

# I

# Introduction

Ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la

[Construction mécanique](#). Les techniques d'[assemblage](#) ne font pas partie des procédés de fabrication, elles interviennent une fois que les différentes pièces ont été fabriquées.

## Obtention par enlèvement de matière

L'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées:

- [Le Tournage](#)
- [Le Fraisage](#)

## Obtention de pièce par déformation

Consiste à [déformer plastiquement](#) le matériau jusqu'à obtention de la forme désirée.

- [Estampage](#)
- [Matriçage](#)
- [Tréfilage](#)
- [Forgeage](#)
- [Hydroformage](#)
- [Laminage](#)
- [Filage](#)
- [Cintrage](#)
- [Emboutissage](#)

|

- [Frittage](#)
- [Pliage](#)
- [Extrusion](#)

# I

# Sommair

## Introduction

## I-Tournage

### 1 - Principe du tournage

1.1 - Opérations de base

1.2 - Paramètres de coupe en tournage

### 2 - Géométrie des outils de tournage

2.1 - Définitions des principaux plans et angles de l'outil (NF E 66-503)

2.2 - Angle de coupe latéral

2.3 - Angle de dépouille latéral

## II- Fraisage

### 1 - Principes de base du fraisage

1.1 - Trois opérations types

1.2 - Principales définitions cinématiques et géométriques

1.3 - Directions de fraisage

### 2 - Définition de la position de l'arête de coupe

2.1 - Angles de coupe

2.2 - Géométries de surfaçage

2.3 - Plaquettes de fraisage

|

2.4 - Géométrie de la fraise et état de surface de la pièce

3 - Autres facteurs du fraisage

3.1 - Effet de l'inclinaison de la broche

3.2 - Vibrations

4 - Annexe : état de surface d'une pièce usinée ; aspects et facteurs principaux

# I-Tournage

## 1 - Principe du tournage

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique.

La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé (figure 1).

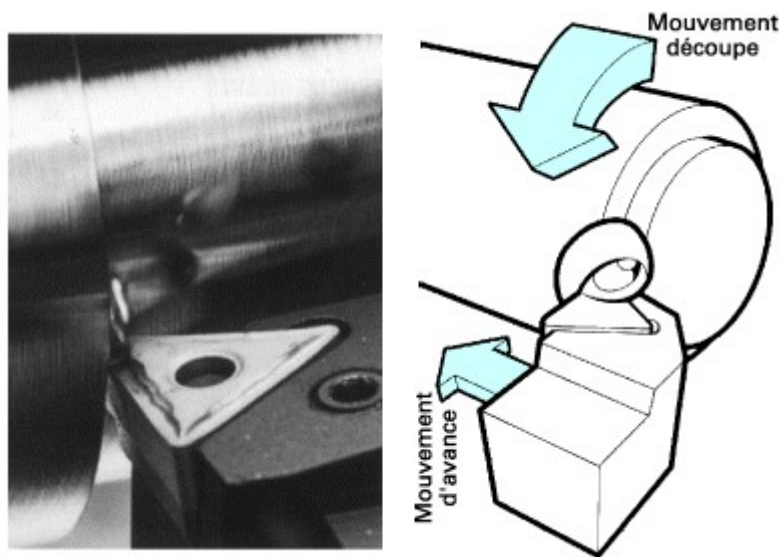


Figure 1 - Tournage avec outil à arête unique

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes).

Bien que la cinématique du procédé et les outils soient assez simples, ce procédé a fait l'objet d'une grande optimisation à cause de l'importance de ses applications.

Cette optimisation a porté sur les machines (tours CN), sur les outils (les vitesses de coupe industrielles ayant pratiquement été multipliées par 10 en 50 ans...), sur les porte-pièces, sur le chargement/déchargement qui s'est automatisé... et même sur les pièces dont les matériaux peuvent parfois être améliorés sur le plan de l'usinabilité (figures 2 et 3).

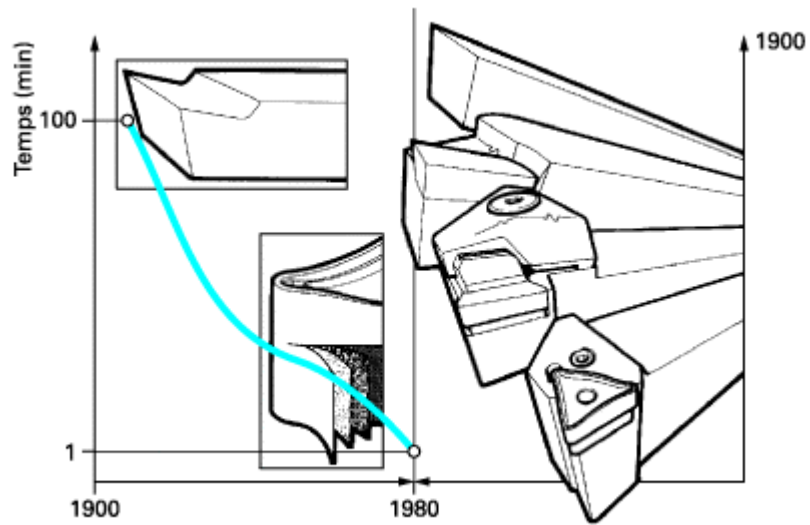


Figure 2 - - Évolution des outils et des temps de coupe

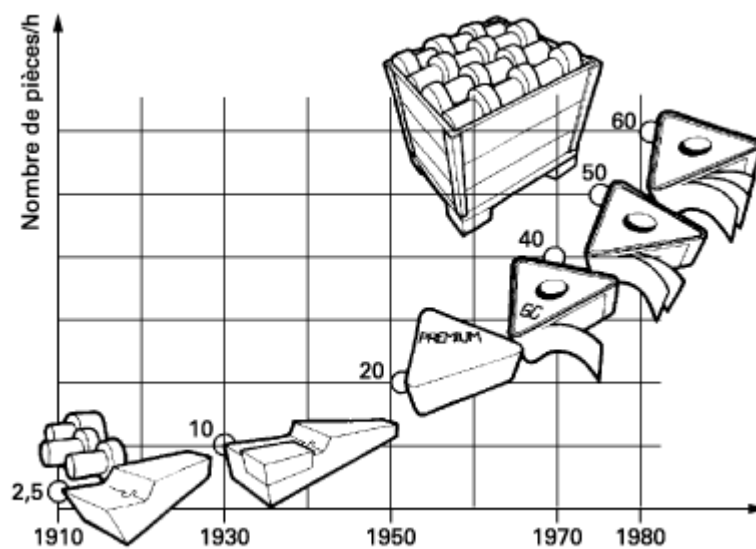


Figure 3 - - Envol de la productivité depuis le début du siècle

Une opération de tournage qui prenait 100 min en 1900 avec un outil en acier était réduite à 1 min en 1980, avec un outil en carbure revêtu

## 1.1 - Opérations de base

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, quatre opérations de base (figure 4) :

- tournage longitudinal, ou chariotage (1) ;
- dressage (2) ;
- tournage de cônes (3) ;
- contournage (4).
  - En chariotage, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.
  - En dressage, le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe (figure 5).
  - En combinant les deux types de déplacements précédents (avance de l'outil en translation rectiligne oblique/axe), on génère des cônes de révolution.
  - Enfin, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil de contournage), on peut obtenir une forme de révolution quelconque. Les tours à commandes numériques de contournage permettent de suivre de tels profils, définis géométriquement par des combinaisons d'éléments simples (segments, cercles...) ou analytiquement par une fonction, ou encore point par point dans le cas de profils non définis mathématiquement.

Le profil ainsi défini numériquement remplace le concept de gabarit de copiage.

Sur un tour CNC, les cas précédents deviennent en fait des cas particuliers du contournage (figure 6).

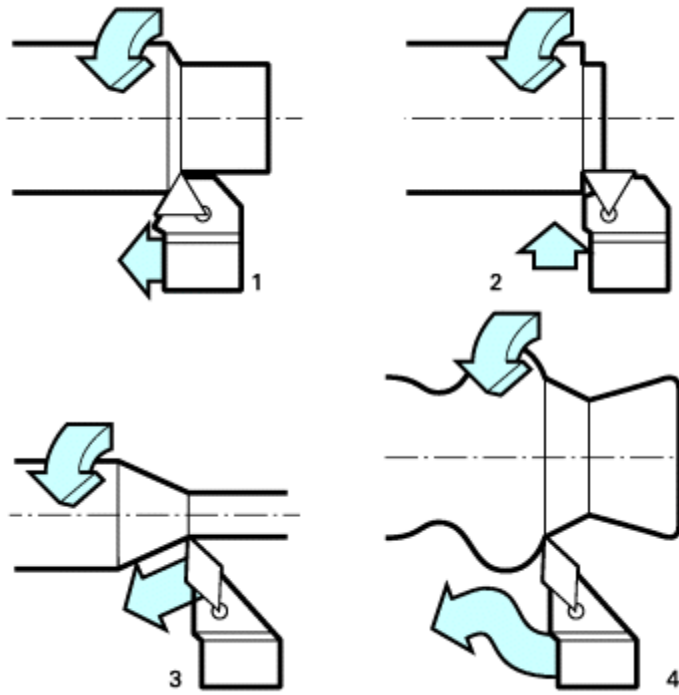


Figure 4 - Opérations de base en tournage

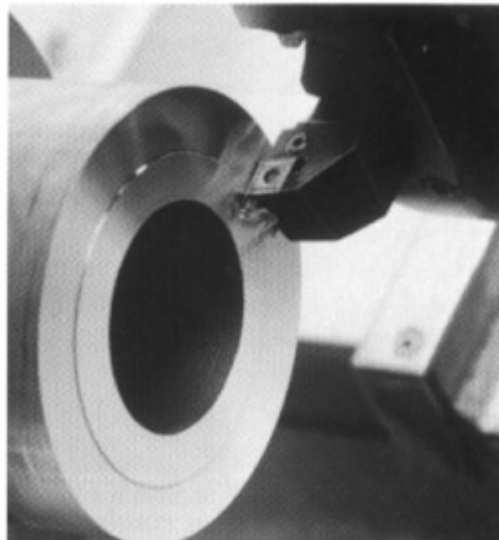


Figure 5 - Dressage d'un tube



Ces différentes opérations correspondent à un usinage dit « de génération » ou « d'enveloppe » : la forme obtenue, à l'échelle macrogéométrique, ne doit rien à la forme de l'outil qui l'a générée.

En d'autres termes, la forme obtenue dépend uniquement de la trajectoire de l'outil, à la rugosité près.

À l'opposé, les gorges, filetages, etc., sont obtenus par reproduction dans la pièce du profil de l'outil et sont qualifiés d'usinage « de forme » (figure 7) :

- a) travail d'enveloppe, chariotage (figure 7a) ;
- b) travail de forme typique : filetage (figure 7b), usinage d'une gorge (figure 7c).

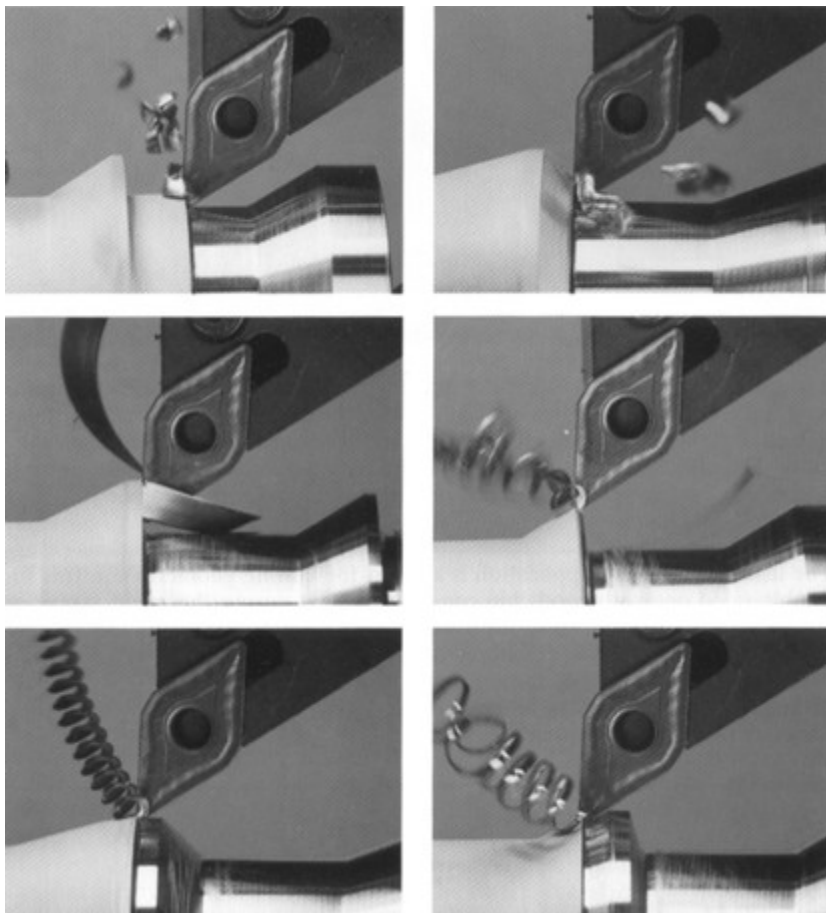
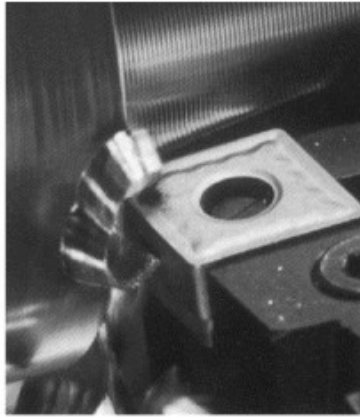
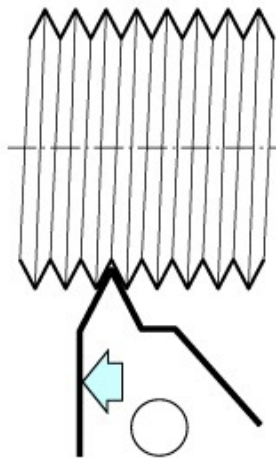


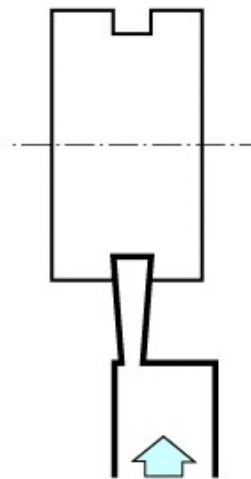
Figure 6 - Opération de contournage



**(a) travail d'enveloppe : chariotage**



**(b) travail de forme typique : filetage**



**(c) réalisation d'une gorge**

**Figure 7 - Usinage de forme**

Enfin, il existe bien sûr l'homologue de toutes ces opérations en travail intérieur de la pièce, de manière à réaliser aussi des alésages, chambrages... Si la cinématique du procédé est semblable, les corps d'outils sont radicalement différents pour des problèmes d'accès et d'encombrement. Les problèmes concrets relatifs aux usinages intérieurs (accès, encombrement, flexions d'outils, lubrification, évacuation de copeaux...) sont souvent beaucoup plus délicats que pour les usinages extérieurs.

## 1.2 - Paramètres de coupe en tournage

### 1.2.1 Vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse  $\omega$  rad/s (soit  $N$  tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce (figure 8).

Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre  $D$ , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut

$$v_c(\text{m/s}) = \frac{D}{2} (\text{m}) \times \omega (\text{rad/s})$$

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe ; soit, avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique :

$$N(\text{tr/min}) = \frac{1000 \times v_c(\text{m/min})}{\pi D(\text{mm})}$$

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante.

Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante.

Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante (figure 9).

Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment :

- des matériaux de la pièce et de l'outil ;
- de la lubrification ;
- de la durée de vie souhaitée pour l'outil ;
- des valeurs des autres paramètres de coupe (avance, profondeur de passe...).

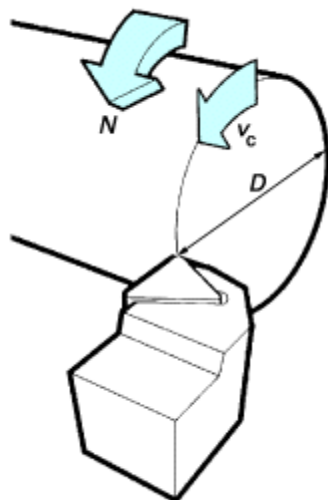


Figure 8 - Vitesse de coupe

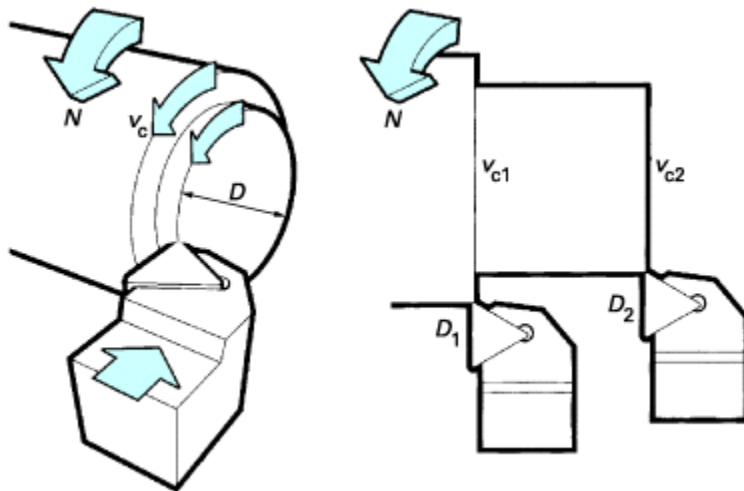


Figure 9 - Définition des trois variables : vitesse de coupe  $v_c$  , diamètre  $D$ , vitesse de rotation  $N$

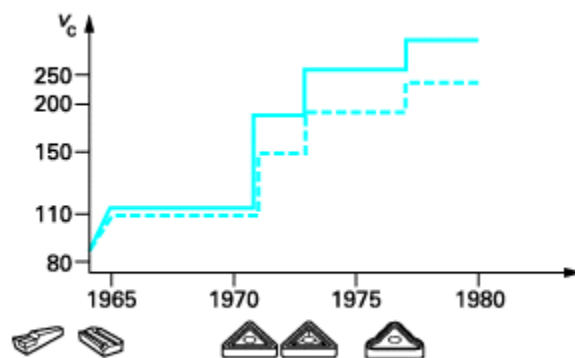


Figure 10 - Amélioration des vitesses de coupe industrielles

Les fabricants de matériaux à outils fournissent des valeurs de vitesse de coupe pour chaque type de plaquette en fonction du matériau de pièce, et ce pour une durée de vie standard de la partie active de l'outil (45 min par exemple).

La valeur numérique de  $v_c$  peut aller, à titre indicatif, de 40 m/min avec un outil en acier rapide coupant une pièce en acier à 0,3 % de carbone, à plus de 600 m/min pour la même pièce, avec un outil céramique, en passant par des valeurs courantes autour de 200 m/min pour des outils à pastille en carbure métallique (figure 10).

L'évolution de ces valeurs de vitesses de coupe en une trentaine d'années a imposé une évolution parallèle des puissances à la broche des tours, afin de pouvoir utiliser au mieux les propriétés des outils.

### 1.2.2 Vitesse d'avance $v_f$ . Avance par tour $f$

La vitesse d'avance  $v_f$  (mm/min) (figure 11) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti.

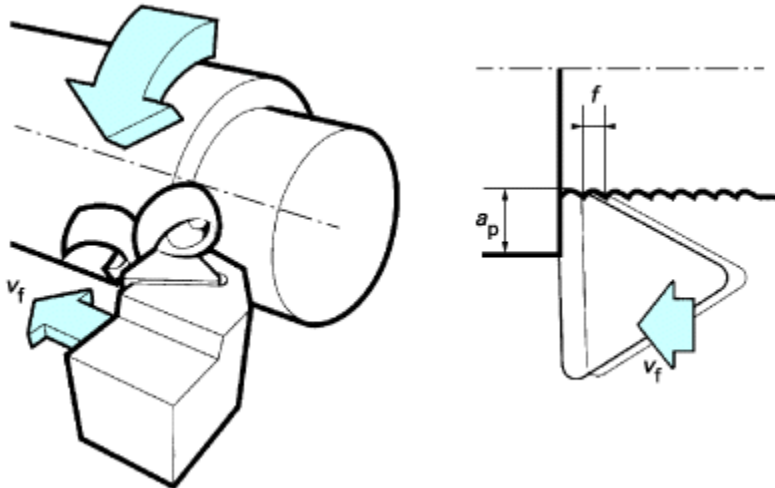


Figure 11 - Vitesse d'avance  $v_f$ . Avance par tour  $f$

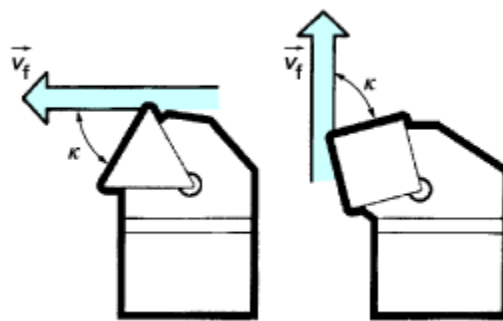


Figure 12 - L'angle de direction d'arête en travail dépend de la direction d'avance

L'avance par tour  $f$  (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée.

L'avance influence non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d'avance  $v_f$  (mm/min) est égale à  $f$  (mm)  $\times$   $N$  (tr/min).

### 1.2.3 Profondeur de coupe $a_p$

En chariotage, la profondeur de coupe  $a_p$ (mm) (figure 11) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

### 1.2.4 Angle de direction d'arête ( $\kappa$ ), ou angle d'attaque (NF E 66-502)

L'angle de direction d'arête ( $\kappa$ ) est l'angle entre l'arête de coupe et la direction de l'avance (figure 12).

- Le premier critère permettant le choix de cet angle est géométrique. Par exemple, si le même outil doit réaliser un chariotage puis un épaulement,  $\kappa$  doit être égal ou supérieur à 90. Il faut donc s'assurer de la compatibilité de cet angle avec la géométrie du profil à usiner (figure 13).
- $\kappa$  affecte également la direction des forces de coupe que l'outil exerce sur la pièce dans le plan horizontal.

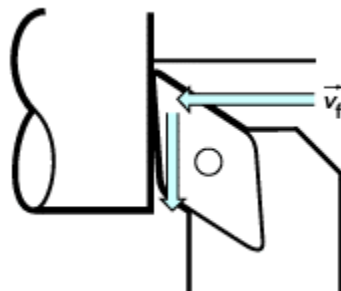


Figure 13 - Compatibilité de l'angle avec la géométrie du profil

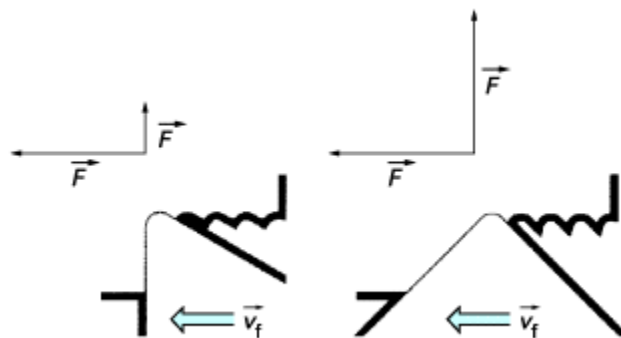


Figure 14 - L'angle ... oriente l'effort de coupe

Ci-dessus : L'angle  $\kappa$  oriente l'effort de coupe

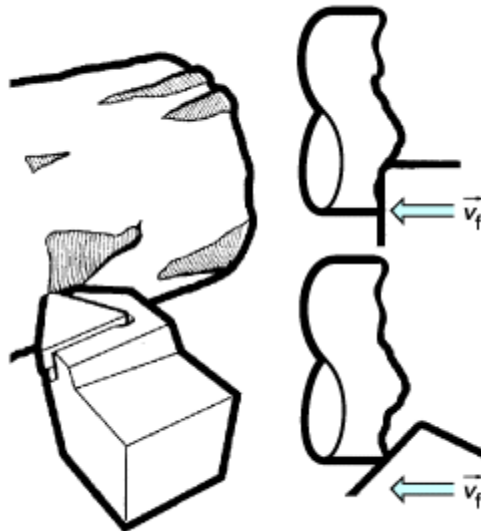


Figure 15 - Protection de la pointe

On peut considérer en première approximation que l'action de l'outil sur la pièce, dans le plan horizontal (défini par l'axe de broche et la vitesse d'avance) est normale à l'arête de coupe (figure 14).

Ainsi, en chariotage, un angle de 90° chargera la pièce axialement (en considérant les forces exercées dans le plan de déplacement de l'outil), alors qu'un angle de 45° la chargera aussi radialement : la flexion augmentera, mais la stabilité peut s'en trouver améliorée.

- Protection de la pointe : l'angle  $\kappa$  peut permettre à l'arête de coupe de pénétrer dans la pièce à une certaine distance de la pointe, c'est-à-dire dans une zone plus résistante, pouvant plus facilement absorber l'effort résultant du contact initial (figure 15).

La coupe démarre graduellement, sans impact excessif, ce qui améliore nettement le processus d'amorce de la coupe. En raison de la nature abrasive de la calamine et autres dépôts superficiels, le choix de l'angle  $\kappa$  correct est essentiel pour la durée de vie des outils. En fin de coupe également, lorsqu'une arête ayant un grand angle  $\kappa$  termine une coupe, la chute brutale de l'effort d'avance peut causer une augmentation momentanée de l'avance et de l'épaisseur de copeau. Ce surcroît de charge verticale sur l'outil peut aussi provoquer la rupture de l'arête (figure 16).



Une ébauche lourde nécessite généralement un angle d'orientation d'arête plus faible qu'une finition (figure 17).

- Direction d'évacuation des copeaux : l'angle d'attaque, en combinaison avec les autres éléments de la géométrie d'arête et la matière usinée, affecte la direction d'évacuation des copeaux au niveau de l'arête de coupe.

En règle générale, il convient de choisir un angle d'attaque de 60 à 80 pour le tournage général chaque fois que la nature de la pièce ou de l'opération l'autorise.

### 1.2.5 Largeur et épaisseur du copeau

L'épaisseur du copeau  $h$  est mesurée perpendiculairement à l'arête de coupe.

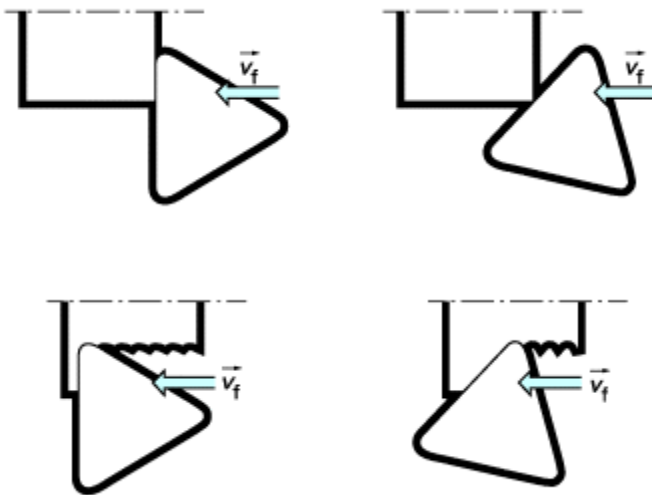
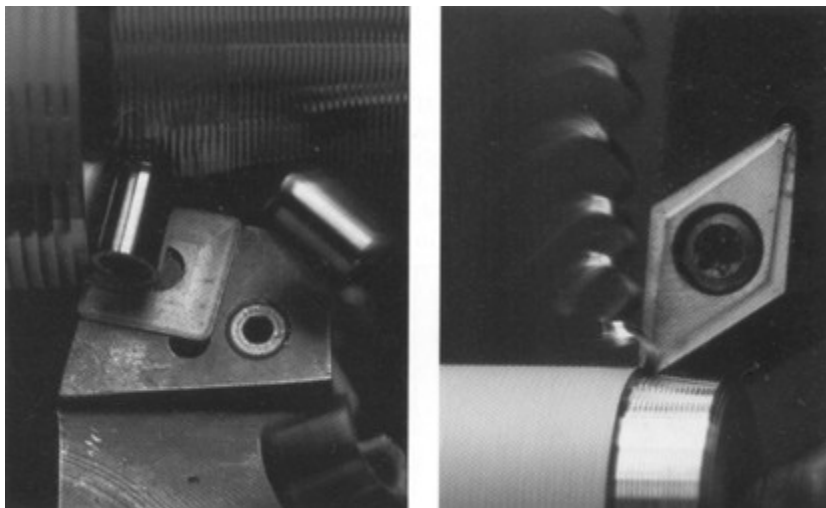


Figure 16 - Modification de la pénétration dans la pièce par l'angle d'orientation d'arête



## Figure 17 - Ébauche lourde et finitions

La largeur  $b_D$  de ce copeau est mesurée parallèlement à cette arête.

Pour une avance par tour  $f$  et une profondeur de passe  $a_p$  données, l'épaisseur et la largeur du copeau varient avec l'angle d'orientation d'arête  $\kappa$ . (figure 18).

Par ailleurs, pour de fortes passes (rayon de bec d'outil négligeable devant les autres paramètres), la section de copeau vaut approximativement :

$$AD = f \times a_p = h \times b_D$$

Pour une section de copeau enlevé, on a donc le choix, en jouant sur  $\kappa$ , entre obtenir un copeau long et mince ou plus court et épais (figure 19).

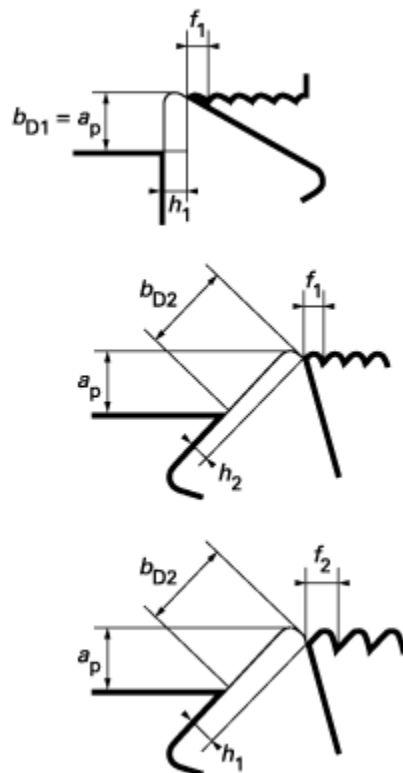


Figure 18 - Influence de ...

Ci-dessus : Influence de  $\kappa$  et de l'avance  $f$

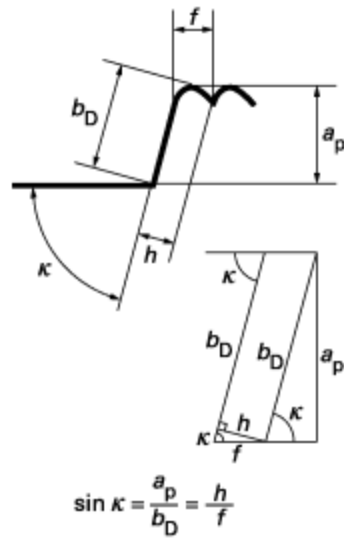


Figure 19 - Variation de l'épaisseur et de la largeur du copeau avec l'angle d'orientation d'arête...

En général, dans le cas d'un outil de tour, la profondeur de coupe doit être choisie à sa valeur maximale. On détermine ensuite une avance permettant un bon rendement et enfin la vitesse de coupe est utilisée pour optimiser l'opération d'usinage.

## 2 - Géométrie des outils de tournage

### 2.1 - Définitions des principaux plans et angles de l'outil (NF E 66-503)

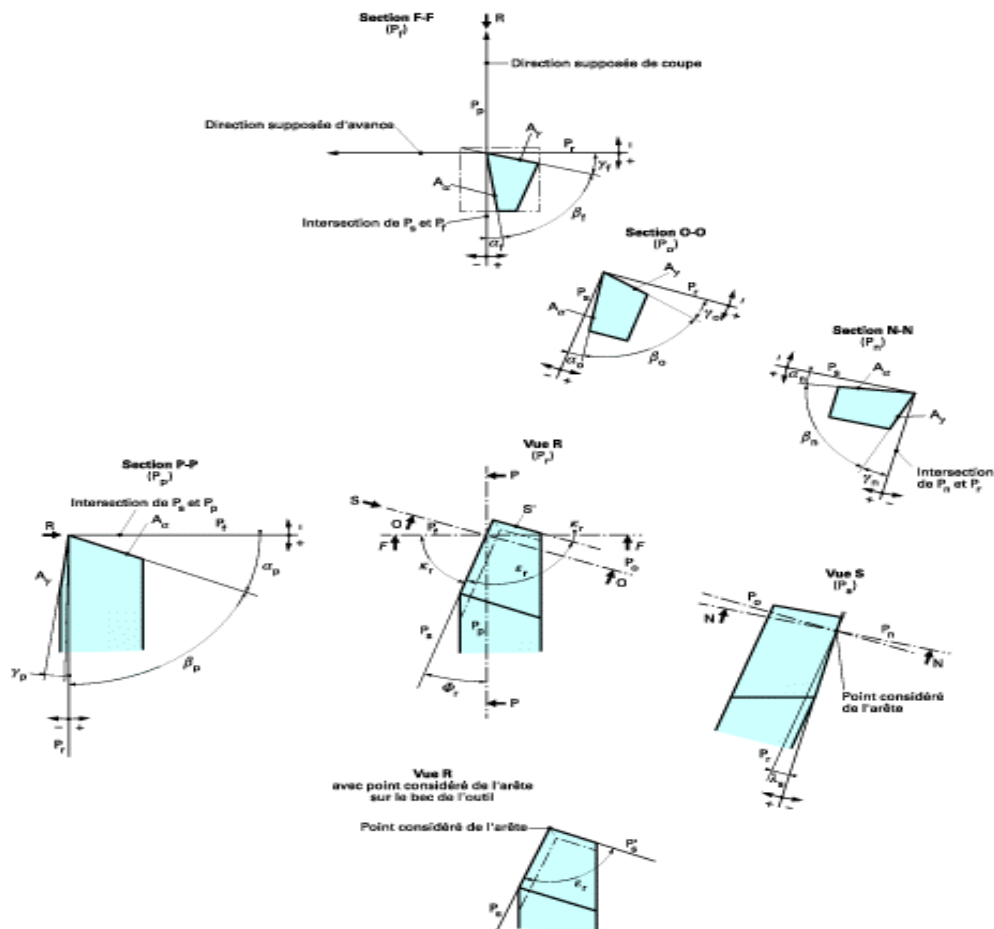


Figure 20 - Plans et angles en main sur les outils courants : outil à charioter droit (d'après NF E 66-502)

- Plans de l'outil (figure 20)
  - Plans de l'outil en main :
    - plan de référence de l'outil,  $P_r$  : plan passant par le point considéré de l'arête et contenant l'axe de l'outil (pour un outil tournant) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil (pour un outil classique) ;
    - plan d'arête de l'outil,  $P_s$  : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence de l'outil  $P_r$  ;
    - plan de travail conventionnel,  $P_f$  : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil  $P_r$ , au point considéré de l'arête, et parallèle à la « direction supposée d'avance » de l'outil ;

- plan vers l'arrière de l'outil,  $P_p$  : plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil  $P_r$  et au plan de travail conventionnel  $P_f$ , au point considéré de l'arête.
- o Plans de l'outil en travail :
  - plan de référence en travail,  $P_{re}$  : plan perpendiculaire au point considéré de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point ;
  - plan d'arête en travail,  $P_{se}$  : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire au plan de référence en travail  $P_{re}$ . Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe ;
  - plan de travail,  $P_{fe}$  : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail  $P_{re}$  ;
  - plan vers l'arrière en travail,  $P_{pe}$  : plan perpendiculaire au plan de référence en travail  $P_{re}$  et au plan de travail  $P_{fe}$ , au point considéré de l'arête.

Les plans de l'outil sont définis par rapport aux plans de référence. Pour l'outil en main, le plan de référence est défini à partir du corps de l'outil. Pour l'outil en travail, le plan de référence est défini par rapport à la cinématique de la coupe.

- Angles de l'outil (figure [20](#))
  - o Angles de l'arête (deux angles sont nécessaires) :
    - angle de direction d'arête de l'outil  $\kappa_r$  ou angle de direction d'arête en travail  $\kappa_{re}$  : angle aigu mesuré dans le plan de référence  $P_r$  ( $P_{re}$ ) entre le plan d'arête  $P_s$  ( $P_{se}$ ) et le plan de travail  $P_f$  ( $P_{fe}$ ) ;
    - angle d'inclinaison d'arête de l'outil  $\lambda_s$  ou angle d'inclinaison d'arête en travail  $\lambda_{se}$  : angle aigu mesuré dans le plan d'arête  $P_s$  ( $P_{se}$ ) entre l'arête et le plan de référence  $P_r$  ( $P_{re}$ ).
  - o Angles des faces :
    - angle de dépouille  $\alpha$  : angle aigu entre la face de dépouille  $A_\alpha$  et le plan d'arête  $P_s$  ( $P_{se}$ ) ;
    - angle de taillant  $\beta$  : angle aigu entre la face de coupe  $A_\gamma$  et la face de dépouille  $A_\alpha$  ;
    - angle de coupe  $\gamma$  : angle aigu entre la face de coupe  $A_\gamma$  et le plan de référence  $P_r$  ( $P_{re}$ ) ( $\alpha + \beta + \gamma = 90$ ).

Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section suivants :

- $P_o$  ( $P_{oe}$ ) : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence  $P_r$  ( $P_{re}$ ) et au plan d'arête  $P_s$  ( $P_{se}$ ), au point considéré de l'arête ;
- $P_n$  ( $P_{ne}$ ) : plan normal à l'arête, plan perpendiculaire à l'arête au point considéré ( $P_n = P_{ne}$ ) ;
- $P_f$  : plan de travail conventionnel (plan de travail  $P_{fe}$ ) ;
- $P_p$  : plan vers l'arrière de l'outil (plan vers l'arrière en travail  $P_{pe}$ ).

## 2.2 - Angle de coupe latéral

Cet angle est vu dans le plan latéral ( $P_f$ ) défini par la vitesse d'avance  $v_f$  et la vitesse de coupe  $v_c$  (figure 21).

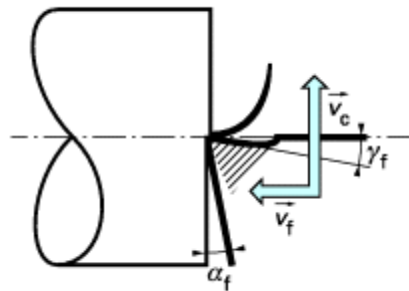


Figure 21 - Angle de coupe latéral ...

Ci-dessus : Angle de coupe latéral  $\gamma_f$

Cet angle (entre le plan de référence  $P_f$  et la face de coupe de l'outil) résulte, dans le cas des outils à plaquettes rapportées, de la géométrie de la plaquette (angle de coupe intrinsèque à la plaquette) et de l'inclinaison que lui impose le porte-plaquette.

Dans le cas des outils monoblocs (en acier rapide par exemple), la géométrie est fixée à l'affûtage.

La valeur de  $\gamma_f$  est déterminante dans le processus de formation du copeau.

Les matériaux tendres (bois, aluminium, aciers à faible résistance) se tournent avec des angles de coupe élevés (20 à 25 pour les alliages légers avec des outils en acier rapide), ce qui donne un tranchant marqué.

À l'inverse, les matériaux durs sont usinés avec des angles de coupe faibles, voire négatifs, ce qui permet de renforcer le taillant de l'outil, donc de le rendre plus résistant mécaniquement et thermiquement (figure 22).

### 2.3 - Angle de dépouille latéral

Toujours dans le plan latéral ( $\vec{v}_f, \vec{v}_c$ ), on constate qu'un angle « de dépouille »  $\alpha_f$  est nécessaire pour éviter le frottement de la face en dépouille de l'outil sur la pièce (figure 21).

Comme pour l'angle de coupe, sur les outils à pastille rapportée, l'angle de dépouille résulte de la géométrie de plaquette et de l'inclinaison conférée par le porte-plaquette. La valeur numérique de cet angle de dépouille est de l'ordre de 4°.

### 3- Systèmes de fixation de la plaquette

Il existe, dans la gamme Sandvik-Coromant, deux types principaux de systèmes de fixation de plaquettes.

- Tmax U (figure 22a) : fixation par vis centrale, plus particulièrement destinée à la finition, avec des plaquettes à géométrie positive.
- Tmax P (figure 22b) : robuste fixation par levier ou bride-coin adaptée à l'ébauche pour utilisation de plaquettes à géométrie négative.

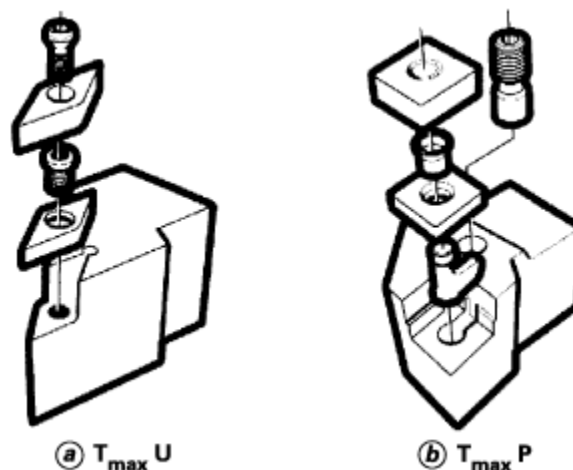


Figure 22 - Systèmes de fixation de la plaquette

#### 3.1 Dimension et type du porte-plaquette

Ce choix se fait en fonction de la direction de l'avance, la profondeur de passe, la nature de la pièce, la fixation de l'outil sur la machine et l'espace disponible. La forme de la pièce est un facteur décisif en contourage (figure 23).

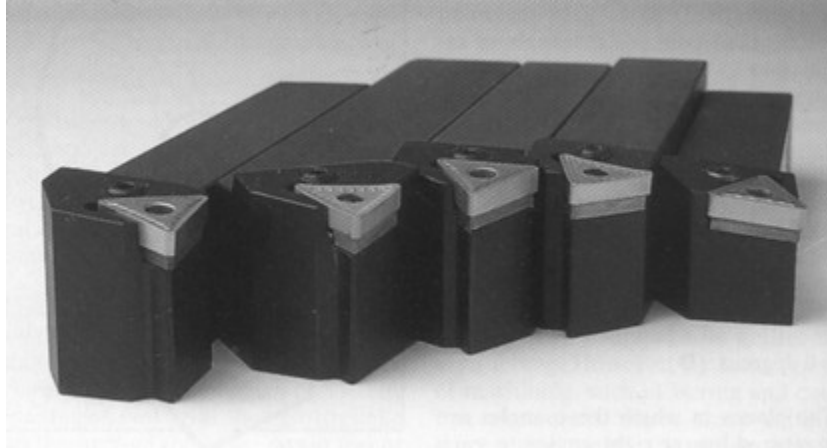


Figure 23 - Différents porte-plaquettes pour une même plaquette

Les opérations complexes peuvent être décomposées en différentes phases (figure24) :

- 1) un chariotage ;
- 2) un dressage ;
- 3) un tournage conique en plongée ;
- 4) une remontée de cône ;
- 5) une remontée d'épaulement.

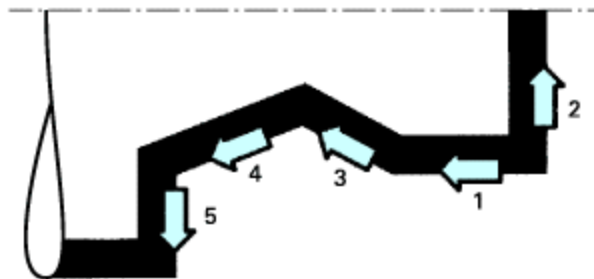


Figure 24 - Décomposition d'un usinage complexe

Les formes rondes peuvent être assimilées à des combinaisons de 3 et 4.

On cherche ensuite à trouver des combinaisons permettant de limiter le nombre d'outils tout en conservant un maximum de performances (rigidité d'outil, résistance d'arête...).



Les différents types de porte-plaquette sont définis par l'angle d'orientation d'arête et l'angle de pointe de la plaquette utilisée.

Un angle de pointe aigu donne une plus grande variété de profils usinable au détriment de la résistance du bec de l'outil (figure 38) : en a, un outil robuste, avec un grand angle de pointe, mais des possibilités limitées en contournage ; en b, un outil élancé, capable de générer des profils très variés, des formes délicates, mais avec un bec beaucoup plus fragile.

On retiendra :

- pour la section du corps d'outil, la règle générale est de choisir la plus grande dimension  $h$  compatible avec la fixation sur la machine, afin de fournir le support le plus rigide possible à l'arête de coupe (figure 39) ;
- pour l'angle d'orientation d'arête, on choisit en général le plus petit  $\kappa$  permettant les opérations envisagées (figures 40 et 41).

### 3.2 Forme et dimension de la plaquette

Il s'agit de déterminer un compromis entre résistance (grand angle de pointe) et polyvalence (petit angle de pointe).

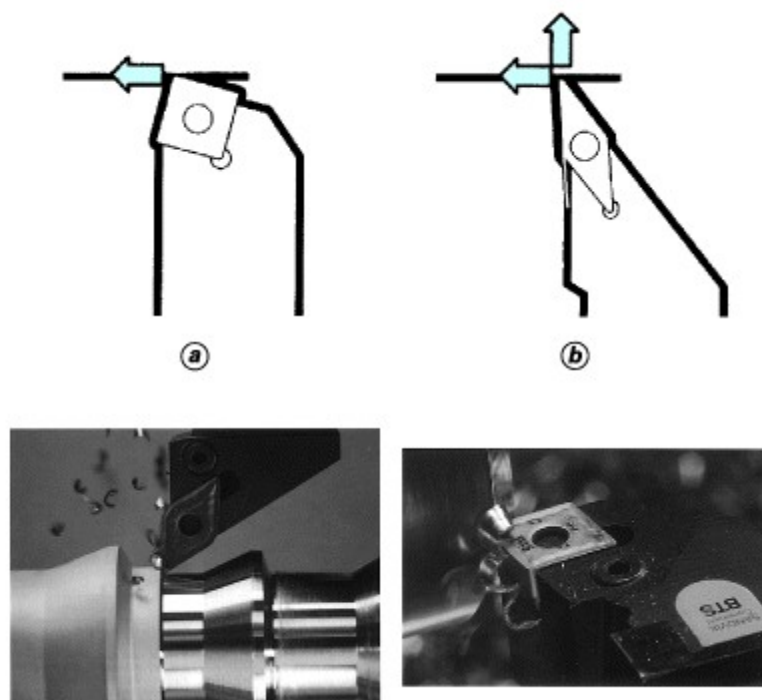


Figure 25 - Angles de pointe

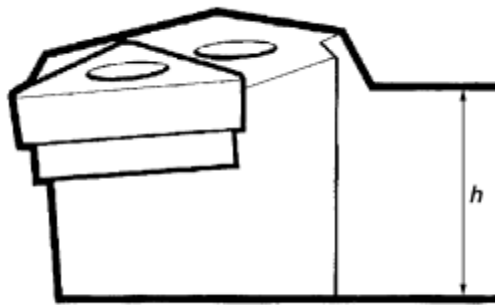


Figure 26 - Section du corps de l'outil : facteur décisif pour la rugosité

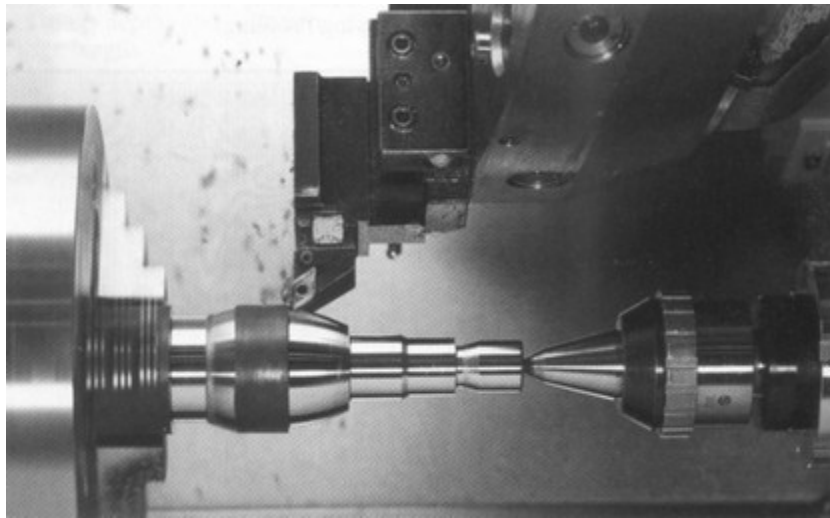


Figure 27- Outil à faible angle de pointe en action

# II- Fraisage

## 1 - Principes de base du fraisage

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 croissant grâce à l'utilisation des techniques CNC (Computerized Numerical Control).

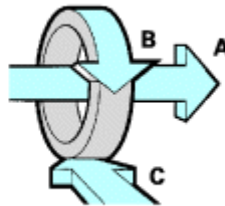
Le fraisage est en passe de devenir une méthode d'usinage de plus en plus universelle, disposant d'une gamme toujours plus étendue de machines, de systèmes de commande et d'outils de coupe. Par exemple, les centres d'usinage utilisent largement le fraisage et ont donc besoin, dans ce domaine, d'une grande 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

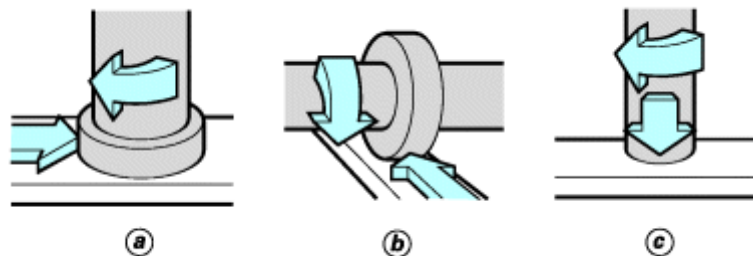
## 1.1 Trois opérations types

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.



**Figure 1 - Directions d'avance en fraisage**

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



**Figure 2 - Surfaçage, fraisage d'épaulements et fraisage axial**

- 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.
- Ces deux méthodes peuvent également être différenciées 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 perçage 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 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 ) :

$$n = \frac{v_c \times 1\,000}{\pi D}$$

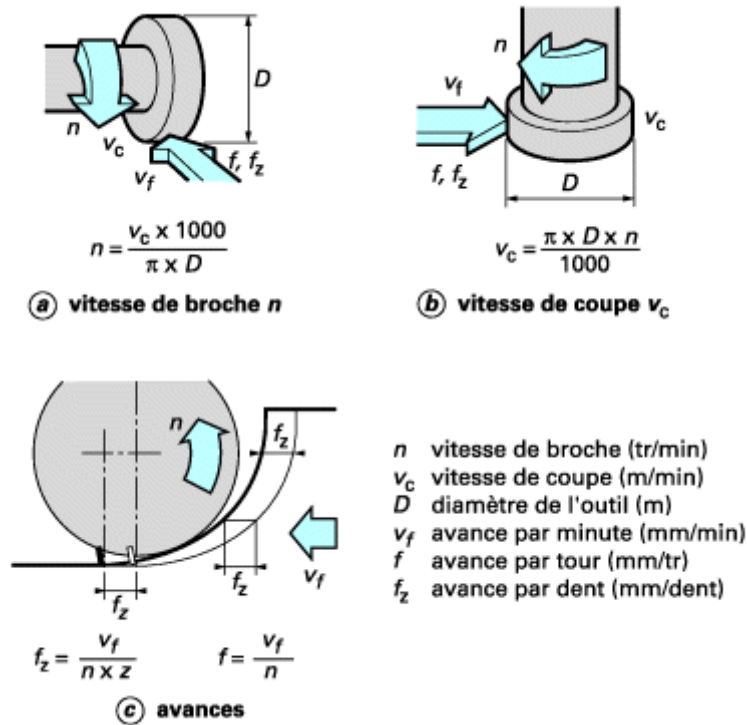
$$v_c = \frac{\pi D n}{1\,000}$$

avec :

D : diamètre de l'outil de fraisage (mm)

n : vitesse de broche (tr/min)

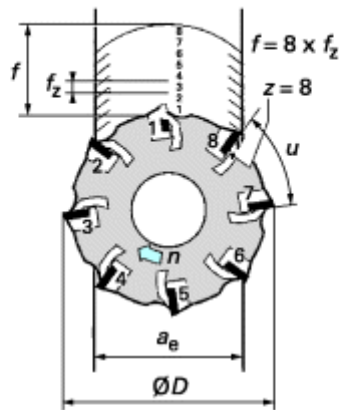
$v_c$  : vitesse de coupe (m/min).



**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).

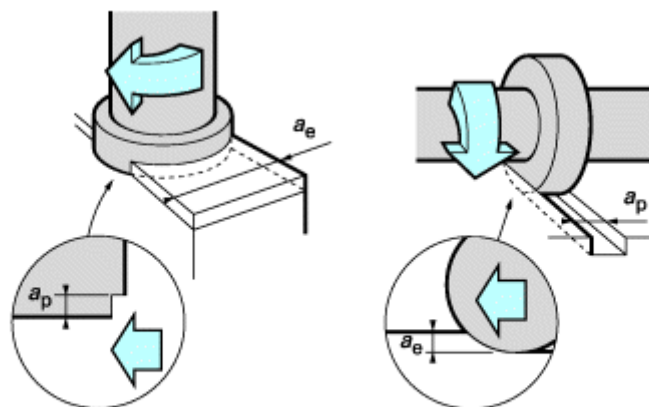


$z$  nombre d'arêtes de l'outil  
 $f$  avance par tour (mm/tr)  
 $f_z$  avance par dent (mm/dent)  
 $a_e$  largeur de coupe (mm)  
 $u$  pas de la fraise

$f_z$  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**

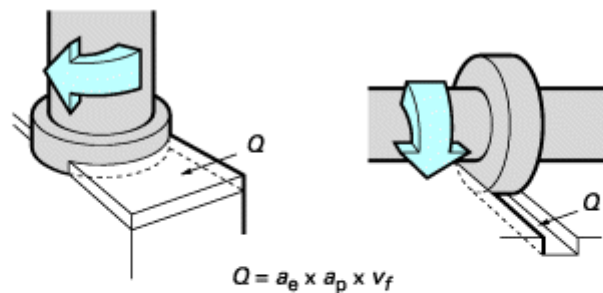
- La profondeur de coupe, axiale ( $a_p$ ) en surfaçage ou radiale ( $a_e$ ) pour le fraisage d'épaulements, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce.
- La largeur de coupe ou profondeur de coupe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



$a_e$  largeur de coupe radiale  
 $a_p$  profondeur de coupe axiale

**Figure 5 - Profondeur de coupe en surfacage (a e) et en fraisage d'épaulement (a p)**

- 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).



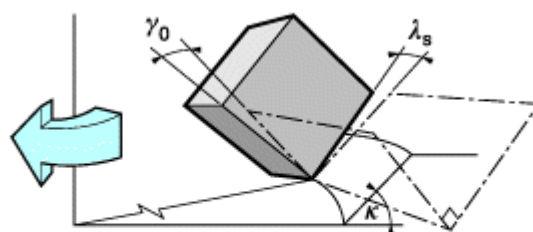
$$Q = a_e \times a_p \times v_f$$

- $a_e$  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] (mm<sup>3</sup>/min)

**Figure 6 - Volume de métal enlevé par unité de temps**

## 2 - Définition de la position de l'arête de coupe

### 2.1 Angles de coupe



- $\kappa$  angle d'attaque
- $\lambda_s$  angle d'inclinaison
- $\gamma_0$  angle de coupe effectif

**Figure 7 - Angle d'inclinaison et angle de coupe effectif**



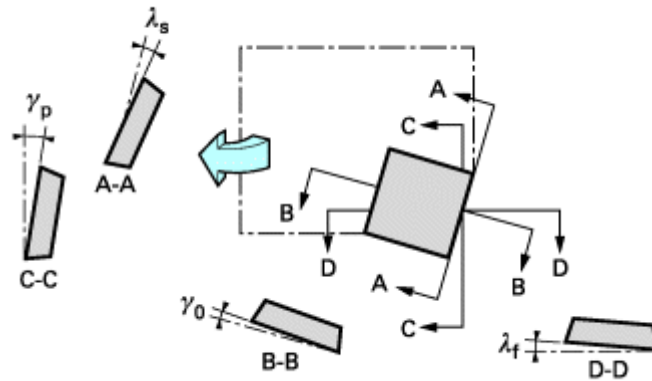
La géométrie de coupe d'une fraise à surfacer fait intervenir plusieurs angles pour déterminer la position de la plaquette dans un espace tridimensionnel. L'angle d'attaque  $\kappa$  a été défini (paragraphe 2.15) comme l'angle formé entre la surface usinée par la fraise et celle générée par l'arête de coupe principale. Quatre angles 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 ( $\lambda_s$ ) et l'angle de coupe effectif ( $\gamma_0$ ). 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).

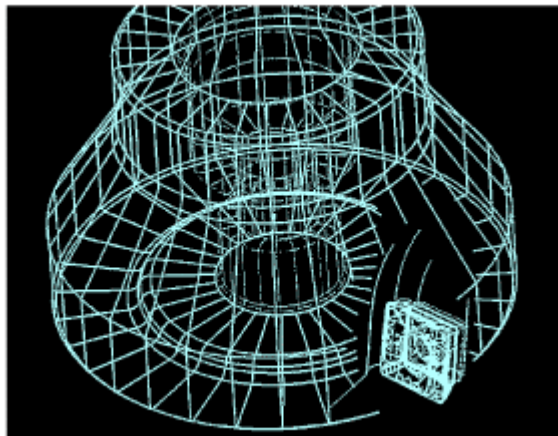
L'angle d'inclinaison et l'angle d'attaque affectent ensemble le schéma d'approche de l'arête de coupe principale, ainsi que le trajet suivi par les copeaux vers le haut, puis vers l'extérieur. À l'image de l'angle d'hélice sur les fraises périphériques, l'angle d'inclinaison joue un rôle important aux 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 ( $\gamma_p$ ) et l'angle de coupe radial ( $\gamma_f$ ), 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 8** - Représentation des quatre angles définissant la position de la plaquette sur la fraise



**Figure 9**- Implantation d'une plaquette sur une fraise à surfacer

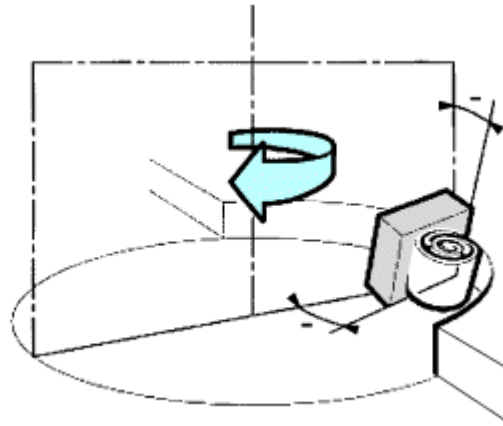
En conclusion, la figure 8 définit les quatre angles déterminant la position de la plaquette sur la fraise et la figure 9 représente schématiquement l'implantation d'une plaquette sur une fraise à surfacer.

## 2.2 Géométries de surfacage

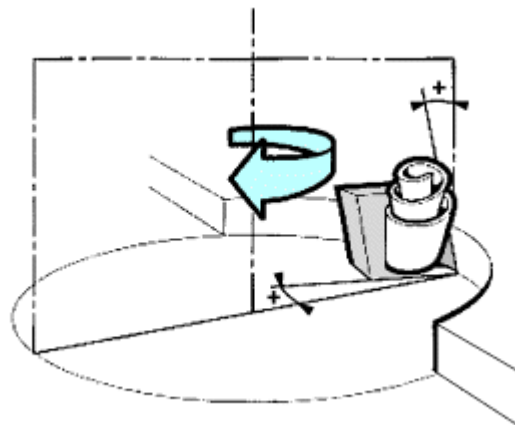
Il existe trois principales géométries pour le surfacage : double négative, double positive et positive/négative.

En ce qui concerne la géométrie double négative (figure 10), 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.



**Figure 10 - Géométrie double négative**

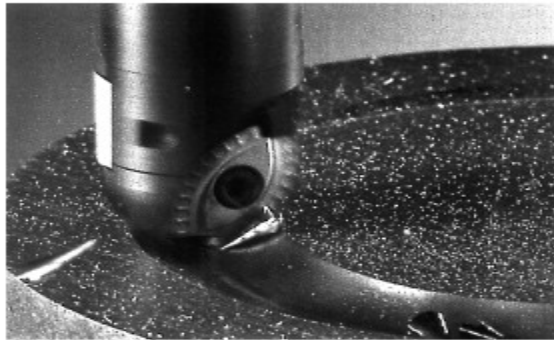


**Figure 11 - Géométrie double positive**

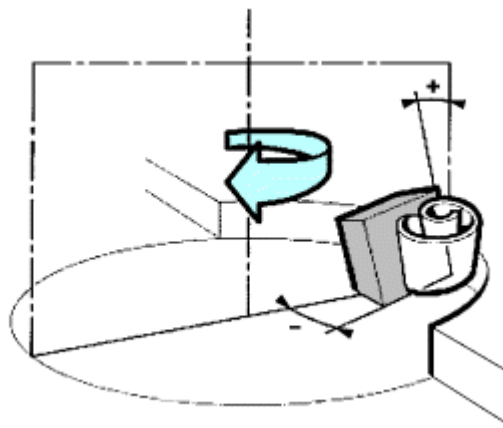
Les fraises avec ce type de géométrie conviennent pour les matières et les conditions d'usinage caractérisées par de fortes contraintes par choc, comme pour l'usinage d'aciers durs et de fontes, et dans les cas où la tenue des paliers axiaux de la machine laisse à désirer.

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 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 11), 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 12). 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.



**Figure 12** - Fraise à rainurer à bout sphérique travaillant dans plusieurs directions avec des plaquettes à géométrie positive



**Figure 13** - Géométrie positive/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'aciers 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'écrouissage, ou lorsque la puissance machine disponible est limitée.

La géométrie positive/négative (figure 13) 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 facilite l'évacuation hors des poches à copeaux.

### 2.3 Plaquettes de fraisage

Diverses formes et tailles de plaquettes indexables sont utilisées sur les différents type de fraises en carbure (figure 44). Ce n'est que dans une époque récente que la géométrie des plaquettes de fraisage a commencé à influencer 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 14 - Position des plaquettes sur la fraise**



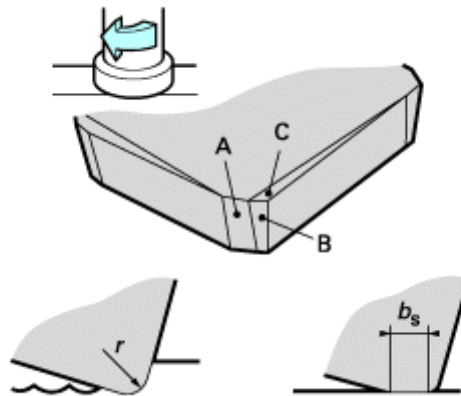
**Figure 15 - Types de plaquettes de fraisage**

- En ce qui concerne les plaquettes, il en existe actuellement trois types de base. Les deux premiers sont les plaquettes négatives (figure 15a ), de forte section carrée, pour les fraises négatives, et les plaquettes à fixation positive (figure 15b ), que leur dépouille permet d'utiliser sur des fraises positives.

Quant au troisième type (figure 15c ), 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-copeaux. La forme sinusoïdale de la face d'attaque de certaines plaquettes réduit le contact entre les copeaux 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 16). 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 16), 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.



**Figure 16 - Rayon, chanfrein et biseau d'une plaquette**

Les transitions brusques inhérentes au biseau plan en direction de l'arête de coupe peuvent cependant rendre cette arête moins résistante que dans le cas d'un rayon de bec. C'est pour cette raison que des chanfreins (B sur la figure 16) 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 16) 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 17). 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 17).

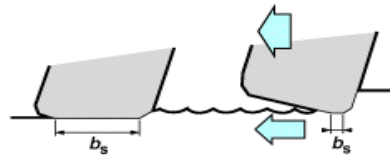


Figure 17 - Plaquette de planage

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.

Pour obtenir le meilleur état de surface, le biseau plan doit être d'aussi 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.

-

#### 2.4 Géométrie de la fraise et état de surface de la pièce

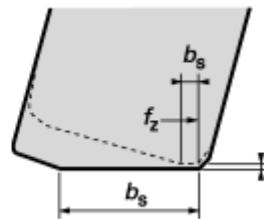
Le saut axial et la position angulaire des biseaux plans affectent grandement l'état de surface. Le saut radial des arêtes de coupe principales est de moindre importance, car il n'influe que sur l'épaisseur des copeaux. La fixation en trois points des plaquettes élimine par ailleurs les problèmes que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



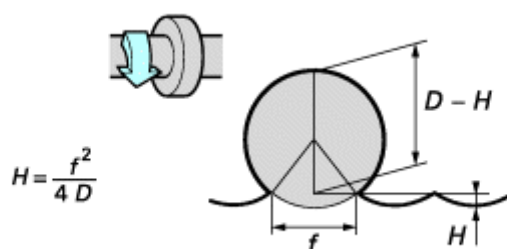
L'utilisation de plaquettes de planage réduit en premier lieu les ondulations sur la surface usinée, ainsi que la profondeur de profil. Si l'avance par tour est supérieure à la largeur du biseau plan, la surface sera générée par deux plaquettes ou plus. L'écart axial dépendra alors de la différence entre 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 18). 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 18 - Utilisation d'une plaquette de planage munie d'un biseau plan surdimensionné, légèrement convexe**



**Figure 19 - 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 19) 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.

### 3. Autres facteurs du fraisage

#### 3.1 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 20). 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 surfacage avec broche inclinée, la surface obtenue n'est généralement pas plane. Selon le degré d'inclinaison  $\delta$ , 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  $\delta$  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 21) ou en est très proche peut être calculé selon la formule ci-dessous :

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

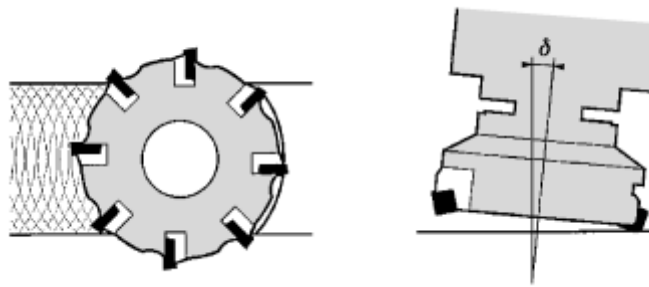
avec :

- $q := 1\,000 \tan \delta$ .

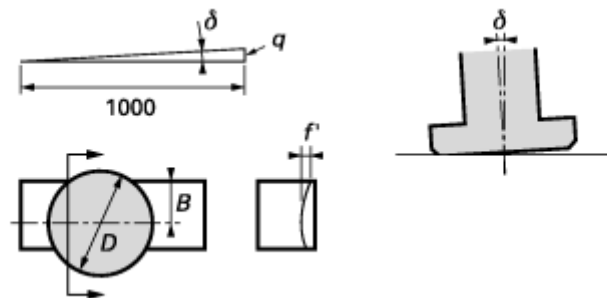
La surface fraisée, dont le profil et le fini varient, dépend de la précision de la broche de la fraise ou du mouvement axial des plaquettes, la distance entre les crêtes des ondulations correspondant souvent à l'avance par tour.

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 20 - Inclinaison de la broche**



**Figure 21 - Écart de surfaçage avec une broche inclinée d'un angle**

### 3.2 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.

#### 4. 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 nitrure 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.