

Fraisage

Principes

par Société SANDVIK-COROMANT

1. Principes de base du fraisage	BM 7 082 - 3
1.1 Trois opérations types	— 3
1.2 Principales définitions cinématiques et géométriques	— 4
1.3 Directions de fraisage.....	— 5
2. Copeaux de fraisage.....	6
2.1 Mode de formation des copeaux	— 6
2.2 Épaisseur des copeaux.....	— 6
2.3 Épaisseur moyenne des copeaux.....	— 7
3. Géométrie des fraises.....	9
3.1 Nombre de dents et pas.....	— 9
3.2 Pas différentiel et vibrations	— 9
3.3 Diamètre d'outil	— 10
4. Puissances et pression de fraisage.....	10
4.1 Pression de coupe spécifique	— 10
4.2 Puissance nécessaire pour le fraisage	— 11
4.3 Facteurs influant sur la puissance.....	— 11
4.4 Autres composantes de la force et de la puissance de fraisage.....	— 12
4.5 Forces de coupe et fixation de la pièce.....	— 13
5. Positionnement de la fraise	14
5.1 Principes généraux	— 14
5.2 Début et fin de coupe	— 14
5.3 Effet de l'excentration de la fraise.....	— 15
6. Définition de la position de l'arête de coupe.....	15
6.1 Angles de coupe	— 15
6.2 Géométries de surfâçage	— 16
6.3 Plaquettes de fraisage	— 17
6.4 Géométrie de la fraise et état de surface de la pièce.....	— 19
7. Autres facteurs du fraisage	20
7.1 Effet de l'inclinaison de la broche	— 20
7.2 Vibrations	— 20
8. Annexe : état de surface d'une pièce usinée ; aspects et facteurs principaux.....	21
Références bibliographiques	21

Le **fraisage** est, dans son principe, un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). Aujourd'hui, toutefois, on a également un déplacement de l'outil par rapport à la pièce, lequel peut s'effectuer pratiquement dans n'importe quelle direction. L'outil de fraisage, la fraise, comporte plusieurs arêtes de coupe dont chacune enlève une certaine quantité de métal sous forme de copeaux. Les avantages du fraisage sont un rendement élevé, un bon fini de surface et une haute précision, ainsi qu'une

grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes. Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et des gorges, mais son efficacité en contournage va croissante grâce à l'utilisation des techniques CNC (Computerized Numerical Control).

Le fraisage est en passe de devenir une méthode d'usinage de plus en plus universelle, disposant d'une gamme toujours plus étendue de machines, de systèmes de commande et d'outils de coupe. Par exemple, les centres d'usinage utilisent largement le fraisage et ont donc besoin, dans ce domaine, d'une grande diversité d'outils. Le fraisage s'effectue donc sur différents types de machines, allant des fraiseuses conventionnelles dont la conception date du début du siècle jusqu'aux machines CNC sophistiquées à axes multiples.

Comme nous le verrons, le fraisage permet non seulement d'effectuer une grande diversité d'opérations, mais fait également intervenir de nombreux types de machines, d'outils et de pièces. Il est très largement influencé par l'état des équipements utilisés et de la pièce usinée, et exige de l'opérateur une connaissance approfondie des différentes limitations existantes.

C'est à partir du plan de la pièce et sur la base des impératifs de production que l'on choisit le type d'opération et d'outil de fraisage. Les méthodes conventionnelles doivent toujours ici être remises en question du fait des perspectives nouvelles ouvertes au fraisage en raison des développements intervenus au fil des années.

Il faut donc étudier le type d'usinage concerné afin de déterminer comment l'exécuter au mieux, ce qui permettra un double gain de temps et de qualité au niveau du résultat. Il convient également d'envisager si une seule ou plusieurs opérations sont nécessaires.

Lorsqu'il est décidé qu'une pièce doit être usinée par fraisage, l'étape suivante consiste à choisir la machine appropriée : fraiseuse horizontale, verticale, universelle, à portique, à commande numérique ou centre d'usinage, c'est-à-dire la meilleure solution pour l'opération en question. Une fois obtenue une bonne compatibilité entre les paramètres d'usinage et les capacités de la machine choisie, il convient de déterminer divers facteurs tels que stabilité, précision et fini de surface désiré. L'instabilité est la principale menace en usinage des métaux par enlèvement de copeaux, non seulement pour la qualité des résultats obtenus, mais également en ce qui concerne la durée de vie et les performances de l'outil, quelle que soit par ailleurs l'aptitude de la machine et de l'outil à l'utilisation qui en est faite.

L'objectif de cette rubrique est d'exposer dans un premier article les principes généraux de ce procédé complexe [BM 7 082]. Puis nous présenterons de manière détaillée les divers types d'opération [BM 7 083] et les aspects complémentaires de ce procédé d'usinage [BM 7 084].

Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter, dans ce traité, les articles :

- [B 7 130] Commande numérique des machines-outils (référence [1]) ;
- [B 7 160] Fraiseuses et centres d'usinage (référence [2]).

Notations et symboles		
Symbol	Unité	Désignation
A	mm^2	surface du copeau non déformé
a	mm	distance entre l'arête et le corps de l'outil
a_e	mm	largeur de coupe radiale
a_p	mm	profondeur de coupe axiale
B	mm	largeur du trait de coupe par rapport à l'axe de la fraise
b_s	mm	longueur de plat d'une plaquette de planage
D	mm	diamètre de l'outil
F_c	N	force de coupe tangentielle
F_{cn}	N	force de coupe radiale
F_p	N	force de coupe axiale
f	mm/tr	avance par tour
f'	mm	écart de surfâçage
f_1		facteur d'efficacité
f_z	mm/dent	avance par dent
H	mm	profondeur de profil
h	mm	épaisseur de copeau
h_m	mm	épaisseur moyenne de copeau
h_x	mm	épaisseur maximale de copeau
IC	mm	longueur de l'arête de coupe
K_c	N/mm^2	pression de coupe spécifique

Notations et symboles		
Symbol	Unité	Désignation
n	tr/min	vitesse de broche
P	kW	puissance de fraisage
Q	mm^3/min	volume de matière enlevé par unité de temps (taux d'enlèvement de matière)
q	$\text{mm}/1\,000\,\text{mm}$	inclinaison de la broche
r	mm	rayon de bec d'une plaquette
u	mm	pas
v_c	m/min	vitesse de coupe
v_f	mm/min	avance par minute ou vitesse d'avance
y	mm	saut axial des arêtes de coupe
z		nombre d'arêtes de l'outil ou nombre de dents d'une fraise
α	degré	arc de coupe
δ	degré	degré d'inclinaison de la broche
γ_t	degré	angle de coupe radial (ou arrière)
γ_o	degré	angle de coupe effectif
γ_p	degré	angle de coupe axial (ou latéral)
λ_s	degré	angle d'inclinaison
η		rendement de la machine
κ	degré	angle d'attaque

1. Principes de base du fraisage

1.1 Trois opérations types

Indépendamment du type de fraise choisie, l'opération de fraisage fera fondamentalement intervenir une des trois méthodes suivantes ou une combinaison de celles-ci. Compte tenu du choix de méthodes qui s'offrent en fraisage, il est important, au préalable, d'établir une distinction entre les différentes directions d'avance par rapport à l'axe de rotation de l'outil (figure 1). (A) correspond, sur cette figure, à la direction axiale, (B) à la direction radiale et (C) à la direction tangentielle.

Le surfâçage (figure 2a) est une opération de coupe combinée avec plusieurs arêtes, essentiellement celles situées à la périphérie et, dans une certaine mesure, seulement dans la partie centrale de

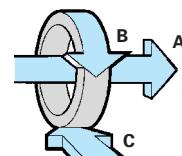


Figure 1 – Directions d'avance en fraisage

l'outil. La fraise au contact de la pièce tourne perpendiculairement à la direction de l'avance radiale.

Le fraisage 3 tailles (figure 2b) utilise les arêtes de coupe situées à la périphérie de l'outil. La fraise tourne ici autour d'un axe parallèle à l'avance tangentielle.

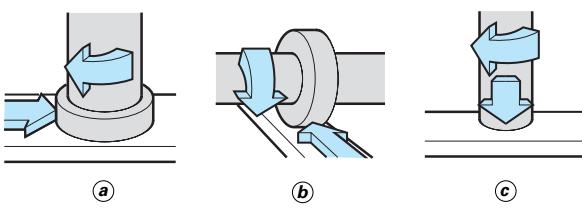


Figure 2 – Surfaçage, fraisage d'épaulements et fraisage axial

Ces deux méthodes peuvent également être différencierées par la **profondeur de coupe** adoptée :

- en surfaçage, la profondeur de coupe dans la direction axiale est déterminée par la profondeur de pénétration des arêtes périphériques. Les arêtes centrales de l'outil génèrent pour leur part la surface finale de la pièce ;
- pour le fraisage d'épaulements, la profondeur de coupe dans la direction radiale est fonction de la partie du diamètre de la fraise pénétrant dans la pièce.

Certaines fraises peuvent également travailler dans une troisième direction d'avance, **axialement**. Il s'agit alors d'une opération de **percage** exécutée par les arêtes de coupe centrales de l'outil. Cette méthode (figure 2c) est utilisée pour l'usinage de rainures non débouchantes, l'outil perçant alors jusqu'à une certaine profondeur, puis passant de la direction d'avance axiale à la direction radiale pour permettre aux arêtes périphériques d'élargir le trou. Une combinaison de plusieurs directions d'avance est également possible lorsque l'on désire usiner des surfaces formant un angle ou incurvées. La fraise à avance axiale doit avoir des arêtes de coupe centrales disposées transversalement pour que sa partie frontale puisse exercer l'action de coupe désirée.

1.2 Principales définitions cinématiques et géométriques

Pour régler les paramètres de l'opération de fraisage, il convient en premier lieu d'établir quelques définitions s'appliquant aux caractéristiques dynamiques de l'outil de fraisage dont le diamètre (D) se déplace contre la pièce.

La **vitesse de broche** (n en tr/min) est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil [3] effectue par minute. Il s'agit là d'une valeur dépendant de la machine, qui ne renseigne guère sur ce qui se passe à la périphérie où l'arête de coupe fait son office.

La **vitesse de coupe** (v_c en m/min) indique pour sa part la vitesse à laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce. C'est un important paramètre de l'outil, qui fait partie intégrante des conditions de coupe avec, pour fonction, de garantir que l'opération est effectuée dans les meilleures conditions d'efficacité par l'outil concerné.

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont naturellement liés par les formules suivantes (figure 3a et 3b) :

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi D}$$

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000}$$

avec D diamètre de l'outil de fraisage (mm),

n vitesse de broche (tr/min),

v_c vitesse de coupe (m/min).

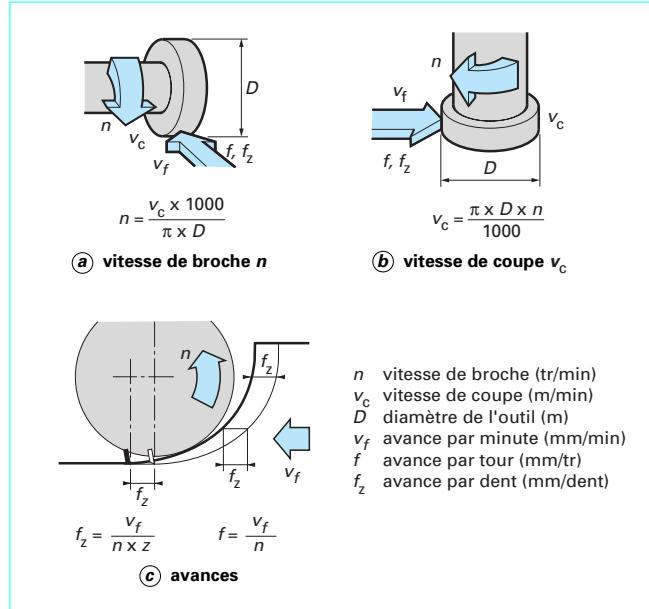


Figure 3 – Vitesse de broche, vitesse de coupe et avances

L'**avance par minute** ou vitesse d'avance (v_f en mm/min) (figure 3c) est l'avance de l'outil en direction de la pièce, exprimée en unités de distance par unité de temps. On parle également ici d'avance de table.

L'**avance par tour** (f en mm/tr) (figure 3c) est une valeur spécialement utilisée pour calculer l'avance et déterminer l'aptitude d'une fraise à surfacer à travailler en finition. Elle indique de combien l'outil avance au cours d'une rotation.

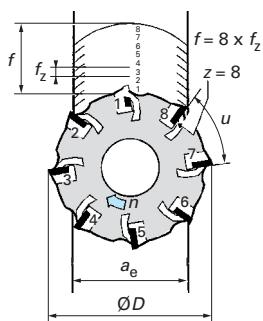
L'**avance par dent** (f_z en mm/dent) (figure 3c) est un important paramètre en fraisage. La fraise étant un outil à arêtes multiples, il faut en effet disposer d'un moyen de mesure pour contrôler que chacune de ces arêtes travaille dans des conditions satisfaisantes. La capacité d'enlèvement de matière de chaque dent est l'élément limitatif au niveau des performances de l'outil. L'avance par dent indique la distance linéaire parcourue par l'outil alors qu'une certaine dent est engagée.

L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc être exprimée en fonction du nombre d'arêtes de l'outil (z) et de l'avance par minute, ou sous forme d'avance par tour (figure 4).

La **profondeur de coupe**, axiale (a_p) en surfaçage ou radiale (a_e) pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce.

La **largeur de coupe ou profondeur de coupe radiale** (a_e) en surfaçage et axiale (a_p) pour le fraisage d'épaulements, est la distance parcourue par l'outil sur la surface de la pièce (figure 5).

Le **volume de matière enlevée par unité de temps** (Q) peut être déterminé en utilisant certaines de ces définitions. Ce volume correspond à la profondeur de coupe multipliée par la largeur de coupe, multipliées par la distance dont l'outil se déplace au cours de l'unité de temps concernée. Le volume d'enlèvement de matière est exprimé en millimètres cubes par minute (figure 6).



z nombre d'arêtes de l'outil
 f avance par tour (mm/tr)
 f_z avance par dent (mm/dent)
 a_e largeur de coupe (mm)
 u pas de la fraise

f_z est un facteur capital en fraisage, décisif pour le taux d'enlèvement de métal par arête, la charge par arête, la durée de vie et, dans une certaine mesure, la structure de surface.

Figure 4 – Avance par dent et avance par tour

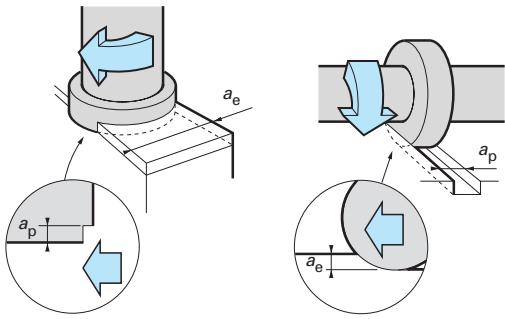


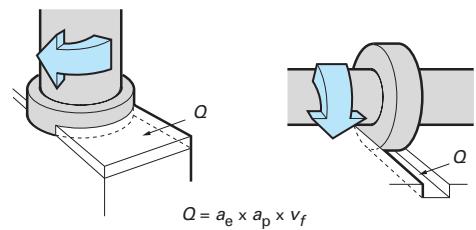
Figure 5 – Profondeur de coupe en surface (a_e) et en fraisage d'épaulement (a_p)

1.3 Directions de fraisage

La fraise effectue un mouvement de rotation tandis que la pièce avance dans sa direction. La coupe est donc ainsi définie par les paramètres impliqués. Il existe deux manières de procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe.

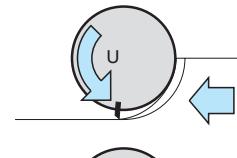
En **fraisage conventionnel** (U, figure 7a), la direction d'avance de la pièce est à l'**opposé du sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe**. L'épaisseur des copeaux, nulle au départ, augmente jusqu'à la fin de la passe.

Dans le cas de **fraisage en avalant** (D, figure 7b), la direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. L'épais-

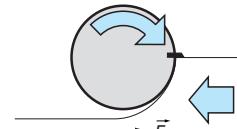
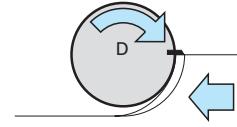


a_e profondeur de coupe radiale (mm)
 a_p profondeur de coupe axiale (mm)
 v_f avance par minute (mm/min)
 Q volume de matière enlevée par unité de temps [taux d'enlèvement de métal] (mm³/min)

Figure 6 – Volume de métal enlevé par unité de temps



(a) fraisage conventionnel



(b) fraisage en avalant

\vec{F} force de coupe qu'exerce la pièce sur l'outil

Figure 7 – Fraisage conventionnel et fraisage en avalant.

Représentation des forces de coupe \vec{F}

leur de copeau va donc diminuer jusqu'à être égale à zéro en fin de passe.

Le fraisage conventionnel, où l'usinage démarre avec une épaisseur de copeau nulle, engendre des forces de coupe élevées qui tendent à séparer la fraise de la pièce. La fraise doit être engagée à force dans la pièce, ce qui crée un effet de frottement ou de gâlage accompagné d'un fort dégagement de chaleur et, souvent

aussi, un contact avec une surface écrouie résultant de l'usinage précédent. Les forces de coupe \vec{F} ont également tendance à soulever la pièce au-dessus de la table de la machine, ce qui oblige donc à faire très attention à la tenue du montage.

Dans le cas du fraisage en avalant, la fraise démarre avec une forte épaisseur de copeau. Cela évite l'effet de galetage, avec réduction du dégagement de chaleur et de la tendance à l'écrouissage. Cette forte épaisseur de copeau est un élément favorable et les forces de coupe tendent à presser la pièce contre la fraise, maintenant ainsi la plaque dans le trait de coupe.

En cours de fraisage, il arrive parfois que des copeaux collent ou se soudent à l'arête de coupe, qu'ils accompagnent alors jusqu'à l'amorce de la passe suivante. En fraisage conventionnel, ces copeaux risquent d'être coincés entre la dent et la pièce avec, pour conséquence, une rupture de la dent. En fraisage en avalant, les mêmes copeaux sont, par contre, cisaillés en deux et n'endommagent pas l'arête de coupe.

En conséquence, le fraisage en avalant est à préférer chaque fois que la machine, le système de fixation de l'outil et la pièce le permettent.

Le fraisage en avalant impose toutefois certaines servitudes du fait que les forces de coupe tendent à exercer une traction sur la fraise tout en pressant simultanément la pièce contre la table. Cela oblige la machine à éliminer le jeu au niveau de l'avance de table. Si l'outil est tiré à l'intérieur de la pièce, on a une augmentation non voulue de l'avance, ce qui peut conduire à une épaisseur de copeau excessive et à une rupture d'arête. Dans une telle situation, il faut recourir au fraisage conventionnel, de même qu'en présence de fortes variations de la surépaisseur d'usinage. Il faut alors veiller à ce que la pièce soit maintenue correctement et adapter la dimension de la fraise à la nature du travail exécuté. La direction des forces de coupe est toutefois plus favorable à l'apparition de vibrations. Les forces de coupe pour un certain taux d'avance sont plus élevées en fraisage en avalant, mais la longueur de coupe est, par contre, plus courte. Le fraisage conventionnel est plus avantageux pour sa part pour certaines opérations de finition.

2. Copeaux de fraisage

2.1 Mode de formation des copeaux

Le contrôle de la formation des copeaux est particulièrement critique en fraisage. Pour parvenir aux performances correctes, prolonger la durée de vie de l'outil et obtenir de bons résultats, il est nécessaire de déterminer les valeurs d'épaisseur des copeaux.

C'est le trajet parcouru par l'outil qui donne naissance au copeau, qui se forme entre l'entrée de la fraise dans la matière et sa sortie de celle-ci. Les copeaux sont plus longs en fraisage conventionnel qu'en fraisage en avalant, ce qui est donc également un facteur à prendre en considération lors du choix de la méthode appropriée. La forme des copeaux varie avec la méthode de fraisage et le positionnement de la fraise.

L'épaisseur maximale, c'est-à-dire sans déformation, du copeau (h_x) correspond à la distance entre deux trajets successifs de l'outil. C'est l'épaisseur maximale de matière que l'arête de coupe rencontre dans la direction radiale, ce qui est en même temps un élément important pour l'évaluation de la force maximale imposée à cette arête (figure 8a).

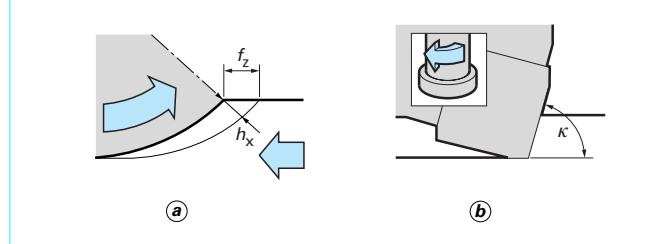


Figure 8 – Épaisseur maximale du copeau (a) et angle d'attaque (b)

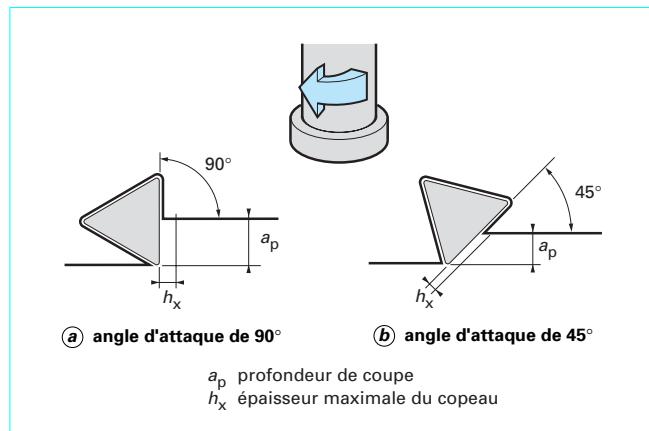


Figure 9 – Variation des dimensions des copeaux suivant l'angle d'attaque en surface

L'épaisseur de copeau varie en fonction de l'angle d'incidence entre la fraise et la pièce. En surface, la valeur déterminante à cet égard est l'angle d'attaque κ , mesuré entre la surface plane usinée et la surface générée par l'arête principale (figure 8b). Les deux valeurs extrêmes en surface sont 90° et 45°, le plus grand de ces deux angles produisant des copeaux plus épais et plus courts, et le plus petit des copeaux minces et plus longs, pour une même profondeur de coupe (figure 9).

Plus l'angle d'attaque est réduit, plus le copeau est mince et réparti sur une plus grande longueur d'arête. La charge imposée à l'arête est ainsi moindre, ce qui permet d'augmenter l'avance par dent. En contrepartie, un angle d'attaque plus petit réduit la profondeur de coupe qu'il est possible d'atteindre pour une longueur d'arête donnée (figure 9).

L'influence de l'angle d'attaque sur la profondeur d'arête et la longueur d'arête engagée est proportionnelle au sinus de cet angle, qui est égal à 1 pour un angle de 90° et à 0,707 1 pour un angle de 45°. Cela signifie que la longueur d'arête engagée dans le cas d'une fraise à surfacer à 45° est 1,4 fois plus longue que celle d'une fraise à 90° pour une même profondeur de coupe.

2.2 Épaisseur des copeaux

L'épaisseur des copeaux varie en fraisage, tout spécialement dans le cas d'épaulements, de zéro à sa valeur maximale. Elle est affectée par l'angle d'attaque, la position d'outil et l'avance. L'épaisseur de copeaux théorique correspond au point d'intersection

tion entre l'axe d'avance de l'outil et le trait de coupe, dans la direction de l'avance. Dans les autres positions, cette épaisseur est variable. Considérons deux points extrêmes de l'arc d'engagement de l'outil (α) sous un angle de 180° dans le cas d'une fraise à rainurer et de 45° pour une fraise-disque (figure 10). **L'axe de l'outil est d'abord au centre du trait de coupe, puis s'en écarte ensuite.**

On peut alors constater, dans certains cas, surtout en fraisage d'épaulements, un volume d'enlèvement de matière par arête insuffisant. L'épaisseur des copeaux doit toutefois être maintenue à un niveau acceptable pour ne pas perturber la coupe. Il est donc ici nécessaire d'augmenter l'avance par dent jusqu'à parvenir à l'épaisseur de copeaux acceptable en l'occurrence. Les autres paramètres dépendant de la machine en découlent ensuite.

Le rapport entre le diamètre de l'outil et la profondeur de coupe en fraisage d'épaulements peut souvent être faible. Plus la profondeur de passe est faible, plus les copeaux deviennent fins et plus l'arc d'engagement de l'outil φ est faible.

2.3 Épaisseur moyenne des copeaux

Lorsque l'axe d'avance de l'outil ne coupe pas le trait de coupe qu'exécute cet outil dans la pièce (figure 11b), l'épaisseur des copeaux doit être contrôlée car elle est inférieure à l'avance par dent. L'épaisseur de copeau maximale h_x doit être contrôlée en même temps que l'angle d'attaque pour garantir une amorce de coupe satisfaisante et éviter de surcharger l'arête.

L'épaisseur des copeaux est non seulement variable en fraisage, mais également souvent compliquée à déterminer. Il est donc plus pratique, et plus logique à de nombreux égards, d'utiliser l'**épaisseur moyenne des copeaux** h_m . Celle-ci constitue une valeur de référence, tout spécialement lors du fraisage d'épaulements, faisant intervenir en combinaison les cotes a_e et D . Cela est visible, par exemple, dans la forme de l'arc α généré par l'outil (figure 12). En plus d'une mesure de la charge imposée par les copeaux, elle est aussi un facteur de calcul du besoin de puissance.

L'épaisseur moyenne des copeaux h_m est calculée par l'intermédiaire d'une formule relativement simple pour le fraisage d'épaulements et le surfaçage :

— en épaulement :

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

ou

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

— en surfaçage en position centrée :

$$h_m = \frac{\sin \kappa \times 180 \times a_e \times f_z}{\pi \times D \times \arcsin \left(\frac{a_e}{D} \right)}$$

L'avance par dent est, de toute évidence, une valeur à prendre en compte dans ces deux méthodes de fraisage, au même titre que la profondeur et la largeur de coupe. Le diamètre de la fraise a également une influence en ce qu'il affecte l'arc de coupe. L'angle d'attaque, enfin, influe également sur l'épaisseur des copeaux.

L'épaisseur moyenne des copeaux calculée doit atteindre un certain minimum. Pour le fraisage d'épaulements, ce minimum se situe généralement aux alentours de 0,07 à 0,1 mm. En surfaçage, 0,1 mm est souvent considéré comme le seuil au-dessous duquel il ne faut pas descendre. Des valeurs appropriées sont fournies pour chaque type de fraise pour permettre le calcul de l'avance par dent. En surfaçage, il est souvent suffisant, sur le plan de la précision, d'adopter pour l'avance par dent une valeur égale à l'épaisseur moyenne des copeaux, une exception à cette règle pouvant intervenir au cas où l'on a un petit angle d'attaque. Avec un angle d'attaque de 45° , le facteur de correction est 0,71.

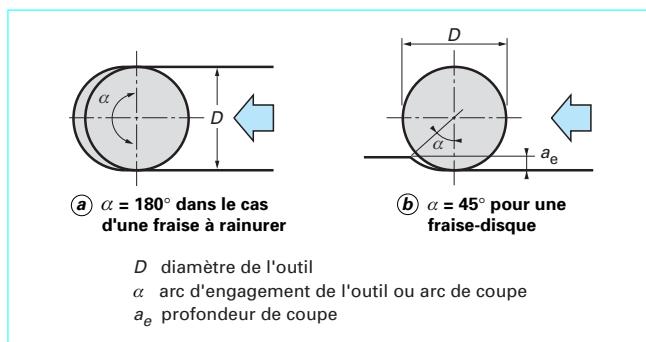


Figure 10 – Deux points extrêmes d'engagement de l'outil

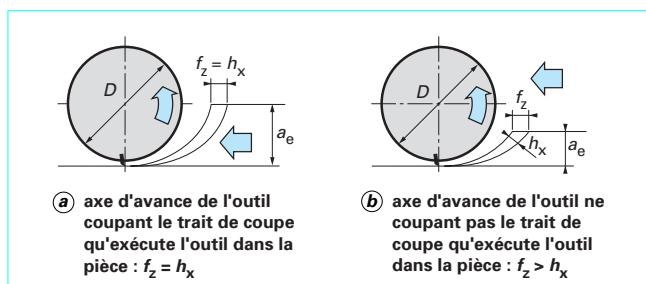


Figure 11 – Position relative de l'axe d'avance de l'outil et du trait de coupe

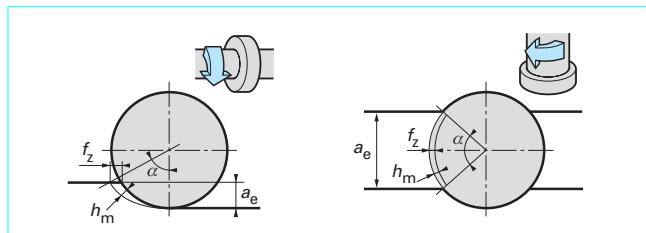


Figure 12 – Épaisseur moyenne des copeaux

Les valeurs recommandées pour l'avance par dent sont comprises entre un minimum de 0,1 mm et un maximum de 0,4 mm. Une faible avance a pour conséquence une mauvaise utilisation de la capacité de coupe des fraises et de la puissance machine.

Les valeurs de l'épaisseur moyenne des copeaux en fonction du rapport a_e/D et de l'avance par dent f_z sont données dans le tableau 1 et figure 13.

L'épaisseur des copeaux n'est généralement pas un facteur critique lorsque le surfaçage est exécuté avec l'avance par dent recommandée.

Cependant, lorsque l'axe d'une fraise est décalé par rapport à la largeur de la pièce, il convient de contrôler l'épaisseur moyenne des copeaux pour l'application concernée. Plus l'arc d'engagement de la fraise est réduit, plus l'axe de cette fraise est éloigné du trait de coupe en cours et plus les copeaux sont minces. C'est là une situation qui se rencontre lors du fraisage d'épaulements ou en surfaçage lorsque la fraise est décalée par rapport à la pièce et que l'épaisseur moyenne des copeaux est inférieure à l'avance par dent.

Tableau 1 – Épaisseur moyenne h_m (en mm) en fonction de l'avance f_z et du rapport a_e/D en fraisage d'épaulement

a_e/D	f_z (mm)										
	0,04	0,08	0,10	0,16	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80	1,0
1/50					0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,11	0,14
1/40				0,03	0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,13	0,16
1/25				0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
1/20				0,03	0,04	0,07	0,09	0,11	0,13	0,18	0,22
1/10			0,03	0,05	0,06	0,09	0,12	0,16	0,19	0,25	
2/10		0,03	0,04	0,07	0,09	0,13	0,17	0,22	0,26		
3/10		0,04	0,05	0,08	0,10	0,16	0,21	0,26			
4/10		0,05	0,06	0,09	0,12	0,18	0,23				
5/10	0,03	0,05	0,06	0,10	0,13	0,19	0,25				

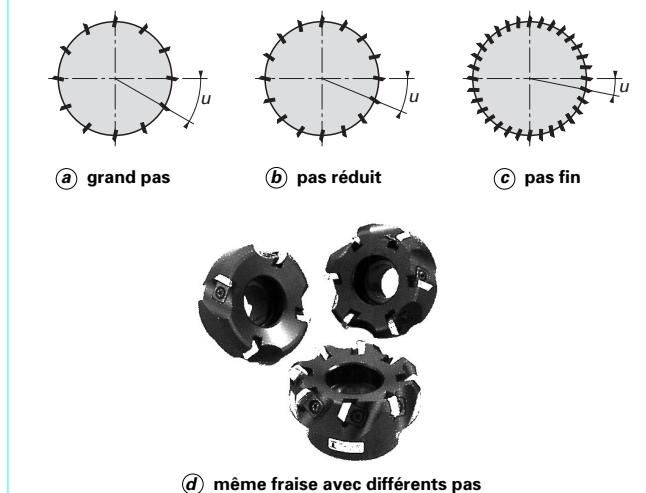
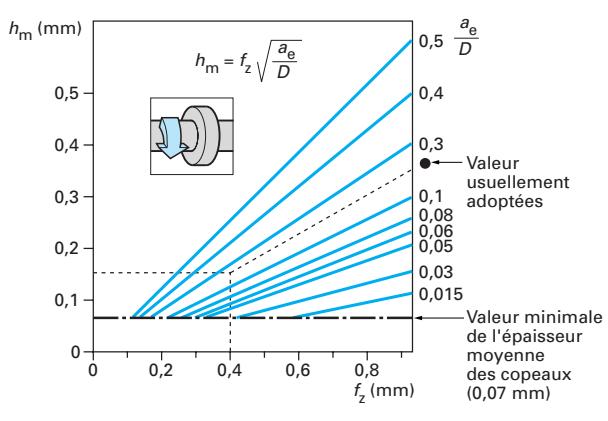
Tableau 2 – Influence de l'angle d'attaque κ sur l'épaisseur moyenne des copeaux en surface

a_e/D	$x_\kappa = \frac{h_m}{f_z}$ (1)							
	$\kappa = 90^\circ$		$\kappa = 75^\circ$		$\kappa = 60^\circ$		$\kappa = 45^\circ$	
0,025	0,16	1,0	0,15	0,97	0,14	0,87	0,11	0,71
0,05	0,22	1,0	0,21	0,97	0,19	0,87	0,16	0,71
0,075	0,27	1,0	0,26	0,97	0,23	0,87	0,19	0,71
0,10	0,31	1,0	0,30	0,96	0,27	0,86	0,22	0,71
0,15	0,38	1,0	0,36	0,96	0,33	0,86	0,27	0,70
0,20	0,43	0,99	0,42	0,96	0,37	0,86	0,31	0,70
0,25	0,48	0,99	0,46	0,96	0,42	0,86	0,34	0,70
0,30	0,52	0,98	0,50	0,95	0,45	0,85	0,37	0,70
0,35	0,55	0,98	0,53	0,95	0,48	0,85	0,39	0,69
0,40	0,58	0,97	0,56	0,94	0,51	0,84	0,41	0,69
0,45	0,61	0,96	0,59	0,93	0,53	0,83	0,43	0,68
0,50	0,64	0,95	0,61	0,92	0,55	0,83	0,45	0,68
0,60	0,68	0,93	0,65	0,90	0,59	0,81	0,48	0,66
0,70	0,71	0,90	0,68	0,87	0,61	0,78	0,50	0,64
0,80	0,72	0,86	0,70	0,83	0,63	0,75	0,51	0,61
0,90	0,72	0,80	0,70	0,78	0,62	0,70	0,51	0,57
1,0	0,64	0,64	0,61	0,61	0,55	0,55	0,45	0,45

(1) Colonne de gauche : $x_\kappa = \frac{180 a_e \sin \kappa}{\pi D \arcsin \sqrt{a_e/D}}$ (surfaceage totalement décentré)Colonne de droite : $x_\kappa = \frac{180 a_e \sin \kappa}{\pi D \arcsin(a_e/D)}$ (surfaceage centré)Dans ces formules, l'arcsin est exprimé en degrés, d'où le facteur $180/\pi$.

L'épaisseur des copeaux a une telle influence sur les résultats du fraisage que l'épaisseur moyenne des copeaux et l'avance par dent sont des critères décisifs quelle que soit l'application considérée à la lumière de ce qui vient d'être dit. Le diagramme de la figure 13

et le tableau 2 donnent les valeurs relatives d'avance par dent et d'épaisseur moyenne des copeaux en fonction de l'avance f_z de la fraise dans la pièce, du rapport a_e/D et de l'angle d'attaque κ en surface.



3. Géométrie des fraises

3.1 Nombre de dents et pas

Les fraises étant des outils à arêtes multiples ont un **nombre variable de dents** (z) (figure 14), déterminé pour chaque type d'opération par divers facteurs. La matière et les dimensions de la pièce, la stabilité, le fini de surface et la puissance disponible sont des facteurs plus spécialement liés à la machine et à la méthode d'usinage, tandis que ceux dépendant de l'outil incluent une avance par dent suffisante (avec une épaisseur moyenne des copeaux d'au moins 0,1 mm), un minimum de deux arêtes simultanément engagées et une bonne capacité d'évacuation des copeaux.

Le **pas u** d'une fraise (figure 14) est la distance entre deux points correspondants sur deux arêtes successives. Les fraises sont classées en trois types de pas : grand pas, pas réduit et pas fin (figure 15).

Un **grand pas** signifie un moindre nombre de dents sur le pourtour de la fraise et de larges espaces de dégagement des copeaux. Ce type de pas est utilisé pour l'ébauche et la finition d'acier, ainsi que lorsque la tendance aux vibrations risque de nuire au résultat de l'opération.

Un **pas réduit** implique un plus grand nombre de dents et des espaces plus restreints pour l'évacuation des copeaux. Ces fraises permettent un taux élevé d'enlèvement de matière et sont normalement choisies pour la fonte et l'usinage moyen d'acier.

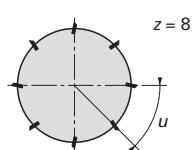


Figure 14 – Géométrie des fraises : nombre de dents et pas

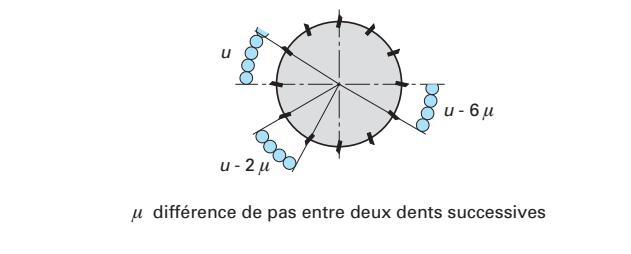


Figure 16 – Pas différentiel

• Un **pas fin** est caractérisé par de petits espaces de dégagement des copeaux et autorise des avances de table très élevées. Ce type de fraise convient pour l'usinage intermittent de surfaces en fonte, l'ébauche de fonte et les faibles profondeurs de coupe en usinage d'acier, ainsi que dans les cas où il est nécessaire de travailler avec une vitesse de coupe réduite, comme pour le titane par exemple.

3.2 Pas différentiel et vibrations

Le pas différentiel signifie que l'espacement des dents à la périphérie de la fraise n'est pas uniforme (figure 16). C'est un moyen très efficace de venir à bout des vibrations et une solution adoptée en standard pour les fraises à surfacer à grand pas.

Il y a toujours des vibrations en fraisage, que ce soit au niveau de la pièce, de l'outil ou de la machine. En général, ces vibrations, si elles demeurent dans une plage contrôlable, ne présentent pas de sérieux problèmes et n'affectent pas non plus les résultats lorsque l'opération s'effectue dans de bonnes conditions de stabilité.

Mais il peut toutefois arriver que la fréquence de vibration des plaquettes engagées dans la pièce coïncide avec la fréquence naturelle de la machine et, éventuellement, de la pièce, auquel cas la

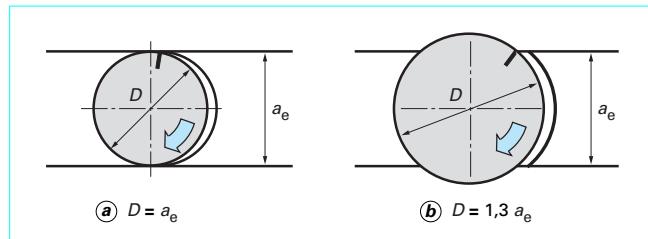


Figure 17 – Rapport diamètre de fraise/largeur de coupe

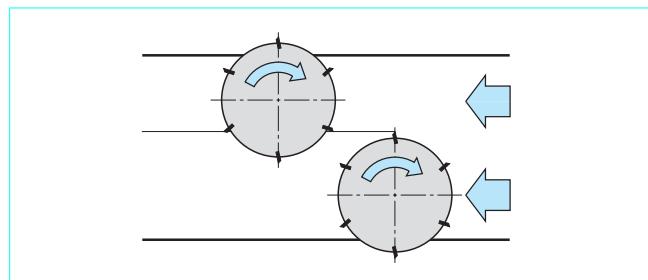


Figure 18 – Surfaçage en deux passes

situation change du tout au tout, les vibrations pouvant alors avoir des conséquences particulièrement négatives. Ce phénomène est courant en fraisage, aussi est-il possible de le contrer en modifiant la vitesse de broche de telle sorte qu'il n'y ait plus coïncidence des fréquences. Cette méthode a cependant ses limites. Le fait de modifier la vitesse peut conduire à sortir de la plage de vitesses de coupe la mieux appropriée pour l'opération concernée. Quant aux possibilités d'influer sur les fréquences naturelles de la machine, elles sont, en règle générale, réduites, tandis qu'agir sur la fréquence naturelle de la pièce présente souvent de grandes difficultés.

Il existe un rapport défini entre l'amplitude des vibrations et celle des forces de coupe. Il est possible de réduire ces dernières en choisissant un angle de coupe positif et, plus encore, en réduisant le nombre d'arêtes de coupe simultanément engagées dans la pièce. La diminution des forces de coupe n'est pas affectée même si l'avance par tour demeure constante.

Une formule consiste à adopter une fraise à grand pas et un angle de coupe positif. Si les vibrations persistent, le nombre d'arêtes de coupe peut être encore diminué dans certaines circonstances et en supprimant tout simplement une sur deux. Une meilleure solution au problème des vibrations est cependant de choisir une fraise à pas différentiel.

3.3 Diamètre d'outil

Le choix du diamètre d'une fraise est guidé, en règle générale, par les dimensions de la pièce et, plus spécialement, sa largeur. Mais s'il y a ici souvent un premier obstacle au niveau de la détermination de la puissance nécessaire compte tenu de celle effectivement disponible, il existe également d'autres facteurs très importants pour que l'opération se déroule dans de bonnes conditions, à savoir, la position de la fraise et le type de contact entre ses dents et la pièce.

Généralement, en surfaçage, le diamètre de fraise doit être plus grand de 20 à 50 % par rapport à la largeur de coupe (figure 17). Dans le cas de très grandes surfaces, il peut être nécessaire d'opérer en plusieurs passes (figure 18). L'épaisseur des copeaux, au

début et à la fin de la coupe, est affectée par le diamètre et la position de la fraise. Si le diamètre est le même ou un peu plus grand que la largeur de la pièce, des copeaux trop minces se formeront en ces deux points, ce qui présentera les mêmes inconvénients que mentionné précédemment dans le cas d'une avance insuffisante par dent.

4. Puissances et pression de fraisage

4.1 Pression de coupe spécifique

La pression de coupe spécifique (K_c) est un important facteur pour ce qui est de permettre de calculer la puissance nécessaire pour une opération de fraisage, un facteur qui donne une mesure de l'usinabilité d'une matière donnée compte tenu de la géométrie et de l'épaisseur de copeaux choisis.

La pression de coupe spécifique est, par définition, la force (tangentielle) nécessaire pour détacher un copeau d'une section transversale de 1 millimètre carré. Dans la pratique, c'est la force de coupe (F_c) requise, divisée par la surface du copeau non déformé (A) (figure 19). Elle est mesurée en N/mm². Pour un acier à moyenne teneur en carbone, elle est de 2 000 N/mm², tandis que, pour un alliage d'aluminium type, elle n'est plus que de 800 N/mm².

Elle est donnée par des tables établies principalement en fonction de différents types de matières à usiner, mais aussi pour permettre de la régler par l'intermédiaire de l'angle de coupe effectif et de l'épaisseur moyenne de copeau. Plus l'angle de coupe est positif, plus la force de coupe spécifique diminue. Un facteur de correction X est fourni dans le tableau 3. La pression de coupe spécifique diminue également lorsque la vitesse de coupe augmente, mais est relativement constante dans les plages de vitesses élevées propres aux matériaux de coupe modernes.

Le rapport entre la pression de coupe spécifique et l'épaisseur des copeaux ressort de ce que nous avons dit précédemment quant à l'importance d'avoir une épaisseur moyenne de copeau suffisante pour obtenir des performances de coupe satisfaisantes.

La pression de coupe spécifique diminue quand cette épaisseur augmente. Si des copeaux trop minces donnent ici des valeurs élevées, c'est parce que la force requise pour couper le métal n'est répartie que sur une faible section transversale du copeau.

Un facteur de correction y est fourni par le diagramme de la figure 20.

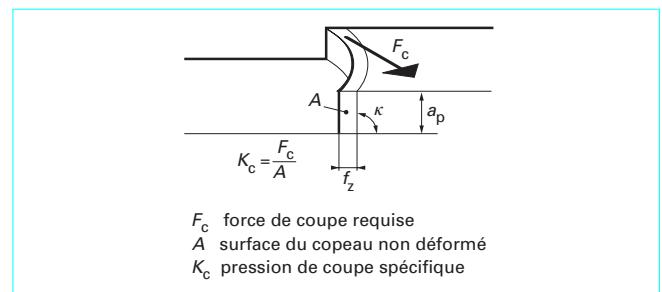
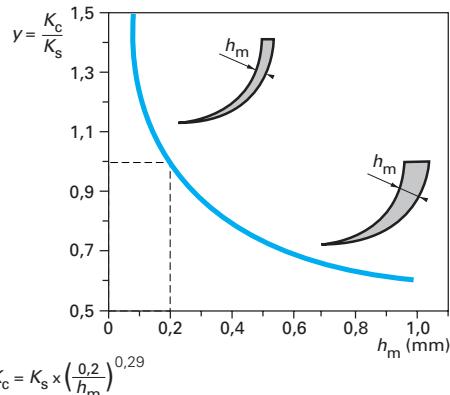


Figure 19 – Pression de coupe spécifique

Tableau 3 – Facteur de correction de K_c pour angles de coupe

Angle de coupe	Facteur de correction X
- 7°	1,000
- 6°	0,935
- 5°	0,970
- 4°	0,955
- 3°	0,940
- 2°	0,925
- 1°	0,910
0°	0,895
+ 1°	0,880
+ 2°	0,865
+ 3°	0,850
+ 4°	0,835



Ce diagramme définit l'évolution avec l'épaisseur moyenne de copeau h_m (exprimée en mm) de la pression spécifique de coupe K_c rapportée à sa valeur K_s pour $h_m = 0,2$ mm

Figure 20 – Diagramme donnant le facteur de correction y en fonction de l'épaisseur du copeau

4.2 Puissance nécessaire pour le fraisage

En fraisage, un certain nombre de variables viennent affecter la quantité de puissance nécessaire pour l'opération concernée. Considérons ainsi la différence entre l'ébauche lourde d'acier avec une fraise à surfer et la finition de fonte avec une géométrie d'outil et un diamètre de fraise totalement différents. Il existe différentes façons compliquées de calculer la puissance absorbée pour différentes opérations de fraisage, mais il existe également des formules approximatives qui prennent uniquement certains facteurs directs en considération.

Fondamentalement, la puissance nécessaire varie en fonction de la quantité de métal enlevée, de l'épaisseur moyenne des copeaux, de la géométrie de la fraise, de la matière de la pièce et de la vitesse.

Il apparaît évident que, pour enlever plus de métal, il faut plus de puissance. Cependant, il existe des manières plus ou moins efficaces de mener à bien l'opération. Comme nous l'avons vu, des copeaux épais permettent une meilleure utilisation de la puissance consommée que des copeaux minces.

Un certain nombre d'inconvénients sont liés à l'obtention de copeaux minces, surtout si leur épaisseur est nulle au début de la coupe. L'effet de galetage de la fraise sur la pièce donne naissance à une déformation plastique consommatrice d'énergie et à des forces qui tendent à écarter l'outil de la pièce. Avec des copeaux épais, par contre, l'usinage est efficace dès le début, les forces impliquées sont moindres et la puissance disponible est mieux utilisée.

Le taux d'enlèvement de matière Q est le volume de métal enlevé par unité de temps, c'est-à-dire la profondeur et la largeur de coupe multipliées par l'avance par minute (cf. § 1.2). La puissance P est alors calculée en multipliant le taux d'enlèvement de matière par la pression de coupe spécifique qui, comme nous l'avons vu, fait intervenir certains critères importants sur le plan de la matière, de la géométrie d'outil, de l'épaisseur de copeau, etc. Pour obtenir le résultat correct, ce facteur doit être divisé par une

certaine valeur et il faut également tenir compte du rendement η de la machine :

$$P = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times K_c}{6 \times 10^7 \times \eta} \text{ (kW)}$$

Ce rendement varie selon l'état et la conception de la machine. Il correspond au pourcentage de la puissance du moteur effectivement utilisable au niveau de l'outil monté sur la broche. Il peut se situer à n'importe quelle valeur comprise entre 0,5 et 0,9. Il convient d'essayer de déterminer une valeur approximative ou, à défaut, d'adopter la valeur courante 0,8.

4.3 Facteurs influant sur la puissance

Entre autres facteurs influant sur la consommation de puissance figure l'**angle d'attaque de la fraise**. Les valeurs indiquées pour la pression de coupe spécifique s'entendent avec angle d'attaque de 90° lorsque la force de coupe tangentielle au niveau du trait de coupe est faible. La grandeur de cette force, qui dépend de l'angle d'attaque, influe sur la puissance nécessaire pour l'opération considérée.

Un angle d'attaque de 45° augmente la force de coupe tangentielle si bien que la consommation de puissance peut être supérieure de 10 % par rapport à une fraise à 90°, les chiffres correspondants étant d'environ 1,5 % pour un angle de 75° et 4 % pour un angle de 60° (tableau 4).

Tableau 4 – Puissance consommée suivant l'angle d'attaque κ

Angle d'attaque κ (°)	Augmentation de puissance (%)
90	1
75	1,5
60	4
45	10

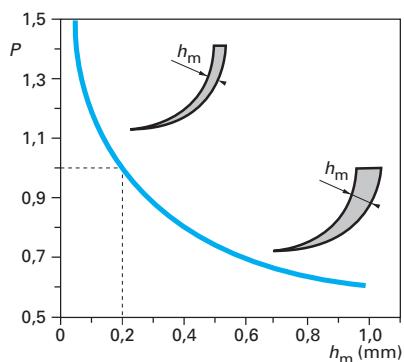


Figure 21 – Diagramme représentatif de l'augmentation de puissance nécessaire en fonction de l'épaisseur moyenne du copeau

- D'un autre côté, l'**angle d'attaque** de 90° entraîne une charge sur l'arête de coupe égale à l'avance par dent. Pour un plus petit angle d'attaque, cette charge est proportionnelle à la valeur de l'angle. Un angle d'attaque de 45° produit des copeaux plus minces, tandis que la charge subie par les dents est d'environ 70 % de ce qu'elle est pour un angle de 90° . Les forces de coupe sont mieux équilibrées quand l'angle d'attaque est plus petit, ce qui donne un usinage plus progressif, de sorte que l'angle de 90° doit être, en règle générale, réservé au surfacage-dressage. Cela a partiellement pour but d'éviter l'effet quelque peu irrégulier exercé sur le processus de coupe, mais aussi de permettre d'utiliser de plus grands rayons de becs pour une meilleure résistance et pour éviter l'écaillage de la pièce en fin de coupe, comme dans la fonte par exemple.

- Le **trajet d'évacuation des copeaux** n'est pas aussi favorable lorsque l'angle d'attaque est important et la broche de la machine est soumise à une charge plus élevée. En revanche, une moindre pression est exercée vers le bas sur la pièce lorsque l'on a un grand angle d'attaque.

■ **L'épaisseur moyenne des copeaux** a une influence considérable sur la puissance. Le diagramme de la figure 21 montre l'importance de cette influence avec $h_m = 0,2 \text{ mm}$ affecté d'un facteur de valeur 1.

Une épaisseur moyenne de copeau de $0,05 \text{ mm}$ entraîne alors une consommation de puissance supérieure de 1,5 fois, tandis que pour une épaisseur de $0,4 \text{ mm}$ la puissance consommée est inférieure de 0,8 fois (figure 21).

■ **L'usure de l'outil** affecte également la puissance absorbée. Une arête de coupe neuve est, bien entendu, plus efficace qu'une arête usée. Pour chaque $0,1 \text{ mm}$ d'usure en dépouille, la consommation de puissance augmente habituellement d'environ 4 % (figure 22).

■ **L'angle de coupe** influe sur la pression de coupe spécifique. Chaque degré peut faire augmenter la valeur K_c de 1 à 1,5 %. La dimension de la poche à copeaux peut également influer sur la déformation des copeaux.

4.4 Autres composantes de la force et de la puissance de fraisage

Bien que la théorie et le calcul des forces de coupe ne soient pas l'objet de ce paragraphe, un aperçu général des forces de coupe intervenant en fraisage peut être utile pour le bon déroulement de l'opération de fraisage. Ainsi, par exemple la machine est-elle suf-

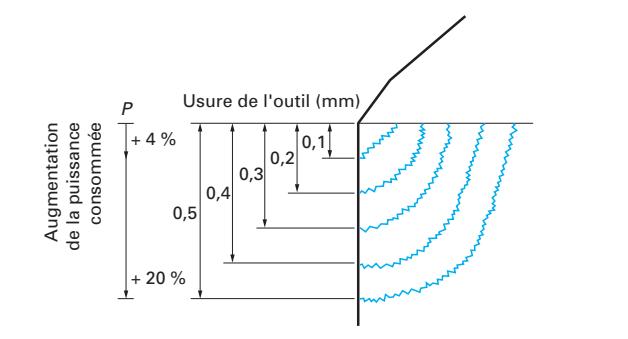


Figure 22 – Augmentation du besoin de puissance de la fraise en fonction de l'usure de l'outil en dépouille

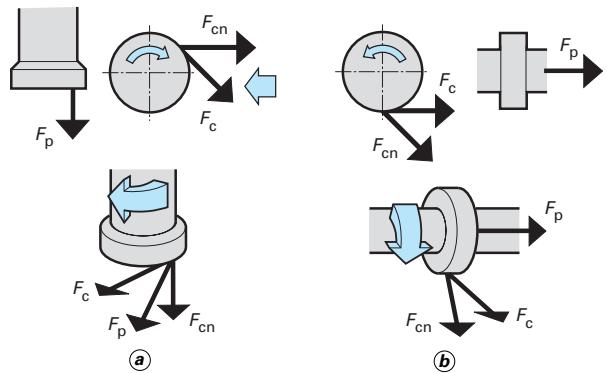


Figure 23 – Composantes de la force de coupe

fisamment puissante et la pièce est-elle solidement fixée ? La force nécessaire pour détacher un copeau est essentiellement la résultante des pressions de coupe effectives agissant contre la face de la dent et des forces de frottement s'exerçant le long de cette même face. Il convient d'observer que la direction et le rapport des forces peuvent varier considérablement selon un processus complexe en fonction de divers facteurs : type de fraisage, position d'outil, matière de la pièce, géométrie de coupe, épaisseur de copeau, degré et type d'usure de l'outil, conditions de coupe, etc. Les forces générées en fraisage sont principalement produites par les dents de la fraise au contact de la pièce. Il existe différentes manières de résoudre ces forces en composantes selon qu'il s'agit de déterminer la puissance nécessaire, l'avance ou le mode de fixation de la pièce.

■ La force de coupe est la résultante de **trois composantes** agissant dans les directions tangentielle (F_c), radiale (F_{cn}) et axiale (F_p) (figure 23). La force tangentielle, qui agit dans le sens de rotation de la fraise, est celle qui a la plus grande influence sur la consommation de puissance. Les forces radiale et axiale affectent pour leur part l'avance de la pièce et son dispositif de fixation.

La grandeur et la direction de la force tangentielle sont déterminées par la somme des forces tangentielles au niveau de chaque dent engagée. Ces différentes forces agissent dans différentes directions en cours de rotation de la fraise. Le type d'opération concerné et plus spécialement la profondeur de coupe influent sur

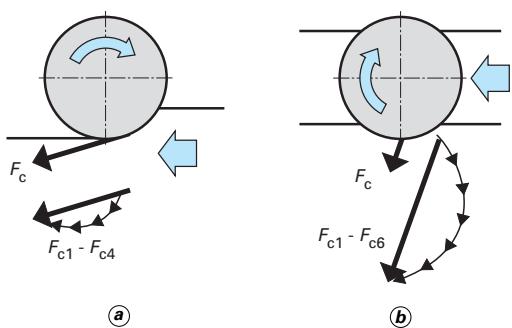


Figure 24 – Influence du type d'opération sur la force de coupe F_c

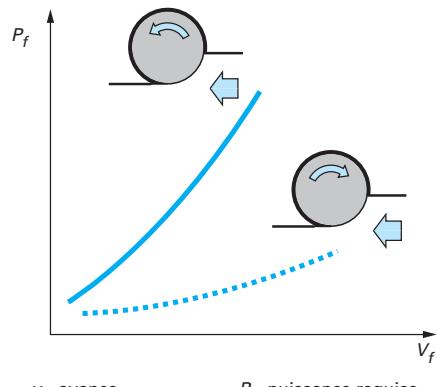


Figure 26 – Besoin de puissance d'avance nécessaire suivant le type de fraisage

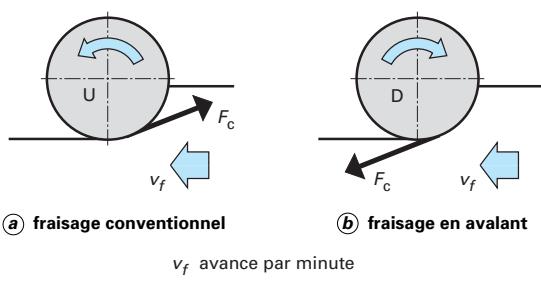


Figure 25 – Direction des forces de coupe en fraisage en opposition et en fraisage en avalant

leur direction et leur grandeur (figure 24). Une faible profondeur de coupe, avec un nombre réduit de dents simultanément engagées comme cela est typiquement le cas lors du fraisage d'épaulements, créera une force de coupe pratiquement dans l'alignement de la direction de l'avance (figure 24a). Si la profondeur de coupe est plus importante, ainsi que le nombre de dents engagées comme souvent en surfaçage, la force tangentielle sera alors perpendiculaire à la direction de l'avance (figure 24b). Comme on peut le voir, ces modifications ont des répercussions à la fois sur la puissance consommée et sur la fixation de la pièce.

En ce qui concerne la **puissance nécessaire pour l'avance de la pièce**, celle-ci dépend de la force d'avance qui, dans le cas d'une pièce horizontale, est la combinaison des forces de coupe tangentielle et radiale. Cette force varie dans une très large mesure en fonction de la position de la fraise par rapport à la pièce (figure 25). Elle augmente en fraisage conventionnel du fait de la plus grande profondeur de coupe, dans le sens opposé à l'avance. En fraisage en avalant, par contre, cette même force agit dans la même direction que l'avance, ce qui réduit le besoin de puissance nécessaire (figure 26), mais oblige en revanche à éliminer les problèmes de jeu dans de bonnes conditions.

Les contrastes ne sont pas aussi marquants en surfaçage et ont encore moins d'importance lorsque la fraise travaille à proximité immédiate de la ligne de centre de la pièce. De manière générale, une vitesse de coupe plus élevée entraîne, compte tenu de paramètres de coupe par ailleurs inchangés, une diminution de la force tangentielle (figure 27). Cela signifie donc que la force tangentielle s'exerçant sur chaque dent augmente lorsque la vitesse de coupe diminue, facteur à prendre en compte pour éviter les ruptures d'arêtes et lorsque la fixation de la pièce n'offre pas une réelle sta-

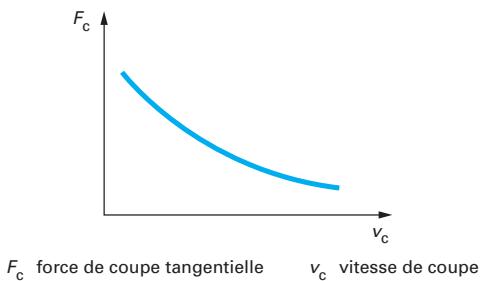


Figure 27 – Variation de la force tangentielle en fonction de la vitesse de coupe

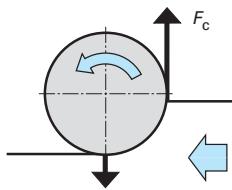
bilité. La vitesse de coupe peut être modifiée en adoptant une vitesse de rotation plus élevée de la broche ou une fraise de plus grand diamètre.

4.5 Forces de coupe et fixation de la pièce

Du point de vue de la fixation de la pièce, les forces intervenant peuvent être plus concrètement résolues en composantes verticales. Il faut tenir compte de différentes directions lors du choix du mode de fixation, étant donné que le dispositif de fixation de la pièce doit pouvoir résister aux forces auxquelles il sera soumis et assurer à cette pièce une bonne stabilité quelle que soit sa forme : barre de métal de faible section, stable, ou structure prismatique complexe manquant de rigidité.

Le fraisage, surtout dans le cas d'épaulements, affecte également ces composantes selon qu'il est conventionnel ou en avalant. En fraisage conventionnel, les forces verticales changent radicalement de direction lorsque la profondeur de coupe augmente (figure 28), tendant alors à soulever la pièce. En fraisage en avalant, il n'y a pas de inversion de direction, ce qui limite donc le besoin de certaines précautions au niveau de la fixation de la pièce.

Le profil des dents de la fraise forme une hélice définie par son angle avec l'axe de rotation de la fraise. La valeur de cet angle lors



En fraisage conventionnel, les forces verticales changent de direction lorsque la profondeur de coupe augmente

Figure 28 – Le fraisage en opposition nécessite une bonne fixation de la pièce

du fraisage d'épaulements influe aussi sur la grandeur de la force axiale qui soumet l'outil à une pression, une traction ou une flexion sur la broche susceptible d'affecter le résultat de l'usinage.

Un plus grand angle d'hélice donne naissance à une force axiale plus élevée, qui tire la fraise avec force en direction de la pièce. En rainurage, l'angle d'hélice et la direction de coupe en combinaison influent sur les forces de flexion agissant sur l'outil. Le choix doit être effectué de manière à éviter une flexion de la fraise dans le même sens que la profondeur de coupe. Il est habituellement avantageux de faire coïncider la direction de la fraise et celle de l'hélice lors du rainurage avec l'extrémité de cette fraise en contact avec la pièce. Si ce n'est pas le cas, le contact étant alors uniquement périphérique, ces directions doivent être contraires.

5. Positionnement de la fraise

5.1 Principes généraux

Comme nous l'avons vu précédemment, le début et la fin de la coupe sont des points importants au niveau de la définition de l'opération de fraisage. Il est généralement important de parvenir à un rapport correct entre la direction de l'avance, le sens de rotation et l'épaisseur de copeau quel que soit le type de fraisage. La position de la fraise par rapport à la pièce est un autre élément important. Ces facteurs doivent donc être correctement déterminés, tout spécialement en surface où la marge de manœuvre est la plus grande à cet égard.

En surface, la largeur de la pièce a une influence sur le choix de la taille de fraise.

Le contact initial entre l'arête de coupe et la pièce est un élément critique, où les facteurs déterminants sont la géométrie de coupe, la position de la fraise et sa taille (figure 29).

Le diamètre d'une fraise à surfacer doit être au moins supérieur de 25 % à la largeur de la pièce et le choix prioritaire doit être le fraisage en avalant. On choisit un engagement immédiat à pleine profondeur de coupe pour éliminer les problèmes dus à des copeaux trop épais en fin de coupe. Il est en effet toujours préférable d'avoir ici des copeaux plus minces, qui imposent de moins contraintes à l'arête de coupe.

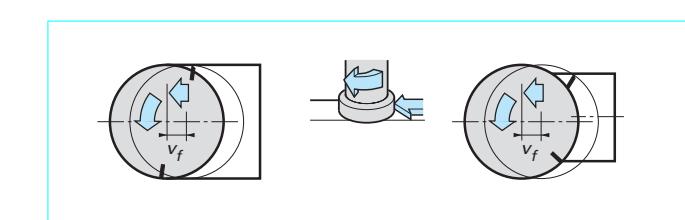


Figure 29 – Le contact initial de l'arête de coupe et de la pièce est déterminé par la géométrie, la position et la taille de la fraise

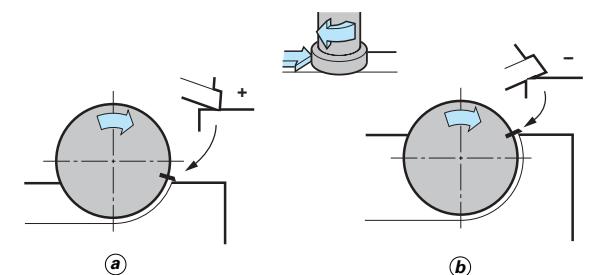
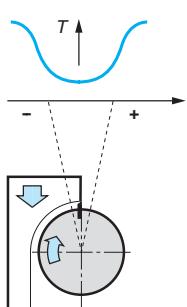


Figure 30 – Influence de la position de la fraise sur l'engagement de l'arête de coupe

5.2 Début et fin de coupe

Prenons l'exemple d'une fraise à surfacer excentrée par rapport à la ligne de coupe initiale sur la pièce (figure 30a). La coupe débute de telle sorte que l'arête de coupe extérieure la plus vulnérable est exposée au premier choc au contact de la pièce du fait de la rotation de la fraise. L'angle de pénétration est positif. Si l'outil est centré par rapport à la pièce (figure 30b), le contact initial intervient plus loin sur l'arête de coupe, où celle-ci est mieux soutenue. L'angle de pénétration est négatif et la coupe démarre dans de meilleures conditions. Toutefois, si l'arête quitte le trait de coupe à proximité immédiate de la ligne de centre de la fraise, la durée de vie d'outil s'en trouve considérablement réduite (figure 31). Une fois l'outil engagé dans la pièce, la géométrie de coupe choisie entre de toute manière en action et exécute la coupe par enlèvement de métal comme prévu. Le début et la fin de la coupe doivent être considérés séparément, tout comme l'usinage de pièces renfermant des cavités, dans lesquelles plusieurs débuts et fins de coupe interviennent. Il peut être nécessaire, dans un tel cas, de reconSIDérer le choix du pas de la fraise et de la géométrie de coupe.

La manière dont une arête de coupe s'écarte de la pièce en fin de coupe est importante. Lorsque l'arête quitte la pièce, on a un soudain relâchement des forces de coupe et il est alors essentiel d'avoir une contrainte de compression et non de traction sur cette arête (figure 32). Lorsque l'arête approche de la fin du trait de coupe, la matière restante cède, éliminant souvent le dégagement nécessaire pour la face de dépolisseuse de la plaquette, ce qui provoque donc une usure excessive. Mais il se crée aussi une force de traction momentanée sur la face de l'arête en contact avec le copeau, ce qui est défavorable ainsi que nous l'avons déjà mentionné. Cet effet est particulièrement dommageable lorsque la géométrie de coupe est négative et que la déformation de la matière à usiner intervient avec un certain retard. Visuellement, ce phénomène se traduit par une bavure sur l'arête sortante dans le cas d'acier et un écaillement de l'arête dans le cas de fonte.



T : durée de vie de l'outil
 \pm : écart du point de sortie de la fraise à la ligne du centre de la fraise (cf. figure 30)

Figure 31 – Position critique de la fraise en sortie de pièce ayant pour conséquence une réduction de la durée de vie de l'outil (T)

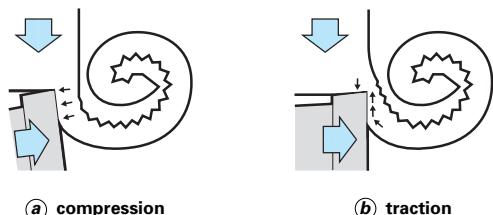


Figure 32 – Contrainte sur l'arête de coupe en sortie de pièce

L'effet de différents types de sorties de fraises a été étudié pour déterminer les positions favorables et défavorables que peut occuper la fraise par rapport à la ligne de centre au moment où l'arête quitte la pièce (figure 33).

Les angles de sortie négatifs (figure 33a) et positifs (figure 33c) sont en l'occurrence favorables, tandis que les positions proches de la ligne d'axe de la fraise (figure 33b) ou coïncidant avec cette ligne imposent des contraintes non souhaitables aux arêtes de coupe de la fraise.

Cette dernière formule a, en effet, pour conséquence que le copeau est le plus épais à l'endroit précisément où la coupe se termine.

5.3 Effet de l'excentration de la fraise

La longueur de coupe est affectée par la position de la fraise. La durée de vie de l'outil est fonction de la longueur du trajet que l'arête de coupe doit effectuer dans la pièce. C'est lorsque la fraise est centrée par rapport à la pièce que la longueur de coupe est la plus réduite, l'arc de coupe s'allongeant en effet dès que la fraise est déplacée d'un côté ou de l'autre de l'axe de la pièce (figure 34a).

Ici encore, un compromis est nécessaire pour tenir compte de l'effet des forces de coupe. La direction des forces de coupe

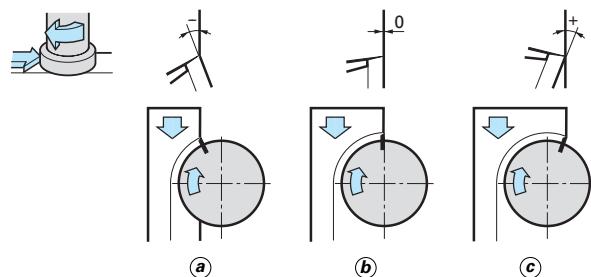


Figure 33 – Position de la fraise suivant les différents types de sorties de pièce

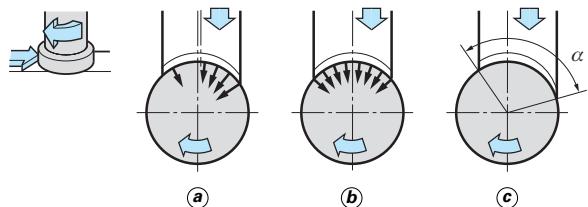


Figure 34 – Avantage de l'excentration en surfâge

radiales (figure 34b) varie selon que les arêtes de coupe entament ou terminent la coupe, et le moindre jeu au niveau de la broche de la machine peut entraîner des vibrations et des ruptures d'arêtes prématurées.

En excentrant légèrement (figure 34c) la fraise, la direction des forces est plus constante. La proximité de l'axe de la pièce a pour résultat de produire des copeaux dont l'épaisseur moyenne est la plus forte possible. Un excentrage plus marqué d'une fraise à surfacer peut se révéler une formule avantageuse du fait qu'un plus grand nombre de plaquettes sont simultanément engagées en raison de la plus grande longueur de l'arc de coupe α .

Si l'engagement radial et le porte-à-faux de la fraise sont importants, le fait de réduire le nombre de dents engagées simultanément en choisissant une fraise à grand pas peut aider à réduire la tendance aux vibrations.

6. Définition de la position de l'arête de coupe

6.1 Angles de coupe

La géométrie de coupe d'une fraise à surfacer fait intervenir plusieurs angles pour déterminer la position de la plaquette dans un espace tridimensionnel. L'angle d'attaque κ a été défini (paragraphe 2.1) comme l'angle formé entre la surface usinée par la fraise et celle générée par l'arête principale. Quatre angles

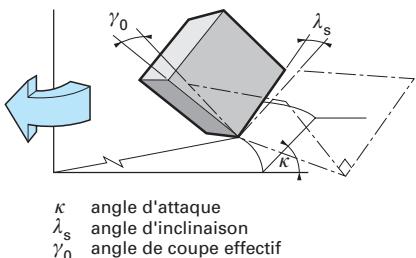


Figure 35 – Angle d'inclinaison et angle de coupe effectif

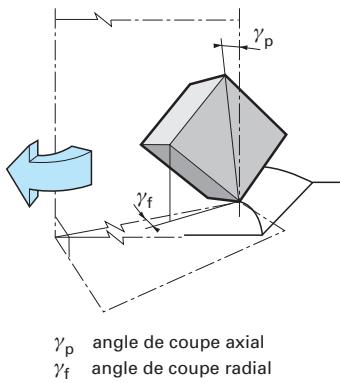


Figure 36 – Angle de coupe axial et angle de coupe radial

supplémentaires sont en outre nécessaires pour déterminer la position de la plaquette sur une fraise à surfacer (figures 35 et 36).

Deux sont des angles fonctionnels : l'**angle d'inclinaison** (λ_s) et l'**angle de coupe effectif** (γ_0). Tout comme l'angle d'attaque, ils influent fortement sur la puissance de la machine nécessaire et le trajet d'évacuation des copeaux (figure 35).

L'**angle d'inclinaison** et l'**angle d'attaque** affectent ensemble le schéma d'approche de l'arête de coupe principale, ainsi que le trajet suivi par les copeaux vers le haut, puis vers l'extérieur. À l'image de l'angle d'hélice sur les fraises périphériques, l'angle d'inclinaison joue un rôle important aux fortes profondeurs de coupe pour l'évacuation des copeaux. Il est mesuré dans un plan parallèle à l'arête de coupe principale et, du fait qu'il est positif, il diminue la force de l'impact lorsque l'arête pénètre dans le métal.

L'**angle de coupe effectif** influe sur les forces de coupe tangentielles et, par voie de conséquence, sur la puissance machine nécessaire. Un angle de coupe positif réduit le besoin de puissance, dans la proportion d'environ 1,5 % pour chaque degré positif supplémentaire. Il est mesuré dans un plan perpendiculaire à l'arête de coupe principale.

Les deux autres angles sont liés à la configuration de la fraise. Ce sont l'**angle de coupe axial** (γ_p) et l'**angle de coupe radial** (γ_f), également désignés en tant qu'angles de coupe latéral et arrière respectivement. Ces deux angles sont mesurés dans un plan parallèle, pour l'un, et perpendiculaire pour l'autre, à l'axe de rotation de l'outil (figure 36). Ces angles définissent le type de fraise et ce sont eux qui, en combinaison avec divers angles d'attaque, génèrent les angles de coupe fonctionnels requis pour différentes fraises.

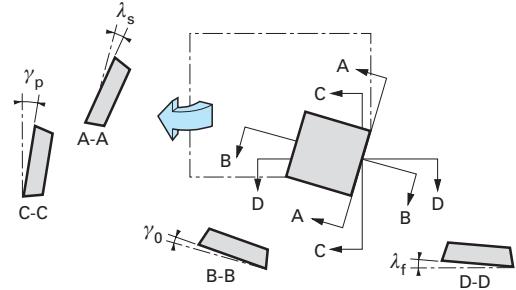


Figure 37 – Représentation des quatre angles définissant la position de la plaquette sur la fraise

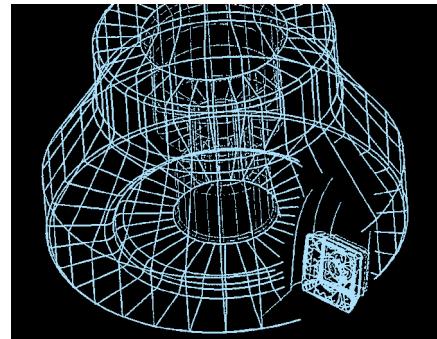


Figure 38 – Implantation d'une plaquette sur une fraise à surfacer

En conclusion, la figure 37 définit les quatre angles déterminant la position de la plaquette sur la fraise et la figure 38 représente schématiquement l'implantation d'une plaquette sur une fraise à surfacer.

6.2 Géométries de surfacage

Il existe trois principales géométries pour le surfacage : double négative, double positive et positive/négative.

En ce qui concerne la **géométrie double négative** (figure 39), les angles radial et axial sont tous deux négatifs et on utilise des plaquettes négatives (cf. § 6.3) que l'on incline pour obtenir une dépouille. Cette formule peut se révéler économique du fait que l'on se sert des deux faces des plaquettes, ce qui permet ainsi de disposer d'arêtes à la fois plus nombreuses et plus robustes.

Les fraises avec ce type de géométrie conviennent pour les matières et les conditions d'usinage caractérisées par de fortes contraintes par choc, comme pour l'usinage d'acières durs et de fontes, et dans les cas où la tenue des paliers axiaux de la machine laisse à désirer.

Cette géométrie exige énormément de puissance et de stabilité en raison des importantes forces de coupe impliquées. La forte épaisseur des copeaux obtenus sur la longue surface de contact de

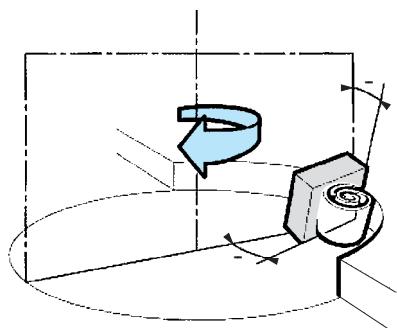


Figure 39 – Géométrie double négative



Figure 41 – Fraise à rainurer à bout sphérique travaillant dans plusieurs directions avec des plaquettes à géométrie positive

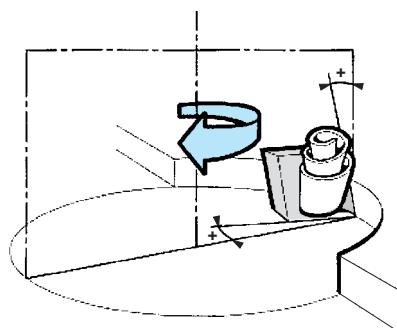


Figure 40 – Géométrie double positive

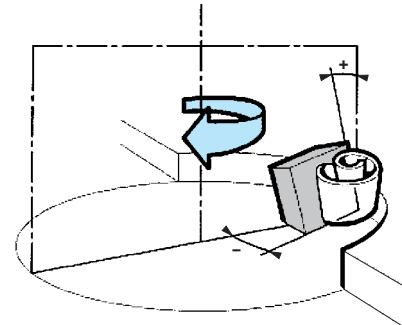


Figure 42 – Géométrie positive/négative

l'arête, lors de l'usinage de matières à copeaux longs, a souvent pour conséquence une formation de copeaux à la fois excessive et défavorable. Les matières douces et ductiles formant des copeaux de grande longueur peuvent provoquer un bourrage de ces copeaux car ils ont tendance à s'enrouler dans les poches à copeaux.

Dans le cas de la **géométrie double positive** (figure 40), les angles radial et axial sont l'un et l'autre positifs, et il est alors nécessaire d'utiliser des plaquettes positives non réversibles (figure 41). Les fraises à géométrie double positive ont une meilleure efficacité que celles à géométrie double négative. L'épaisseur des copeaux et la longueur de contact des plaquettes diminuent. Les forces de coupe sont moindres, la puissance machine et la résistance d'arête nécessaires sont inférieures à celles requises pour le même travail dans le cas d'une géométrie double négative.

Le schéma de formation des copeaux est favorable car ceux-ci sont en spirale et faciles à évacuer des poches à copeaux. Dans de nombreux cas, lors de l'usinage d'aluminium, d'acières ductiles et de certains aciers inoxydables ou réfractaires ayant tendance à la formation d'arêtes rapportées, les fraises à géométrie double positive peuvent être l'unique solution.

Cette même géométrie est également avantageuse lorsque la pièce usinée est fragile, instable ou a tendance à l'écrasement, ou lorsque la puissance machine disponible est limitée.

La **géométrie positive/négative** (figure 42) est caractérisée par un angle axial positif et un angle radial négatif. La puissance absorbée de ces fraises est supérieure par rapport à la géométrie double

positive, mais légèrement inférieure comparativement à la géométrie double négative. Cette géométrie permet des vitesses d'usinage élevées sous de fortes avances et avec de grandes profondeurs de coupe, car l'angle de coupe radial négatif renforce la résistance de la plaquette, tandis que l'angle positif facilite la formation des copeaux en les dirigeant à l'opposé de la fraise.

La géométrie positive/négative présente un net avantage avec de grandes profondeurs de coupe. Elle permet d'obtenir une fraise universelle performante qui, lorsqu'elle est utilisée avec un angle d'attaque de 45°, est capable de prendre en charge des matières difficiles même dans des conditions défavorables. Ce type de géométrie est également approprié pour les grandes longueurs de coupe comme cela est le cas avec les fraises à rainurer, étant donné que la forme en spirale des copeaux en facilite l'évacuation hors des poches à copeaux.

6.3 Plaquettes de fraisage

Diverses formes et tailles de plaquettes indexables sont utilisées sur les différents types de fraises en carbure (figure 43). Ce n'est que dans une époque récente que la géométrie des plaquettes de fraisage a commencé à influer sur celle des outils. Cette dernière est déterminée dans une large mesure par le mode de fixation de la plaquette sur la fraise, la **forme de la plaquette** influant ici sur la résistance de l'arête de coupe, le nombre d'arêtes disponibles, la précision du fini de surface et, jusqu'à un certain point, la forme de la pièce.



Figure 43 – Position des plaquettes sur la fraise

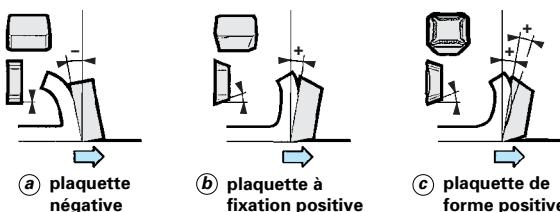


Figure 44 – Types de plaquettes de fraisage

En ce qui concerne les plaquettes, il en existe actuellement **trois types de base**. Les deux premiers sont les plaquettes négatives (figure 44a), de forte section carrée, pour les fraises négatives, et les plaquettes à fixation positive (figure 44b), que leur dépouille permet d'utiliser sur des fraises positives.

Quant au troisième type (figure 44c), il représente un tout nouveau développement dans le domaine du fraisage. Il s'agit en fait d'une géométrie positive additionnelle, intégrée à une plaquette à fixation positive. L'angle de coupe effectif a été augmenté grâce au profil ondulé de l'arête de coupe munie d'un bossage brise-coapeaux. La forme sinusoïdale de la face d'attache de certaines plaquettes réduit le contact entre les coopeaux et la plaquette. Ces plaquettes coupent plus facilement et requièrent moins de puissance, tandis qu'une combinaison correcte de chanfreins et de transitions progressives contribue à leur conférer une bonne résistance.

La résistance d'une plaquette est également affectée par son épaisseur et les **modifications qu'elle a subies sous forme de rayons, de chanfreins et de biseaux**. Certaines plaquettes subissent par ailleurs divers traitements en vue d'améliorer la structure de surface obtenue.

Une plaquette peut être munie d'un rayon de bec r (figure 45). Cet arrondi augmente la résistance de la pointe et assure une répartition plus régulière de la chaleur et de l'usure au niveau de la partie la plus vulnérable de l'outil. Le principal inconvénient, toutefois, est l'impossibilité d'obtenir un bon état de surface. C'est donc là qu'intervient le **biseau plan** (A sur la figure 45), qui a la forme d'une arête rectiligne parallèle au plan de rotation de la fraise. Ce biseau plan améliore considérablement l'état de surface de la pièce, aussi de très nombreuses plaquettes en sont-elles munies.

Les transitions brusques inhérentes au biseau plan en direction de l'arête de coupe peuvent cependant rendre cette arête moins

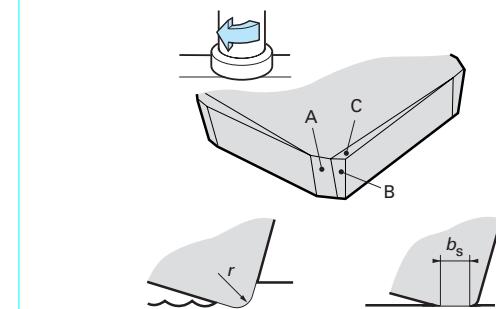


Figure 45 – Rayon, chanfrein et biseau d'une plaquette

résistante que dans le cas d'un rayon de bec. C'est pour cette raison que des **chanfreins** (B sur la figure 45) sont ménagés au niveau des pointes, sous forme de méplats obliques entre le biseau plan et l'arête de coupe la plus proche.

Le chanfrein négatif (C sur la figure 45) a pour effet de renforcer l'arête de coupe. On se sert fréquemment de chanfreins négatifs sur les plaquettes de fraisage et ceux-ci sont particulièrement utiles pour l'usinage d'acier car ils renforcent la résistance des arêtes aux contraintes par choc. Il se peut cependant que ces biseaux exigent un surplus de puissance et doivent, par ailleurs, être configurés en fonction exactement de l'application concernée. Les biseaux négatifs ne sont pas aussi importants pour le fraisage de fonte, où un rodage de l'arête est souvent la formule appropriée. Les matières telles que les alliages d'aluminium exigent des arêtes de coupe extrêmement tranchantes, aussi une préparation consistant au moins à vérifier le fil de l'arête est-elle nécessaire. Le type de préparation d'arête et son étendue sont en partie liés à la dimension de l'angle de coupe souhaitable pour la matière à usiner.

Lorsque les impératifs en matière d'**état de surface** sont élevés et surtout dans le cas de fortes avances, la solution du biseau plan peut ne pas être un moyen suffisant pour obtenir une surface satisfaisante. Une fraise étant constituée de plusieurs arêtes de coupe, il est nécessaire, pour obtenir un bon état de surface, que les biseaux plans des arêtes soient réglés avec une extrême précision les uns par rapport aux autres dans le plan axial. La surface usinée est générée par les biseaux plans les plus bas et, pour les régler avec une précision suffisante pour obtenir une excellente qualité de surface, il faut, soit procéder à des réglages longs et fastidieux, soit meuler la fraise sur sa face axiale. Pour des raisons à la fois de temps et de coût, aucune de ces deux solutions n'est toutefois à retenir.

Compte tenu de la plus grande précision des fraises modernes, une autre solution consiste à recourir à des plaquettes de planage, qui présentent une bien plus grande longueur de plat b_s (figure 46). Ce plat, situé juste au-dessus des autres plaquettes, munies de biseaux plans, lisse la surface, faisant ainsi office d'arête de finition (cf. figure 46).

La longueur du plat est calculée de manière à correspondre à l'avance par tour. Les plaquettes de planage génèrent un bon état de surface, même lorsque les conditions d'usinage sont défavorables.

Si l'avance par tour est inférieure à la dimension du biseau plan, la surface sera générée par l'arête de coupe occupant la position la plus basse, celle des autres plaquettes étant alors sans importance.

Cela s'applique particulièrement aux fraises de petit diamètre. Sous une avance modérée, elles fourniront un bon état de surface en dépit de fortes variations de la position axiale des plaquettes.

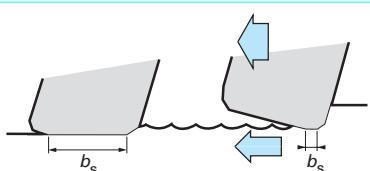


Figure 46 – Plaquette de planage

Pour obtenir le meilleur état de surface, le biseau plan doit être d'autant plus grande dimension que possible, mais en veillant cependant à éviter les excès dans ce domaine, qui provoqueraient en effet des vibrations. La tendance de la pièce à vibrer est donc l'élément limitant la largeur de biseau à adopter.

Le besoin d'augmenter le nombre d'arêtes de coupe situées dans le même plan axial évolue avec l'avance par tour. Si la dimension du biseau plan correspond à quatre fois l'avance par tour, une arête de coupe sur quatre doit se trouver dans le même plan. Les écarts par rapport à cette règle se répercuteront directement sur l'aspect de la surface. La profondeur de profil sera identique au saut axial y des arêtes de coupe générant la surface.

Les plaquettes occupant les positions les plus basses doivent être réparties sur la fraise avec une régularité suffisante pour obtenir un recouvrement correct. À défaut, une partie de la surface sera générée par les plaquettes les plus hautes, ce qui créera une plus grande profondeur de profil pour un même saut axial de la fraise. Une fraise présentant un important saut peut produire une surface de bonne qualité à condition que les arêtes de coupe les plus basses soient uniformément réparties.

6.4 Géométrie de la fraise et état de surface de la pièce

Le saut axial et la position angulaire des biseaux plans affectent grandement l'état de surface. Le saut radial des arêtes de coupe principales est de moindre importance, car il n'influe que sur l'épaisseur des copeaux. La fixation en trois points des plaquettes élimine par ailleurs les problèmes que pourrait causer une déformation de ces plaquettes.

L'utilisation de plaquettes de planage réduit en premier lieu les ondulations sur la surface usinée, ainsi que la profondeur de profil. Si l'avance par tour est supérieure à la largeur du biseau plan, la surface sera générée par deux plaquettes ou plus. L'écart axial dépendra alors de la différence entre les deux biseaux dans le plan axial.

Les ondulations de la surface sont dues au faux-rond de la fraise sur la broche, lequel peut avoir pour origine des paliers déficients, des traces de coups ou d'échauffement sur l'extrémité de la broche et/ou la surface de contact de la fraise, la présence de saleté ou de copeaux entre la broche et la fraise, ou un manque de précision de l'outil. Plus la fraise est de grand diamètre, plus ces causes ont d'effet.

Pour obtenir un bon état de surface avec une fraise de grand diamètre, il est possible d'utiliser une plaquette de planage munie d'un biseau plan surdimensionné, légèrement convexe. Une fois la plaquette en place sur le corps de fraise, ce biseau doit se trouver à environ 0,05 mm au-dessous de la plaquette la plus basse (figure 47). La plaquette de planage assure alors la finition de la surface, éliminant les ondulations et autres inégalités. La forme légèrement convexe du biseau a pour objet d'éliminer la tendance au profil en dent de scie résultant d'un défaut de parallélisme.

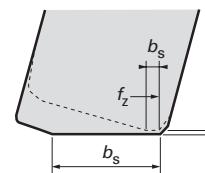


Figure 47 – Utilisation d'une plaquette de planage munie d'un biseau plan surdimensionné, légèrement convexe

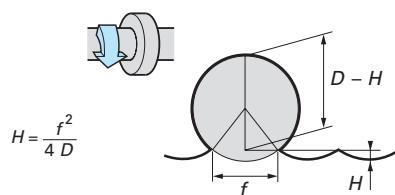


Figure 48 – Ondulations produites par une fraise circulaire

Normalement, on n'utilise qu'une seule plaquette de planage à la fois. S'il est toutefois nécessaire, dans le cas de très grandes fraises, de recourir à deux de ces plaquettes pour couvrir l'avance par tour, il peut y avoir besoin de meuler des biseaux plans sur la fraise de manière qu'ils soient à la même hauteur. Sinon, l'effet des plaquettes de planage pourrait être réduit à néant.

Des plaquettes de planage peuvent être utilisées pour obtenir de bons résultats lors de l'usinage de matières à copeaux courts. Pour l'acier, cette formule n'est pas toujours recommandée en raison des difficultés que l'on risque de rencontrer au niveau de l'évacuation des copeaux et des vibrations. Les plaquettes de planage ont un nombre limité d'arêtes de coupe, souvent une ou deux seulement, et s'usent habituellement plus vite. Si les inconvénients des plaquettes de planage se révèlent assez sérieux, il est recommandé de rechercher les causes des ondulations et autres inégalités afin d'essayer de les éliminer pour éviter d'avoir à utiliser ces plaquettes.

Si un excellent état de surface est requis, il est nécessaire, dans la plupart des cas, de s'assurer que la dimension du biseau plan ou de celui de la plaquette de planage correspond à l'avance par tour. L'avance de table v_f la plus élevée permettant de respecter ce critère peut être calculée selon la formule générale :

$$v_f < 1\,000 \frac{b_s}{\pi} \frac{v_c}{D} \text{ (en mm/min)}$$

Les fraises de type circulaire produisent une surface ondulée (figure 48) dont la hauteur des ondulations ou la profondeur de profil H est en relation géométrique avec le diamètre de fraise D et l'avance f :

$$H = \frac{f^2}{4D}$$

Quand une fraise a un faux-rond, la profondeur de profil n'est pas affectée par le nombre de plaquettes et, compte tenu de ce que l'on obtient une ondulation à chaque tour, c'est la plaquette située sur le plus grand diamètre qui déterminera le fini de surface. Cela peut être théoriquement mis en formule.

Il convient de noter qu'il n'est ici tenu compte que de considérations géométriques et qu'il ne s'agit donc pas d'une description exacte du phénomène. Le rôle essentiel du diamètre et de l'avance est toutefois souligné. Si la fraise n'a pas de faux-rond, la profondeur de profil sera considérablement moindre et subira l'influence du nombre de plaquettes.

7. Autres facteurs du fraisage

7.1 Effet de l'inclinaison de la broche

Certaines machines utilisées pour le fraisage ont une broche légèrement inclinée dans le sens de l'avance pour éviter que la fraise ne repose à plat contre la pièce à usiner (figure 49). Cette inclinaison (q), qui peut être d'environ 0,1 mm par 1 000 mm, a essentiellement pour objet d'empêcher la fraise de talonner, ce qui nuirait à l'état de surface en y laissant des marques plus ou moins profondes, dans le sens opposé à l'avance normale. Les centres d'usinage et autres machines multi-opérations ne permettent souvent pas d'incliner la broche, de sorte que le talonnage est alors habituellement inévitable. Même en inclinant correctement la broche, il peut malgré tout se produire des problèmes de talonnage dus à une flexion de celle-ci ou de la pièce. Cela peut être contrecarré :

- en améliorant la fixation de la pièce ;
- en choisissant une fraise positive pour réduire les forces de coupe ;
- en contrôlant que l'attachement de la fraise ne comporte pas de bavures et qu'il est propre et correctement aligné ;
- en réduisant les forces de coupe, soit en diminuant l'avance, la profondeur et la largeur de coupe, soit en augmentant la vitesse de coupe ;
- en choisissant un plus grand angle d'attaque pour réduire les forces axiales ;
- en réduisant au strict minimum le porte-à-faux de la broche.

En surfaçage avec broche inclinée, la surface obtenue n'est généralement pas plane. Selon le degré d'inclinaison δ , le diamètre effectif de la fraise D et la largeur du trait de coupe par rapport à l'axe de la fraise B , le résultat sera une surface plus ou moins concave. L'inclinaison est exprimée en mm par 1 000 mm et la valeur δ correspond à l'angle d'inclinaison de la broche.

L'écart f' dans le cas d'une fraise dont la position coïncide avec le centre de la pièce (figure 50) ou en est très proche peut être calculé selon la formule ci-dessous :

$$f' = \frac{q}{1\,000} \left(\frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - B^2} \right) \text{ en mm}$$

avec $q = 1\,000 \tan \delta$.

La surface fraisée, dont le profil et le fini varient, dépend de la précision de la broche de la fraise ou du mouvement axial des plaquettes, la distance entre les crêtes des ondulations correspondant souvent à l'avance par tour.

Les inégalités superficielles, qui donnent aux ondulations un aspect rugueux, peuvent avoir l'une des causes suivantes :

- mouvement axial des plaquettes ;
- usure irrégulière des plaquettes ;
- forme irrégulière des plaquettes ;
- mauvaise évacuation des copeaux ;
- nature de la matière à usiner ;
- état de la machine ;
- mode de fixation de la pièce ;
- stabilité de la pièce.

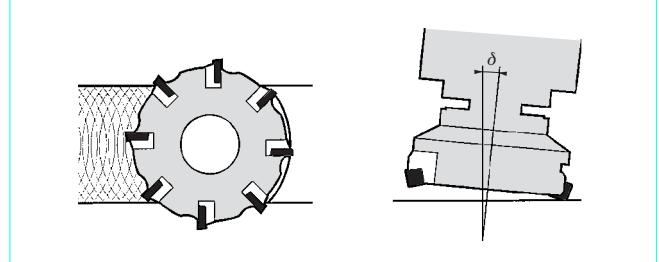


Figure 49 – Inclinaison de la broche

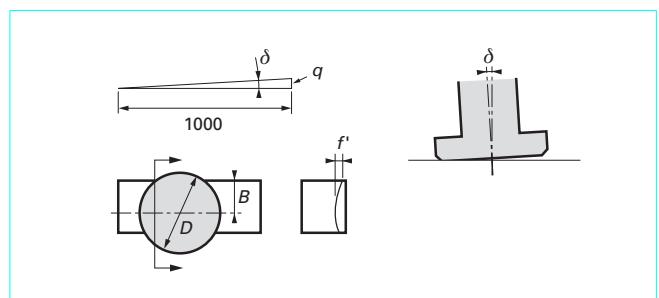


Figure 50 – Écart de surfaçage avec une broche inclinée d'un angle δ

7.2 Vibrations

L'état de la machine et sa rigidité affectent la qualité de la surface obtenue. Une usure excessive du mécanisme d'avance des paliers de la broche peut avoir pour conséquence un mauvais état de surface. Un défaut de réglage et d'entretien de la machine peut entraîner des vibrations qui raccourcissent la durée de vie de l'outil et empêchent d'obtenir un bon état de surface. Les vibrations peuvent aussi avoir d'autres origines, telles que celles mentionnées ci-dessous.

Porte-à-faux de la broche

La distance entre la pièce et la tête de la broche doit être limitée au strict minimum pour que la rigidité soit la meilleure possible. Des porte-plaquettes antivibratoires peuvent être nécessaires pour fraiser avec porte-à-faux. Les porte-à-faux supérieurs à quatre fois le diamètre peuvent permettre de multiplier la productivité par deux ou trois.

Fixation de la pièce

Pour obtenir les meilleurs résultats, la pièce doit être correctement fixée, compte tenu des forces de coupe générées par le processus d'usinage, et il convient, par ailleurs, d'éviter de travailler sur des parties de cette pièce se trouvant en porte-à-faux et non soutenues.

Outil

Choisir la fraise appropriée pour l'opération envisagée. Utiliser le diamètre correct compte tenu du rapport de largeur de la pièce. Choisir le pas adéquat, étant donné qu'un trop grand nombre de dents simultanément engagées peut exercer une pression excessive, et utiliser chaque fois que possible une fraise à géométrie positive pour réduire les forces de coupe. La position de la fraise est un élément important, qui doit reléguer au second rang les considérations touchant à la longueur de contact.

■ Avance par dent

Elle est toujours importante et doit donc être systématiquement contrôlée, surtout en présence de vibrations. Il est habituellement préférable de l'augmenter que de la diminuer.

8. Annexe : état de surface d'une pièce usinée ; aspects et facteurs principaux

Lorsque la qualité du fini de surface augmente, les coûts d'usinage en font généralement autant. C'est pourquoi il est vital de spécifier les paramètres de structure superficielle, compte tenu des exigences propres aux pièces concernées. La plupart des méthodes d'usinage laissent des traces caractéristiques à la fois visibles et mesurables sur la surface de la pièce, ce qui souligne donc la nécessité de méthodes de contrôle oculaire adaptées aux critères de conception de la pièce. Une pièce surfacée peut présenter des traces visibles bien définies, dues à l'arête de coupe, mais tout en demeurant dans les limites des critères de conception mesurables.

La technologie moderne des outils de coupe a établi une relation entre les critères conventionnels fréquemment utilisés et la structure superficielle de la pièce usinée, encore que ces critères ne soient pas particulièrement précis.

Prenons par exemple la distinction faite entre l'usinage de métaux par enlèvement de copeaux et par meulage. Les recommandations actuelles diffèrent ici considérablement de ce qu'elles étaient jadis. Les plaquettes en nitride de bore cubique, en cermet ou diamant sont beaucoup plus efficaces dans de nombreuses opérations de fraisage et de tournage. Même les pièces trempées peuvent être usinées dans de bien meilleures conditions de rendement que par meulage. Dans un grand nombre de contextes de production, la rectification finale est désormais totalement éliminée. C'est donc aujourd'hui sur la base de différentes variables que l'on adapte les opérations d'usinage aux critères de conception de chaque pièce concernée.

Non seulement le développement des outils de coupe a considérablement modifié les bases de sélection de la méthode d'usinage, mais les machines, les systèmes de commande et les équipements de mesure sont aujourd'hui d'une classe tout à fait différente. Les anciennes règles précisant combien de minutes il fallait pour obtenir une certaine structure superficielle par meulage ou tournage ne sont plus applicables.

Cela étant, l'usure, le manque de stabilité ou d'entretien et divers autres facteurs affectent le résultat final. C'est en fait la stabilité d'ensemble du système d'usinage qui compte en premier lieu pour ce qui est de garantir un fini de surface de bonne qualité et toujours le même.

Soulignons donc encore une fois que la règle numéro un en matière d'usinage de métaux par enlèvement de copeaux est et demeure une bonne **stabilité**. La structure superficielle de la pièce est, en effet, la première à pâtir de vibrations excessives.

Chaque type d'outil de coupe laisse des traces plus ou moins caractéristiques sur la surface usinée. La direction de ces traces est influencée par la méthode d'usinage adoptée.

La géométrie de la surface de la pièce peut être calculée théoriquement pour les opérations de fraisage et de tournage. Ce calcul donne une valeur approximative de ce qu'il est possible d'obtenir dans des conditions idéales, le résultat pratique étant bien entendu affecté par un certain nombre de paramètres intervenant dans le processus. De plus, la stabilité dynamique et statique du système dans son ensemble revêt une importance décisive pour la qualité de surface obtenue.

■ Principaux facteurs affectant l'outil :

- stabilité ;
- porte-à-faux ;
- géométrie de coupe ;
- matière de la pièce ;
- usure de l'outil ;
- conditions de coupe ;
- formation des copeaux ;
- température d'usinage.

■ Principaux facteurs affectant la machine :

- stabilité ;
- environnement ;
- adduction de liquide de coupe ;
- état de la machine ;
- puissance et rigidité.

■ Principaux facteurs affectant la pièce :

- stabilité ;
- qualité de la matière usinée ;
- configuration ;
- fixation ;
- état d'ébauche ;
- phases d'usinage précédentes ;
- tolérances de cotes et de forme.

Références bibliographiques

Dans le traité Génie mécanique des Techniques de l'Ingénieur

- [1] PROD'HOMME (G.). – *Commande numérique des machines-outils*. B 7 130, vol. BT2 (1996).
- [2] SACHOT (M.). – *Fraiseuses et centres d'usinage*. B 7 160, vol. BT2 (1995).
- [3] PRUVOT (F.C.). – *Machine-outil : présentation*. B 7 120, vol. BT2 (1997).