d'évacuation des copeaux et l'utilisation de l'arête de coupe y gagnent en général lorsque l'angle d'attaque choisi est plus petit.

■ Surfacier

En surfacage général, l'angle d'attaque doit être de 75° ou 60°. Ces deux angles permettent un bon rendement de la puissance machine tout en convenant à la fois pour l'ébauche et la finition. L'angle de 75° est le choix habituellement prioritaire, tandis que l'alternative 60° augmente l'efficacité de l'arête dans les conditions d'usinage difficiles. Les fraises à 75° donnent en outre la possibilité de travailler avec une grande profondeur de coupe.

Les fraises à 45° sont appropriées, soit pour les fraises de faible diamètre utilisées sur de petites machines peu puissantes, soit pour les applications difficiles ou les matières à copeaux courts. La fraise à surfacer type 145 (nomenclature Sandvik-Coromant), avec géométrie ultrapositive en combinaison avec un angle d'attaque de 45°, convient pour les matières à copeaux longs lorsque la puissance disponible est limitée et que la stabilité est limitée au niveau aussi bien de la broche que du porte-à-faux de l'outil ou de la pièce. Il s'agit en fait d'une fraise à surfacer type pour l'ébauche et la semi-finition sur centres d'usinage.

Par ailleurs, cette même fraise couvre une large plage d'opérations moyennes ou lourdes faisant intervenir un taux élevé d'enlèvement de matière. Ici encore, la puissance absorbée relativement faible et le profil favorable de formation des copeaux rendent la



f représentation des quatre angles définissant la position de la plaquette sur la fraise
(cf. article [BM 7082], paragraphe 1)

Figure 5 – Différentes géométries de fraises

fraise à surfacer type 45 appropriée pour les alésages de grand diamètre et les centres d'usinage. Cependant, les forces de coupe axiales et la pression exercée vers le bas sur la pièce sont élevées. Un angle d'attaque de 45° convient également pour le surfacage de matières telles que la fonte grise. Les fraises type Auto permettent l'ébauche et la semi-finition en réduisant les risques de bavures de la pièce.

Les plaquettes rondes ont un angle d'attaque variable selon la profondeur de coupe, en même temps qu'une arête robuste. Les forces de coupe axiales sont plus importantes et l'épaisseur des

copeaux se modifie en fonction de la profondeur de coupe par rapport au diamètre de la plaquette. La pièce et la machine doivent toutes deux être parfaitement stables et avoir une excellente tenue. Toutefois, les fraises modernes et l'utilisation de plaquettes positives ont rendu ces outils beaucoup plus polyvalents, de sorte qu'il convient de les prendre systématiquement en considération.

Les valeurs d'avance recommandées pour le surfacage s'appliquent à des angles d'attaque de 75-90°. Pour les angles plus petits, 45-60°, l'avance peut être augmentée respectivement de 40 et 10 %.

1.2.3 Géométrie de coupe d'une fraise à surfacer

La **géométrie de coupe** d'une fraise à surfacer fait intervenir un certain nombre de paramètres. En modifiant le rapport entre l'angle d'attaque, l'angle d'inclinaison et l'angle de coupe effectif, axial et radial, la puissance absorbée, l'évacuation des copeaux, l'engagement de l'arête de coupe et divers autres facteurs peuvent être évalués pour chaque type de fraise à surfacer. La figure 5 (p. 5) montre des combinaisons d'angles spécifiques pour diverses opérations avec différentes fraises. La figure 5a représente une fraise à surfacer pour matières relativement douces et, plus spécialement, les alliages d'aluminium, tandis que la fraise de la figure 5b est prévue pour la finition dans des matières à copeaux courts comme la fonte. La figure 5c montre une fraise à surfacer-dresser pour les matières à copeaux longs telles que l'acier, la figure 5d une petite fraise à surfacer à 45° pour le surfacage universel et la figure 5e une fraise à surfacer polyvalente avec arête de coupe robuste, pour l'acier.

■ Surfacer

Les fraises à surfacer universelles à 45 et 60° ont en général une géométrie positive/négative (cf. § 6.2, article [BM 7 082]). Ce type de géométrie à effet de cisaillement contribue à une formation favorable des copeaux tout en fournissant une plaquette robuste. Cette combinaison permet d'exécuter des opérations d'ébauche difficiles et d'obtenir une bonne structure de surface. Pour la fonte, la fraise à surfacer Auto à 45° a une géométrie double négative. Pour les opérations difficiles dans des matières à copeaux longs, on utilise une fraise à surfacer avec angle d'attaque de 60° et géométrie double positive pour permettre de grandes profondeurs de coupe et utiliser ainsi de manière optimale la puissance machine disponible.

Les fraises à surfacer avec angle d'attaque de 75° ont une géométrie négative/négative ou positive/positive selon l'application considérée. La géométrie double positive fournit une coupe efficace en ce que les forces de coupe et la puissance absorbée demeurent limitées. L'effet de cisaillement contribue à former les copeaux en spirales pour les évacuer de la poche à copeaux, ce qui facilite leur évacuation tout en améliorant l'état de surface. Les fraises de ce type sont polyvalentes en ce qui concerne les matières usinées. La fraise à surfacer double négative à 75° a été développée pour sa part pour l'usinage d'aciers durs, mais aussi de fontes. Une puissance élevée et une bonne stabilité sont nécessaires pour permettre aux plaquettes robustes de déformer les copeaux épais et de résister à de fortes contraintes d'impact.

■ Surfacer-dresser

Les fraises à surfacer-dresser ont habituellement une géométrie double positive en combinaison avec un angle d'attaque de 90 ou 88° pour limiter le besoin de puissance pour l'usinage d'une grande diversité de matières. Le type 290 (nomenclature Sandvik-Coromant) a cependant une géométrie positive/négative travaillant par effet de cisaillement, combinant un profil de formation de copeaux favorable et une bonne tenue d'arête qui rendent cet outil approprié pour une grande diversité d'opérations d'ébauche et de finition. Quant aux fraises à surfacer avec angle d'attaque de 90° pour la fonte, elles ont une géométrie double négative.

Les matières tendres comme les alliages d'aluminium exigent des géométries ultrapositives pour couper correctement avec une arête vive. Le surfacage général est ici souvent effectué avec un angle d'attaque de 75°.

On se sert de fraises à surfacer avec plaquettes rondes pour les opérations difficiles dans des matières dures ou réfractaires, ou pour l'usinage de titane. Des arêtes de coupe extrêmement robustes permettent de réduire l'épaisseur des copeaux et d'obtenir de bons résultats dans des applications où les autres fraises à surfacer ne sont pas performantes. Les plaquettes positives modernes donnent une coupe positive qui augmente l'universalité des fraises concernées.



Figure 6 – Fraises à surfacer pour applications diverses

La figure 6 représente quelques fraises à surfacer pour applications diverses.

1.2.4 Diamètre de fraise

Le **diamètre de fraise** affecte le besoin de puissance, la position de la fraise par rapport à la pièce, l'engagement et la sortie de l'arête de coupe, la relation entre les paliers de la broche et le diamètre de l'outil et, dans certains cas aussi, l'état de surface. En règle générale, il faut choisir un diamètre de fraise égal à 1,2-1,5 fois la largeur de coupe et recourir au fraisage en avalant, avec des copeaux aussi minces que possible du côté sortie.

Si la puissance machine est limitée, il est conseillé d'utiliser une fraise à surfacer de petit diamètre et d'exécuter la coupe en plusieurs passes. Sinon, le manque de puissance conduira à une avance par dent et une profondeur de coupe défavorables. Un engagement et une sortie de pièce incorrects peuvent aussi réduire la durée de vie de l'outil et nuire à la fiabilité de l'arête de coupe.

Les différentes situations rencontrées sont marquées sur la figure 7 du signe + lorsqu'elles sont favorables et du signe – dans le cas contraire.

Les petites fraises à surfacer du type universel et les fraises à surfacer-dresser telles que 145 et U-Max pour les centres d'usinage et les fraiseuses dont la puissance est limitée ont des diamètres compris entre 40/50 et 80/125 mm. Les fraises à surfacer universelles de plus grand diamètre avec différents angles d'attaque vont, pour leur part, de 50, 63 ou 80 mm jusqu'à 500 mm.

La fraise à surfacer-dresser universelle type 290 existe dans une plage de diamètres de 50 à 250 mm. Les fraises à surfacer plus spécifiques, pour la fonte et l'aluminium par exemple, couvrent une plage étendue, de 80 à 500 mm, pour pouvoir faire face aux applications très diverses propres à ces matières. Enfin, les fraises à surfacer prévues pour l'usinage lourd ont des diamètres adaptés à l'usinage de pièces de grandes dimensions sur des fraiseuses puissantes.

À ce stade, le type de pas doit également être déterminé en fonction des paramètres de l'opération à effectuer. Certaines gammes de fraises à surfacer offrent le choix entre trois types de pas : grand, réduit et fin. Le pas réduit est le choix de base pour le fraisage général. Un grand pas différentiel est souvent la solution en cas de problèmes de puissance limitée, d'instabilité ou de longs porte-à-faux, ainsi également que pour permettre de parvenir à une avance satisfaisante par dent. Le pas fin convient de son côté pour les applications requérant une coupe douce, comme pour les pièces à parois minces, par exemple.

1.2.5 Utilisation des plaquettes de planage

Des **plaquettes de planage** peuvent être utilisées sur certains types de fraises à surfacer pour améliorer l'état de surface. La plu-

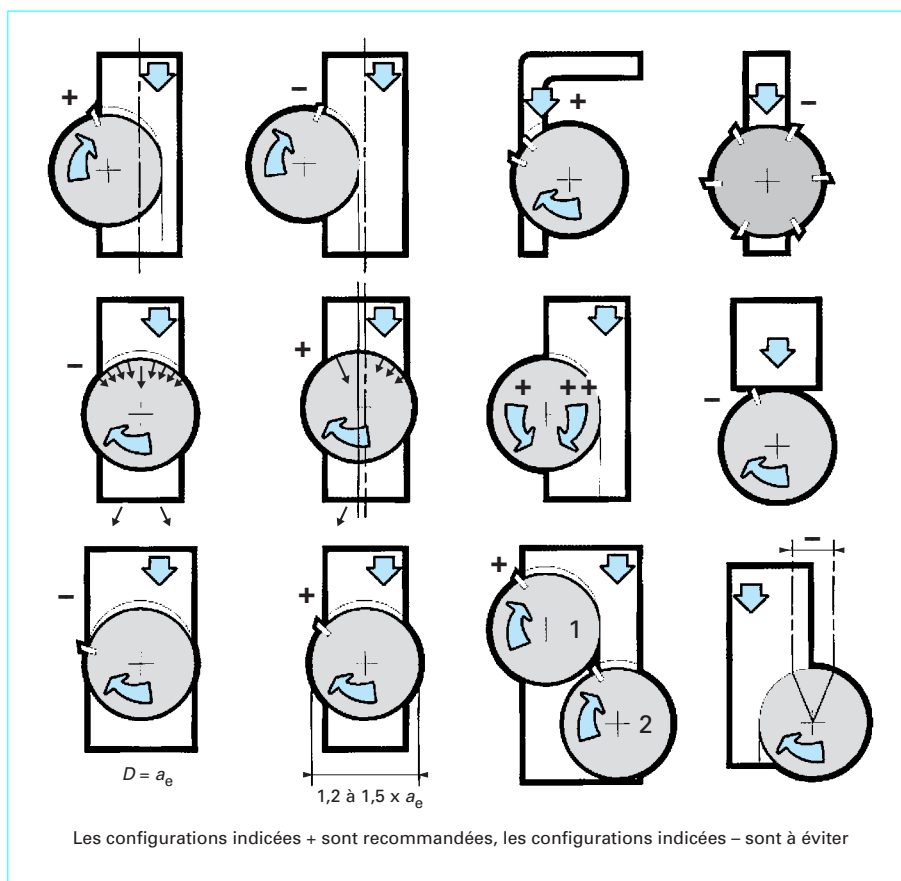


Figure 7 – Effets positifs et négatifs du positionnement de la fraise en surfacage

part des plaquettes sont munies de biseaux plans destinés à réduire les ondulations, mais, tout spécialement sur les fraises de grand diamètre, il est possible d'utiliser une plaquette avec plat de planage. Positionnée légèrement au-dessous des autres plaquettes, elle génère une surface plus lisse en égalisant les irrégularités (cf. article [BM 7 082], paragraphe 6.3).

Les plaquettes de planage donnent les meilleurs résultats dans les matières tendres et à copeaux courts. Leur utilisation pour des matières plus dures et à copeaux longs nécessite de plus grandes précautions pour éliminer les risques de vibrations et éviter une mauvaise évacuation des copeaux. Les plaquettes de planage ne doivent être utilisées que pour la finition et uniquement dans les positions recommandées sur la fraise. Il s'agit normalement de plaquettes de précision, positionnées automatiquement à environ 0,05 mm au-dessous des autres plaquettes de la fraise (figure 8).

1.2.6 Guide de choix

Compte tenu de l'application envisagée et des critères d'outil définis, les données devraient maintenant être suffisantes pour déterminer le profil de la fraise appropriée. La largeur de coupe a_p ouvre différentes options en matière de diamètre d'outil D , de tolérances d'usinage et de type de pointe en fonction de la profondeur de coupe a_p . La matière à usiner commande pour sa part le choix du type de fraise, de l'angle d'attaque et de la géométrie de coupe. En finition, certaines fraises à surfacer peuvent avoir besoin d'une plaquette de planage pour égaliser les irrégularités sur la surface finie.

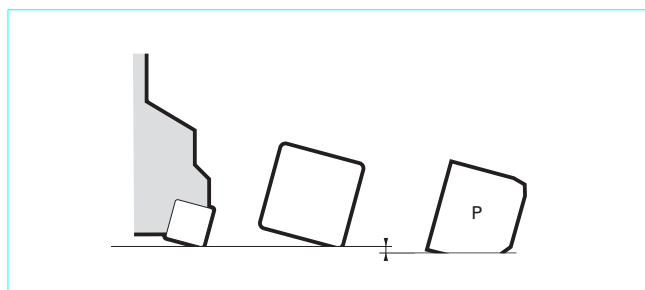


Figure 8 – Effet d'une plaquette de planage P

La figure 9 est un petit guide succinct pour le choix de base d'une fraise à surfacer. D'autres facteurs peuvent venir s'ajouter selon la nature de la pièce et les caractéristiques de la machine ou de l'opération.

Il faut toujours tenir compte de la dureté de la pièce, de sa qualité et de sa stabilité, ainsi que de l'état général et des performances de la machine ou des exigences spécifiques à l'opération concernée.

Le tableau 2 propose tous les critères généraux à prendre en compte lors du choix d'une fraise à surfacer selon les matériaux à usiner.

Caractéristiques des opérations réalisées	Angle d'attaque κ	γ_p / γ_f	Type de pas z	Géométrie des plaquettes
Surfaçage d'une pièce stable, de grande longueur	75°	+ / +		
Fraisage d'épaulement	90°	+ / - + / +		
Pièce instable ou à parois minces	90° (75°)	+ / +		
Long porte-à-faux d'outil	45°	+ / -		
Risque d'écaillage de la pièce	45°	+ / -		
Faible puissance machine	45°	+ / -		
Usinage lourd sur machine puissante	60° 45°	+ / - + / +		
Pièce étroite (a_e)	45°	+ / -		
État de surface de qualité élevée	90°	+ / -		
Tendance aux vibrations sur machine ou montage instable	45°	+ / -		
Grand pas Pas réduit Pas fin Plane Nouvelle génération				

Voir article [BM 7082] dans ce traité pour la définition des différents symboles

Figure 9 – Facteurs de choix d'une fraise à surfaçer

1.3 Plaquettes de surfaçage

1.3.1 Principes généraux de conception

Il existe pour les fraises à surfaçer différentes plaquettes dont le choix est déterminé par l'angle d'attaque, la géométrie de la fraise et le type d'opération à effectuer (figure 10 et tableau 3, p. 11).

L'arête de coupe est définie dans l'espace par la géométrie de la fraise. L'inclinaison et l'angle de coupe d'une plaquette sont déterminés par la position qu'elle occupe dans son logement. Selon cette géométrie, la plaquette est alors négative, neutre ou positive, avec différentes valeurs de dépouille à l'arrière de l'arête. C'est pourquoi l'angle de dépouille sur l'arête principale varie habituellement, jusqu'à 27° sur les plaquettes pour le fraisage d'aluminium qui sont fortement inclinées vers l'arrière pour augmenter l'angle de coupe.

Tableau 2 – Critères généraux de choix d'une fraise à surfacer (doc. Sandvik-Coromant)

Largeur/ diamètre de coupe (1)	Profondeur de coupe	Matériau à usiner (cf. figure 2) (2)							Angle d'attaque κ	Géométrie γ_p/γ_f	Plaquette de planage	Type de fraise (Sandvik Coromant)
		Copeaux longs : la plupart des aciers	Aciers inoxydables	Copeaux courts : fontes grise et nodulaire, etc.	Super alliages réfractaires	Métaux tendres : aluminium, alliages de Cu, etc.	Métaux durs	Titane				
40 à 80	15	●	●	●	●	●	●	●	90°	+/-		U-Max (252.44)
40 à 80	6	●	●	●	●	●	●	●		-/-		U-Max (250.44)
50 à 125	6,4	●	●	●	●	●		●	45°	+/-		T-Max 145 (260.22)
50 à 125	12,6	●	●	●		●			90°	+/+		T-Max 190 (262.22)
50 à 100	13,3/18	●	●	●	●	●	●		90°	+/+		T-Max (262.2)
50 à 250	12,7	●	●	●	●	●	●	●	90°	+/-		T-Max 290 (290.90)
80 à 250	18					●			90°	+/+		T-Max AL (262.2AL)
100 à 400	12	●	●	●	●		●		45°	+/-		T-Max 45 (260.7)
250 à 400	17	●	●	●			●		60°	+/+		T-Max HD (267.21)
125 à 500	6,4/8,7	●	●	●	●	●		●	45°	+/-		Modulmill 145 (260.22)
125 à 500	11,5	●	●	●			●		60°	+/-		Modulmill (287.5)
80 à 500	9 à 14	●		●			●		75°	-/-	✓	Modulmill (285.1)
80 à 500	9 à 14	●	●	●		●	●		75°	+/+	✓	Modulmill (285.2)
80 à 500	11,5 à 17	●	●	●		●			88°	+/+	✓	Modulmill (283.2)
80 à 500	13,3 à 18	●	●	●	●	●	●		90°	+/+	✓	Modulmill (282.2)
80 à 500	8 à 10	●		●	●		●			-/-		Modulmill (280.2)
80 à 500	9,5		●	●	●			●				Modulmill (280.6)
80 à 500	9/12	●	●	●		●	●		75°	+/+	✓	T-Max (265.2)
80 à 500	9					●			75°	+/+	✓	T-Max-AL (265.2 AL)
80 à 500	6	●		●					45°	-/-		Auto (260.3)
80 à 500	1			●		●			90°	-/-	✓	Auto-F (260.4)
125 à 500	8			●		●			90°	-/-	✓	Auto-FS (262.4)

(1) D diamètre de la fraise.

- (2)
- Choix de base
 - Alternative
 - Acceptable
 - Passable

■ La **forme de plaquette** diffère selon le type de fraise à surfacer. À la différence du tournage, où un même porte-plaquette peut être équipé de plusieurs types différents de plaquettes de même taille et de même forme, les fraises à surfacer ont un nombre limité de plaquettes, en outre spécifiquement conçues. Les plaquettes carrées avec plusieurs arêtes de coupe et des pointes robustes dominent. En surfacage-dressage également, les pla-

quettes carrées sont en train de supplanter les plaquettes triangulaires du fait, en premier lieu, du développement des fraises à 88° et, en second lieu, des fraises modernes type 290. Les plaquettes rondes avec de nombreuses arêtes extrêmement résistantes et des angles d'attaque variables sont destinées en priorité aux applications faisant intervenir des matières difficilement usinables.

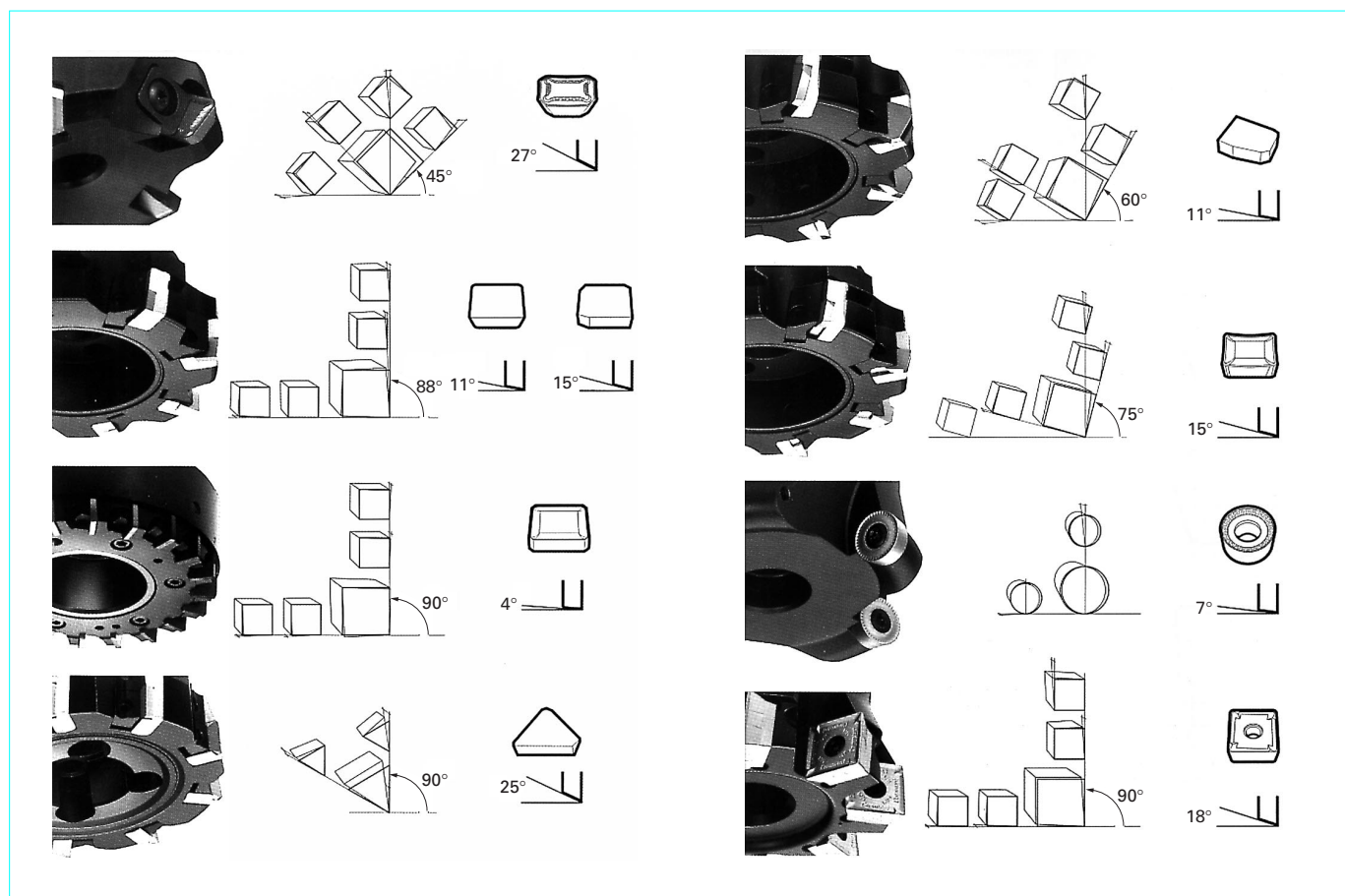


Figure 10 – Différentes fraises à surfaçer avec diverses géométries et types de plaquette

■ La **taille de plaquette** pour le surfaçage est affectée par la règle générale applicable à ce type d'usinage, c'est-à-dire que la profondeur de coupe ne doit pas dépasser deux tiers de la longueur de l'arête de coupe (figure 11). Cela étant, la profondeur de coupe maximale pour une fraise à surfaçer et les plaquettes dont elle est munie doit toujours être comparée aux recommandations valables pour chaque type d'outil. Les performances peuvent être ici très variables, non seulement en fonction de l'angle d'attaque et de la taille de plaquette, mais également de la géométrie et de la configuration de la fraise. L'épaisseur des plaquettes n'est pas non plus la même pour certaines fraises.

■ Une **plaquette plus épaisse** peut être nécessaire dans certains cas pour augmenter la résistance de l'arête de coupe. Il faut rechercher la plus petite taille et la plus faible épaisseur possibles pour un rendement optimal, mais en veillant cependant à ce que la plaquette soit quand même capable de résister aux contraintes qui lui sont imposées par les copeaux et sans mettre en danger la fiabilité d'arête.

■ Le fractionnement des copeaux n'a jamais eu une grande importance en fraisage, étant donné que la longueur de coupe est limitée et que les copeaux produits sont donc relativement courts. En revanche, la **formation des copeaux** et leur évacuation sont en relation directe avec le bourrage des copeaux et la conception des poches à copeaux et des dispositifs de fixation. La géométrie

positive/négative de la fraise influe favorablement sur l'évacuation des copeaux. Jusque récemment, les plaquettes demeuraient lisses, sans qu'aucun effort ne soit fait pour modifier la face d'évacuation des copeaux.

Le **fraisage positif** a gagné énormément de terrain, en partie en raison de l'extension du surfaçage sur de petits centres d'usinage ou des fraiseuses de faible puissance. Un angle d'attaque de 45° en combinaison avec une géométrie positive/négative donne un outil efficace. Cette évolution a par ailleurs été encouragée par la progression des plaquettes positives à arêtes curvilignes.

Réduire les forces de coupe en fraisage est toujours un avantage, et un degré de plus d'angle de coupe positif peut signifier une diminution de la puissance absorbée et des vibrations. La géométrie curviligne accentue l'angle de coupe effectif. Les nouvelles géométries de coupe concaves et convexes pour le fraisage diminuent la force axiale et assurent une distribution plus favorable des forces. La formation des copeaux, la durée de vie d'outil et la sécurité d'arête s'en trouvent améliorées.

Les géométries ont été développées à partir de combinaisons d'arêtes curvilignes, de chanfreins, de biseaux négatifs et de rayons. Une coupe extrêmement fluide est obtenue avec des plaquettes positives, robustes, munies d'une arête vive et différentes avances en fonction du type de géométrie. Les brise-copeaux garantissent un contrôle efficace des copeaux, y compris avec faibles profondeurs de coupe.

Tableau 3 – Choix des plaquettes pour une fraise à surfacer

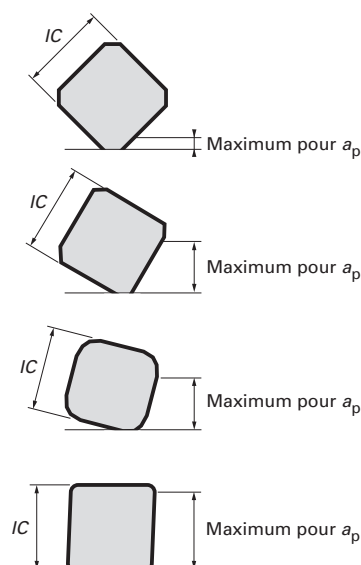
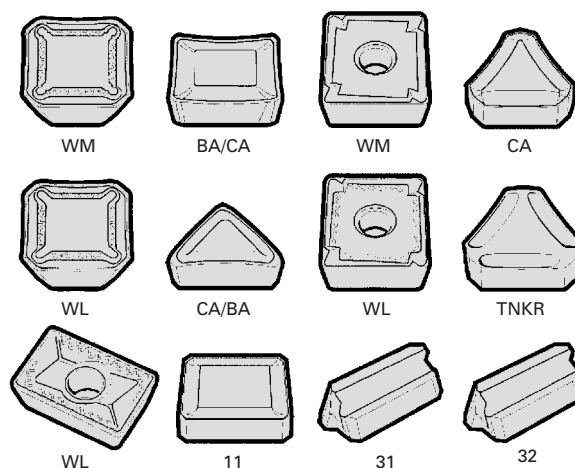
Type de fraise (nomenclature Sandvik-Coromant)	Plaquette (nomenclature Sandvik-Coromant)	Géométrie de l'arête de coupe (cf. figure 12)
U-Max 90	R 215.44	
U-Max (250.44)	RCMT	
T-Max 145 (260.22)	SEMN, SEKN, SEHN	WM/WL
T-Max (262.2)	TPKR, TPKN, TPMN	BA
T-Max 290 (290.90)	R 290.90	WM/WL
T-Max AL (262.2AL)	TFAN	
T-Max 45 (260.7)	LNCX, LNMX	31/32
T-Max HD (267.21)	SPMN, SPUN-T	
Modulmill 145 (260.22)	SEMN, SEKN, SEHN	
Modulmill (287.5)	SNHN	
Modulmill (285.1)	SNKN, SNMN, SNAN	
Modulmill (285.2)	SPKR, SPKN, SPMN, SPAN	CA
Modulmill (283.2)	SPEN	
Modulmill (282.2)	TPKR, TPKN, TPMN, BPKX	BA
Modulmill (280.2)	RCEN, RCMN	
Modulmill (280.6)	RDHN	
T-Max (265.2)	SPKR, SPKN, SPMN, SPAN	CA
T-Max-AL (265.2 AL)	TFAN	
Auto (260.3)	TNMF-CA, TNHF-CA, TNJN, TNMF	
	TNKF, TNMN, TNKR, TMCN	CA, TNKR
Auto-F (260.4)	SBAN, SBMX, SBEX	– 11
Auto-FS (262.4)	SBAN, SBMX, SBEX	

1.3.2 Principales géométries

La géométrie de l'arête de coupe en fraisage a fait l'objet de développements qui en ont considérablement accru les performances. Plusieurs nouvelles géométries de plaquettes positives sont désormais le choix logique pour le fraisage d'acier et d'autres matières. Les nouvelles géométries telles que WM, WL, CA et BA (figure 12) ont tout spécialement fait du surfacage une opération plus performante, plus fluide, plus fiable et faisant intervenir des températures moins élevées tout en améliorant l'évacuation des copeaux.

■ La **géométrie WM** est une géométrie universelle pour l'usinage moyen d'acier, d'acier inoxydable et de fonte nodulaire. Elle est idéale sur les petites fraiseuses et les petits centres d'usinage, ainsi que pour l'usinage avec longs porte-à-faux. Une faible puissance absorbée et une coupe fluide garantissent une durée de vie d'outil aussi longue que fiable. Une arête robuste, générant de faibles forces de coupe, crée une bonne stabilité et permet, en combinaison avec les fraises à surfacer des types 145 et 290, de couvrir de nombreuses opérations courantes sur les centres d'usinage.

■ La **géométrie WL** est appropriée pour l'usinage léger. Il s'agit d'une arête de coupe positive vive qui consomme encore moins de puissance que la géométrie WM. Certaines opérations de surfacage sont exécutées avec de faibles avances par dent et exigent une géo-

**Figure 11 – Rapport taille de la plaquette/profondeur de coupe****Figure 12 – Sélections de plaquettes de fraisage positives modernes (nomenclature Sandvik-Coromant)**

métrie micrométrique pour que les résultats obtenus avec les fraises 145 et 290 soient ceux attendus.

Le centre rehaussé des plaquettes WM et WL, en combinaison avec l'arête de coupe concave et le brise-copeaux incorporé, concourt à diriger les copeaux à l'opposé de la fraise. Un angle de coupe accentué est également le résultat de cette géométrie. Le contact entre la plaquette et les copeaux est limité, ce qui réduit la génération de chaleur et permet une meilleure utilisation de la puissance machine disponible.

Le passage aux plaquettes de fraisage planes intervient en règle générale lorsqu'il faut répondre à des critères supplémentaires.

Bien que les plaquettes WM et WL génèrent des forces de coupe favorables, les matières dures tout spécialement requièrent une arête de section monobloc. Les coupes intermittentes, le manque de stabilité, les très fortes avances et les positionnements défavorables exigent aussi le maximum de sécurité que procurent les plaquettes planes.

■ Pour le **surfaçage-dressage** de diverses matières avec fraise type 290 munie de plaquettes carrées à géométrie positive/négative, il existe également des géométries WM et WL, qui apportent ici efficacité et sécurité. Comme précédemment, la géométrie WM est du type universel, couvrant la plupart des applications sur l'acier, dans des conditions d'usinage variables. La géométrie WL, comme dans le cas du surfaçage général, est prévue pour l'usinage léger avec fraises de petit diamètre. Les plages d'avance par dent sont distinctes pour chacun des deux types de géométries.

■ Les **géométries CA et BA** sont prévues pour les fraises à surfaçer à 75 et 90°, de petit ou grand diamètre, et les fraises à surfaçer-dresser. Il s'agit là de plaquettes pour le surfaçage lourd d'acier et d'acier coulé, ainsi que pour le dressage d'épaulements. Les robustes arêtes positives de ces plaquettes acceptent les avances élevées et les grandes profondeurs de coupe. Les plaquettes CA carrées sont le choix logique pour le fraisage général d'acier, même lorsque les impératifs à respecter sont très stricts. Dans cette plage, les plaquettes planes sont les mieux appropriées pour l'acier inoxydable, la fonte, l'aluminium et les alliages de cuivre.

Pour le surfaçage de fonte avec les fraises type Auto, il existe également une géométrie positive (CA), permettant une coupe extrêmement fluide, avec un maximum d'efficacité et un minimum d'écaillage de la pièce. S'y ajoutent aussi des géométries de brise-copeaux positives sur les plaquettes de finition carrées pour le surfaçage de fonte, qui limitent le besoin de puissance et réduisent la tendance aux vibrations.

■ Les **géométries 31 et 32** des plaquettes de surfaçage LNCX sont développées pour les fraises à 45°, prévues pour le fraisage moyen. La géométrie positive/négative de la fraise, en combinaison avec l'angle d'attaque, permet des performances exceptionnelles. La plaquette positive type 31 est principalement destinée à l'acier inoxydable, tandis que la géométrie 32 est prévue pour divers alliages réfractaires.

2. Surfaçage-dressage, rainurage et fraisage longitudinal

2.1 Diversité des opérations

Les opérations de base, courantes sur de nombreuses pièces, exigent de recourir à une combinaison de fraisage périphérique et de surfaçage. Selon le réglage effectué, le surfaçage peut toutefois être également utilisé pour les configurations **a** et **b** dans le plan horizontal ou à condition de travailler en plusieurs passes (figure 13).

2.1.1 Description des opérations

■ En **surfaçage**, la largeur de la surface à usiner est le critère essentiel de choix du diamètre de fraise. La surépaisseur d'usinage doit être calculée en fonction de la profondeur de coupe maximale que permet d'atteindre la fraise envisagée. Les épaulements (figure 13a) et les rainures (figure 13b) ont plusieurs faces, qui doivent être usinées simultanément, ce qui signifie que la largeur de coupe a_e et la profondeur de coupe a_p doivent être prises en considération pour le choix de la taille et du type d'outil appropriés.

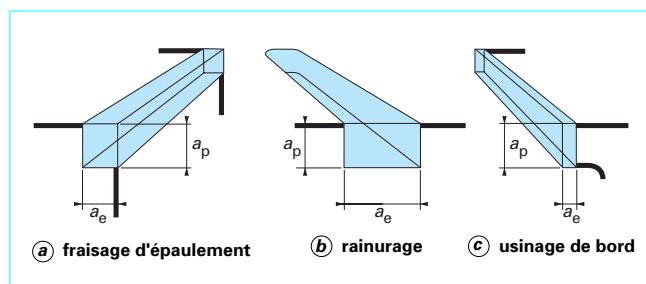


Figure 13 – Surfaçage-dressage, rainurage et fraisage longitudinal

La réalisation d'un épaulement de petite dimension peut être comparée à celle d'un bord, même si le rapport largeur/profondeur diffère considérablement et exige donc un concept d'outil également différent.

■ Les **fraises à rainurer** ont une plage d'utilisation définie par leur diamètre et la profondeur de coupe qu'elles autorisent. Certaines fraises à rainurer peuvent être considérées comme des fraises à surfaçer-dresser de petit diamètre capables d'atteindre une plus grande profondeur de coupe. Leurs performances sont par ailleurs affectées par la nature de l'opération : épaulement (figure 13a) ou rainure (figure 13b).

■ L'**usinage d'un bord** (figure 13c) ou d'un épaulement est essentiellement une opération de fraisage latéral impliquant l'exécution de deux faces. Un facteur limitatif peut être ici la flexion de l'outil.

■ L'usinage d'une rainure ou d'une gorge, ce que l'on appelle aussi le **rainurage dans le plein**, fait intervenir pour sa part l'exécution de trois faces. La gorge peut être ouverte à ses deux extrémités ou à une seule. (Les gorges fermées à leurs deux extrémités sont désignées sous le nom de poches et exigent une fraise à rainurer capable de percer, c'est-à-dire de travailler dans le sens axial.) La fraise à rainurer se trouve dans une entaille à 180°, à peu près à mi-chemin sur le diamètre, ce qui lui assure un maintien latéral éliminant le risque de flexion.

2.1.2 Conditions générales de coupe

Le facteur limitatif pour les opérations de rainurage dans le plein est souvent l'évacuation des copeaux. Les fraises à rainurer modernes sont très efficaces en raison de leur taux élevé d'enlèvement de matière, mais il est important de veiller à ce qu'il n'y ait pas de bourrage des copeaux susceptible de conduire à une rupture d'arête. L'utilisation d'air comprimé ou de liquide de coupe est une méthode satisfaisante pour évacuer rapidement les copeaux.

La fraise à rainurer est un outil conçu pour travailler dans le sens axial ce qui la rend donc plus sensible aux effets des forces de coupe, surtout aux vitesses de coupe élevées. Une fixation extrêmement stable de l'outil est essentielle, car sinon, compte tenu des porte-à-faux intervenant en rainurage, une flexion accompagnée de vibrations est inévitable. Les fraises à rainurer existent avec différents types de queues, dont certains sont préférables aux autres. Les mandrins à pinces et les porte-outils modulaires assurent habituellement une meilleure stabilité par un serrage rigide de la queue.

Les effets des forces de coupe sur une fraise à rainurer peuvent influencer considérablement sur les résultats obtenus. Les forces radiales, axiales et tangentielles tendent à imposer une flexion et une traction à la fraise. Le choix de la méthode de fraisage, conventionnelle ou en avalant, ainsi que d'une inclinaison éventuelle et de l'angle d'hélice approprié est à considérer en fonction du type de coupe envisagée.

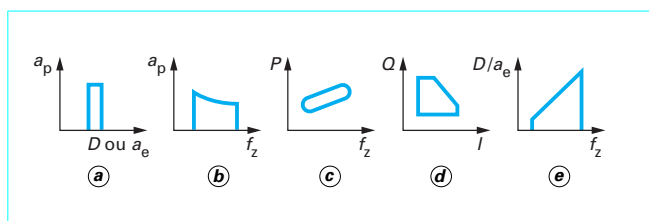


Figure 14 – Relations entre caractéristiques et performances d'une fraise à rainurer

Le choix de l'outil adéquat doit également être effectué avec précision en ce qui concerne sa taille et ses caractéristiques. Le rapport entre diamètre et profondeur de coupe est, entre autres, important. **Les performances ou les limitations d'une fraise à rainurer peuvent être exprimées de différentes manières**, la profondeur de coupe et le diamètre étant alors les facteurs décisifs. Quelques-unes des relations les plus couramment utilisées dans ce contexte sont : profondeur axiale/diamètre (figure 14a), profondeur axiale/avance (figure 14b), puissance/avance (figure 14c), taux d'enlèvement de matière/longueur d'outil (figure 14d), diamètre et largeur de coupe radiale/avance (figure 14e).

Les fraises à rainurer peuvent être de différentes formes, avec plaquettes indexables, ou de type plus conventionnel, avec une longue arête de coupe hélicoïdale (figure 15). La fraise munie de plaquettes a une capacité d'usinage élevée, mais la profondeur de coupe axiale est limitée par la longueur d'arête des plaquettes. Comme les petites fraises à surfacer-dresser, elle peut avoir un nombre de plaquettes et un pas variables en fonction du diamètre. L'avantage que présentent les nuances de carbure et les géométries de plaquettes modernes rend ce type de fraise inégalable. Grand pas ou pas réduit sont utilisés selon le cas pour optimiser les conditions d'usinage en ce qui concerne l'engagement des dents, l'épaisseur moyenne des copeaux, la puissance absorbée et la stabilité.

Le fraisage en avalant est à préférer au fraisage périphérique car il permet de varier l'avance par dent tout au long de la plage allant du rainurage dans le plein jusqu'au simple dressage des bords.

Il ressort du diagramme de la figure 16 que, lorsque le rapport entre le diamètre et la profondeur de coupe radiale D/a_e est dans la plage correspondant au rainurage dans le plein, effectif ou virtuel, avec une largeur de coupe de 40 % du diamètre, ou lorsque la valeur D/a_e maximale est égale à 2,5, l'avance doit être maintenue aux alentours des valeurs nominales indiquées. Mais, au fur et à mesure que l'on approche du simple dressage des bords, avec un plus petit engagement de la fraise, il est alors possible d'augmenter progressivement l'avance. Pour le dressage des bords, l'avance par dent f_z est à multiplier par le facteur d'efficacité f_1 , lequel est calculé pour augmenter le taux d'enlèvement de matière en fonction de la diminution progressive de la profondeur de coupe par rapport au diamètre. Il est également important, tout spécialement en fraisage latéral avec arc d'engagement réduit, de s'assurer que l'épaisseur moyenne des copeaux est suffisante.

Les différentes relations que nous venons de voir doivent cependant être évaluées en fonction de l'opération concernée. Il se peut que le facteur d'efficacité ne soit pas toujours intégralement applicable du fait que la qualité d'état de surface et la tendance au broutage peuvent, dans certains cas, limiter l'avance.

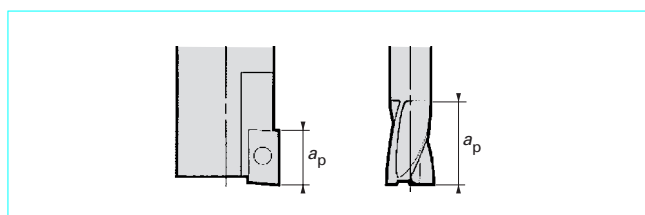


Figure 15 – Capacité de profondeur de coupe axiale d'une fraise à rainurer

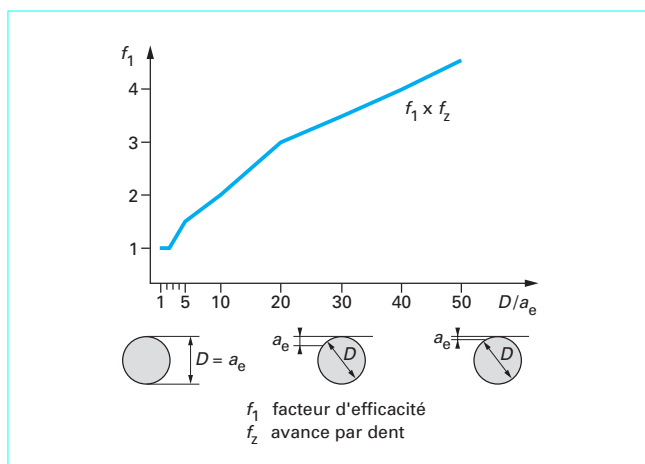


Figure 16 – Facteur d'efficacité en dressage de bord

2.2 Principales géométries de fraises

2.2.1 Fraises à rainurer

Le rainurage dans le plein avec une fraise à rainurer est une opération délicate. En général, la profondeur de coupe axiale a_p doit être réduite à peu près aux deux tiers de la longueur d'arête de la plaquette. La rigidité de la machine et le profil d'évacuation des copeaux auront également une influence décisive sur les résultats obtenus.

Les fraises à rainurer à plaquettes indexables (plaquettes que l'on fixe sur le corps de la fraise et sur lesquelles se forment les copeaux) peuvent aussi être utilisées dans le cadre d'une combinaison limitée d'avance dans le sens radial et axial. Cette opération, qui porte le nom de **fraisage en pente** (figure 17), peut être exécutée dans les limites de la longueur de l'arête de coupe engagée (largeur l_w) pour chaque passe radiale. Il peut être largement fait appel à cette formule pour accélérer les opérations de fraisage sur les machines CNC.

Lors de l'exécution d'une **poche par fraisage en pente**, l'opération doit démarrer à proximité du centre et se poursuivre en direction de l'extérieur pour faciliter l'évacuation des copeaux et l'obtention d'une dépouille (figure 18). La fraise sort ensuite de la poche dans un de ses coins. Les fraises à rainurer à dent perçante sont cependant mieux appropriées lorsque le fraisage en pente est une opération fréquente.

Les fraises à rainurer à plaquettes indexables étant limitées au niveau de la profondeur de coupe axiale ou des possibilités de

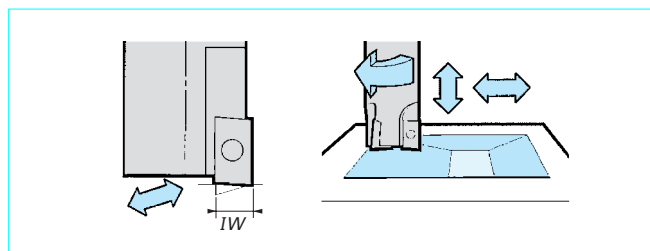


Figure 17 – Fraisage en pente avec fraise à rainurer

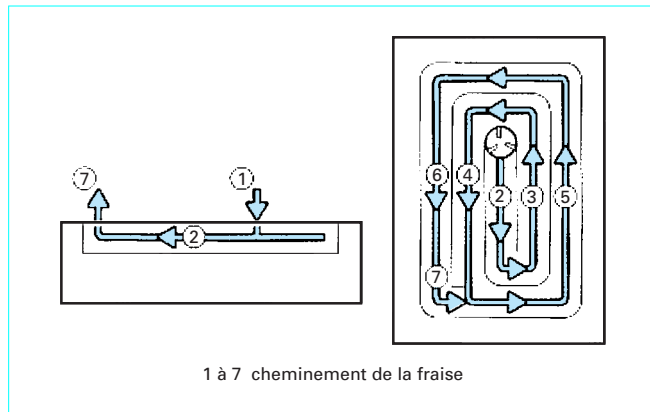


Figure 18 – Fraisage en pente d'une poche

fraisage latéral, par la longueur d'arête des plaquettes, il est nécessaire de travailler en plusieurs passes pour exécuter une rainure profonde ou un épaulement d'une certaine hauteur. Les vitesses d'usinage élevées que permettent ces fraises compensent toutefois ces limitations. D'une manière générale, à condition d'utiliser la machine appropriée, il est donc possible de réaliser bords et rainures plus rapidement en plusieurs passes, qu'avec une fraise à rainurer du type hélicoïdal ayant une arête de coupe plus longue.

2.2.2 Fraises deux tailles

Pour les applications plus lourdes ou faisant intervenir de plus grandes profondeurs de coupe, la fraise deux tailles est le complément naturel pour les épaulements et les rainures. Une fraise à rainurer type peut avoir une longueur d'arête d'environ le quart de celle d'une fraise deux tailles de même diamètre. La fraise deux tailles a une plus grande capacité d'enlèvement de matière et est généralement utilisée pour l'ébauche, la structure de surface étant obtenue par fraisage latéral sous forte avance.

La fraise deux tailles est semblable à une fraise à rainurer hélicoïdale de grand diamètre dont l'arête longue serait constituée de plaquettes indexables (figure 19). Les fraises deux tailles actuelles ont quelques ressemblances sur le plan de leur fonctionnement avec les anciennes fraises en acier rapide, montées sur mandrin sur des fraiseuses horizontales. Avec des angles d'hélice de 15 ou 30°, ces fraises permettent un enlèvement efficace de matière, mais exigent de respecter certains impératifs en matière de stabilité, d'état de la broche, d'évacuation des copeaux, de fixation de l'outil et de puissance machine. Des forces radiales considérables rendent difficile ce type d'application en fraisage latéral.

La longueur totale d'arête de coupe peut être modifiée en fonction de l'application considérée, par exemple plus courte pour le rainurage dans le plein ou pour compenser les limitations imposées par la machine. Les arêtes plus longues sont prévues pour le dressage des bords sur des fraiseuses à la fois puissantes et stables.

Des positions de plaquettes soigneusement calculées permettent de réaliser des arêtes de coupe de profil variable selon le diamètre. Une option consiste à utiliser une fraise deux tailles avec des embouts interchangeables (figure 20) pour pouvoir réaliser différentes configurations avec rayons ou pentes.

Des rainures de même profondeur que le diamètre de la fraise peuvent être usinées avec des versions plus courtes, tandis que des épaulements de hauteur double de ce même diamètre peuvent l'être par dressage des bords avec arêtes courtes ou longues. L'avance, qui peut être augmentée pour le dressage des bords, est élevée pour la plupart des matières usinées.

2.2.3 Fraises à pas fin

Une fraise à pas réduit avec grand angle d'hélice est le meilleur choix pour le dressage des bords. Des profils extérieurs ou intérieurs peuvent être usinés efficacement avec des fraiseuses CNC. Des épaulements de grandes dimensions ou des bords épais, faisant intervenir de longues coupes axiales, peuvent être réalisés avec une profondeur de coupe radiale de 0,5 fois le diamètre. Le grand angle d'hélice garantit également que le nombre de dents simultanément engagées est suffisant pour donner une coupe fluide à une faible profondeur de coupe radiale.

2.3 Compléments

2.3.1 État de surface, défauts de forme et applications spéciales

L'état de surface en rainurage dépend du faux-rond radial de l'outil, mais il convient cependant d'évaluer aussi le rapport diamètre/porte-à-faux, l'avance par dent et la stabilité de fixation de la fraise.

Le plus mauvais état de surface est obtenu lorsque la surface n'est générée que par une seule arête. Le fait de passer du fraisage en avalant au fraisage conventionnel peut améliorer l'état de surface dans certaines matières. L'utilisation correcte de liquide de coupe, surtout lors de la finition de matières ayant tendance à coller, influe également sur les résultats. En finition, la profondeur de coupe radiale doit être généralement maintenue à une faible valeur car elle a une influence importante sur la flexion de la fraise. Il convient toutefois, lors de l'usinage d'acier inoxydable, de veiller à ce que la profondeur de coupe demeure suffisante pour éviter l'écroutissage de la pièce.

Avec une fraise à rainurer à plaquettes indexables, les tolérances et la flexion de l'outil contribuent à induire un défaut de perpendicularité réelle de l'épaulement exécuté. Lorsque la tolérance angulaire doit être très précise, une fraise hélicoïdale réaffûtable peut être, dans certains cas, la meilleure solution.

Le concept deux tailles peut également être utilisé pour l'exécution de profils spéciaux. Le fraisage circulaire (figure 21) permet de réaliser efficacement des opérations de fraisage latéral dans le cas de profils uniformes d'une certaine longueur. La technologie moderne des plaquettes indexables apporte des solutions performantes équivalentes à ce que permettaient traditionnellement les fraises en acier rapide affûtées en forme. Des plaquettes indexables standards peuvent être montées sur des fraises conçues pour

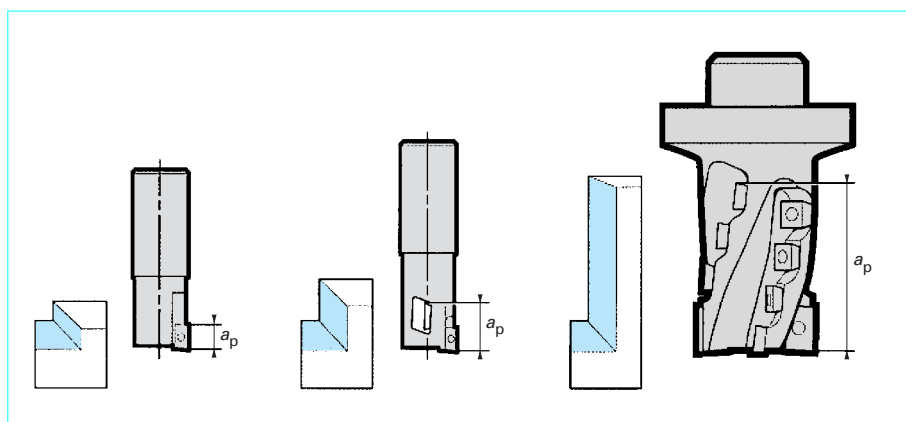


Figure 19 – Fraise deux tailles et longueur d'arête de coupe

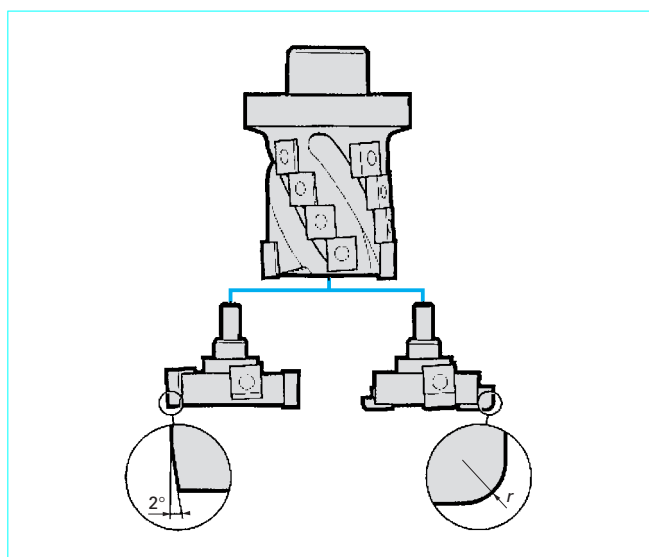


Figure 20 – Fraise deux tailles avec embouts interchangeables

produire pratiquement n'importe quel profil. Les techniques CAO/FAO garantissent la précision des profils exécutés et le positionnement correct des plaquettes de manière à obtenir une arête de coupe et une face de dépouille continues.

2.3.2 Apport des fraises à rainurer monoblocs en carbure et en *Coronite*

Il existe d'importantes plages d'applications dans lesquelles les fraises à rainurer monoblocs complètent les versions à plaquettes indexables. Ces fraises, disponibles en différents diamètres, sont faciles à profiler, sont réaffûtables et permettent d'obtenir un bon état de surface avec une arête longue en carbure ou en *Coronite*.

■ Fraises en carbure

Les fraises à rainurer monoblocs en carbure ou à plaquettes en carbure brasées sont proposées dans de grands diamètres (15 à 50 mm) avec les caractéristiques deux tailles. Elles sont appro-

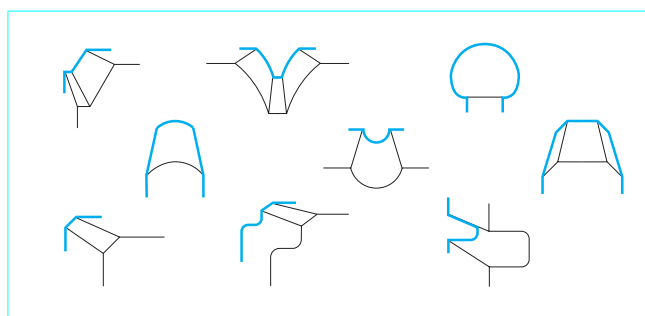


Figure 21 – Exemples d'opérations réalisables avec fraises cylindriques deux tailles

priées pour certaines opérations et matières et lorsque une précision élevée et un bon état de surface sont exigés, et ont une productivité plusieurs fois supérieure à l'acier rapide.

- Les fraises à rainurer hélicoïdales monoblocs supportent de fortes températures d'arête et conviennent pour une grande diversité de matières. Elles peuvent percer et permettent de rainurer dans le plein à une profondeur égale à leur diamètre. Le fraisage latéral est possible avec des profondeurs de coupe radiales relativement importantes. Ce sont des outils rigides, qui limitent la flexion au strict minimum et donnent un bon état de surface.

- Les fraises à rainurer à plaquettes en carbure brasées peuvent également percer et étaient initialement développées pour l'usinage d'aluminium. Un angle d'hélice de 25° et un angle de coupe très positif les rendent appropriées pour l'ébauche et la finition de divers types de pièces creuses, à cela près toutefois que la profondeur de coupe radiale doit demeurer limitée pour réduire la flexion au strict minimum.

Le rainurage avec fraises de petit diamètre, c'est-à-dire ne dépassant généralement pas 20 mm, représente une large plage d'applications, réalisées par des outils en acier rapide disponibles dans des diamètres à partir de quelques millimètres seulement. Bien que moins coûteux, ces outils, utilisés depuis de nombreuses décennies, ont des performances assez médiocres, qui souvent ne répondent pas aux critères actuels de rentabilité en matière d'usinage. Les fraiseuses, les centres d'usinage et les centres de tournage modernes ne doivent pas être contraints de travailler à des vitesses de coupe comparativement faibles pour exécuter de petites rainures telles que les rainures de clavettes par exemple. Plus le coût machine est élevé, moins les outils lents sont rentables.

Fraises en Coronite

Dans les plages d'applications où l'on utilise des fraises à rainurer de diamètre inférieur à 20 mm, la *Coronite* permet un meilleur rendement que l'acier rapide. La ténacité de l'acier rapide, combinée à la résistance à l'usure du carbure, rend possible des vitesses de coupe dix fois supérieures et une durée de vie d'outil également décuplée. Un programme en continu extension est proposé dans ce type de fraises à rainurer basées sur un matériau de coupe relativement nouveau, constitué de particules dures ultrafines entourant un noyau en acier tenace.

La *Coronite* est le matériau idéal pour les fraises à rainurer appelées à résister à des efforts de flexion considérables, dus à la longueur de l'outil entre le mandrin et le trait de coupe, tout en satisfaisant aux critères de l'usinage moderne.

Ces fraises à rainurer couvrent une gamme d'applications allant de l'ébauche à la semi-finition et la finition de rainures, de rainures de clavettes, de poches et de profils (figure 22a et b).

Un grand angle d'hélice (40°), complété par un grand angle de coupe, est tout spécialement approprié pour l'usinage d'acier inoxydable et d'acier à basse teneur en carbone ayant tendance à coller, tandis que, pour le rainurage général, une valeur de 30° est préférable.

Un bon état de surface est obtenu, surtout si l'on adopte le fraisage conventionnel pour les passes de finition. Des vitesses de 100 m/min ou plus sont recommandées pour l'usinage d'aciers non alliés.

Comme pour toutes les opérations de rainurage, il est essentiel de fixer solidement la fraise et de limiter le porte-à-faux au minimum, d'utiliser un débit abondant de liquide de coupe ou d'air pour évacuer les copeaux, et d'optimiser avec soin les conditions de coupe à partir des valeurs recommandées.

3. Autres opérations

3.1 Opérations de fraisage-perçage

Elles concernent les opérations de fraisage de poches et de profils.

3.1.1 Fraisage de poches et de cavités

Le fraisage de poche met à contribution la capacité de l'outil de percer à une certaine profondeur avant de fraiser. La fraise doit pouvoir avancer axialement sur l'entière profondeur de la poche, soit en une seule passe, soit en plusieurs passes d'ébauche ou de fraisage en pente. La fraise à rainurer utilisée doit avoir une arête de coupe transversale en bout pour pouvoir percer relativement profond, comme cela est le cas des types de la figure 23a. Ou bien, la fraise à rainurer, ou dans certains cas la fraise à surfacer, peut percer ou fraiser en pente dans l'espace de dégagement axial compris entre l'arête en bout et le corps de fraise, comme dans le cas des types de la figure 23b.

La possibilité de perçage n'est pas une fonction unique aux fraises à rainurer modernes à plaquettes indexables. Les fraises en

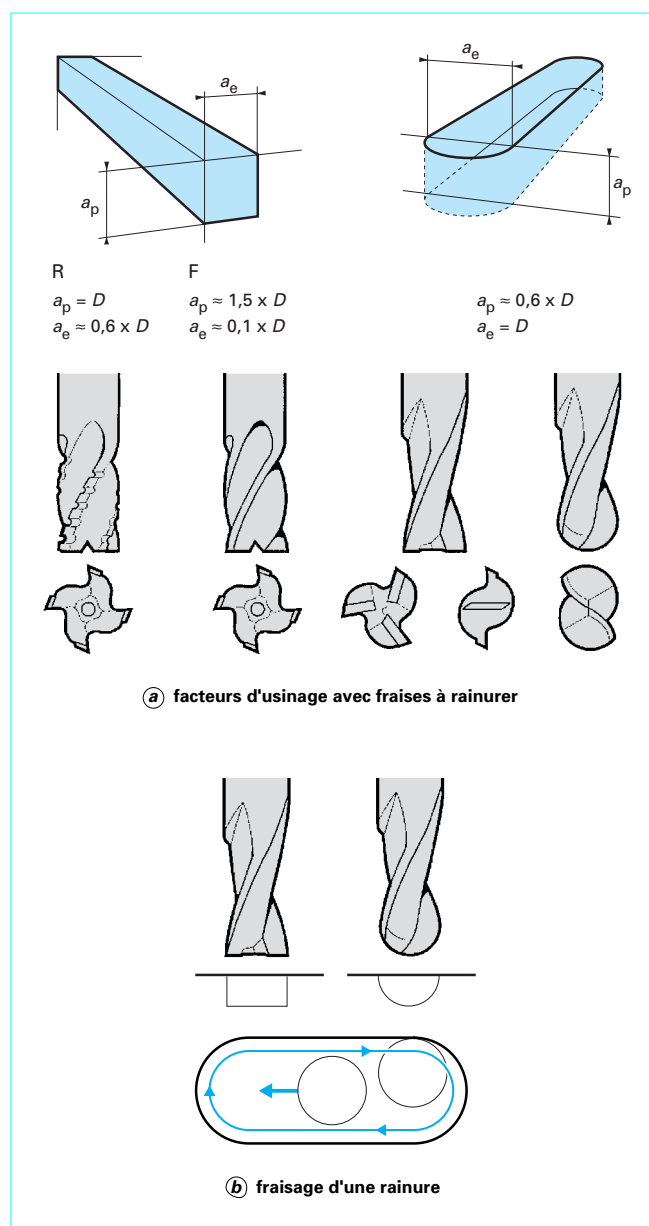


Figure 22 – Exemple de fraises à rainurer et d'opérations d'ébauche (R) et de finition (F) réalisées avec ces fraises

acier rapide et en carbure permettaient depuis longtemps d'exécuter des rainures de clavettes et des poches. Mais les fraises modernes ont, par contre, la propriété d'effectuer ces opérations à très grande vitesse, et le fraisage CNC ou par la méthode conventionnelle est extrêmement efficace lorsque l'on sait choisir et utiliser correctement les outils modernes appropriés.

La possibilité de percer en continu est révélée par la configuration de l'extrémité d'une fraise à rainurer. Ce type de fraise est muni d'une ou plusieurs arêtes de coupe couvrant l'ensemble du diamètre de l'outil.

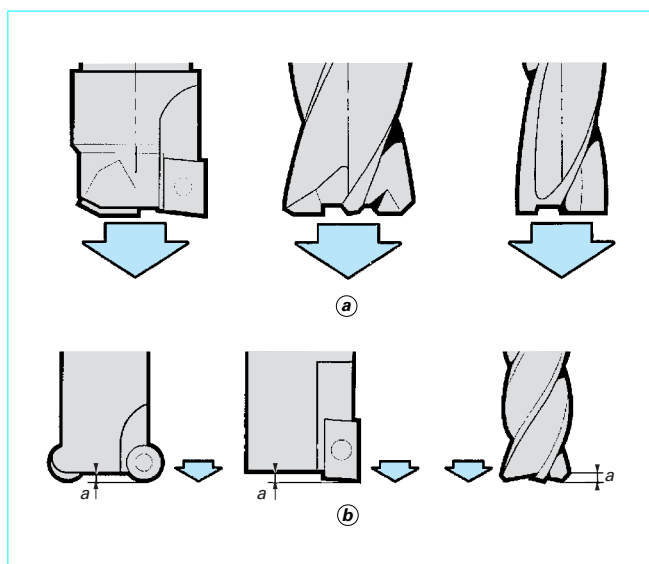


Figure 23 – Capacité d'avance axiale de différents types de fraises

Les outils dont la capacité de perçage est limitée, mais qui sont utilisables pour divers degrés d'ébauche et de fraisage en pente, doivent avoir une arête de coupe en bout uniquement en direction du centre et avec un certain dégagement par rapport au corps de l'outil.

La possibilité d'avance axiale et de fraisage en pente est alors limitée en fonction de la distance entre l'arête et le corps d'outil a et de la longueur de l'arête de coupe axiale.

Les fraises à rainurer à dent perçante modernes munies de plaquettes indexables (figure 24) sont des outils efficaces qui présentent en outre l'avantage d'effectuer le travail de deux outils conventionnels : un foret et une fraise à rainurer. Elles sont capables de travailler dans toutes les directions d'avance, ce qui peut se révéler particulièrement précieux sur les centres d'usinage, et permettent également d'effectuer un certain nombre d'autres opérations que les poches et les épaulements : réalésage, poches en pente et divers travaux de copiage. **Pour le perçage, l'utilisation de liquide de coupe est indispensable, car l'évacuation des copeaux est essentielle.**

L'avance nécessite des ajustements selon la direction dans laquelle elle s'effectue (figure 25). Les valeurs nominales applicables au fraisage radial rectiligne et conventionnel doivent être diminuées pour le fraisage en avalant avec profondeur de coupe limitée par passe. En perçage, l'avance par tour est également limitée et dépend, dans une certaine mesure, du diamètre de la fraise à rainurer.

Les fraises à rainurer en carbure monoblocs et certains types de fraises en *Coronite* peuvent percer jusqu'à une profondeur d'environ 0,7 fois leur diamètre. L'avance doit être considérablement réduite pour le perçage lorsqu'une avance radiale, pour l'exécution d'une rainure, doit intervenir ensuite. L'évacuation des copeaux est elle aussi essentielle, aussi convient-il d'utiliser de l'air comprimé ou un liquide de coupe sous pression. Un autre facteur crucial pour l'obtention de bons résultats, tout spécialement en fraisage latéral, est l'épaisseur moyenne des copeaux. L'arc d'engagement par rapport au diamètre d'outil doit être lui aussi correctement calculé pour la bonne marche de l'opération. Des fraises à deux ou trois dents sont recommandées pour les opérations où interviennent de grandes profondeurs de coupe.

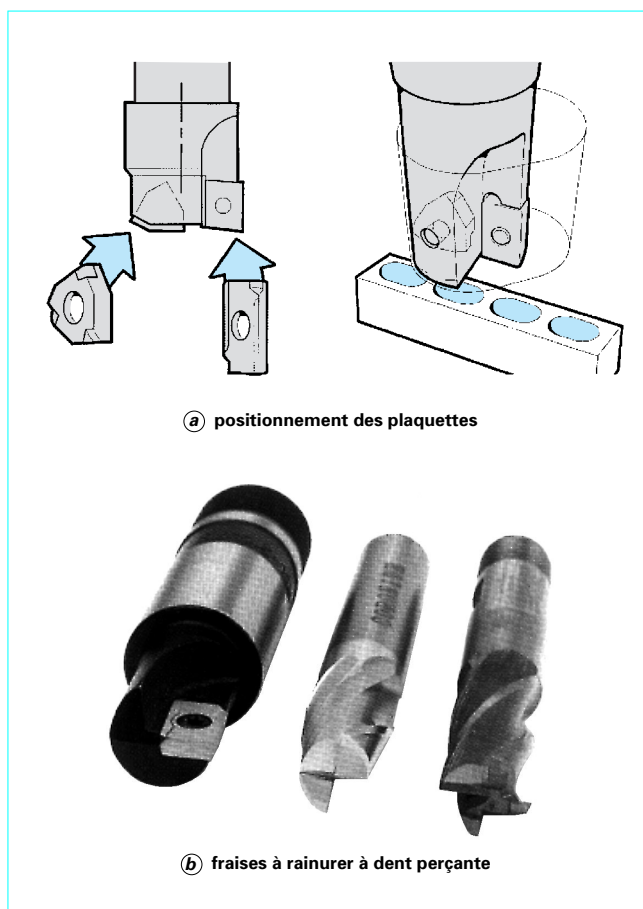


Figure 24 – Combinaison de plaquettes sur une fraise à rainurer à dent perçante moderne

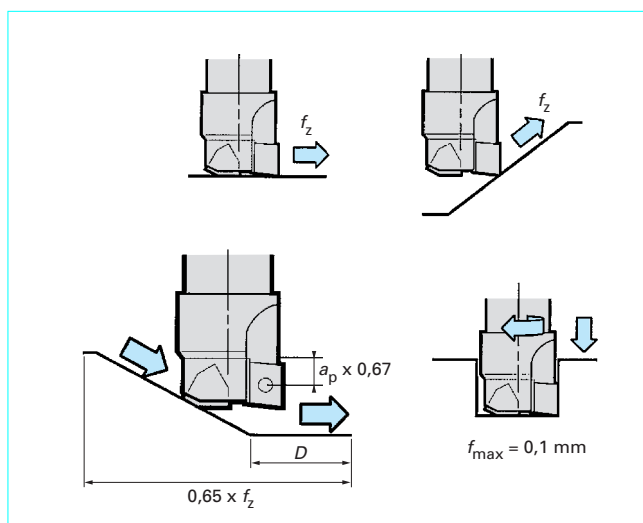


Figure 25 – Ajustement de l'avance selon la direction dans laquelle elle s'effectue

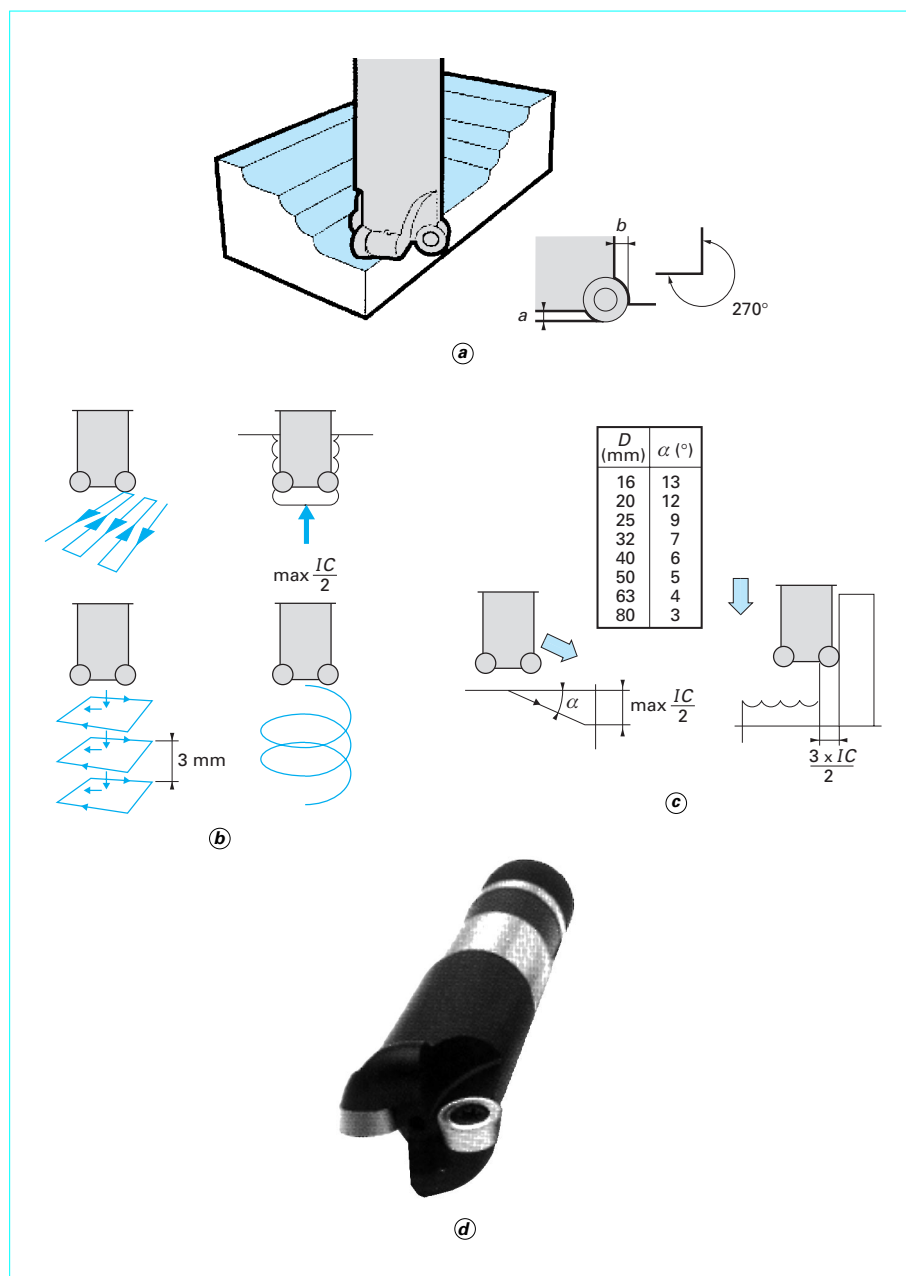


Figure 26 – Possibilité de fraisage d'une fraise à plaquettes rondes

Une avance axiale limitée est un avantage dans de nombreux contextes d'usinage. Cela permet en effet de fraiser dans de bonnes conditions d'efficacité des trous, des poches et des profils. Les fraises à rainurer et les fraises à surfacer à plaquettes rondes (figure 26d) sont des outils robustes et dont l'angle de travail par rapport à la pièce peut atteindre 270° (figure 26a). Cela permet donc d'exécuter divers types d'opérations de perçage et de fraisage. Un taux élevé d'enlèvement de matière et une grande sécurité d'arête rendent ce type d'outil approprié pour les usinages difficiles.

La possibilité de fraisage en pente sous forte avance et la capacité de pénétrer en profondeur dans la pièce font des fraises à plaquettes rondes l'outil par excellence pour les opérations de profilage complexes comme par exemple, le profilage sur machines à cinq axes ou l'ébauche sur machines à trois axes. Le surfacage et le fraisage rectiligne à l'intérieur de poches peuvent être effectués en choisissant une profondeur de coupe de la moitié du diamètre des plaquettes (figure 26b). L'angle de pente est fonction du diamètre de fraise. Il est par exemple de 13° pour une fraise de 16 mm et de 3° pour une fraise de 80 mm (figure 26c). L'importance de la dépouille dépend également de ce même diamètre.

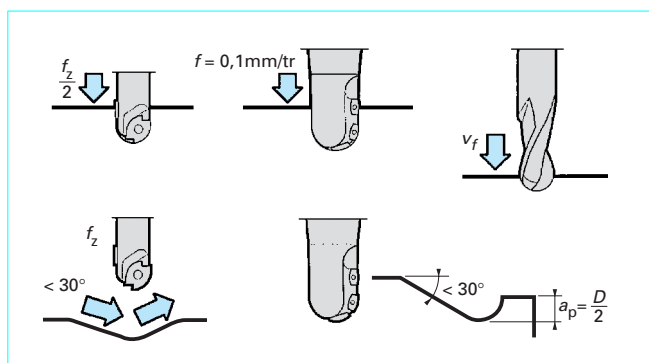


Figure 27 – Capacités et limitation des fraises à plaquettes rondes et des fraises à arête brasée en carbure à bout arrondi (fraise de droite)

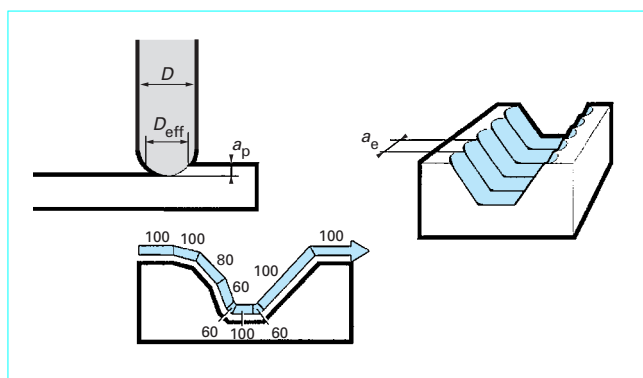


Figure 28 – Avance variable lors d'une opération de contournage

3.1.2 Fraisage de profils

Divers profils sont exécutés par copiage et sur des machines CNC. La possibilité d'effectuer ce type d'opération est essentielle dans la fabrication d'outillage et, bien que les fraiseuses capables d'exécuter des rainures et des poches puissent également réaliser certains profils, les outils véritablement spécifiques pour le profilage sont les fraises à rainurer à arêtes arrondies telles que les fraises à bout sphérique et, dans une moindre mesure, les fraises à rainurer à plaquettes rondes (figure 27). Le fait non seulement de fraiser, mais également de percer et de copier pour exécuter des profils complexes, à des vitesses rentables, exige énormément de l'outil utilisé.

Pour l'usinage en continu de profils concaves ou convexes, l'arête de coupe en bout doit être arrondie et permettre une grande polyvalence. Cela a été obtenu à la fois avec une arête brasée en carbure et avec des plaquettes indexables. La fraise à plaquettes indexables est prévue pour l'ébauche et la semi-finition, tandis que la version brasée est affûtée avec précision pour la finition.

Le concept de la fraise à bout sphérique à plaquettes indexables a été élargi de manière à englober également des fraises de grand diamètre dont l'arête de coupe est constituée de plusieurs plaquettes décalées avec précision pour fournir une coupe fluide.

La pointe de la fraise à bout sphérique a une géométrie efficace pour le perçage. Il convient cependant de noter qu'un défaut de forme peut intervenir au niveau de la pointe, entraînant un léger écart de certains profils, ce dont il faut donc tenir compte pour la finition.

Productivité et sécurité sont deux des principaux avantages des fraises à bout sphérique modernes.

Le calcul de l'avance par dent (figure 28) pour les fraises à bout sphérique, de manière à permettre à la fraise de prendre en charge les nombreux types de coupe auxquels elle peut être confrontée, doit s'effectuer avec certains facteurs de correction pour la profondeur de coupe radiale et axiale (figure 29). Le diamètre effectif D_{eff} de l'outil est également à prendre en considération pour calculer la vitesse de broche (figure 30) :

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_{\text{eff}}} \text{ (mm/tr)}$$

La capacité de fraisage en pente est très étendue et aucun ajustement des valeurs nominales n'est nécessaire tant que l'angle de pente ne dépasse pas 30° dans un sens ou dans l'autre. Pour le perçage, il convient d'adopter une avance égale à la moitié de celle utilisée en fraisage général (cf. figure 27).

$f_z = h_{\text{max}} \times f_1 \text{ (mm)}$						
$D \text{ (mm)}$	10 à 12	16	20	25	32	
$h_{\text{max}} \text{ (mm)}$	0,08	0,13	0,14	0,16	0,24	
$\frac{D_{\text{eff}}}{a_e}$	50	40	20	10	5	2,5
f_1	4,5	4	3	2	1,5	1

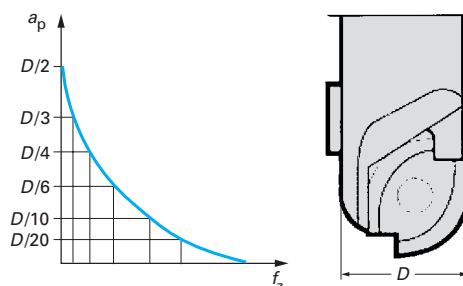


Figure 29 – Facteurs de correction à prendre en compte pour la profondeur de coupe radiale et axiale

3.2 Fraisage de rainures

3.2.1 Présentation

Les rainures doivent, de préférence, être usinées avec une **fraise-disque** (figure 31) plutôt qu'une fraise à rainurer. Dans la pratique, la frontière est quelque peu diffuse et son tracé est affecté par divers facteurs. Le choix de l'outil est en outre victime du changement dans les habitudes d'usinage intervenu depuis quelques décennies. Traditionnellement, ce choix est essentiellement guidé par la longueur et la profondeur de la rainure, ainsi que par sa largeur dans une certaine mesure, les fraises à rainurer étant préférées, pour leur part, pour les rainures de faible longueur et peu profondes telles que les rainures de clavettes et surtout les poches.

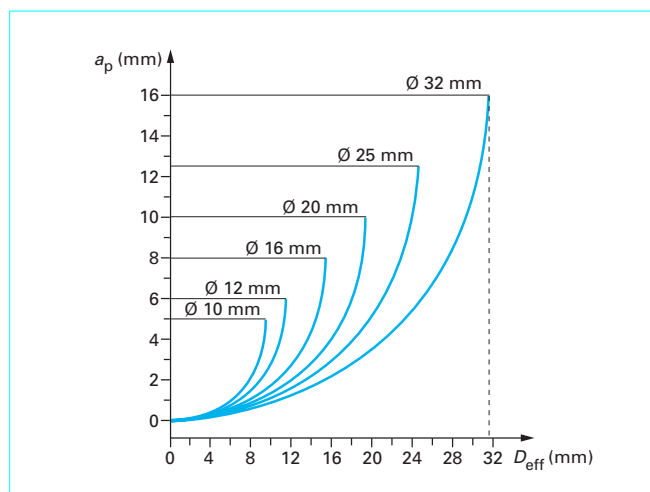


Figure 30 – Évaluation, pour divers diamètres D de fraises à bout arrondi 10-12-16... mm, de la profondeur de coupe a_p et du diamètre effectif D_{eff} (cf. figure 28)

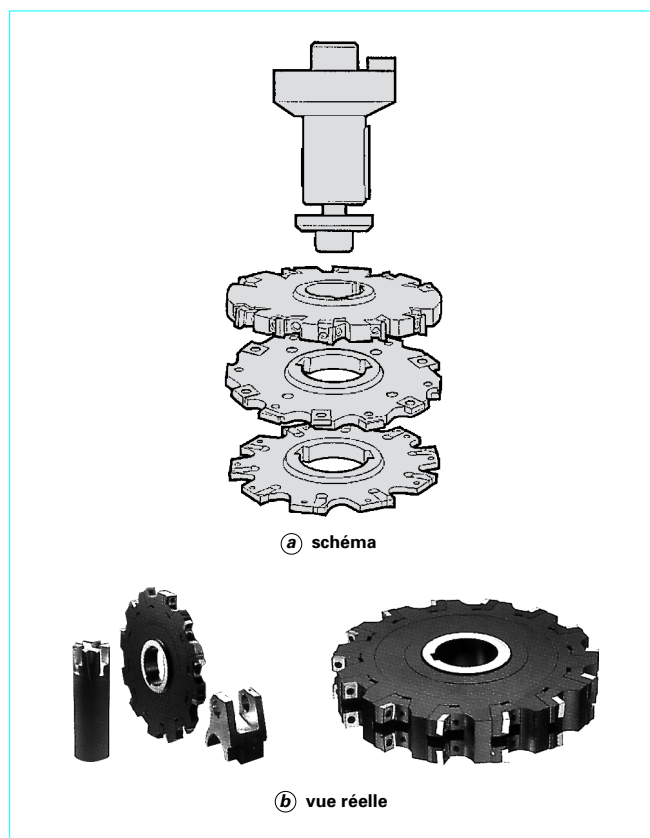


Figure 31 – Différents types de fraises-disques

Le fraisage trois tailles permet d'exécuter dans de meilleures conditions d'efficacité des rainures profondes et de grande longueur. Les fraises-scies de grand diamètre, munies de nombreuses

dents, sont imbattables pour quelques-unes de ces applications. Plus larges et donc plus stables, les fraises-disques peuvent également être utilisées pour l'usinage de longs épaulements, ce qui augmente d'autant leur polyvalence. Le fraisage latéral est en fait une forme de fraisage périphérique.

C'est toutefois souvent le type de machine disponible et la répétitivité de l'opération qui décident s'il convient de choisir une fraise à rainurer, une fraise deux tailles ou une fraise trois tailles. Pour les grandes séries de rainures à la fois longues et profondes, le fraisage trois tailles se révèle habituellement la formule la plus efficace si la machine le permet. Une fraiseuse horizontale correctement réglée pour ce type de fraisage est généralement la plus performante, ce qui explique sa popularité dans les ateliers. Par le passé, les fraises-scies en acier rapide ou les fraises-disques larges étaient le choix prioritaire pour la plupart des opérations de rainurage et de dressage de bords. Les fraises à rainurer en acier rapide étaient bien trop lentes en comparaison.

Aujourd'hui, la situation a changé. Les fraises à rainurer et les fraises deux tailles modernes sont souvent plus efficaces, en même temps qu'adaptées à une plus grande diversité de coupes et de profils. La progression des fraiseuses verticales et des centres d'usinage a quelque peu relégué le fraisage trois tailles. Pourtant, il existe pour les fraises-disques des attachements parfaitement adaptés aux machines verticales, qui font donc souvent du fraisage circulaire une alternative à envisager.

Dans la plage limitrophe entre le fraisage trois tailles et le rainurage, il convient de considérer les dimensions de la rainure par rapport au rayon d'action des fraises à rainurer, des fraises deux tailles et des fraises trois tailles. Il faut ensuite examiner les avances de table pour chaque type d'outil afin de comparer les taux de productivité. Ce sont le volume de production et la répétitivité de l'opération concernée, ainsi que la machine disponible, qui déterminent finalement le choix.

Les fraises-disques à plaquettes indexables poussent souvent la machine à la limite de sa capacité. Les vitesses d'usinage qu'elles permettent d'atteindre sont impressionnantes et l'on observe, dans ce domaine, de continus progrès. Une fraise-disque trois tailles d'un diamètre de 250 mm peut permettre d'atteindre une profondeur de coupe de 60 mm pour une largeur de rainure de 24 mm. L'outil adéquat est ainsi capable d'exécuter, en une minute, une longueur de rainure de plus d'un mètre dans l'acier. Une fraise deux tailles de 25 mm de diamètre et ayant une profondeur de coupe standard de 25 mm également peut, pour sa part, effectuer dans le même temps le quart de cette longueur. En ce qui concerne tout spécialement les rainures profondes, les fraiseuses trois tailles travaillent donc à des vitesses plusieurs fois supérieures.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, un facteur critique en fraisage circulaire est le choix de l'avance appropriée par dent. Une valeur insuffisante entraîne de tels inconvénients, qu'il est absolument indispensable de veiller à adapter l'avance avec précision lorsqu'on adopte le fraisage trois tailles.

La profondeur de coupe radiale est limitée par la contenance de la poche à copeaux et, bien entendu, le diamètre de bossage du mandrin et la déformation des clavettes. Il peut aussi arriver que, sur certaines machines, la puissance du mandrin d'entraînement soit insuffisante. Sur les machines verticales, il est très important que le porte-à-faux soit minimal et le mandrin volumineux. Les profondeurs de coupe radiale a_r et axiale a_p des fraises-disques sont indiquées sur celles-ci.

Le dispositif de montage et la fixation du mandrin doivent permettre d'absorber les forces de coupe. Le fraisage en avalant, qui est la méthode la mieux appropriée, exige une butée fiable dans la

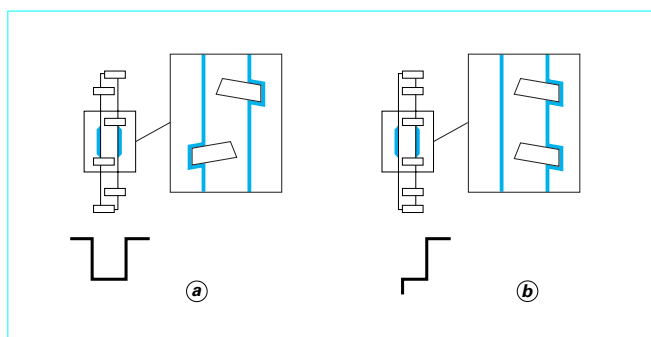


Figure 32 – Fraises-disques trois et deux tailles

direction des forces tangentielles. La pièce est pressée contre la table mais, comme la direction de l'avance coïncide avec la force de coupe et que la fraise a tendance à brouter, il est important d'avoir une rigidité suffisante et d'éliminer tout jeu. Le fraisage conventionnel est à envisager en tant qu'alternative lorsqu'une rigidité insuffisante est source de problèmes ou que l'on a affaire à des matériaux exotiques.

3.2.2 Mise en œuvre des fraises trois tailles

Pour l'usinage de rainures, on se sert de fraises-disques trois tailles (figure 32a) munies de chaque côté d'arêtes de coupe décalées. Ces arêtes ont des pointes chanfreinées et sont renforcées par des chanfreins primaires négatifs. Sur les fraises-disques deux tailles (figure 32b) pour le dressage de bords et d'épaulements, le nombre effectif d'arêtes de coupe est égal au nombre de plaquettes. Le décalage des arêtes sur les fraises trois tailles fait que seule une plaquette sur deux coupe sur un même côté, ce qui facilite le fraisage en train de fraises.

Pour les **rainures étroites et le tronçonnage**, l'outil moderne efficace est une fraise-disque trois tailles à plaquettes indexables. Cette fraise permet de réaliser des rainures à partir de 2,5 mm de large et 17 mm de profondeur, ce qui en fait donc un outil à la fois polyvalent et précis, y compris pour les rainures intérieures et pour utilisation sur centres d'usinage. De nombreuses opérations de tronçonnage sont effectuées avec efficacité par des fraises de type Q utilisant des plaquettes avec roule-copeaux disposées en ligne sur la périphérie de l'outil pour égaliser les forces de coupe et réduire le faux-rond au strict minimum.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'épaisseur moyenne des copeaux doit être contrôlée et demeurer proche de 0,1 mm pour le fraisage trois tailles de rainures de grande largeur et de 0,08 mm avec fraise-scie. Cela correspond à $f_z = 0,3$ mm pour la plupart des opérations de fraisage trois tailles. Dans le cas des fraises-scies, l'avance dépend de la position de l'axe de la pièce par rapport à la fraise et du type d'opération (figure 33a, b, c), les valeurs nominales respectives étant, pour **a**, une avance par dent à peu près égale à l'épaisseur moyenne des copeaux, et pour **b** et **c**, définie par la formule :

$$f_z = h_m \sqrt{\frac{D}{a_e}}$$

La formule convenant le mieux pour la détermination de l'avance par dent est à choisir en fonction des conditions d'usinage. L'épaisseur moyenne des copeaux peut varier, mais est toujours inférieure à f_z . Nominale en position **b**, elle est légèrement supérieure en position **a** et inférieure en position **c**. Sur les fraises à dents étagées, le nombre effectif de dents z_{eff} correspond à la moitié seulement du nombre de plaquettes. L'avance par dent peut

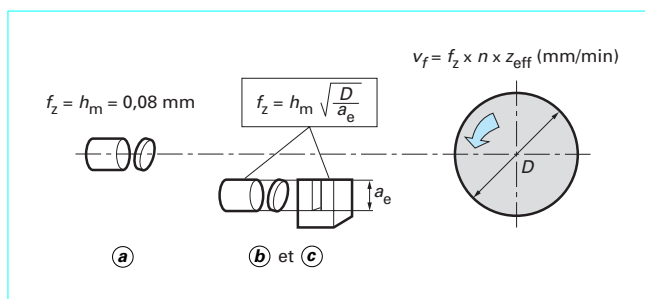


Figure 33 – Avance en fonction de la position de la fraise

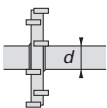
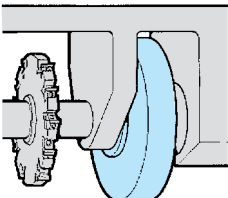
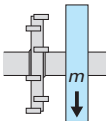
	d (mm)				
	27	32	40	50	
	m (kg)				
	15	20 à 25	25 à 35	35 à 50	

Figure 34 – Adaptation du volant en fonction de la taille d du mandrin

être augmentée lorsque la pièce usinée est de petites dimensions et décentrée.

En fraisage trois tailles sur machines horizontales, quelques dents seulement sont engagées simultanément, ce qui peut provoquer de fortes vibrations dues aux mouvements de torsion, dommageables pour les résultats de l'usinage. **Un volant est souvent la meilleure solution à ce problème et, dans de nombreux cas, la clé d'un gain de productivité.** Le moment d'inertie augmente d'une valeur égale au carré du rayon. Le meilleur emplacement pour le volant est à proximité du bâti de la machine, du côté intérieur. Il peut être également placé à l'extérieur, mais il est alors important que la distance entre celui-ci et les corps de fraises soit aussi réduite que possible.

Ce volant peut être constitué d'un certain nombre de disques en acier ou carbone munis chacun d'un trou central et d'une rainure de clavette s'adaptant à l'arbre porte-fraise. Les recommandations suivantes en matière de masse sont à considérer comme de simples valeurs initiales. Quant au diamètre du volant, il est ici de 400 mm.

Pour une masse donnée du volant, le moment d'inertie augmente avec le diamètre, ce qui signifie que, s'il y a place pour un volant de grand diamètre, il est possible d'en réduire la masse (figure 34).

Dans les ateliers où le fraisage trois tailles est fréquemment utilisé, il peut être conseillé de prévoir un jeu de volants de largeurs et de diamètres variables, et munis de différentes dimensions de trous centraux.

Voici quelques conseils à suivre lors de l'utilisation de volants :

— la présence de doubles rainures de clavettes sur les fraises trois tailles de diamètre supérieur à 80 mm permet de décaler les fraises de la moitié du pas par rapport les unes aux autres

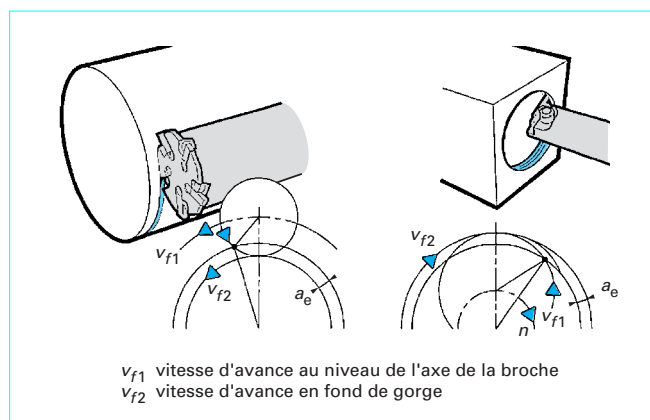


Figure 35 – Usinage de gorges par interpolation

lorsqu'elles sont utilisées sous forme de trains. Cela atténue les variations de charge et rend un volant moins nécessaire ;

- en augmentant la vitesse et le nombre de plaquettes engagées simultanément, on réduit du même fait le besoin de volant ;

- une petite machine peu puissante a plus besoin d'un volant qu'une machine de grandes dimensions et de forte puissance ;

- il faut choisir le plus petit diamètre de fraise possible, afin de pouvoir augmenter la vitesse de broche pour une vitesse de coupe donnée ;

- il est nécessaire de placer le volant du côté intérieur du bâti de la machine et le plus près possible de la fraise pour réduire au strict minimum les oscillations dues aux mouvements de torsion ;

- renforcer ou reconcevoir le dispositif de fixation de la pièce est souvent un excellent investissement en plus du volant ;

- un volant permet une rotation plus régulière de la fraise. Cela présente l'avantage de réduire le bruit et les vibrations, tout en prolongeant la durée de vie des plaquettes.

3.2.3 Fraisage de surfaces circulaires

Les opérations fréquemment effectuées sur les centres d'usinage comprennent, en plus de l'exécution de rainures sur des surfaces planes, le **fraisage de gorges par interpolation** sur des surfaces circulaires intérieures ou extérieures (figure 35). Cela consiste à remplacer alors le tournage ou l'alésage par un fraisage avec broche rotative. Il s'agit souvent d'une opération à effectuer sur une pièce circulaire ou à l'intérieur d'un alésage dans une pièce de forme prismatique, ce qui fait que l'on se sert ici du même montage. Les fraises modernes à plaquettes indexables doivent être utilisées dans ce contexte avec comme option supplémentaire la possibilité de différentes configurations de gorges.

Les fraises de ce type sont prévues en premier lieu pour fournir un maximum d'efficacité lors de l'usinage de gorges peu profondes. Ces fraises à une ou plusieurs plaquettes sont caractérisées par des avances élevées et une grande précision.

En surfacage, l'épaisseur maximale des copeaux se situe au point de transition entre le fraisage conventionnel et le fraisage en avalant. Dans le cas du fraisage circulaire en avalant, l'engagement se fait au point où cette épaisseur est maximale, de sorte qu'il faut y faire attention lorsque l'on a affaire à de fortes contraintes en fraisage trois tailles ou en rainurage.

Le diagramme de la figure 36 montre des transitions types entre plages de travail faisant intervenir des fraises deux tailles ou à rainurer A et des fraises trois tailles B. La plage A est dominée par des gorges de grande largeur par rapport à leur profondeur, tandis que la plage B s'oriente plus vers les rainures étroites et profondes.

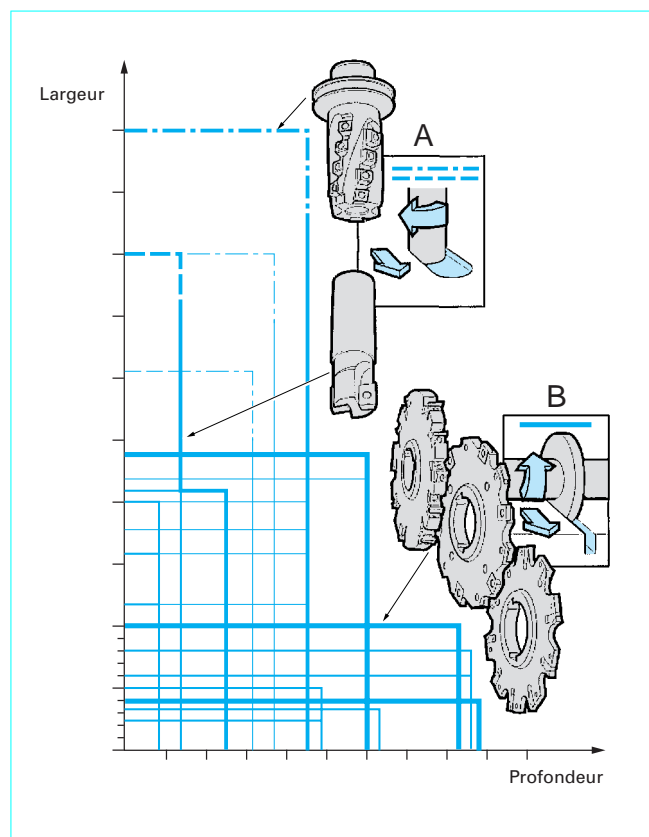


Figure 36 – Relations largeur/profondeur de rainures pour différents types de fraises

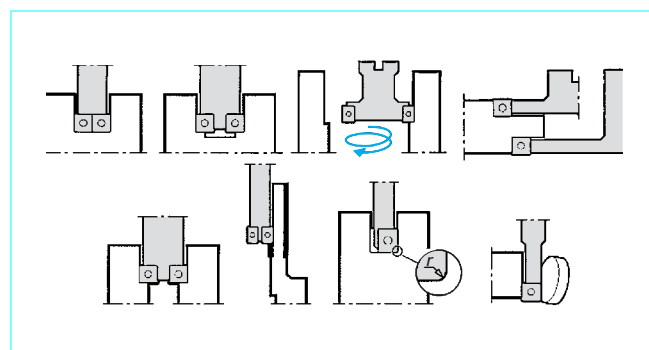


Figure 37 – Exemples de fraisage réalisé avec des fraises-disques

Terminons en soulignant le rôle important joué en fraisage universel par les fraises-disques. En effet, les fraises-disques modernes permettent le fraisage universel tout en répondant aux exigences de flexibilité des opérations réalisées sur centre d'usinage à outils polyvalents ; ces fraises sont réglables axialement dans une large plage et avec une très grande précision et sont équipées de plaquettes à géométrie positive. Les schémas de la figure 37 donnent divers exemples d'opérations de fraisage réalisées avec des fraises-disques.

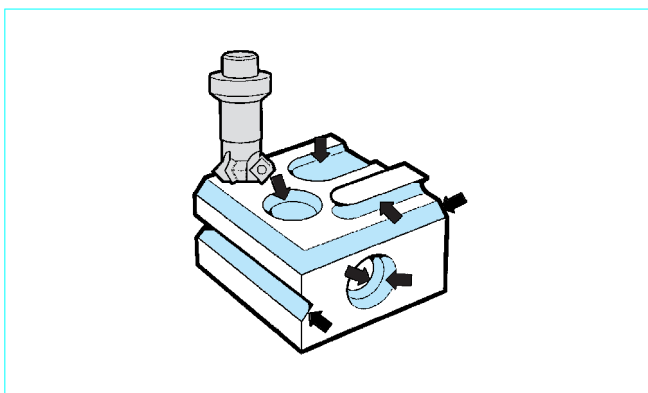


Figure 38 – Fraise spécifique pour le fraisage de chanfreins

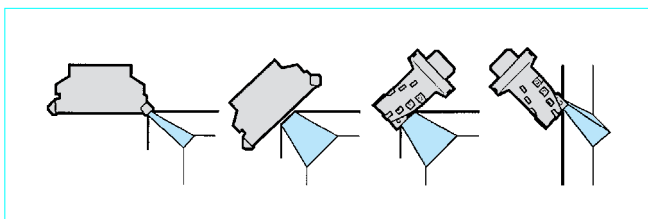


Figure 39 – Différentes méthodes de fraisage de chanfreins avec fraise à surfacer et fraise cylindrique deux tailles

3.3 Fraisage de chanfreins

3.3.1 Description des opérations

Les chanfreins, les rainures en V, les dégagements et l'ébavurage sont des opérations fréquentes sur les pièces rectilignes (figure 38). Selon la machine et le montage utilisés, ces opérations peuvent être effectuées par différentes méthodes. Une petite fraise à surfacer ou une fraise deux tailles de grande longueur peut être utilisée en fonction de la configuration de la broche (figure 39). Cela suppose cependant une inclinaison de la broche correspondant à l'angle de chanfrein. Les fraises d'angle en acier rapide étaient fréquemment utilisées par le passé pour réaliser les chanfreins, tandis que l'on recourait aux fraises de forme pour les rainures en V.

3.3.2 Réalisation pratique

Les centres d'usinage et les fraiseuses modernes sont à même de proposer des solutions efficaces permettant un usinage angulaire entre deux faces. Le chanfreinage des arêtes vives, la préparation des joints de soudure, les dépouilles, etc., peuvent être effectués à grande vitesse avec des fraises standards à plaquettes indexables. Longueur utile et stabilité sont également deux impératifs incontournables pour permettre d'usiner des pièces circulaires ou à l'intérieur de carters, tout spécialement dans le cas de chanfreinage en tirant, sans modification de réglage de la machine.

Le fait de disposer de l'outil correct signifie en outre qu'une grande diversité d'opérations ponctuelles peuvent être exécutées

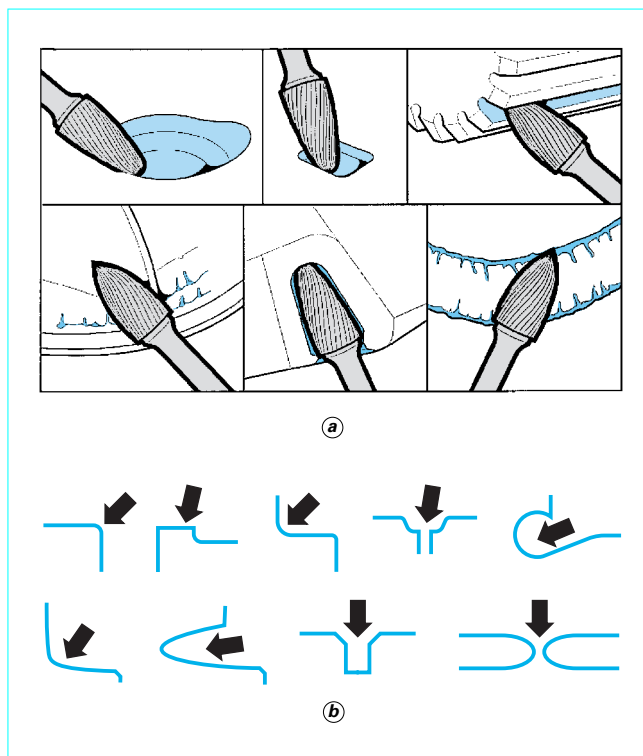


Figure 40 – Possibilités d'usinage avec fraises-limes

avec le même outil. Un surfacage limité peut ainsi être effectué avec un outil qui est en principe une fraise à surfacer à queue ayant à la fois un petit diamètre et un petit angle d'attaque. Le perçage avec déburrage est un autre exemple d'application annexe, tout comme l'usinage de gorges larges mais peu profondes avec parois à angle droit.

En fait, un tel outil, dans la mesure où il est disponible dans le magasin du centre d'usinage, peut être utilisé de manière créative pour une grande variété d'opérations, ce qui permet souvent d'éliminer un ou plusieurs outils spéciaux.

La fraise à chanfreiner à plaquettes indexables avec angle d'attaque de 45° permet d'exécuter des bords et des trous. L'angle d'attaque de 60° convient pour la préparation de joints de soudure ou l'usinage de chanfreins à 60 ou 30°. La longueur des queues permet d'obtenir différents degrés d'accessibilité et de rigidité.

3.3.3 Utilisation de fraises-limes

Les opérations à plus petite échelle telles que chanfreinage, préparation des joints, ébavurage, diverses finitions et profilage sont exécutées avec de petites fraises-limes en carbure dont les arêtes de coupe sont configurées pour faciliter le fractionnement des copeaux. Ces fraises-limes, très efficaces, sont disponibles dans une grande diversité de formes et de tailles pour un grand nombre d'applications (figure 40), fréquemment robotisées. Grâce à leur denture hélicoïdale, le nombre de dents simultanément engagées est toujours suffisant, ce qui accroît d'autant la stabilité et la durée de vie d'outil.

Les fraises-limes existent en une gamme de 3 à 16 mm, avec arêtes de coupe continues, vives pour les matières tendres ou à

taille croisée pour les matières tendres ou dures. Les fraises-limes à arêtes monoblocs génèrent la meilleure structure de surface, avec formation de copeaux filiformes. La taille croisée permet de travailler à des vitesses plus lentes et produit des copeaux courts émoussés.

Les fraises-limes sont par ailleurs réaffûtables dans certaines limites.

Des outils de petit diamètre impliquent une grande vitesse de broche, qu'il est nécessaire de maintenir uniforme même lorsque la charge est relativement élevée. Le type de fraise-lime le plus fréquemment utilisé rappelle la fraise à rainurer dans son principe, mais à cette différence que les vitesses de coupe peuvent être beaucoup plus importantes : deux fois plus rapides pour l'acier et cinq fois plus pour les alliages tels que le laiton. La vitesse de broche n est déterminée par le diamètre de la fraise D et l'usinabilité de la matière à usiner (figure 41). Les fraises-limes en carbure doivent normalement tourner à des vitesses largement supérieures à 15 000 tr/min.

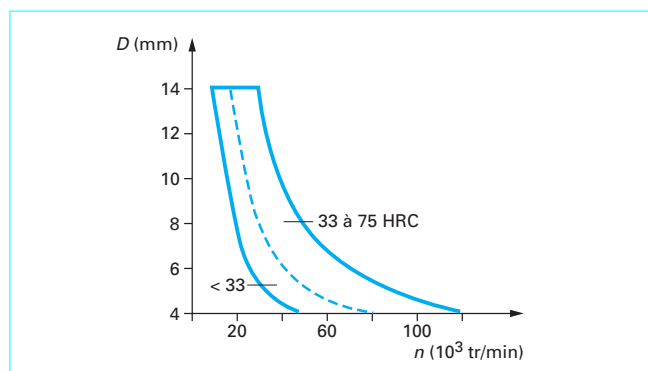


Figure 41 – Vitesse de broche à adopter en fonction de l'usinabilité du matériau avec des fraises-limes