

Fraisage

Étude de cas

par Société SANDVIK-COROMANT

1. Conditions particulières d'utilisation des plaquettes de fraisage	BM 7 084 - 2
1.1 Utilisation des plaquettes rondes en fraisage.....	— 2
1.2 Capacité d'usinage d'épaulements en surfaçage	— 3
1.3 Fraisage positif : plus qu'une source supplémentaire de puissance	— 3
2. Mises en œuvre particulières du fraisage.....	— 5
2.1 Détourage de l'aluminium	— 5
2.2 Fraisage sous arrosage	— 6
2.3 Fraisage avec plaquettes en cermet.....	— 8
3. Application des fraises à rainurer	— 8
3.1 Fraises à rainurer sur machines CNC.....	— 8
3.2 Gain de temps d'usinage : exemples.....	— 9
4. Tournage/fraisage	— 10
4.1 Description des procédés.....	— 10
4.2 Tournage-fraisage pour l'usinage de vilebrequins (<i>turnbroaching</i>)	— 12
Notations et symboles	BM 7 082

Les applications du fraisage sont extrêmement variées. Nous allons ici les illustrer avec quelques exemples pratiques :

- diverses conditions d'utilisation des plaquettes de fraisage ;
- trois mises en œuvre particulières du fraisage ;
- exemples d'utilisation des fraises à rainurer ;
- procédé de fraisage-tournage.

Cet article est le troisième volet d'une étude sur le fraisage dont les deux premiers :

[BM 7 082] *Fraisage. Principes* ;

[BM 7 083] *Fraisage. Principales opérations* ;

peuvent être consultés avantageusement par le lecteur pour tout renseignement complémentaire.

1. Conditions particulières d'utilisation des plaquettes de fraisage

Les notations utilisées dans cet article sont définies dans le tableau « **Notations et symboles** » paru au début de l'article [BM 7 082]. S'y reporter en cas de besoin.

1.1 Utilisation des plaquettes rondes en fraisage

L'angle d'attaque d'une fraise a une influence décisive sur les performances de coupe ; celles-ci dépendent en effet de l'angle sous lequel l'arête de coupe rencontre la pièce, de l'action des forces de coupe et de la répartition de la pression sur toute la longueur de l'arête de coupe. La différence entre la fraise à surfacer-dresser à 90° et les fraises à 45° pour le surfacage général et la fonte a été discutée dans les articles précédents de cette rubrique, de même que les fraises avec angle d'attaque de 75 ou 60° . En revanche, nous ne nous sommes pas intéressés à l'effet de l'angle d'attaque sur les fraises à surfacer et les fraises à rainurer à plaquettes rondes.

L'angle d'attaque d'une fraise à plaquettes rondes est variable, sa valeur effective se modifiant en fonction de la relation existant entre la largeur de coupe radiale (a_p) et le diamètre de la plaquette (D) (figure 1). Partant de zéro, l'angle d'attaque effectif atteint 45° lorsque la profondeur de coupe est égale à la moitié du diamètre de la plaquette, ce qui est en même temps la profondeur de coupe maximale (figure 2).

Le fait que l'épaisseur des copeaux varie en fonction de l'avance par dent (f_z) s'applique aussi aux fraises à plaquettes rondes ; mais cette épaisseur est également affectée par la profondeur de coupe (figure 3). Il est donc important, en surfacage, de maintenir l'épaisseur moyenne des copeaux sous contrôle pour garantir une avance correcte par dent et respecter les recommandations en matière de consommation de puissance (pour de plus amples renseignements, le lecteur pourra se reporter utilement à l'article [BM 7 082]).

La formule de calcul de l'épaisseur moyenne des copeaux pour le surfacage en général est assez compliquée, mais, en même temps, elle n'est pas aussi critique que pour le fraisage périphérique dans la mesure où la fraise n'est pas trop excentrée. En surfacage avec plaquettes rondes, toutefois, l'épaisseur moyenne des copeaux est plus variable, avec une forme en virgule comme en fraisage périphérique, et devient donc de ce fait un facteur plus critique. La formule applicable au surfacage avec plaquettes rondes est la même que pour le fraisage périphérique (cf. article [BM 7 082]).

Des valeurs moyennes d'épaisseur de copeaux de $0,1$ à $0,2$ mm peuvent être utilisées, selon la dureté de la matière à usiner. Initialement développées pour l'usinage de matières difficiles, les fraises à surfacer et les fraises à rainurer sont progressivement devenues, au rythme des progrès effectués, des outils beaucoup plus universels, convenant pour une grande variété de matières, mais tout en ayant la résistance suffisante pour les opérations d'usinage difficiles. L'arête de coupe ronde est la plus robuste qui existe et peut être particulièrement productive lorsqu'elle est choisie à bon escient et correctement utilisée (figure 4).

La robustesse de l'arête de coupe ronde fait que les outils équipés de plaquettes rondes se prêtent à l'usinage de la plupart des matières et, plus particulièrement, des aciers à haute limite d'élasticité, des alliages réfractaires, des alliages de titane, des aciers inoxydables et des alliages d'aluminium. Les fraises à plaquettes

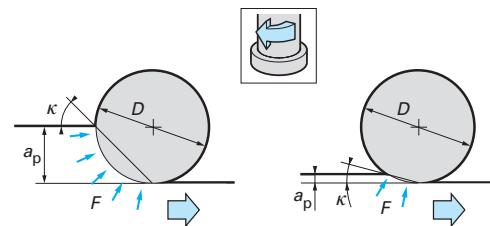


Figure 1 – Variation de l'angle d'attaque κ d'une fraise à plaquettes rondes en fonction de la profondeur de coupe a_p

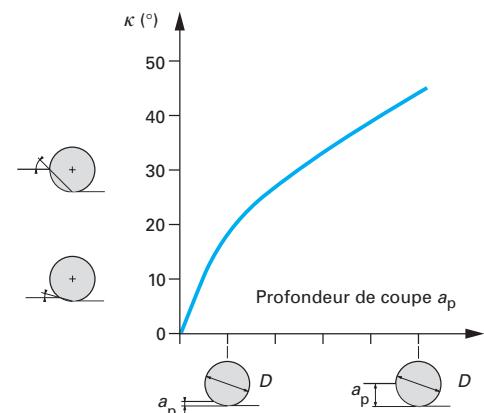


Figure 2 – Courbe de variation de κ en fonction de a_p

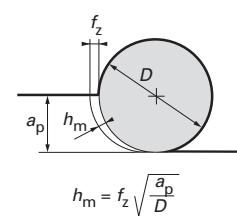


Figure 3 – Variation en fonction de l'avance par dent f_z de l'épaisseur de copeaux h_m pour les fraises à plaquettes rondes

rondes étaient initialement prévues pour l'ébauche, sous de fortes avances par dent, l'état de surface n'étant pas ici le critère primordial. Cela étant, il est possible de donner à la surface fraisée un meilleur fini en choisissant les conditions de coupe appropriées. Les plaquettes rondes modernes donnent une coupe positive, avantageuse dans les matières ayant tendance à coller. L'épaisseur des copeaux est limitée dans le cas d'alliages relativement tenaces. Les géométries Waveline (cf. article [BM 7 083]) permettent une coupe positive fluide, ce qui rend les plaquettes rondes idéales pour fournir une bonne stabilité en présence de longs porte-à-faux. Une fraise à pas réduit est généralement le meilleur choix initial pour le fraisage en avalant. Un abondant arrosage de liquide de coupe peut être éventuellement nécessaire.

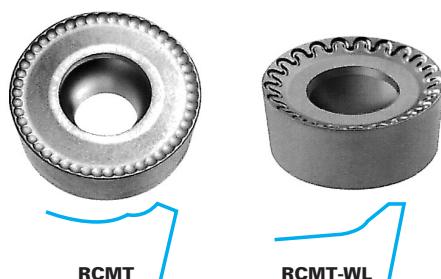


Figure 4 – Différents types d'arêtes de coupe rondes
(selon nomenclature Sandvik-Coromant)

1.2 Capacité d'usinage d'épaulements en surface

Le surfaceage proche d'un épaulement, le dressage d'un épaulement ou le surfaceage général dans une zone limitée sont des opérations courantes, non seulement sur les fraiseuses de forte puissance, mais également de plus en plus sur les centres d'usinage. La frontière séparant la fraise à rainurer à plaquettes indexables de la petite fraise à surfacer-dresser a tendance à s'effacer. Le choix de l'une ou de l'autre est désormais un paramètre parmi d'autres, et pas toujours lié à la taille. A l'autre extrémité de la gamme demeurent un grand nombre d'opérations lourdes faisant intervenir l'usage d'épaulements sur des pièces de grande longueur.

La polyvalence, alliée à la performance et à la fiabilité, est une priorité en ce qui concerne les fraises à surfacer-dresser pour les centres d'usinage. La fraise moderne doit aussi être une fraise à surfacer universelle capable de prendre en charge diverses opérations de surfaceage complémentaires. D'autre part, cette même fraise peut, dans certaines applications, avoir à élargir des alésages par interpolation circulaire ou à effectuer d'autres opérations de tournage/fraisage.

La large gamme actuelle de fraises à surfacer-dresser permet de choisir le type optimal dans n'importe quelle situation, allant des petits centres d'usinage jusqu'au fraisage lourd d'épaulements sur des alésoeuses à portique avec table de grande longueur. Les fraises à surfacer-dresser modernes ont, par ailleurs, la capacité de traiter une grande diversité de matières, surtout avec le renfort de fraises spécifiques pour le surfaceage-dressage de pièces en fonte et en aluminium.

Les fraises à surfacer-dresser (figures 5a et b) sont l'approche moderne pour le fraisage dans la plage des petites et moyennes largeurs. Avec leurs plaquettes positives, le choix entre trois types de pas et la possibilité d'usinage axial aussi bien en ébauche qu'en finition, elles constituent le choix de base, non seulement sur les petits centres d'usinage, mais également pour un grand nombre d'applications dans la gamme moyenne, où l'on a souvent besoin d'un outil optimal pour atteindre une productivité satisfaisante. Ces fraises existent cependant aussi dans une autre version, en plus grands diamètres, pour les opérations lourdes sur machines de grande puissance.

Le choix du pas : grand, réduit ou fin, permet d'exécuter chaque opération dans les meilleures conditions possibles (figure 6). Le pas réduit étant ici le choix le plus général, son remplacement par un grand pas peut être motivé pour améliorer les performances en cas de manque de stabilité, de puissance machine insuffisante ou de long porte-à-faux de l'outil. Quant au pas fin, il est le meilleur choix pour les matières à copeaux courts, le titane, dans des conditions stables ou en présence de faibles profondeurs de coupe radiales (tableau 1).

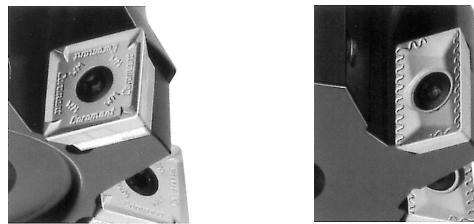


Figure 5 – Exemple de fraises à surfacer-dresser de type différent

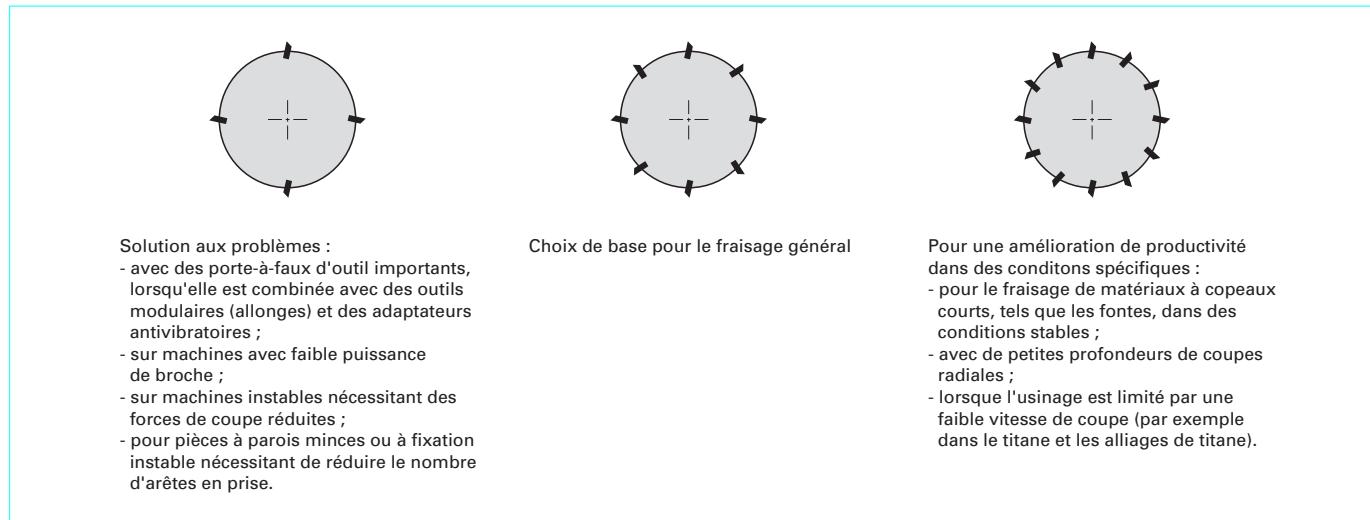
1.3 Fraisage positif : plus qu'une source supplémentaire de puissance

L'utilisation croissante de centres d'usinage, de petites fraiseuses CNC et de machines mieux appropriées pour l'usinage de pièces fragiles rend nécessaire des outils de fraisage présentant un meilleur rapport puissance-efficacité et permettant une coupe plus fluide. Les forces de coupe jouent à ce niveau un rôle important.

La géométrie de coupe et plus spécialement les angles de coupe affectent ces forces (cf. article [BM 7 082]). En modifiant l'angle de coupe pour le rendre plus positif, on réduit la déformation de la matière usinée et les forces de coupe générées, et, du même fait, la puissance absorbée. Cela ne signifie pas dans la pratique que les plaquettes munies d'arêtes plus positives et plus vives sont plus fragiles. L'angle inscrit au point d'intersection est sans doute plus petit, mais les forces de coupe sont judicieusement redirigées vers une zone de la plaque bénéficiant d'un meilleur appui et constituée d'un matériau plus tenace. Les nouvelles plaquettes positives ont des arêtes de coupe curvilignes (figure 7), convexes ou concaves selon le cas. Il s'agit en fait d'une nouvelle génération d'arêtes qui permettent des performances inégalées en fraisage, dans la ligne directe des développements intervenus au niveau des ateliers d'usinage.

Ces plaquettes n'ont pas seulement une arête positive plus vive, elles facilitent également la formation des copeaux et comportent des transitions soigneusement calculées entre les différents éléments de leur géométrie, pour augmenter ainsi la microrésistance de l'arête de coupe. Les roule-copeaux réduisent le contact entre les copeaux et l'arête tout en leur donnant une forme en spirale qui les rend plus maniables et augmente l'évacuation de chaleur hors de la zone de coupe.

Les plaquettes à géométrie positive (figure 8) sont devenues le choix de base général pour le surfaceage, le surfaceage-dressage, le rainurage et le fraisage deux tailles. Ce concept a fait l'objet d'adaptations spécifiques des géométries d'arêtes en fonction d'une grande diversité d'opérations.

**Figure 6 – Pas à choisir selon l'opération concernée****Tableau 1 – Capacité d'usinage d'épaulements à 90° en surface**

Diamètre de la fraise (mm)	a_p (mm)	Pas u/Z	Plaquettes de planage	Usinage (1) (4)			Type de fraise (Nomenclature Sandvik-Coromant)
				L	M	H	
40 à 80	15	○ ○ ○	oui	●	●		U-Max (252.44) (cf. figure 5a)
40 à 250	12,7	○ ○ ○	oui	●	●	●	Coromill 290 (290.90) (cf. figure 5b)
80 à 500	13,3/19	○ ○			●	●	Modulmill (282.2)
80 à 250	18	○		●	●	●	T-Max AL (2) (262.2AL)
125 à 500	18	○		●	●	●	Auto FS (3) (262.4)

(1) L : usinage léger ; M usinage moyen ; H usinage lourd.

(2) Pour usinage d'aluminium.

(3) Pour usinage des fontes.

(4) ● Choix de base ; ○ Alternative.

Dans le principe, on a trois catégories correspondant chacune à l'une des applications suivantes :

- usinage léger ;
- usinage moyen ;
- usinage lourd.

■ Pour les applications légères, ce sont les plaquettes de type WL (selon nomenclature Sandvik-Coromant) qui ont la géométrie la plus positive et la plus vive, ce qui les rend particulièrement appropriées

pour les petites machines peu puissantes et les passes de finition. Elles présentent une arête robuste, mais suffisamment vive pour fournir une coupe positive avec une avance par dent réduite au strict minimum (figure 9).

■ L'usinage moyen implique une bonne polyvalence, avec chanfrein de renfort pour les conditions difficiles. Les plaquettes de type WM (selon nomenclature Sandvik-Coromant) sont généralement ici le choix de base lorsque l'arête de coupe doit être robuste tout en

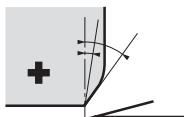


Figure 7 – Conceptions types de géométries de plaquettes positives pour le fraisage

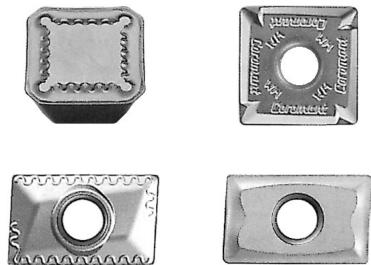


Figure 8 – Plalettes de fraisage positives pour diverses applications

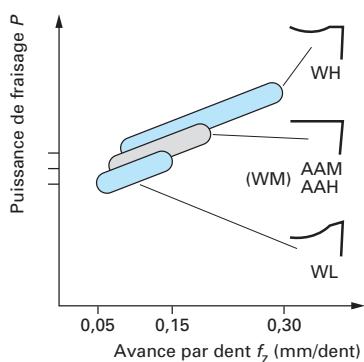


Figure 9 – Utilisation des différents types de plalettes de fraisage selon l'application désirée

réduisant la puissance absorbée. Ces plalettes supportent des avances plus élevées et permettent d'usiner des matières plus tenaces. Il existe par ailleurs dans cette même catégorie des types de plalettes planes (AAM et AAH) (figure 9).

■ Les **opérations d'usinage lourd** qui font intervenir de fortes avances, de plus grandes profondeurs de coupe, des matières plus dures et des machines plus puissantes, nécessitent une arête de coupe particulièrement résistante. Le type WH (selon nomenclature Sandvik-Coromant) est ici la solution moderne, en même temps qu'un outil très fiable pour l'usinage intermittent (figure 9).

■ **En combinaison avec des plalettes planes conventionnelles** pour certains alliages difficiles, la gamme de plalettes positives, réalisées dans de nouveaux matériaux de coupe, a ouvert au fraisage de nouvelles perspectives sur le plan de l'efficacité dans la plupart des matières. Ces plalettes indexables brutes de frittage, avec des géométries macrométriques et micrométriques sophistiquées, sont également adaptées à divers types d'opérations. Elles offrent en effet un large choix de rayons de bec, biseaux plans et géométries pour le surfâge-dressage avec plalettes carrées. Des plalettes rondes, qui ont pourtant la réputation de générer des forces de coupe élevées et de consommer énormément de puissance, sont, elles aussi, proposées avec géométrie positive (cf. § 1.1). La tendance aux vibrations est ainsi réduite au strict minimum, même lorsque le taux d'enlèvement de matière est élevé en ébauche ou en finition.

2. Mises en œuvre particulières du fraisage

2.1 Détourage de l'aluminium

Les alliages d'aluminium sont généralement considérés comme faciles à usiner, avec des forces de coupe comparativement faibles, surtout aux grandes vitesses de coupe. Les limitations dans ce domaine sont surtout imposées par les machines et les outils de coupe. Le rainurage a longtemps été dominé par un large choix de fraises à rainurer en acier rapide, utilisées sur une grande diversité de machines, allant des petites fraiseuses à copier jusqu'aux puissantes machines CNC à plusieurs axes en service dans l'industrie aéronautique. Les principaux critères pour la finition sont habituellement l'efficacité de coupe, l'état de surface et la durée de vie d'outil lors de l'utilisation de fraises à rainurer hélicoïdales réaffutables. Les fraises avec plalettes en carbure brasées et en *Coronite* améliorent considérablement la qualité de la finition, ainsi que le fraisage de pièces en aluminium avec fraises de petit diamètre, en permettant d'adopter de plus grandes vitesses de coupe tout en prolongeant la durée de vie de l'outil. Cependant, pour l'ébauche et, dans une certaine mesure, la finition, les fraises détourees à plalettes indexables sont les plus performantes (figure 10).



Figure 10 – Fraises détourees pour l'aluminium

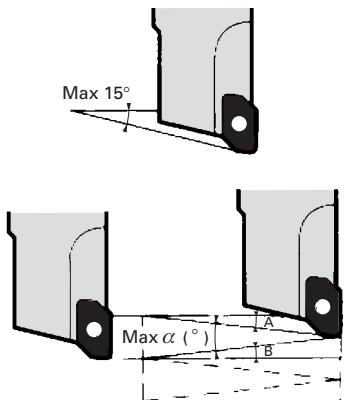


Figure 11 – Géométrie de fraises à rainurer en carbure et conditions d'application au détourage de l'aluminium

Les fraises à rainurer en carbure (figure 11) génèrent moins de chaleur que les fraises en acier rapide et peuvent donc tourner beaucoup plus vite. Les fraises détourees à plaquettes indexables sont en premier lieu des outils d'ébauche hautement productifs, mais permettent d'obtenir un bon état de surface. Aucune reprogrammation n'est nécessaire lors de la mise en service d'une nouvelle arête de coupe, comme cela est par contre le cas pour les fraises à rainurer en acier rapide après réaffûtage.

La fraise détoureuse est essentiellement une fraise à rainurer pour l'exécution de poches (figure 12), conçue pour des vitesses d'usinage élevées dans les alliages d'aluminium, dans la plage de diamètres 25 à 50 mm. Munies habituellement d'une seule arête, ou de deux dans les grands diamètres, les fraises détourees sont équilibrées pour tourner jusqu'à la vitesse de 10 000 tr/min. Elles sont également utilisables sur des machines de faible puissance avec vitesse de broche réduite.

Conçues pour des vitesses de coupe élevées en combinaison avec des avances poussées au maximum pour utiliser de manière optimale la puissance machine disponible et garantir la plus longue durée de vie d'outil possible, les fraises détourees n'ont qu'une très faible tendance à vibrer. Des pièces même à parois minces peuvent être usinées efficacement, sans traces de brûlures, dans la mesure où le rayon de bec de la plaque a été correctement choisi. Les valeurs nominales d'avance sont de 0,3 à 0,5 mm/tr, compte tenu de vitesses de broche adaptées pour permettre d'utiliser au maximum la puissance machine disponible.

Les fraises détourees travaillent en pente dans le sens axial, à grande vitesse. Les fraises détourees AL (selon nomenclature Sandvik-Coromant) sont conçues pour assurer une évacuation efficace des copeaux par l'intermédiaire de poches à copeaux incorporées de grandes dimensions. Des plaquettes en carbure à grain fin, munies d'une arête vive, ont pour leur part été développées pour permettre à la fois une longue durée de vie d'outil et un bon état de surface lors du fraisage d'alliages d'aluminium. Les temps de réglage de la machine et des outils sont limités au strict minimum et il est également possible d'utiliser différents rayons de bec en fonction de l'application concernée.

Les fraises détourees sont prévues pour des taux élevés d'enlèvement de matière et une indexation très rapide des arêtes de coupe, ce qui explique qu'elles soient surtout utilisées pour l'ébauche. Il est recommandé de laisser une dépouille d'environ 0,5 mm après chaque passe radiale (figure 13) pour permettre aux copeaux de passer sans encombre le long de la queue de l'outil. Cela laisse une faible surépaisseur d'usinage pour la finition, effec-

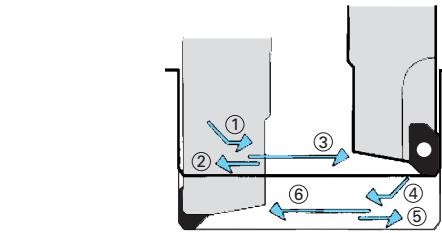


Figure 12 – Usinage de poche dans l'aluminium avec fraise détoureuse

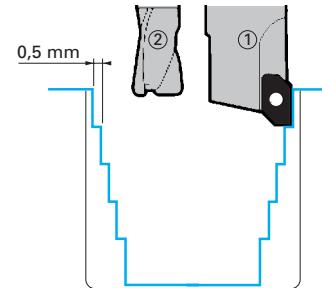


Figure 13 – Fraisage d'aluminium avec une fraise à détourer et dépouille de 0,5 mm à chaque passe radiale

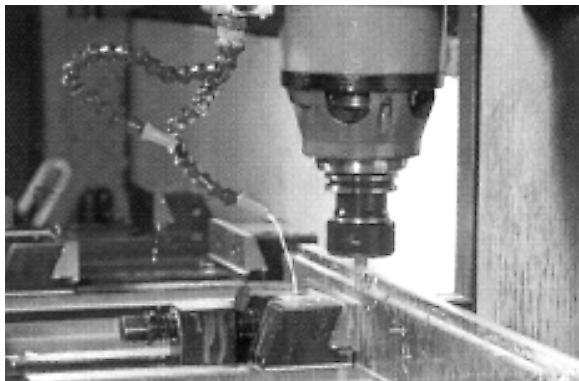
tuée avec une fraise à rainurer à plaquettes en carbure brasées (n° 2 sur la figure 13) permettant d'obtenir un bon état de surface. Le fond de la poche est fini par la fraise détoureuse et, comme cela est la règle en général, il convient de choisir la dimension de rayon de bec appropriée pour éviter les vibrations.

2.2 Fraisage sous arrosage

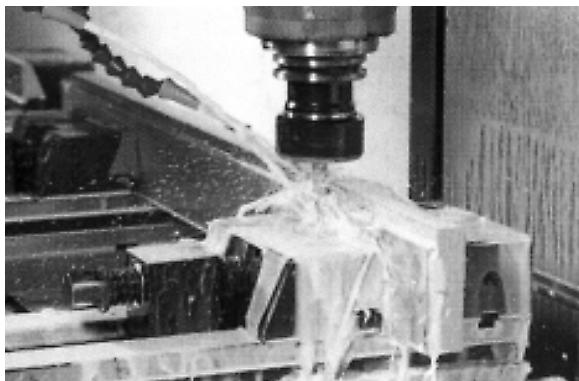
Les carbures modernes, surtout les carbures revêtus, n'exigent normalement pas de liquide de coupe lors de l'usinage. Les nuances GC donnent de meilleurs résultats sur le plan de la durée de vie de l'outil et de la fiabilité lorsque le fraisage s'effectue à sec. En cas d'utilisation de liquide de coupe, celui-ci doit être fourni en abondance autour des arêtes de coupe durant toute l'opération (figure 14). Il ne faut surtout pas alors lésiner sur son emploi ni le limiter à certaines phases du fraisage seulement.

Les vitesses de coupe élevées aujourd'hui adoptées avec les carbures revêtus ont pour effet d'échauffer fortement la zone d'usinage. L'opération de coupe crée entre l'outil et la pièce une zone de circulation d'air dans laquelle la température approche 1 000 °C. Tout liquide de coupe venant au contact plus ou moins direct des arêtes engagées est donc instantanément vaporisé, de sorte qu'il n'a aucune action réfrigérante.

Le liquide de coupe, en fraisage, a souvent pour effet de renforcer les variations de température enregistrées au niveau des plaquettes entre deux passes successives. Lorsque l'usinage s'effectue à sec, des variations interviennent, mais demeurent dans les limites en fonction desquelles la nuance a été développée. L'adduction de liquide de coupe ne fera donc qu'accroître ces variations du fait qu'elle n'affectera l'arête de coupe concernée que



(a) incorrect



(b) correct

Figure 14 – Fraisage sous arrosage

lorsque celle-ci n'est pas engagée, avec pour résultat un léger refroidissement seulement, suivi d'un nouvel échauffement, et ainsi de suite. Ces chocs thermiques entraînent une modification continue des efforts imposés à la plaque, ce qui se termine par une fissuration thermique qui met fin prématurément à l'existence de l'outil ou de l'arête de coupe. Plus la température de la zone d'usinage est élevée, moins l'utilisation de liquide de coupe est appropriée. Les nuances de carbure modernes ont une bonne efficacité avec vitesses de coupe élevées et supportent du même fait des températures supérieures.

Lorsque l'on utilise des plaquettes de fraisage en carbure revêtu, l'épaisseur du revêtement joue un rôle important. (On peut ici faire une comparaison avec de l'eau bouillante que l'on verse dans deux récipients en verre, l'un à paroi épaisse et l'autre à paroi mince, pour illustrer ce qui se passe lorsqu'une plaquette revêtue entre en contact avec le liquide de coupe.) Des différences de durée de vie de l'outil allant jusqu'à 40 % en faveur du fraisage à sec n'ont ici rien d'inhabituel.

Dans les cas où l'usinage de métaux ayant particulièrement tendance à coller, comme l'acier à bas carbone ou l'acier inoxydable par exemple, doit s'effectuer à des vitesses favorisant la formation d'arêtes rapportées, des précautions sont nécessaires. La température dans la zone d'usinage doit être soit au-dessus soit au-dessous de la plage critique. Le fait d'obtenir une zone de circulation d'air à haute température élimine le problème lorsque l'on travaille à une température d'usinage modérée, avec réduction des

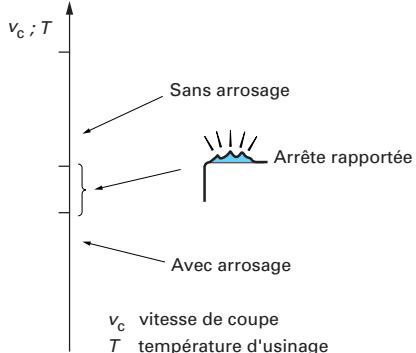


Figure 15 – Usinage des métaux ayant tendance à coller

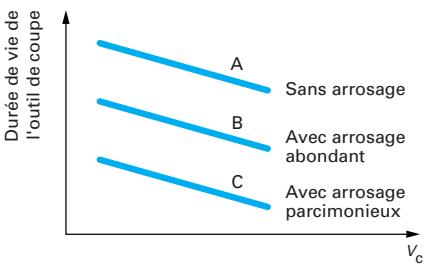


Figure 16 – Variation de la durée de vie de l'outil de coupe avec ou sans arrosage

conditions de coupe, mais donne naissance à d'autres phénomènes non souhaitables. Dans une telle situation, il est habituellement nécessaire de recourir à l'utilisation de liquide de coupe pour parvenir entre autres à un état de surface satisfaisant (figure 15).

Le graphique de la figure 16 illustre les principales différences en ce qui concerne la durée de vie de l'outil en fraisage (A) sans adduction de liquide de coupe, (B) avec débit abondant de liquide de coupe et (C) lorsque le liquide de coupe est utilisé parcimonieusement. Avec une nuance revêtue correctement choisie, les meilleures performances de durée de vie de l'outil sont obtenues à sec. La pire situation à laquelle puisse être confrontée une nuance de fraisage est une adduction de liquide de coupe dont le seul effet soit d'accentuer les variations de température entre début et fin de passe.

Si, comme c'est le cas par exemple sur certains centres d'usinage ou certaines machines spéciales, on a une alimentation continue en liquide de coupe, il faut alors choisir une nuance de carbure recommandée pour utilisation indifféremment sous arrosage ou à sec, c'est-à-dire habituellement une nuance revêtue tenace de type ISO 35.

On utilise normalement un liquide de coupe pour les raisons suivantes :

- faciliter l'évacuation des copeaux, surtout en perçage ;
- limiter la température de la pièce en vue de maintenir la précision de cotés ;
- l'usinage d'acier inoxydable, afin d'améliorer l'état de surface ;
- l'usinage de fonte, afin de lier et évacuer la poussière ;
- évacuer les copeaux des fixations ;
- lorsque le même montage fait intervenir également certains outils conçus pour travailler sous arrosage.

Pour parvenir à des résultats optimaux en usinage, il convient d'analyser l'opération envisagée afin de déterminer si une adduction de liquide de coupe est absolument nécessaire ou s'il est possible de travailler intégralement à sec, par exemple en utilisant l'air comprimé pour évacuer les copeaux. Dans le premier cas, les trois points suivants doivent être respectés :

- l'arrosage doit être abondant au niveau des arêtes de coupe ;
- la nuance de plaquette doit être choisie en conséquence (revêtement mince) ;
- le liquide de coupe doit être du type approprié.

Il convient aussi de se souvenir que le liquide de coupe peut représenter jusqu'à 15 % du coût de production des pièces usinées par enlèvement de copeaux. (À titre de comparaison, le coût des outils n'est ici que de 3 %.) Il vaut donc toujours mieux envisager l'usinage à sec comme alternative.

2.3 Fraisage avec plaquettes en cermet

Les plaquettes en cermet (figure 17) se sont révélées donner d'excellents résultats dans de nombreux contextes de fraisage, non seulement en finition et en semi-finition, mais également en ébauche légère.

Une nuance moderne de cermet (P20), en combinaison avec la forme et la géométrie de plaquette appropriées, s'est révélé donner d'excellents résultats au niveau de l'optimisation d'une très large gamme d'opérations et de matières. Cette forme de plaquette correcte, tout spécialement en ce qui concerne les plaquettes rondes ou rhombiques avec de grands rayons de bec, a permis d'obtenir de bonnes performances. En combinaison avec une géométrie qui ajoute une bonne ténacité à la capacité de coupe de l'arête, il est possible d'usiner, avec de bons résultats, une grande diversité de matières comprenant l'acier au carbone, l'acier inoxydable, les alliages réfractaires à haute limite d'élasticité et les aciers pour moules et matrices. Les cermets permettent aussi de fraiser les aciers à outil comportant des carbures abrasifs avec d'excellents résultats, ainsi que les pièces brutes de coulée ou de forgeage et l'acier austénitique.

Les cermets permettent d'atteindre des vitesses de coupe de 100 à 700 m/min, avec des avances par dent pouvant atteindre 0,25 mm sous un angle d'attaque de 45 degrés. Ils permettent de choisir en toute sécurité des profondeurs de coupe assez importantes ainsi que de travailler en coupe intermittente. Les plaquettes à géométrie positive ont, par ailleurs, largement contribué à limiter les forces de coupe défavorables.

Exemples d'utilisation

• L'utilisation de plaquettes en cermet sur un centre d'usinage (figure 18a) pour le surfaceage d'un acier allié (CMC 02.2) d'une dureté de 300 HB a permis d'améliorer les performances d'usinage. Une fraise T-Max 145 (selon nomenclature Sandvik-Coromant) de 100 mm de diamètre, montée sur une machine d'une puissance de 35 kW, exécute ici le surfaceage de 288 pièces jusqu'à un haut degré de finition. La vitesse de coupe est de 392 m/min, l'avance de table de 1 100 mm/min et la profondeur de coupe de 1 à 2 mm.

• Une tôle en acier inoxydable de type duplex, d'une dureté de 290 HB, longue de 3,65 m (figure 18b), est fraisée avec une fraise à surfer T-Max 145 à grand pas de 80 mm de diamètre, équipée de plaquettes en cermet P25. Une pièce et demie, avec dans chaque cas deux coupes dans le sens de la longueur, est usinée sur une fraiseuse d'une puissance de 20 kW. La vitesse de coupe est de 302 m/min l'avance de table de 1 200 mm/min et la profondeur de coupe de 4 mm.

Les cermets sont souvent une formule très avantageuse en fraisage, où ils permettent d'obtenir des finis « miroir » et peuvent remplacer une rectification.

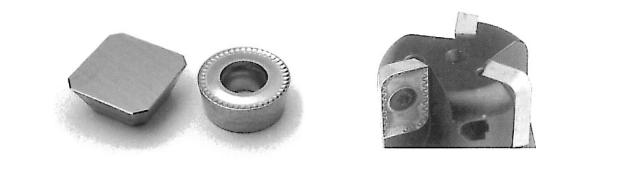


Figure 17 – Différents types de plaquettes en cermet

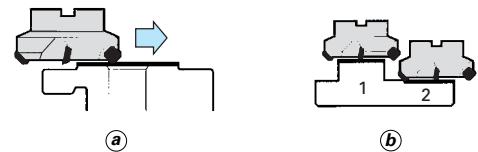


Figure 18 – Exemples d'utilisation de plaquettes en cermet

3. Application des fraises à rainurer

3.1 Fraises à rainurer sur machines CNC

La progression des machines CNC (*Computerized Numerical Control*) et des centres d'usinage a influé sur le développement et l'utilisation des fraises à rainurer. La nécessité d'utiliser au maximum le potentiel de ces machines d'un coût horaire plus élevé a conduit à usiner les épaulements, les gorges, les poches et les profils selon des procédés souvent différents de ceux utilisés avec les machines conventionnelles. Tout d'abord, les techniques d'usinage doivent être hautement performantes et les machines conçues en conséquence. Les fraises à rainurer ne sont plus désormais à la dimension exacte des cotes à exécuter. Au lieu de cela, on utilise une ou plusieurs fraises sous-dimensionnées pour l'ébauche et la finition. Les machines CNC permettent de déplacer la fraise selon différents axes (figure 19) et de travailler avec des rendements nettement supérieurs à ceux d'hier. La rapidité des changements d'outils rend dans certains cas compétitives de nouvelles combinaisons de fraises à rainurer. De plus, les fraises à rainurer sous-dimensionnées peuvent être utilisées pour plusieurs opérations et types de pièces différents, ce qui offre à la fois une meilleure flexibilité et la possibilité de réduire le stock d'outils.

■ La fraise à rainurer est un outil particulièrement polyvalent, véritable « clé de voûte » en matière d'usinage sur les machines modernes. Jusqu'à la moitié des outils contenus dans les magasins des centres d'usinage sont quelquefois des fraises à rainurer. Ce type de fraise peut prendre en charge une grande diversité d'opérations, effectuer des coupes plus précises et plus complexes, dans des matières plus difficiles à usiner et en permettant d'atteindre une plus longue durée de vie de l'outil en même temps qu'une meilleure productivité. Parallèlement, les fraises à rainurer ont considérablement évolué, ce qui les rend de plus en plus efficaces dans la plupart des matières habituellement usinées.

■ Une utilisation et des conditions de coupe correctes sont essentielles pour l'obtention de bons résultats. Le choix d'une fraise à rainurer n'est pas uniquement limité par la forme, la dimension et le type de la coupe à effectuer, puisque chacune des fraises proposées couvre un large domaine d'application. Il est ici très important

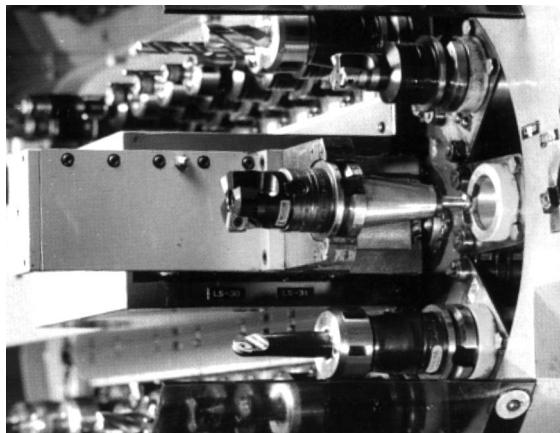


Figure 19 – Fraises à rainurer sur machine CNC

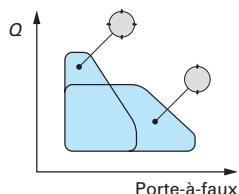


Figure 20 – Volume de matière enlevée par unité de temps suivant le porte-à-faux et le pas de la fraise

de maintenir l'épaisseur moyenne des copeaux au-dessus des valeurs minimales. Une avance élevée par dent a une influence particulièrement bénéfique sur la durée de vie de l'outil. Une avance insuffisante est l'une des principales causes d'usure rapide des fraises à rainurer. Le volume de matière enlevée par unité de temps Q (ou taux d'enlèvement de matière) dépend de l'avance par dent (f_z), du nombre de dents de la fraise (z) et de la vitesse de broche (n) :

$$Q = a_c \times a_p \times v_f$$

$$v_f = z \times n \times f_z$$

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

Le pas de la fraise influe donc sur le taux d'enlèvement de matière, puisque plus il y a de dents, plus l'avance est élevée. Mais on se heurte ici à des limitations du fait que les fraises à rainurer sont tributaires du porte-à-faux, de l'espace d'évacuation des copeaux, des restrictions au niveau du montage sur la broche et de la puissance fournie par celle-ci. La stabilité de la fixation de la fraise affecte ses performances. Les versions à pas réduit exigent des conditions stables ou une avance élevée. Celles à grand pas sont caractérisées par un moindre nombre de dents engagées en même temps, ce qui peut contribuer à réduire la tendance aux vibrations, surtout dans le cas de longs porte-à-faux (TO) (figure 20).

C'est généralement le meilleur choix lorsque la stabilité laisse à désirer ou que la machine est équipée d'un cône de petite taille.

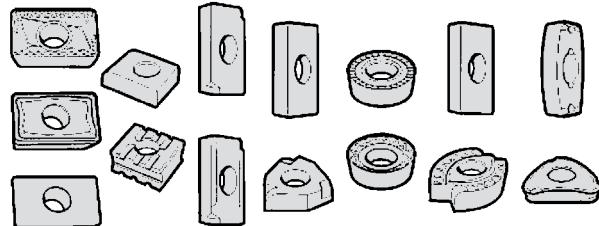


Figure 21 – Diversité des plaquettes pour fraises à rainurer deux tailles et cylindriques

Sur les fraises monoblocs ou brasées, l'arête de coupe hélicoïdale facilite l'amorçage de la coupe, donne une coupe plus régulière, sur une plus grande longueur, et plus précise. Le nombre de goujures affecte l'espace d'évacuation des copeaux, qui est ainsi nettement moindre sur une fraise à quatre goujures que sur une fraise n'en comportant que deux. Les fraises à rainurer à deux goujures conviennent parfaitement pour le perçage et les gorges de fortes dimensions. Les fraises à quatre goujures autorisent habituellement une meilleure fluidité de l'usinage, avec des interruptions plus courtes entre l'engagement des différentes dents, ce qui signifie aussi une réduction de la flexion et des vibrations. Les fraises à rainurer à trois goujures sont un compromis entre la souplesse que confèrent quatre goujures et l'espace d'évacuation des copeaux plus largement calculé que l'on obtient avec seulement deux goujures. Les arêtes de coupe avec géométrie brise-coapeaux sont souvent la meilleure formule pour l'ébauche. Les copeaux divisés sont épais, mais plus maniables parce que courts et s'évacuant d'eux-mêmes en même temps que la chaleur générée au niveau de l'arête.

Les fraises cylindriques deux tailles avec plaquettes indexables, prolongement des fraises à rainurer, se caractérisent par une excellente capacité d'usinage et permettent un grand nombre d'utilisations avec outils de grand diamètre. Le rapport exactement calculé entre les positions des différentes plaquettes donne une arête de coupe à crantage décalé. Chaque plaquette amorce une nouvelle coupe et l'on obtient ainsi une coupe fluide dans le cas d'opérations difficiles. Le principe de la fraise à deux tailles est idéal pour enlever une importante quantité de métal en ébauche et pour réaliser des formes spéciales (cf. article [BM 7 083], § 2.2).

Les plaquettes pour fraises à rainurer et fraises cylindriques deux tailles sont très diverses selon la nature du travail que doit accomplir l'arête de coupe (figure 21). Les plaquettes curvilignes positives ont fait leur chemin en rainurage, tout comme en surface et surfaçage-dressage. Elles offrent un certain nombre d'avantages tels qu'un meilleur contrôle de la force de coupe, une faible puissance absorbée, une bonne évacuation des copeaux et des arêtes de coupe à la fois robustes et vives. Il existe par ailleurs également des plaquettes adaptées à une grande diversité de matières. Différents rayons de bec permettent d'optimiser la résistance de l'arête et d'exécuter des angles vifs.

3.2 Gain de temps d'usinage : exemples

Un exemple d'usinage avec fraises à rainurer modernes sur une fraiseuse CNC est présenté figure 22 et concerne une matrice destinée à la fabrication d'une pièce d'automobile de grandes dimensions. Cette matrice est réalisée en trois nuances différentes d'acier pour moules et matrices et sa masse initiale est de huit tonnes.

La combinaison de techniques, de programmes d'usinage et d'outils modernes a permis d'optimiser l'usinage en réduisant sa

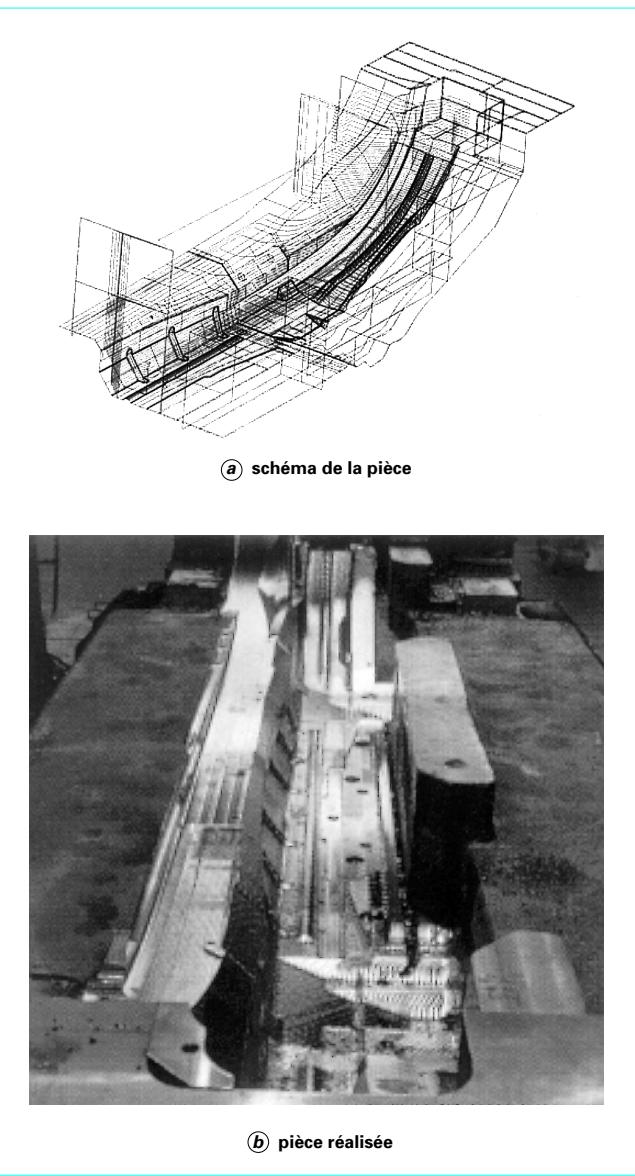


Figure 22 – Exemple de pièce de grandes dimensions réalisée sur fraiseuse CNC

durée de moitié par comparaison avec les méthodes et les outils classiques. Le projet consistait à envisager l'usinage sous un nouvel angle et à choisir des fraises à rainurer et des trajets d'outil aptes à augmenter au maximum la productivité.

Des porte-à-faux jusqu'à 500 mm étaient nécessaires pour atteindre l'intérieur des cavités de la matrice, ce que l'on a réalisé en utilisant des fraises à géométrie positive et des adaptateurs antivibratoires de type modulaire. On a exécuté le fraisage en suivant les trajets les plus longs possible pour réduire le « temps machine » au strict minimum. La finition a permis d'obtenir un état de surface de R_a 1,0, ce qui a réduit d'autant le besoin de polissage complémentaire.

L'ébauche et la semi-finition ont été essentiellement effectuées avec des fraises hémisphériques, qui ont donné à la pièce une

bonne préparation. Les surfaces rondes et les cavités ont été usinées avec des fraises à bout sphérique et une combinaison de nuances de carbure revêtues et non revêtues, de cermets et de *Coronite*.

Quelques conseils pour améliorer l'efficacité des fraises à rainurer

- Réduire le plus possible la distance entre le mandrin de fixation et l'arête de coupe.
- Choisir le plus grand diamètre possible.
- Choisir prioritairement le fraisage en avalant pour l'ébauche (contrôler le jeu).
- Faciliter l'évacuation des copeaux (liquide de coupe ou air comprimé).
- Utiliser des attachements performants et veiller à leur propreté. Les attachements à changements rapides doivent être stables et précis.
- Utiliser des fraises à grand pas pour réduire la tendance aux vibrations.
- Avec les longs porte-à-faux, limiter la profondeur de coupe, augmenter l'avance et envisager éventuellement l'utilisation d'adaptateurs antivibratoires.
- Vérifier que la pièce est correctement fixée et que son support est en mesure de résister aux forces de coupe impliquées.
- Contrôler l'épaisseur moyenne des copeaux en fonction de l'avance par dent.
- Contrôler les limites à ne pas dépasser en fraisage en pente.
- Utiliser chaque fois que possible des plaquettes indexables positives modernes.
- Utiliser chaque fois que possible des plaquettes en carbure ou en *Coronite*.
- Utiliser des fraises hélicoïdales pour gagner en fluidité.

4. Tournage/fraisage

4.1 Description des procédés

■ Concept du tournage/fraisage

Le concept de tournage/fraisage recouvre un certain nombre de procédés d'usinage utilisant en combinaison une fraise et une pièce en rotation. Cette technique est essentiellement utilisée pour usiner divers types de pièces excentriques, de surfaces planes, coniques et cylindriques, ainsi que des gorges et des alésages.

Le tournage/fraisage exige une machine-outil équipée de certaines fonctions et de plusieurs axes. Il peut s'agir ici de centres d'usinage ou de tournage, de tours spécialement adaptés, de fraiseuses, d'alésouses ou de machines spéciales. Lorsque d'autres opérations de tournage et de perçage sont combinées sur ces machines, la possibilité de réaliser l'opération en un seul montage permet un gain de temps et de flexibilité.

Ce procédé d'usinage est caractérisé par une sécurité et une productivité élevées. L'utilisation d'une fraise au lieu d'un outil de tour présente certains avantages pour les applications devant répondre à des critères définis.

■ Principe du fraisage au tour

Le principe du fraisage au tour est appliqué lorsque la vitesse périphérique de la fraise correspond à la vitesse de coupe (v_c) et que la vitesse de rotation (n) de la pièce fournit l'avance (v_f) en combinaison avec un outil à avance axiale (f), ce qui est généralement le cas (figure 23).

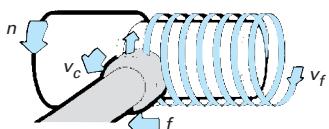


Figure 23 – Principe du fraisage au tour

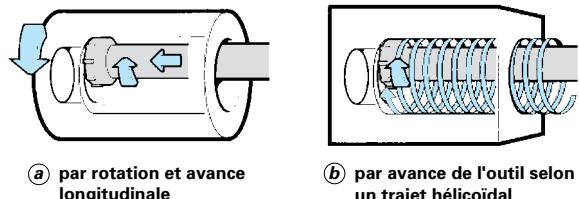


Figure 24 – Agrandissement des alésages

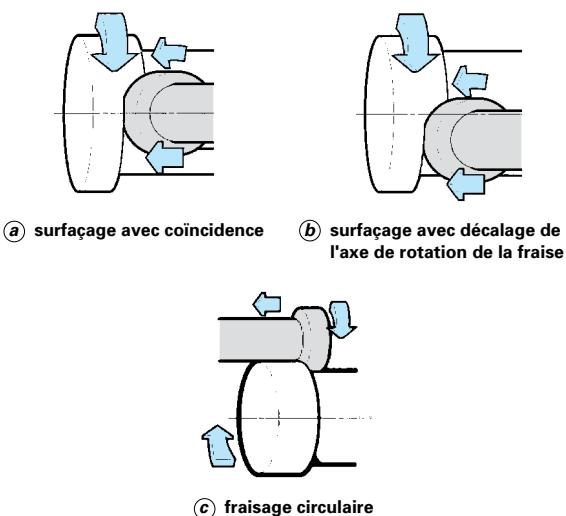


Figure 25 – Surfaçage et fraisage circulaire

- Cette méthode est utilisée sur les centres d'usinage pour **agrandir les alésages**, soit par rotation de la pièce et avance longitudinale de la fraise (figure 24a), soit avec avance de l'outil selon un trajet hélicoïdal (figure 24b).

- Le tournage/fraisage peut être exécuté sous forme de **surfaçage** (figure 25a et b) ou de **fraisage circulaire** (figure 25c), la forme de la pièce à usiner étant ici l'élément déterminant pour le choix de la méthode appropriée.

Le surfaçage peut être exécuté de deux manières différentes, c'est-à-dire soit à l'intersection des axes de la fraise et de la pièce, soit en maintenant ces deux axes légèrement distants l'un de

l'autre. Le procédé de fraisage circulaire utilise une fraise-disque dont l'axe de rotation est parallèle à l'axe de la pièce, lequel décrit un mouvement d'avance axial en cours de rotation de l'outil et de la pièce.

Lorsque l'on recourt au tournage/fraisage pour surfacer, avec coïncidence (figure 25a) entre les axes de la fraise et de la pièce, l'engagement de l'outil est limité par la longueur utile des arêtes de coupe de la fraise. En décalant l'axe de rotation de la fraise (figure 25b), la largeur de fraisage augmente en même temps que la vitesse d'usinage. Une fraise à surfacer excentrique, positionnée à l'intersection des axes, a dans le principe une action similaire à celle d'une fraise à surfacer ou à surfacer-dresser conventionnelle, avec une longueur suffisante d'arêtes de coupe axiales. Cela a pour rôle de limiter au strict minimum les ondulations sur la surface fraisée.

Applications du tournage/fraisage

D'une manière générale, les barres ou les pièces tubulaires d'une certaine dimension, dont l'usinage ne fait pas intervenir une trop forte part de copiage ou de rainurage et dont la forme n'est pas trop complexe pour gêner l'accès de la fraise, peuvent être avantageusement fraisées au tour. Parmi les applications types de cette méthode, citons également les alésages d'une certaine dimension exécutés sur centres d'usinage. Une fraise destinée à d'autres applications, montée sur un porte-outil suffisamment long, peut être ici utilisée pour une large gamme de diamètres.

Une proportion croissante d'opérations d'usinage sont désormais effectuées en un seul montage, ce qui nécessite donc un plus grand nombre d'outils dans les magasins des centres d'usinage. Les outils d'alésage de grand diamètre occupent ici à eux seuls deux ou trois positions et n'ont qu'une plage d'application restreinte. Les méthodes de tournage/fraisage sont par contre flexibles et font appel à une fraise multifonction convenant également pour une grande diversité d'autres opérations.

Le tournage de pièces de grand diamètre impose un contrôle précis des copeaux pour éviter les risques de bourrage. C'est également une formule avantageuse en ce qui concerne la formation des copeaux lors de l'usinage d'acières austénitiques ou à bas carbone ayant tendance à coller. Le tournage/fraisage améliore cette opération du fait de l'action intermittente de la fraise.

En résumé, cette solution est envisageable en présence de critères d'usinage tels que difficultés de contrôle des copeaux lors de l'usinage de grands diamètres dans des matériaux ductiles ; tolérances extrêmement variables ne permettant pas à une seule géométrie de plaque de couvrir de manière satisfaisante la totalité de la plage considérée ; présence de joints de soudure et de cavités imposant à l'outil des contraintes variables ; instabilité de la pièce du fait de sa conception ou de sa structure ; nécessité d'une durée de vie de l'outil correspondant à la totalité du cycle d'usinage de la pièce considérée ; finition de barres de grand diamètre ayant subi un traitement thermique qui en empêche le tournage sur une seule pointe ; ou opérations d'ébauche à haut rendement sur des arbres et autres pièces de configuration irrégulière.

La présence sur l'outil de plusieurs arêtes de coupe accroît en outre la sécurité tout en permettant d'augmenter la vitesse d'usinage et de prolonger la durée de vie de la fraise. Cependant, malgré la souplesse de cette méthode, quelques opérations de tournage complémentaires sont à prévoir au niveau des cavités et des gorges, ainsi que pour certaines phases de profilage.

Dans ces techniques de tournage/fraisage, on classe également le « *whirlmilling* », le « *turnbroaching* » et le filetage avec fraise-mère. La commande CNC peut être conçue de manière à obtenir une interpolation simultanée sur plusieurs axes de manière à réaliser des pièces polygonales.

■ Avantages du tournage/fraisage

Les avantages habituellement reconnus du tournage/fraisage sont, en plus de ceux déjà mentionnés, la possibilité d'usiner des pièces de grandes dimensions mal équilibrées, qui ne peuvent donc pas tourner à grande vitesse, de générer des pièces excentrées ayant des surfaces complexes et présentant des parties en saillie, de réaliser des axes longs et manquant de stabilité ou des pièces à parois minces, de réaliser des surfaces exigeant un fini de bonne qualité, de respecter des tolérances même très étroites et de permettre d'exécuter des opérations d'usinage intermittentes particulièrement délicates.

■ Planification des opérations

Planifier une opération de tournage/fraisage implique la détermination d'un certain nombre de paramètres en liaison directe avec la fraise appropriée :

- vitesse de coupe ;
- avance par dent ;
- nombre de dents simultanément engagées ;
- position de la fraise par rapport à la pièce ;
- épaisseur moyenne de copeaux ;
- décalage entre l'axe de l'outil et celui de la pièce ;
- largeur de coupe ;
- profondeur de coupe ;
- état de surface ;
- puissance de la machine ;
- couple ;
- conditions de coupe limites.

L'application de certains de ces paramètres fait intervenir un mode de calcul différent et d'autres combinaisons qu'en fraisage conventionnel.

■ Exemples

Les exemples de pièces qu'il est possible de réaliser par fraisage au tour sont très divers : cames, vilebrequins, carters cylindriques, cylindres de grand diamètre, arbres de transmission, etc.

• Une **section elliptique** peut être réalisée à une vitesse d'usinage élevée en utilisant une fraise dont la direction d'avance décrit une courbe et est perpendiculaire à l'axe de la pièce. Une avance synchronisée de la pièce et de l'outil selon quatre axes permet d'obtenir un profil elliptique (figure 26).

• Un exemple de **conditions de coupe** pour le tournage/fraisage avant trempe, sur un centre d'usinage, d'une pièce de forme complexe (figure 27) à partir d'une barre en acier allié donne ainsi : fraise à surfacer de 63 mm avec six plaquettes carbure, tournant à des vitesses comprises entre 1 000 et 2 000 tr/min, pour une vitesse de rotation de la pièce de 5 tr/min et une profondeur de coupe de 5 mm.

• Un autre exemple concerne l'**ébauche d'un arbre à cames** de grandes dimensions en acier au carbone, usiné également avec fraise à surfacer de 63 mm, mais avec profondeur de coupe axiale de 3,5 mm, vitesse de coupe de 200 m/min et avance de 600 mm/min. Pour la finition, la vitesse de coupe était de 300 m/min et l'avance de 3 000 mm/min.

4.2 Tournage-fraisage pour l'usinage de vilebrequins (*turnbroaching*)

■ Principe

Le *turnbroaching* est un procédé efficace pour l'usinage de vilebrequins en acier ou en fonte nodulaire. Il existe pour cette opération des machines spéciales permettant de travailler de manière linéaire, circulaire ou en spirale. Les fraises de type circulaire sont réalisées en différents segments, dont les caractéristiques sont une manipulation simple des sections d'ébauche et une possibilité de réglage des sections de finition en fonction de tolérances étroites.

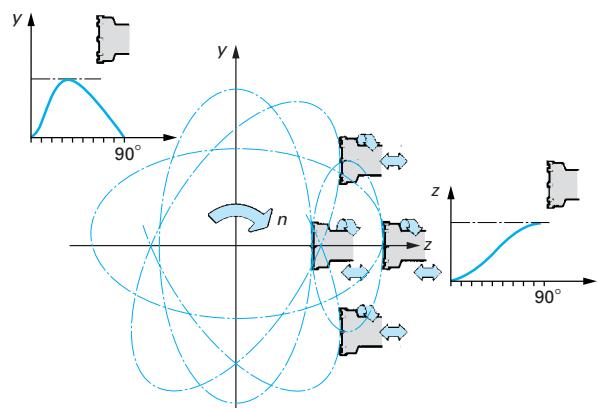


Figure 26 – Réalisation d'une section elliptique

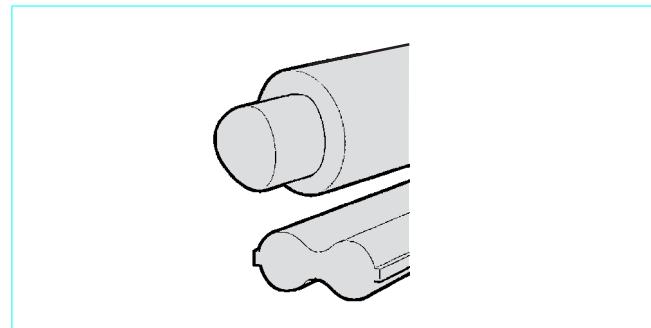


Figure 27 – Réalisation d'une pièce de forme complexe

Il existe trois principales méthodes :

— le *turnbroaching linéaire*, où l'axe du vilebrequin et l'outil sont à une distance fixe l'un de l'autre. L'enlèvement de matière est effectué par progression de l'arête de coupe ;

— le *turnbroaching circulaire*, où l'axe du vilebrequin est positionné à une distance fixe, l'enlèvement de matière étant contrôlé par l'avance de l'axe de l'outil ;

— le *turnbroaching hélicoïdal*, où l'outil et l'axe du vilebrequin sont à une distance fixe l'un de l'autre. L'enlèvement de matière est ici également effectué par progression de l'arête de coupe (cf. figure 24b).

Les systèmes de *turnbroaching* utilisent essentiellement des composants standardisés similaires pour l'ébauche et la finition. C'est le type de machine qui détermine la nature de l'outil : linéaire, circulaire ou hélicoïdal. Le nombre de segments et de plaquettes d'ébauche que comporte l'outil dépend du taux d'enlèvement de matière requis, le dernier segment étant toujours affecté à la finition.

Les segments de finition sont munis de plaquettes logées dans des cartouches réglables permettant de respecter des tolérances étroites, tandis que les segments d'ébauche sont équipés de logements de plaquettes fixes. Ces segments sont conçus par ordinateur et spécialement fabriqués pour chaque machine, afin de s'adapter à la forme de chaque vilebrequin et aux tolérances qui lui sont applicables. Le nombre de plaquettes et le positionnement de chaque segment sont calculés pour limiter les forces de coupe. Les

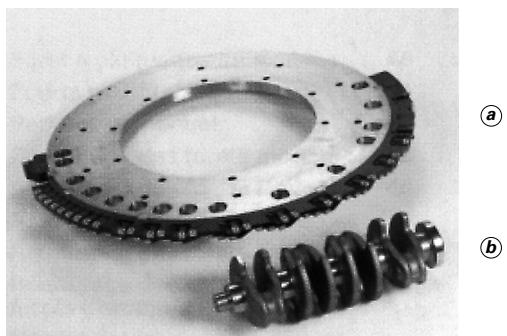


Figure 28 – Segment de logement des plaquettes (a) et vilebrequin ainsi que pièce type de fraisage-tournage (b)

segments d'ébauche sont munis de logements de plaquettes trempés fixes et de poches à copeaux de grandes dimensions. Les plaquettes sont disposées tangentiellement et fixées par une vis centrale (figure 28a).

■ Avantages

À condition d'être utilisé de manière appropriée, le *turnbroaching* peut présenter des avantages considérables comparativement aux autres procédés d'usinage, linéaires ou rotatifs. Cette

formule permet un degré élevé de précision dans de bonnes conditions de répétitivité. Comme dans le cas d'un espace axial fixe, l'outil se déplace tangentiellement à la pièce, sans nouveau réglage radial entre chaque pièce. On obtient une bonne qualité de surface, en même temps qu'une bonne souplesse de mise en place et d'enlèvement des fraises, jointe à un effet supplémentaire de rodage. Un autre avantage est, par ailleurs, le respect de tolérances étroites. Une réduction de la tolérance d'usure est souvent aussi, dans de nombreux cas, une conséquence de ce qui vient d'être dit.

La durée de vie de l'outil se trouve prolongée du fait des temps d'engagement très courts de chaque arête de coupe et des faibles contraintes thermiques en découlant. Le taux d'utilisation de la machine est très élevé, étant donné que les fraises de finition n'ont besoin, en règle générale, d'être remplacées qu'une seule fois par équipe, la fréquence correspondante pour les fraises d'ébauche étant d'environ une fois toutes les trois équipes. Les performances élevées des outils débouchent sur des temps d'usinage courts, ces performances étant essentiellement le résultat d'une répartition bien étudiée des arêtes de coupe et de la disposition respective des différents outils.

Exemple : mentionnons que la combinaison des opérations d'ébauche et de finition de surfaces circulaires de paliers en un seul montage et sur une seule machine permet de réaliser d'appréciables gains de temps au niveau de la manipulation des outils et de sérieuses économies en matière d'investissements. Il serait difficile de trouver une méthode plus pratique que le *turnbroaching* pour l'usinage des vilebrequins, qui sont parmi les pièces les plus difficiles et les plus coûteuses à réaliser en grande série (figure 28b).