

Usinage

STUTO Jean

VAN HULLE Romain

1^{ère} Partie

Usinage par enlèvement de matière

Usinage

1. GÉNÉRALITÉS

Définitions

L'usinage consiste à donner à une pièce brute sa forme finale par enlèvement de matière.

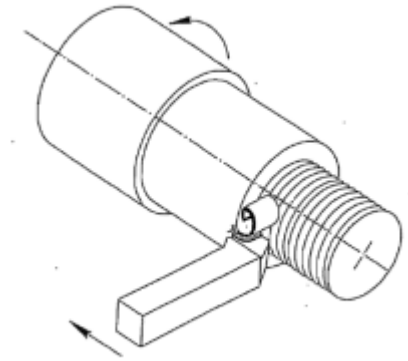
Selon le type d'outils et la manière de travailler, on peut faire diverses classifications.

Définitions

– Copeau coupé

L'outil a un ou plusieurs tranchants bien déterminés et dégage un copeau visible, c'est le cas en :

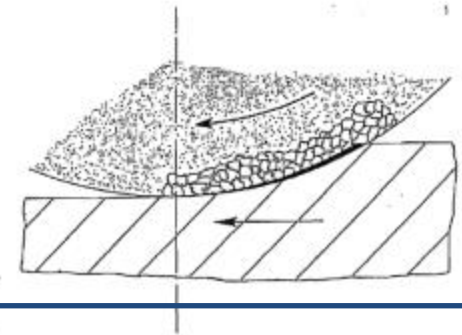
- Tournage
- Fraisage
- Perçage
- Alésage



– Copeau gratté

L'outil comporte un très grand nombre de tranchants, de géométrie éventuellement incertaine, chacun engendrant un microcoupeau. C'est le cas du travail à la meule ou à la lime.

- Rectification
- Affutage
- Ebavurage
- Honage



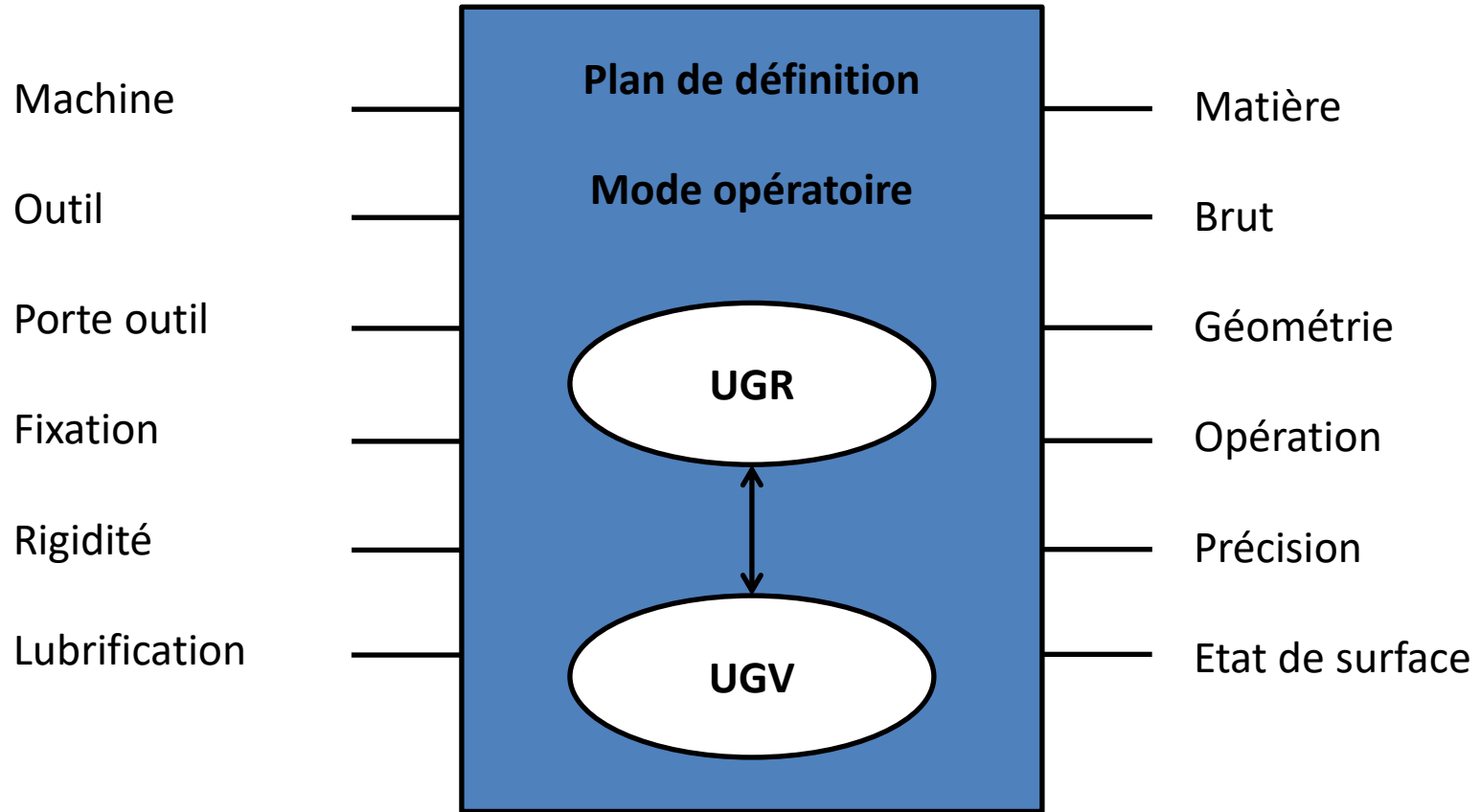
Opérations d'usinage

Mouvement de coupe	Mouvement d'avance	Mouvement de positionnement	Opération	Machine
circulaire à la pièce	longitudinal (Z) à l'outil	radial (X) à l'outil	cylindrage	tour
	radial (X) à l'outil	longitudinal (Z)	dressage ou plongée	
	X et Z à l'outil	X et Z à l'outil	tournage CN	
rectiligne à l'outil	rectiligne à la pièce	rectiligne à la pièce	rabotage	étau limeur (table // au mouvement de coupe)
rectiligne à l'outil	rectiligne à la pièce	rectiligne à la pièce		mortaiseuse (table \perp au mouvement de coupe)
rectiligne à la pièce	rectiligne à l'outil	rectiligne à l'outil		raboteuse
circulaire à l'outil (rotation autour de Z)	rectiligne X ou Z	rectiligne Z ou X	fraisage	fraiseuse
		combinaison X et Z	fraisage CN	
circulaire à l'outil	rectiligne Z	manuel	perçage	perceuse
circulaire à l'outil	rectiligne Z	X et Y	alésage	aléreuse
	rectiligne Z	X et Y très précis		pointeuse

Usinage

2. COMPOSANTES DE L'USINAGE

Composantes de l'usinage



Usage

3. TOURNAGE

Généralités

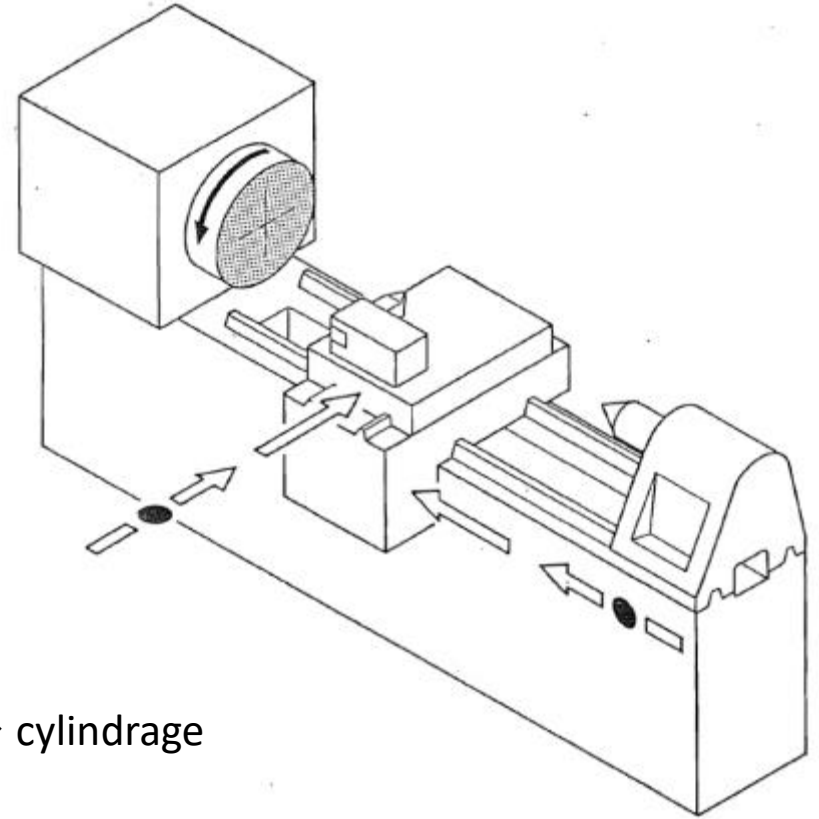
Les opérations de tournage se caractérisent par un mouvement de coupe circulaire donné à la pièce.

- Définitions

- A. Base du tour
- B. Poupée fixe
- C. Chariot porte outil
- D. Poupée mobile
- E. Vis mère

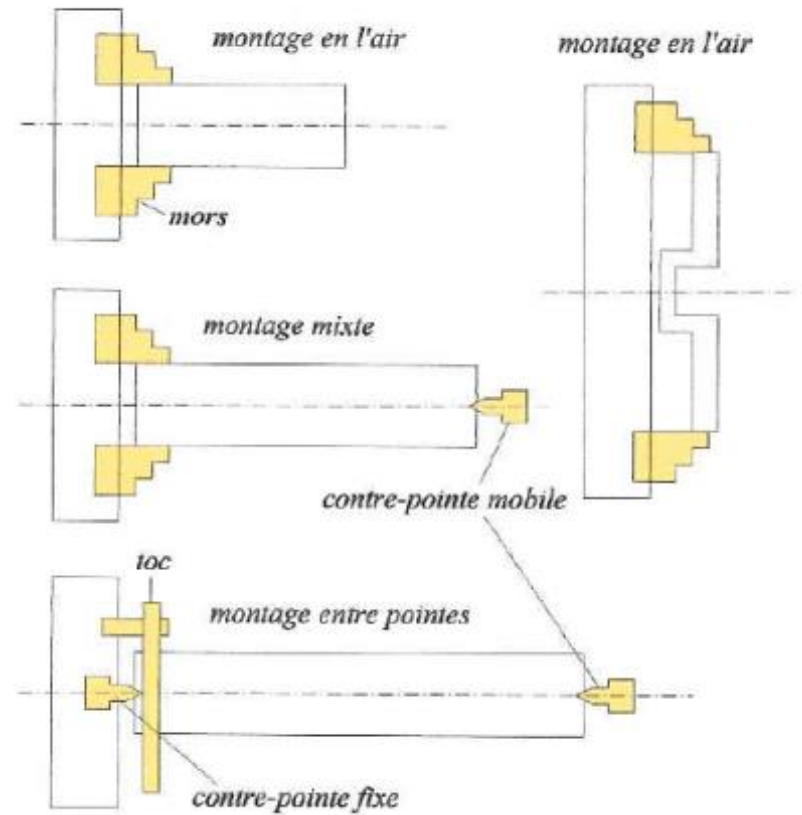
- Axes

- Z : axe de la broche
- X : axe radial
 - Avance selon Z, positionnement X → cylindrage
 - Avance selon X → dressage



Montages

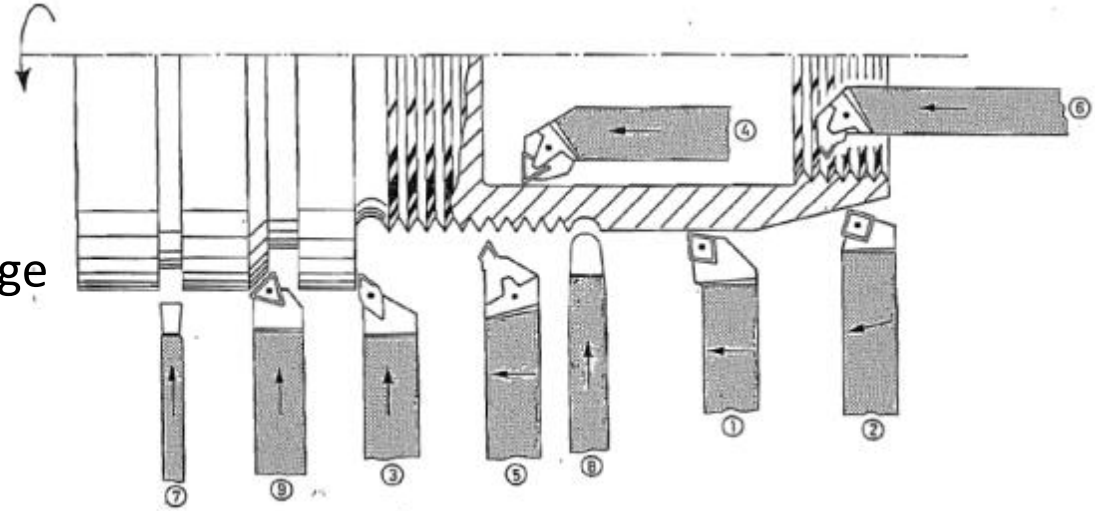
- Les trois montages classiques :
 1. Montage en l'air
 2. Montage entrepointe
 3. Montage mixte



L. Masset, 2004

Opérations

- Principales opérations de tournage



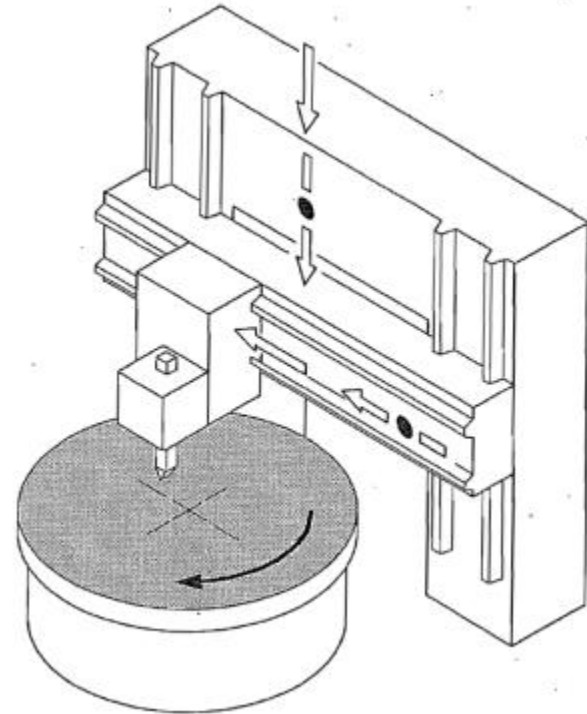
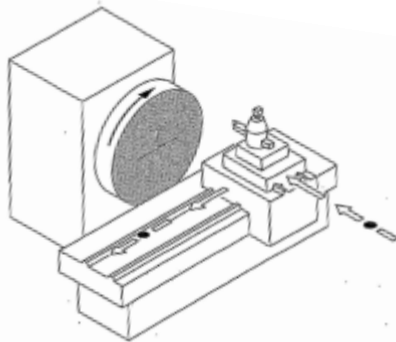
1. Cylindrage ou chariotage
2. Tournage d'un cône
3. Dressage
4. Alésage
5. Filetage
6. Taraudage
7. Saignage d'une gorge
8. Saignage d'une gorge à fond circulaire
9. Chanfreinage

Machines

- Revue des machine de tournage

A l'heure actuelle, le tournage possède une multiplicité de modèles différents de machines outils que l'on pouvait classer en :

 - Tours universels manuels
 - Tours universel à CNC
 - Tours verticaux
 - Centre de tournage bibroches
 - Centre de tournage-fraisage
 - Centre de tournage-rectification



Théorie de la coupe

La mise en œuvre pratique des processus de coupe nécessite de maîtriser les paramètres suivants :

1. Force de coupe

Il est important de prévoir les forces de coupe parce qu'elles déterminent d'abord la puissance nécessaire de la machine-outil.

2. Géométrie de l'outil

Elle influence les efforts de coupe.

3. Vitesse de coupe

Influence à la fois la puissance nécessaire à la machine et la durée de vie de l'outil.

4. Matériau de l'outil

Subit de forts échauffements, responsables de son usure, il doit rester dur en service tout en gardant une grande résilience.

Théorie de la coupe

5. **Dérive de la cote**

L'usure de l'outil se manifeste par un accroissement de la matière laissée sur la pièce : raison principale qui motive d'établir des tolérances.

6. **Durée de vie de l'outil**

Après un certain temps, nécessaire de le réaffûter ou de le remplacer.

7. **Etat de surface**

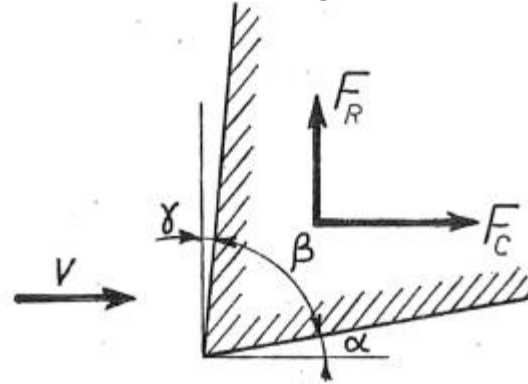
La pièce résinée présente des sillons correspondant aux passages successifs de l'outil. Ces sillons constituant la partie principale de la rugosité de la pièce.

8. **Stabilité du processus**

Il peut apparaître des instabilités comme le broutage ou des vibrations néfastes à la tenue des outils.

Formation du copeau

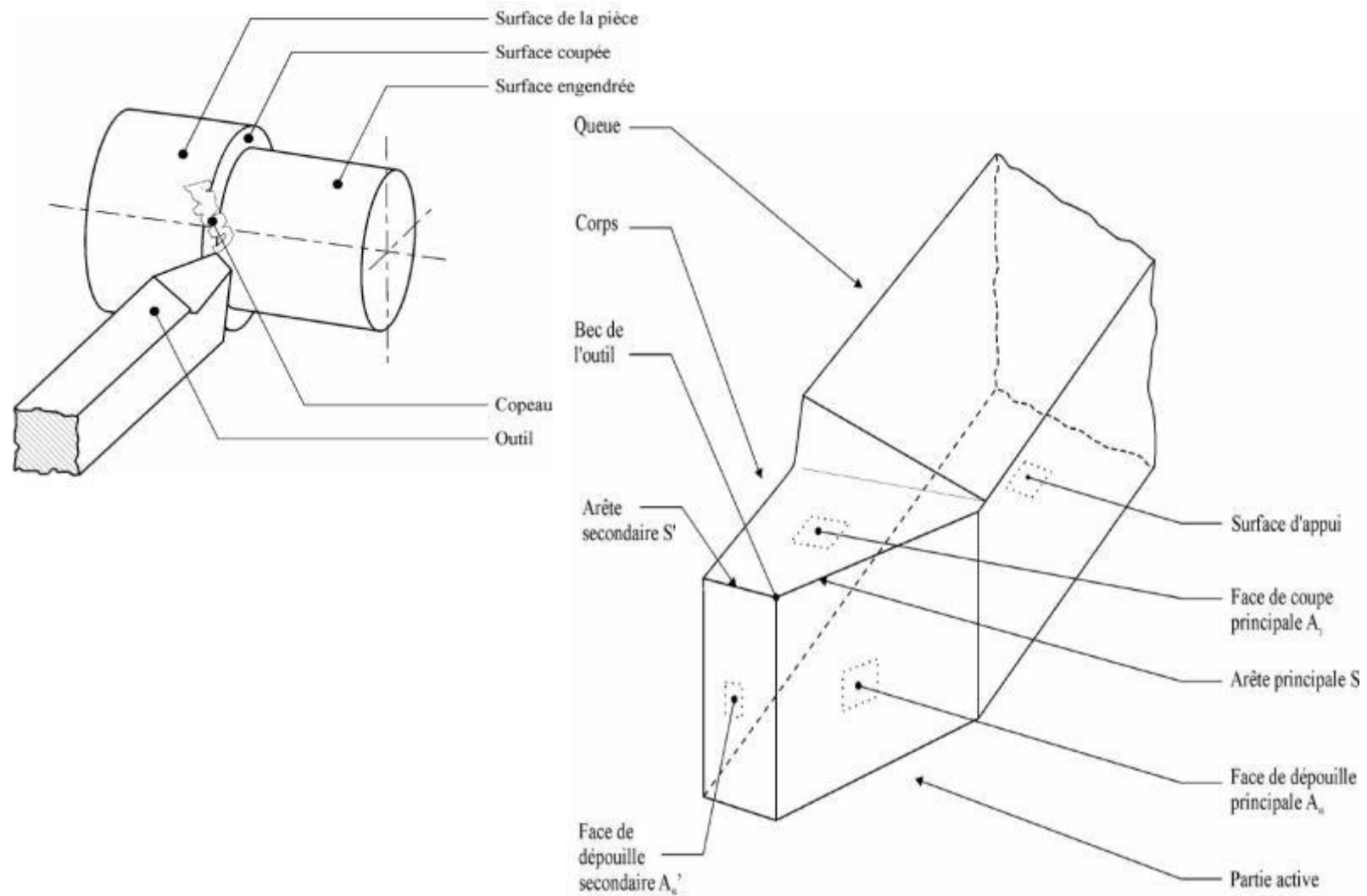
- L'angle γ : angle de coupe
- L'angle α : angle de dépouille
- L'angle β : angle de taillant

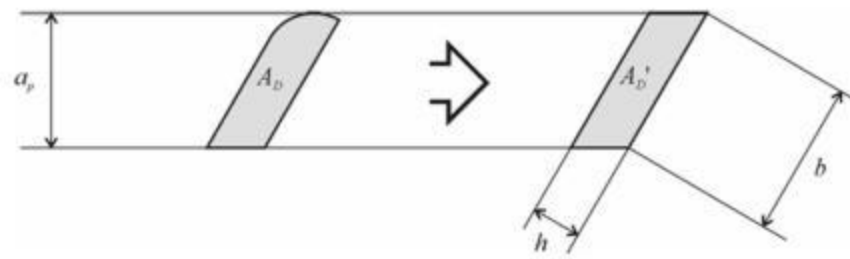


- α et β sont toujours positifs, contrairement à γ qui lui peut être négatif (on parle alors de coupe négative) mais on a toujours la relation :

$$\alpha + \beta + \gamma = \frac{\pi}{2}$$

- Il reste une dernière caractéristique, le rayon R_N de l'arête de coupe. Ce rayon, inévitable en pratique, doit être aussi faible que possible.



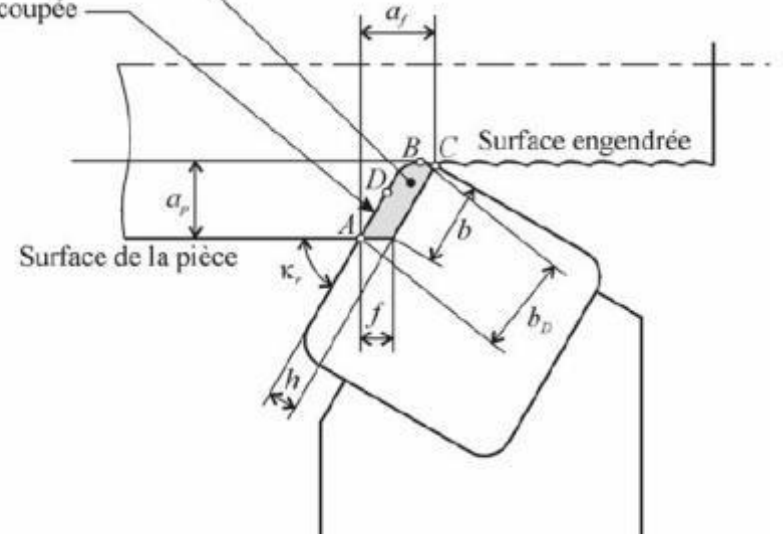


$$h = fn \times \sin(\kappa_r)$$

$$b = \frac{ap}{\sin(\kappa_r)}$$

Aire nominale de la section transversale de coupe, A_D

Surface coupée

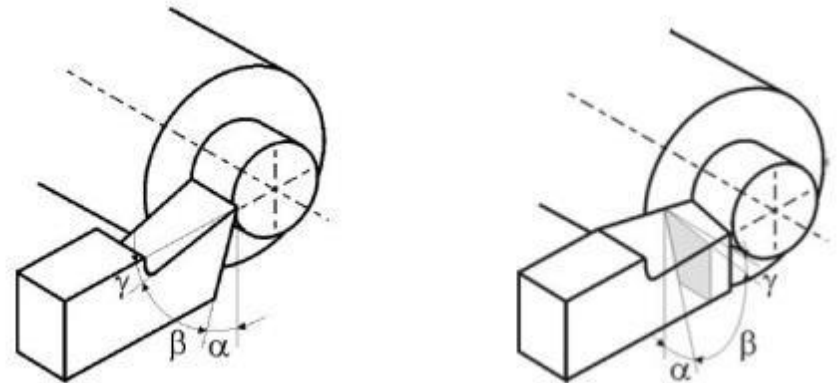


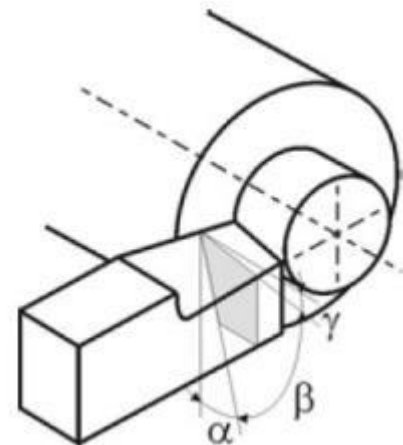
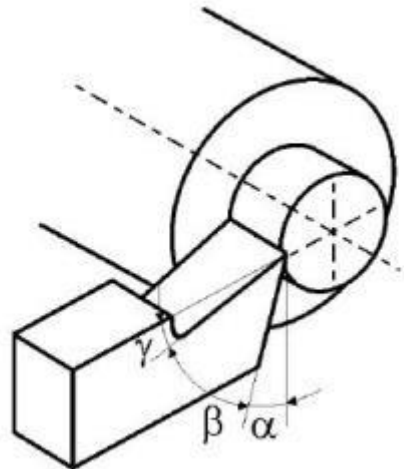
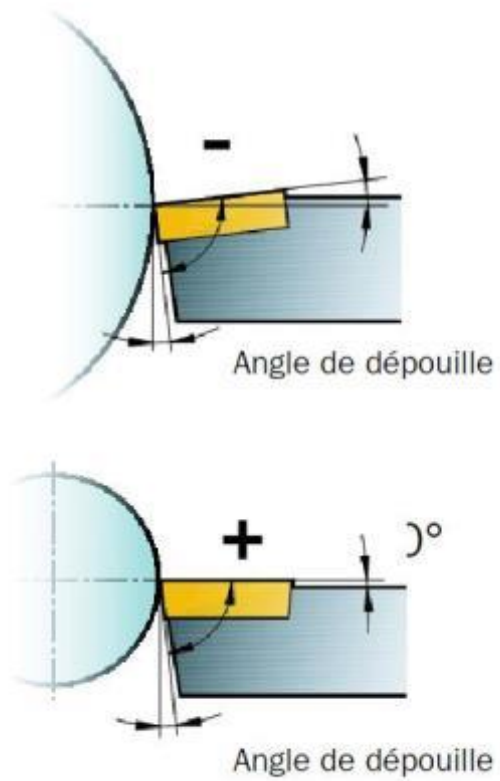
α (Alpha) : Angle de dépouille

β (Béta) : Angle de taillant

γ (Gamma) : Angle de coupe

κ_r (Kappa) : Angle d'attaque



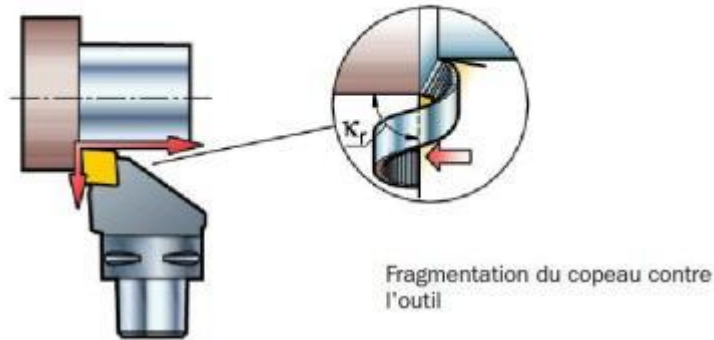


Effet de l'angle d'attaque

L'angle d'attaque K_r est l'angle entre l'arête de coupe et la direction de l'avance. C'est un paramètre important dans la sélection d'un outil de tournage car il influence :

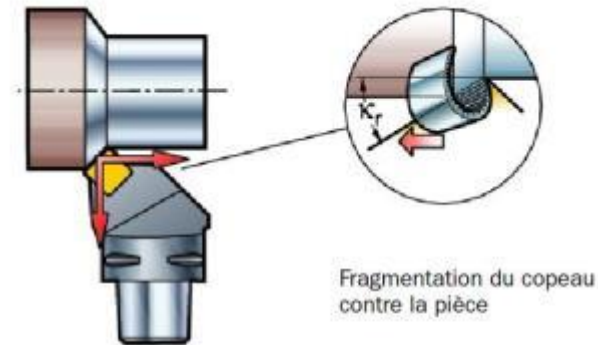
- la formation des copeaux
- la direction des forces de coupe
- la longueur de l'arête en coupe.

Grand angle d'attaque



- Forces dirigées vers le mandrin. Risque de vibrations réduit
- Possibilité de tourner contre un épaulement
- Forces de coupe plus élevées, surtout en entrée et en sortie de la matière.
- Tendance à l'usure en entaille dans les superalliages réfractaires et les pièces de cémentation.

Petit angle d'attaque



- Charge réduite sur l'arête de coupe
- Production d'un copeau plus fin = avance plus élevée
- Réduction de l'usure en entaille
- Impossible de tourner contre un épaulement à 90°
- Les forces s'exercent à la fois dans le sens axial et radial, ce qui peut provoquer des vibrations.

Puissance de coupe

- La force principale de coupe induit une puissance :

$$P_c = F_c \cdot V_c$$

Matériau de coupe

1. Aciers à outil

- Non alliés sont des aciers à haute teneur en carbone (1,25%). Ils sont trempés à l'eau de manière à obtenir une structure martensitique qui confère une grande dureté.
- Alliés Cr, Mo, W, V.
→ alésoirs, tarauds, (faible vitesse)

2. Aciers rapides

aciers fortement alliés

- Cr améliore la trempabilité
- W améliore la dureté à chaud et la ténacité.
- Mo améliore la dureté à chaud et la ténacité.
- V forme des carbures, augmente la résistance à l'usure.
- Co permet température de trempe plus élevée améliore la dureté.

Matériau de coupe

3. Les stellites

- Ce sont des alliages de fonderie
- C (3%) W(17%) Cr(25%) Co(35%) Fe(20%)

4. Les carbures

- Ils sont obtenus par frittage. Il s'agit de carbures métalliques de tungstène, de titane, de tantalum, de niobium auquel est ajouté un liant constitué de cobalt.
- Il existe une classification ISO :
 - P pour les aciers à copeaux longs
 - M pour les aciers inoxydables
 - K pour les matériaux à copeaux courts

Ces symboles sont suivis de 1 à 50

Plus le nombre est petit → grande vitesse plus il est fragile

Plus le nombre est grand → c'est l'inverse

Matériau de coupe

5. Outils revêtus

6. Cermet

- Céramique et métal TIC / TIN
avec addition de nickel et de cobalt

7. Céramiques

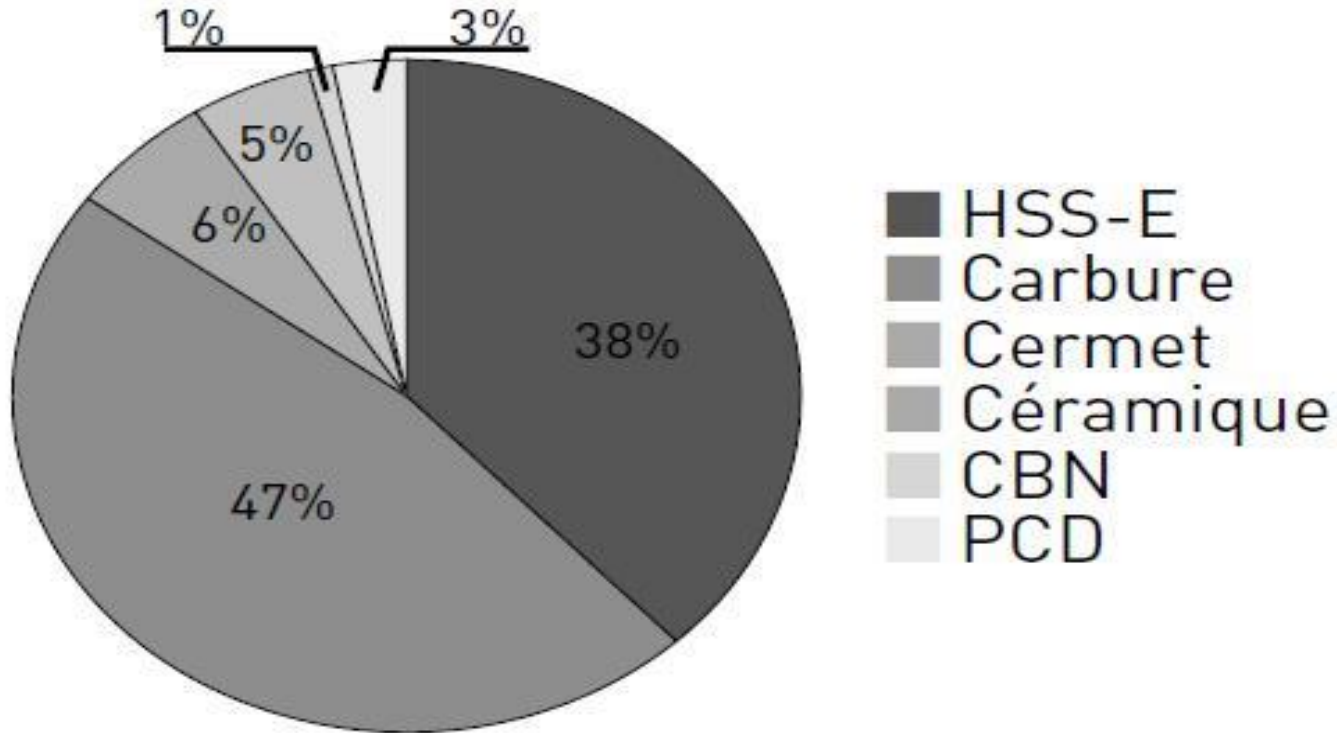
- Plaquettes frottées d'alumine

8. Matériaux de coupe extra-durs

- Diamant naturel
- Diamant synthétique
- Nature de base cubique

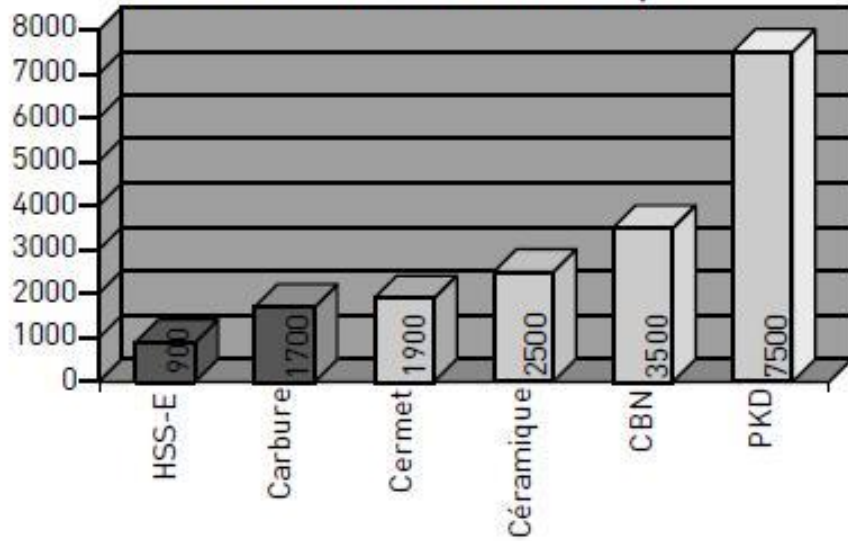
Types d'outils

Fractions des différentes matières de coupe

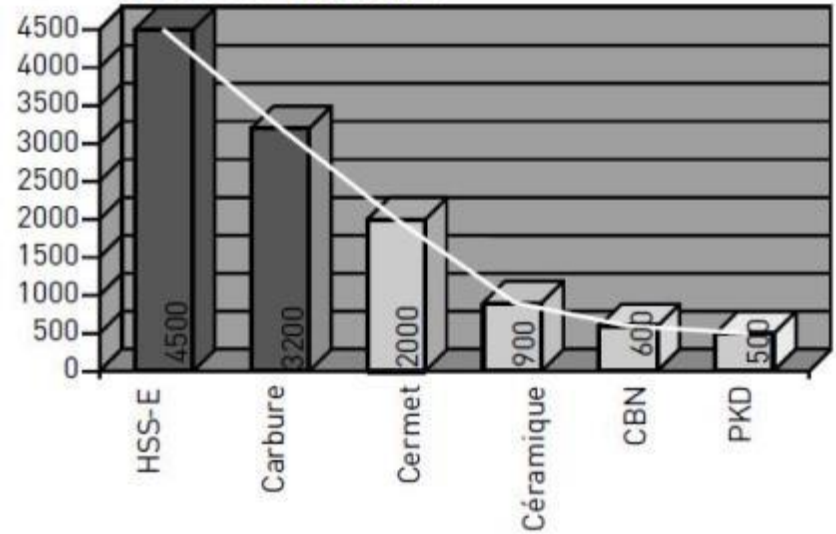


Types d'outils

Dureté des matières de coupe



Ténacité (N/mm²)

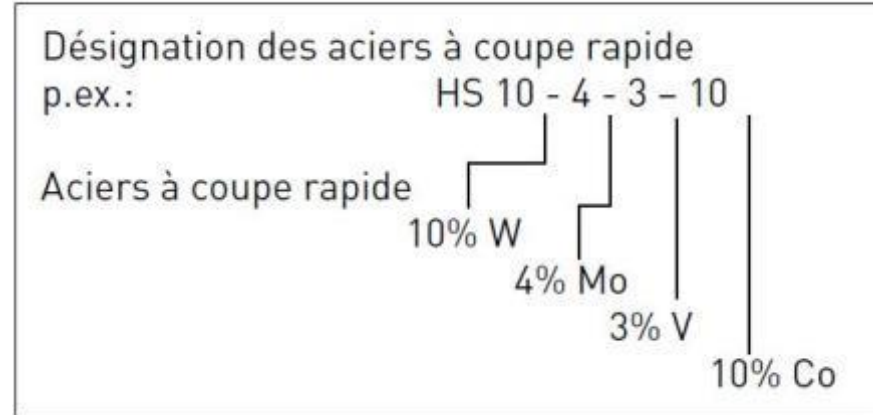


Types d'outils

- HSS et HSS-E – High Speed Steel (Acier rapide)

Acier ayant la capacité de garder sa trempe à haute température

HSS	< 4,5 % cobalt et < 2,6 % vanadium
HSS-E	≥ 4,5 % cobalt ou ≥ 2,6 % vanadium



Co : Le Cobalt a pour effet d'augmenter la résistance à chaud de l'outil – donc l'outil résistera mieux à des températures de coupe plus élevées

W (Tungstène) : Génère des carbures – augmente la résistance à usure et au revenu

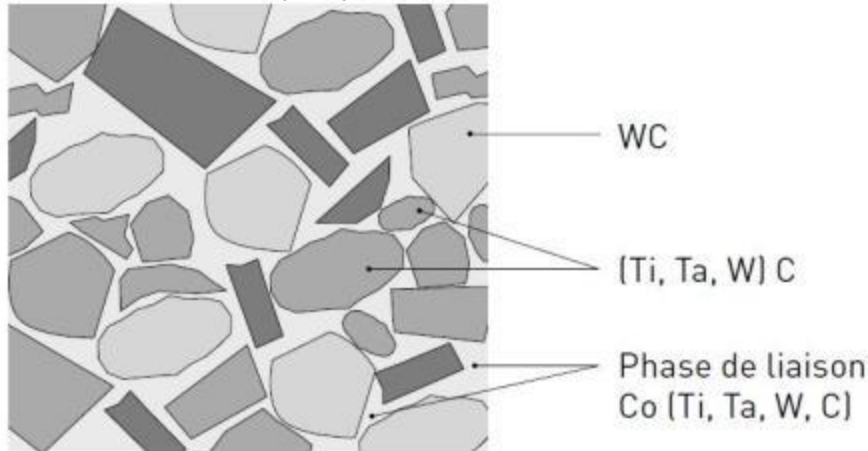
Mo (Molybdène) : Augmente pénétration de trempe, améliore la ténacité. Mo peut partiellement remplacer W

V (Vanadium) : Génère des carbures

Types d'outils

- Carbure

Composé fabriqué par frittage de poudres métalliques (essentiellement WC) dans un liant (Co)



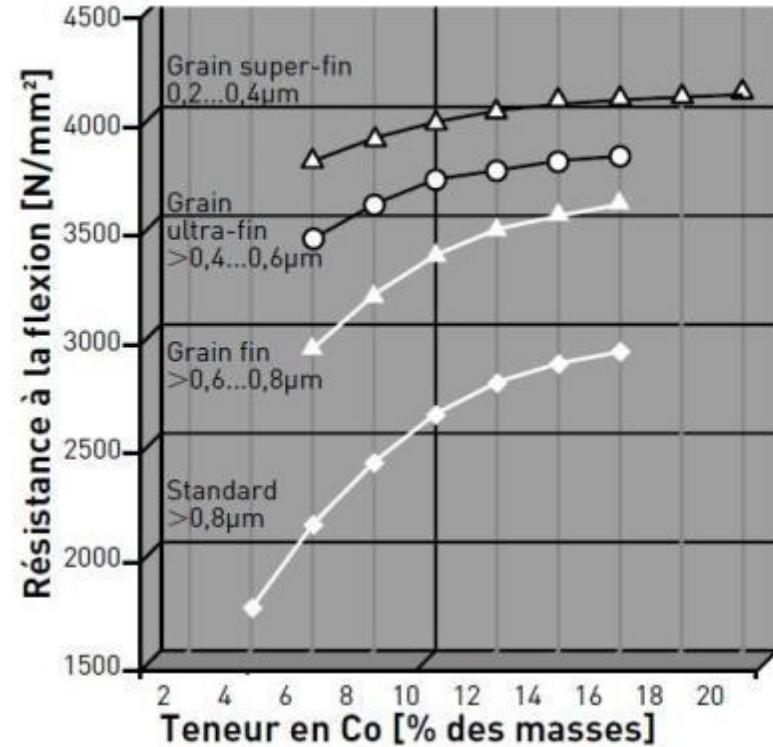
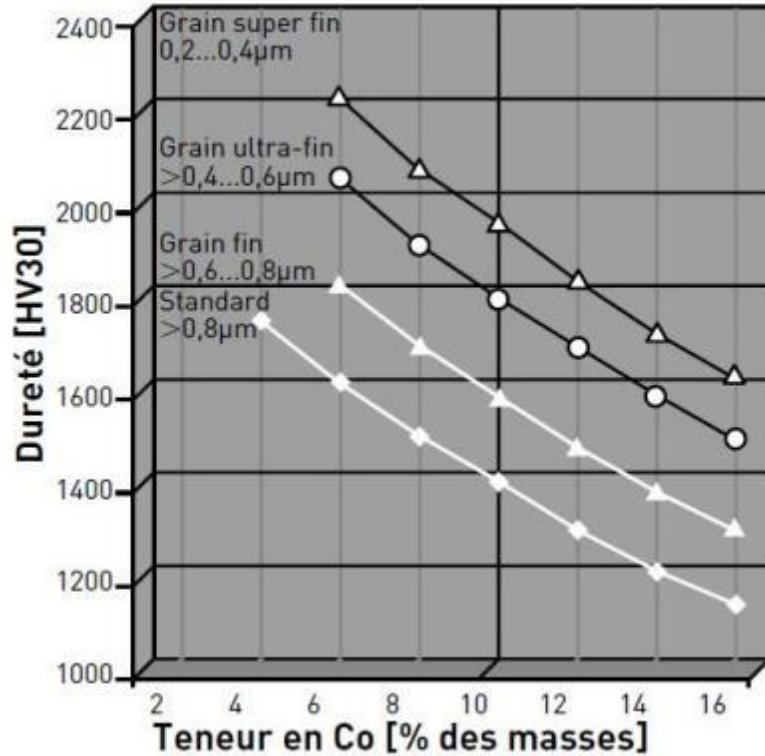
Le Co « cimente » les particules de carbure

WC : Très bonne résistance à l'usure (mieux que TiC et TaC) mais diffusion possible dans Co à température plus élevée

TiC : Faible tendance à la diffusion donc bonne résistance thermique mais adhérence moindre et résistance restreinte au tranchant

TaC et NbC : Affine le grain donc améliore la résistance du tranchant et la ténacité

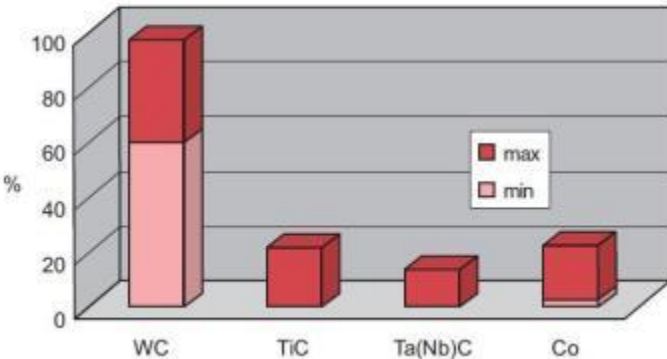
Types d'outils



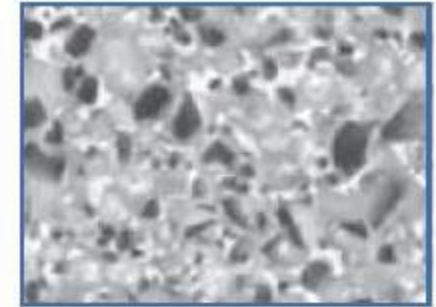
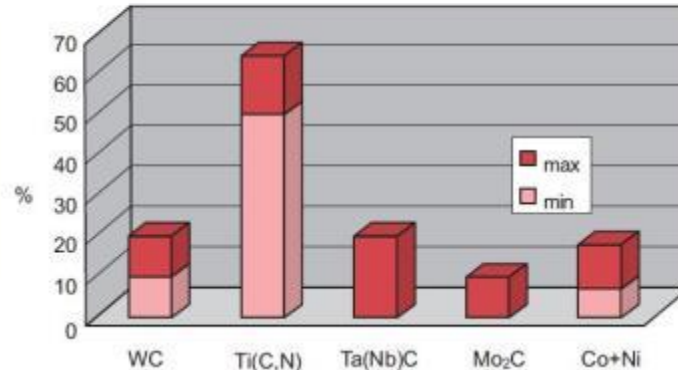
Types d'outils

- Cermet
 - Céramique avec liant métallique,
 - Concilie : la résistance gardée à haute température (Céramique) avec la ténacité (liant métallique)
 - Avantage : Faible tendance à la diffusion

Carbures



Cermets

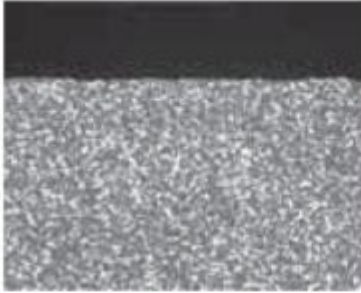


Microstructure d'un cermet moderne (nuance TCM10)

Le cermet est principalement utilisé pour les opérations de finition de fontes ductiles (nodulaires, malléables) et d'aciers (compris Inox)

- Cermet, exemple :

TCM407
(P10, M05, K05)



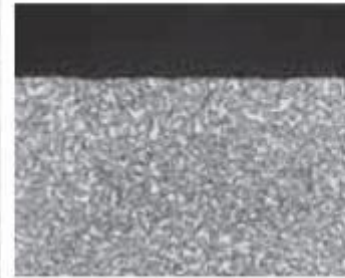
Composition :

Co/Ni 8,0 % ; WC 16,0 % ; (Ta,Nb) C 10,0 % ;
Ti (C,N) reste

Caractéristiques :

- > Tenue à chaud et résistance à l'usure maximales
- > Excellente résistance à l'oxydation
- > Pour vitesses de coupe très élevées
- > Nuance idéale pour la finition

TCM10
(P15, M10, K10)



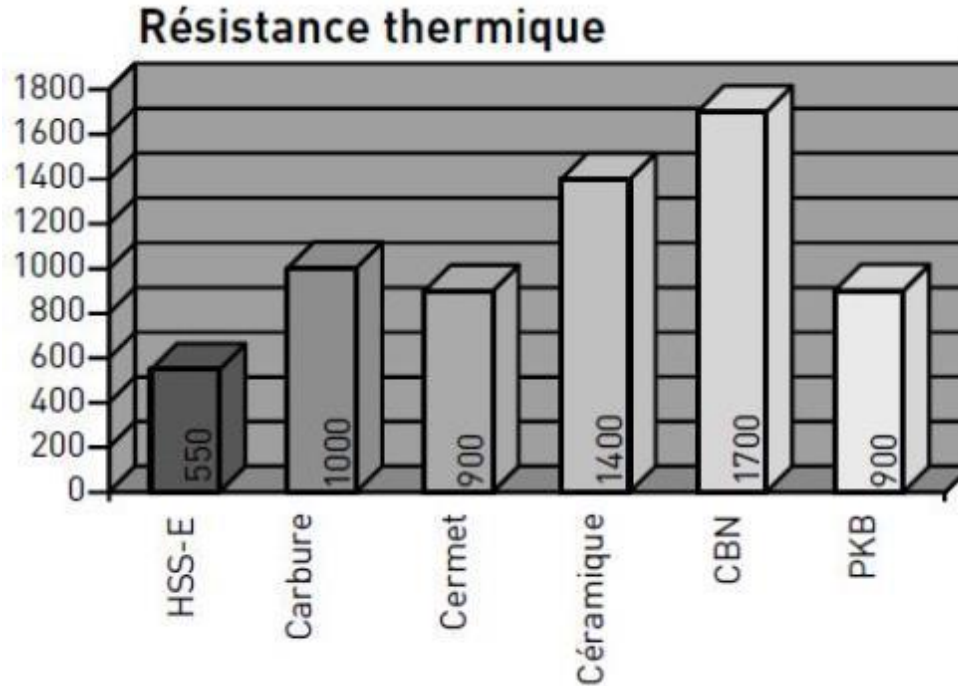
Composition :

Co/Ni 12,2 % ; WC 15,0 % ; (Ta,Nb) C 10,0 % ;
Ti (C,N) reste

Caractéristiques :

- > Tenue à chaud et résistance à l'usure élevées
- > Bonne ténacité
- > Pour grandes vitesses de coupe
- > Nuance universelle

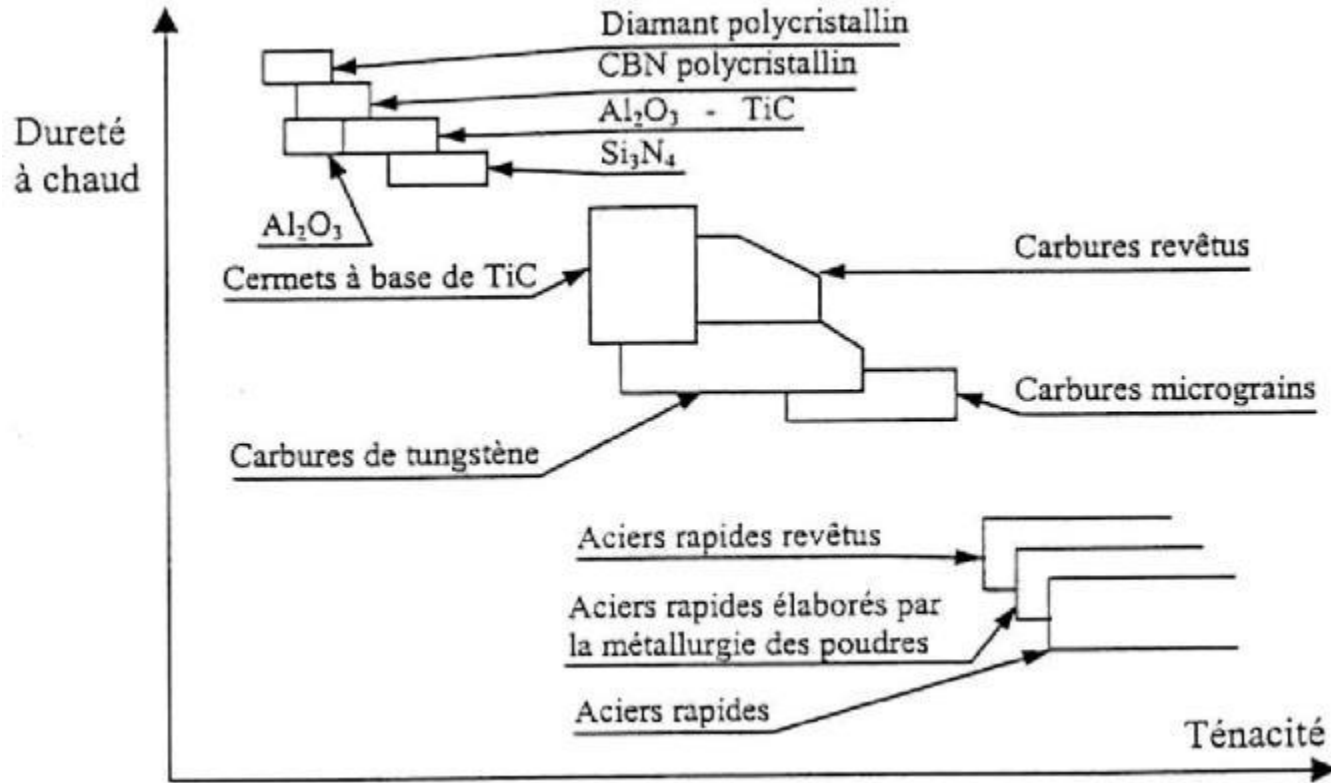
Types d'outils



- Un matériau dur n'est pas nécessairement très résistant à la chaleur
➔ Attention à l'effet thermique de la coupe

Types d'outils

- Dureté à chaud et ténacité

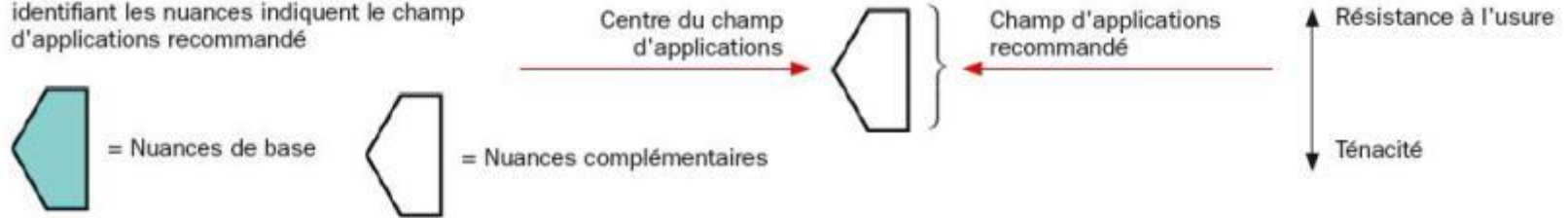


Types d'outils

- Choix de la nuance de la plaquette

Le choix d'un outil → compromis entre dureté à chaud et ténacité

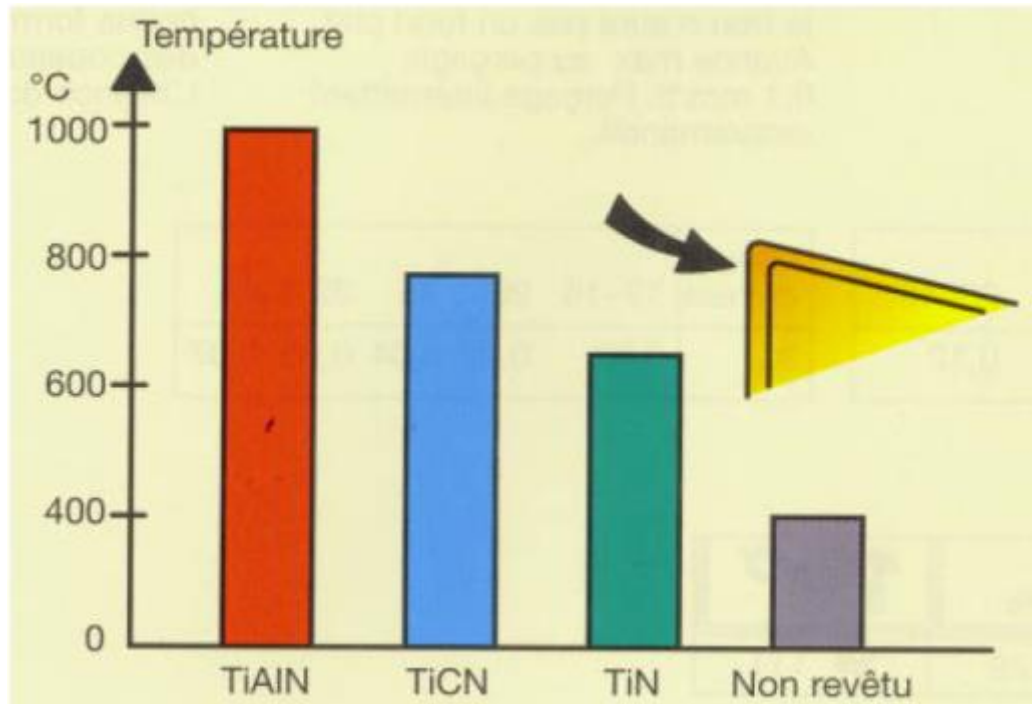
La position et la forme des symboles identifiant les nuances indiquent le champ d'applications recommandé



			Nuances de base			Nuances complémentaires			
	ISO	ANSI							
P	01	C8							↑ ↓
	10	C7	CT 530	GC 4220	GC 1025	GC 1010	GC 3040	GC 2030	
	20								
	30	C6		GC 4230		SM 30			
	40	C5	GC 1030		GC 4240			GC 2040	
	50								

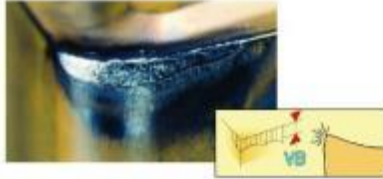
Types d'outils

- Revêtements :
 - La dureté à chaud du revêtement est également d'une importance primordiale dans le choix de la vitesse de coupe



Types d'usures

Usure par abrasion



Usure en dépouille

C'est le type le plus courant d'usure et c'est aussi l'usure la plus souhaitable étant donné qu'elle est plus prévisible et stable. Elle est due à l'abrasion exercée par les constituants durs de la matière de la pièce.

Usure chimique



Usure en cratère

L'usure en cratère apparaît sur la face de coupe de la plaquette. Elle est provoquée par la réaction chimique entre la matière de la pièce et le matériau de coupe. La vitesse de coupe l'amplifie. Une usure en cratère excessive affaiblit l'arête de coupe qui peut se rompre.

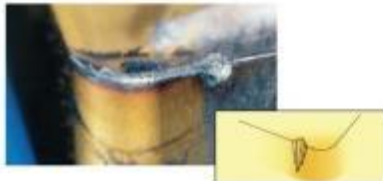
Usure par adhérence



Arête rapportée

Ce type d'usure est provoqué par le soudage sous pression du copeau sur la plaquette. C'est le type d'usure le plus courant avec les matières collantes telles que les aciers bas carbone, les aciers inoxydables et l'aluminium. Une faible vitesse de coupe accélère la formation d'une arête rapportée.

Usure par adhérence

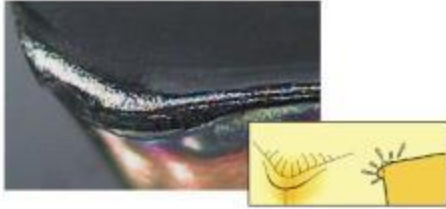


Usure en entaille

Ce type d'usure se caractérise par une entaille localisée tant sur la face de coupe que sur la face de dépouille, au niveau de la profondeur de coupe. Il est provoqué par l'adhérence (soudage par pression du copeau) et la déformation. Il est courant dans l'usinage des aciers inoxydables et superalliages réfractaires.

Types d'usures

Usure thermique



Déformation plastique

La déformation plastique survient lorsque le matériau de coupe est ramolli par une température trop élevée. De manière générale, plus une nuance est dure et plus le revêtement est épais, meilleure est la résistance à la déformation plastique.

Usure thermique



Usure en peigne

Lorsque l'arête de coupe subit des refroidissements brusques, des fissures perpendiculaires à l'arête apparaissent. Ce type de fissure est fréquent en cas de coupes interrompues, ce qui est courant en fraisage. L'utilisation de l'arrosage aggrave ce phénomène.

Usure mécanique



Écaillement ou rupture de l'arête

L'écaillement ou la rupture de l'arête survient en cas de surcharge des contraintes de traction mécanique. Celles-ci sont dues à différentes causes telles que le martèlement des copeaux, une profondeur de coupe ou une avance excessives, des inclusions de sable dans la matière de la pièce, des arêtes rapportées, des vibrations ou une usure excessive de la plaquette.

Usinage

4. FRAISAGE

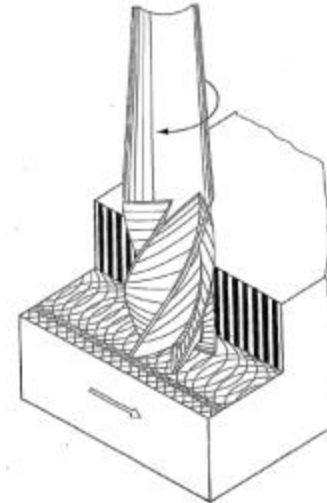
Généralités

1. Fraisage vertical :

- Le fraisage se caractérise par un mouvement de coupe circulaire à l'outil (l'axe de l'outil est appelé Z) et deux mouvements selon les axes X et Y perpendiculaires à Z.

2. Fraisage en bout et fraisage en roulant

- La fraise travaille à la fois par son extrémité (en bout) et par sa périphérie (en roulant). On dit dans ce cas qu'il s'agit d'une fraise à 2 tailles.
- Les états de surface sont différents :
 - rosaces pour le travail en bout
 - ondulations parallèles pour le travail en roulant



3. Fraisage horizontal

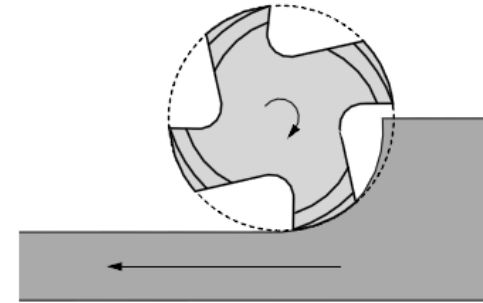
- L'axe de la broche est horizontal

4. Fraisage en opposition et fraisage en avalant

- Dans le fraisage en opposition, le mouvement de coupe de la fraise tend à s'opposer au mouvement d'avance de la pièce. Au contraire dans le fraisage en avalant, la fraise tend à augmenter le mouvement d'avance et donc, à avaler la pièce.

Fraisage en avalant

Lors du fraisage en avalant, le tranchant s'introduit à la pleine épaisseur du copeau et ressort à épaisseur de copeau zéro. Ce phénomène qui produit des chocs importants sur le tranchant, facilite pourtant sensiblement son introduction. L'inconvénient lié à la génération de chocs importants est largement compensé par l'utilisation de fraises fortement hélicoïdales. En globalité, lors du fraisage en avalant, la durée d'utilisation de la fraise est nettement plus importante que pour le fraisage en opposition. La différence est d'autant plus importante que la matière usinée est tenace. Des matières particulièrement tenaces sont par exemple les aciers hautement alliés, les aciers inoxydables et résistant à l'acide, les alliages de titane et les alliages de nickel.



Fraisage en avalant

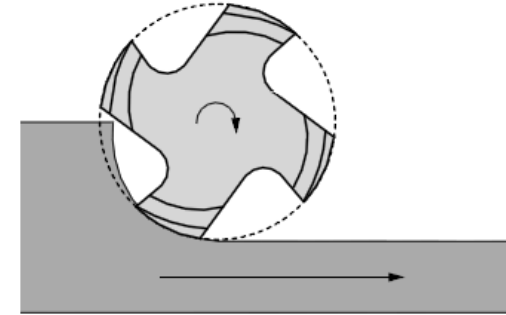
C'est pourquoi le fraisage en avalant est fondamentalement préconisé

Attention: pour les pièces à usiner présentant une croûte de laminage ou d'autres durcissements de surface, le fraisage en avalant n'est pas avantageux. Dans ces cas, il faudra préconiser le fraisage en opposition! Lors du fraisage en avalant, la force d'avance est négative.

La dérive radiale de la fraise est plus importante que lors du fraisage en opposition.

Fraisage en opposition

Lors du fraisage en opposition, le tranchant doit théoriquement s'introduire dans la matière à épaisseur de copeau zéro. Comme ce n'est pas possible, le tranchant glisse sur la matière jusqu'au moment où elle a généré une pression suffisante. Elle pénètre ensuite dans la matière par à-coups. Ce type de contrainte requiert une haute ténacité et en cas d'utilisation de tranchants en carbure monobloc, elle peut provoquer des ruptures.



Fraisage en opposition

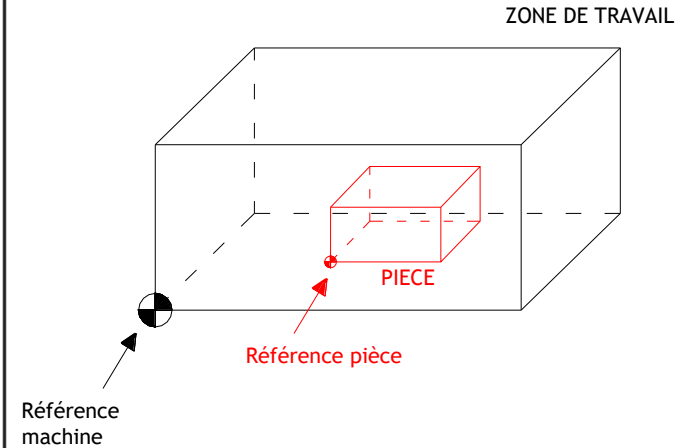
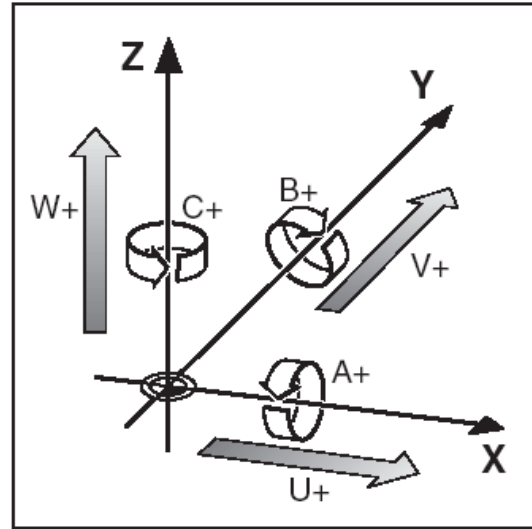
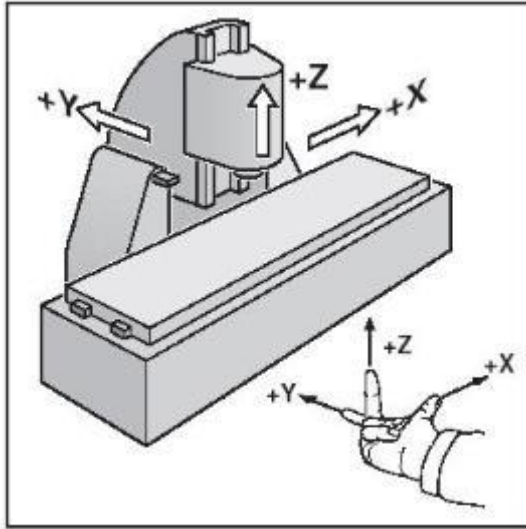
De ce fait, le fraisage en opposition n'est fondamentalement pas préconisé.

Lors du fraisage en opposition, la force d'avance est positive. La dérive radiale de la fraise est moins importante que lors du fraisage en avalant. De ce fait, le fraisage en opposition est généralement préconisé pour les taraudages profonds lors de filetage à la fraise, bien que la durée d'utilisation soit réduite.

Fondamentalement, le rainurage doit être considéré comme le fraisage en opposition. La nature de la pénétration du tranchant est déterminante.

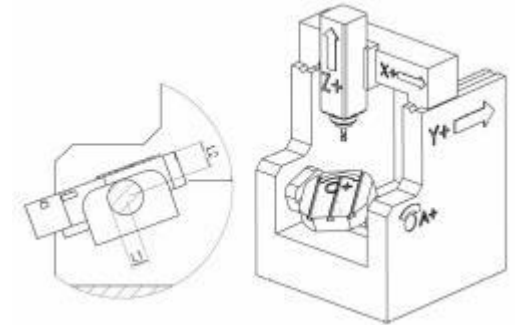
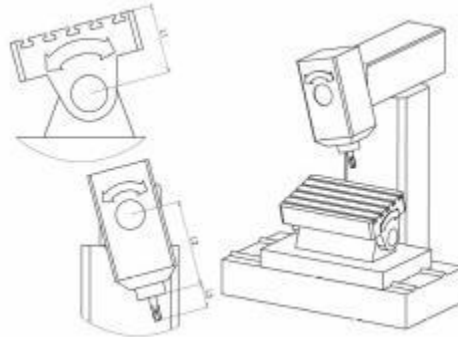
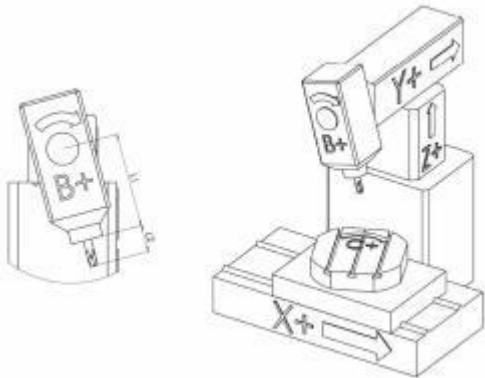
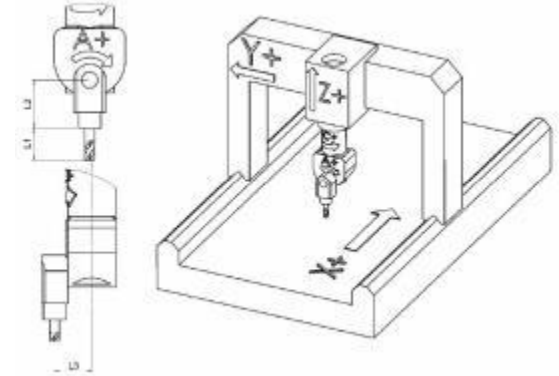
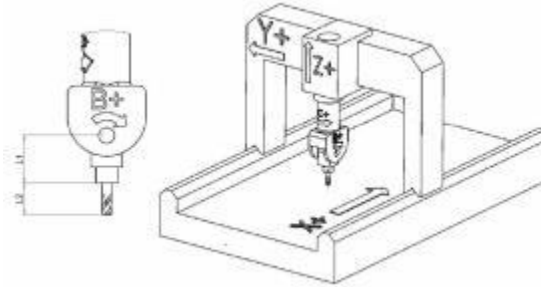
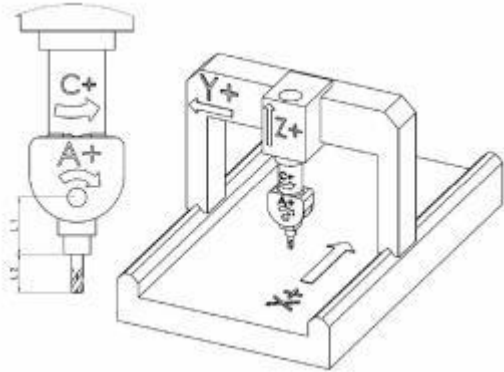
Référentiel

- Référentiel
 - Référentiel dextrorsum – Coordonnée machine et pièce



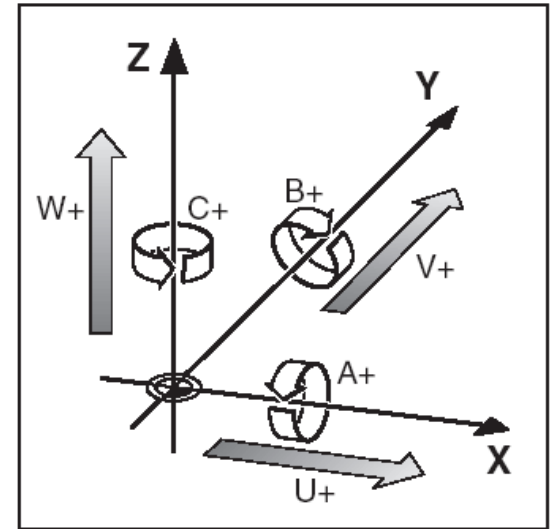
Cinématiques machines

- Cinématiques machines :



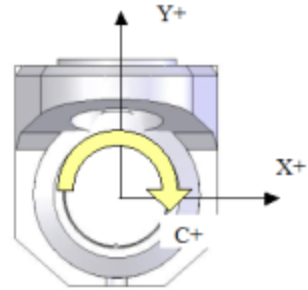
Machines

- Exemple : Mikron HSM 400U Fraiseuse grande vitesse

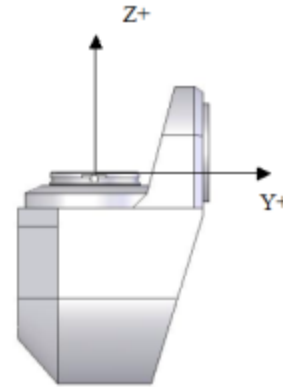
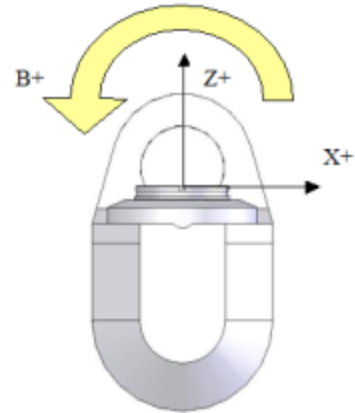


Machines

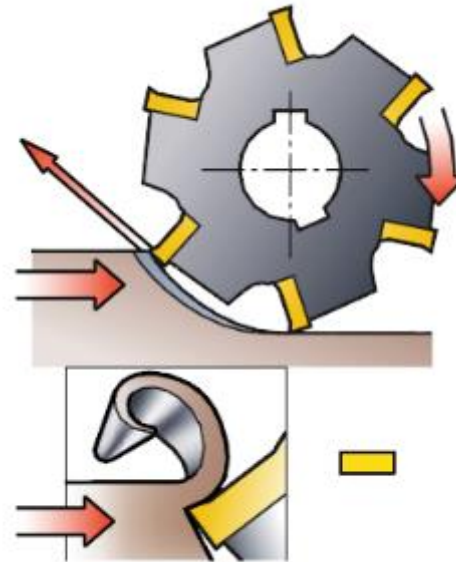
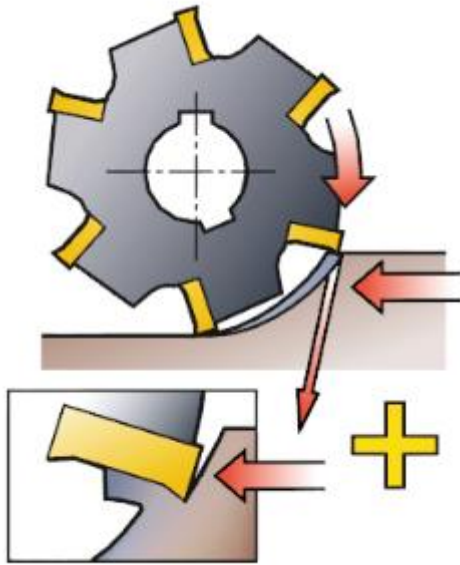
Axe C (4^{ème} axe) : Rotation autour de Z



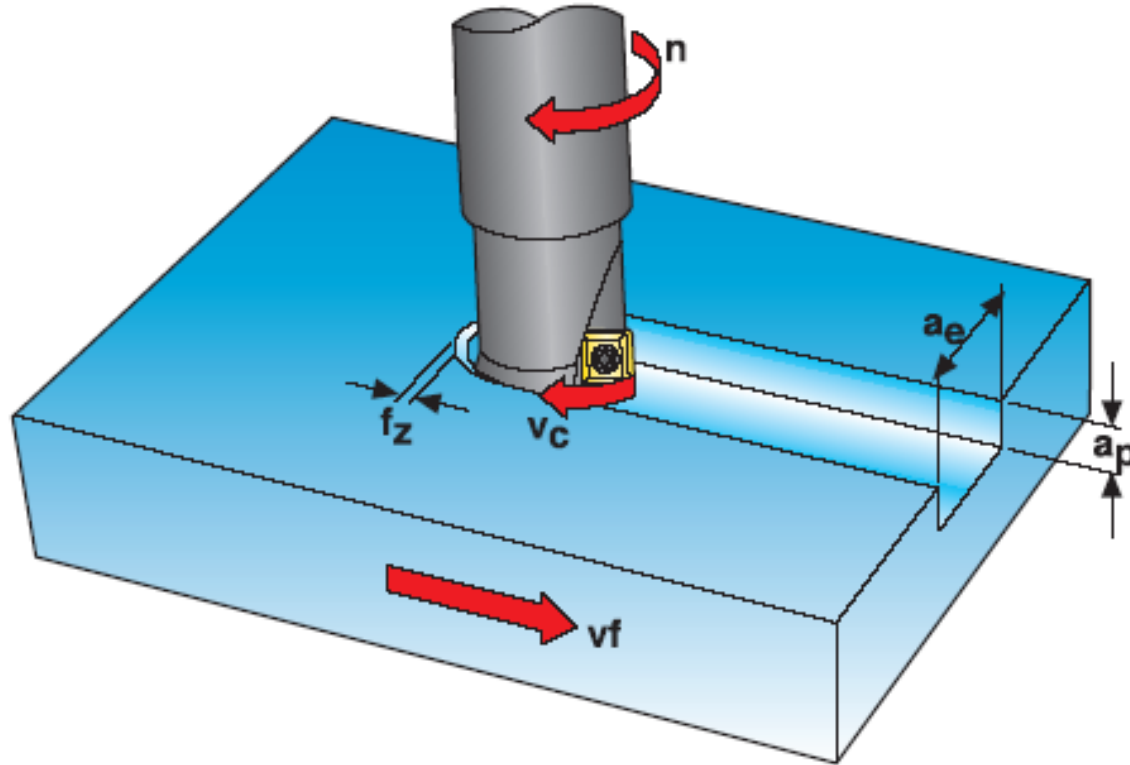
Axe B (5^{ème} axe) : Rotation autour de Y



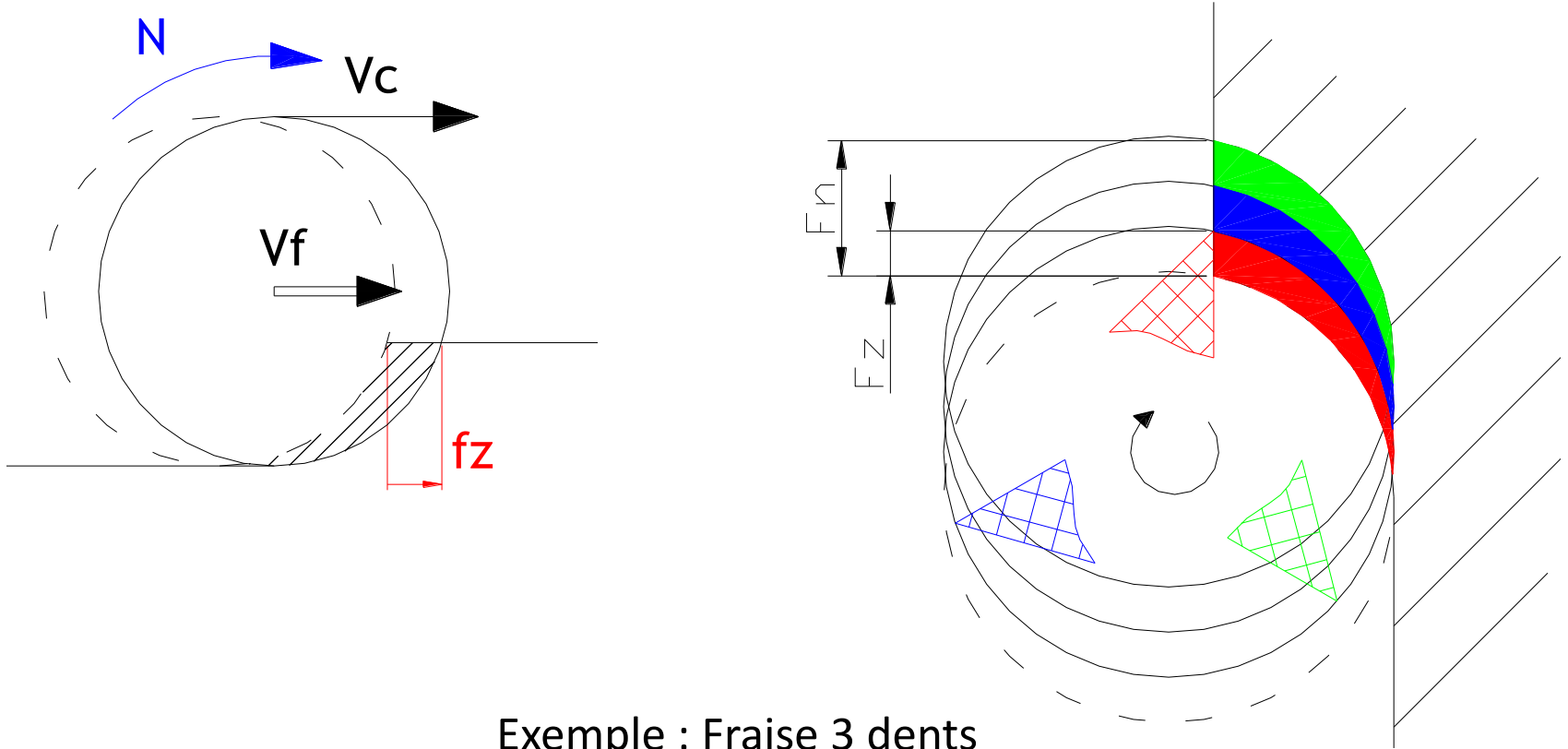
Fraisage en avalant ou opposition



Paramètres de coupe



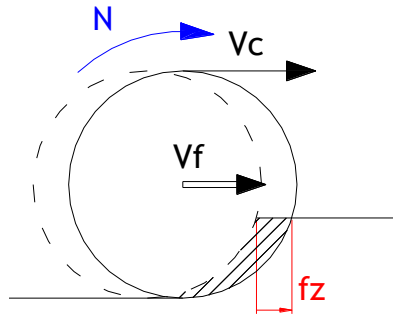
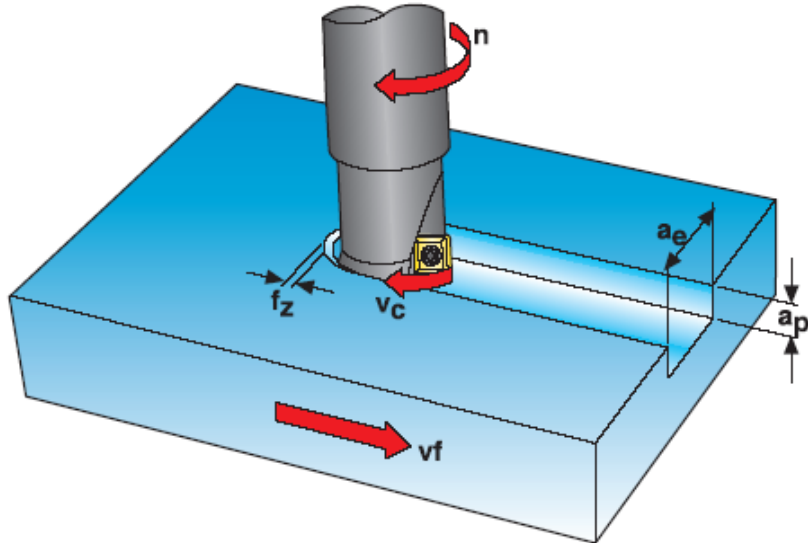
Paramètres de coupe



Exemple : Fraise 3 dents

$$f_n = 3 \times f_z$$

Paramètres de coupe



Vitesse de coupe

$$v_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_c}{1000} \quad (\text{m/min})$$

Vitesse d'avance

$$v_f = n \cdot z_n \cdot f_z \quad (\text{mm/min})$$

$$v_f = n \cdot z_c \cdot f_z \quad (\text{mm/min})$$

Avance par tour

$$f = z_n \cdot f_z \quad (\text{mm/tr})$$

$$f = z_c \cdot f_z \quad (\text{mm/tr})$$

Débit copeaux

$$Q = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f}{1000} \quad (\text{cm}^3/\text{min})$$

a_e = Profondeur de coupe radiale (mm)
 a_p = Profondeur de coupe axiale (mm)
 D_c = Diamètre de fraise (mm)
 f = Avance par tour (mm/tour)
 f_z = Avance par dent (mm/dent)
 z_c = Nombre effectif de dents pour le calcul de la vitesse d'avance ou de l'avance /tour (voir ci-dessous)
 n = Vitesse de rotation (tr/min)
 Q = Débit copeaux (cm³/min)
 v_c = Vitesse de coupe (m/min)
 v_f = Vitesse d'avance (mm/min)
 z_n = Nombre de dents

Puissance de coupe

- Equations générales :

ou

P : Puissance en W (N.m/s)

C : Couple (N.m)

ω : Fréquence angulaire (Hz ou s⁻¹)

F : Effort (N)

V : Vitesse (m/s)

- Equation appliquée à la coupe

: Puissance engendrée par l'opération (kW)

: Prise de passe en profondeur (mm)

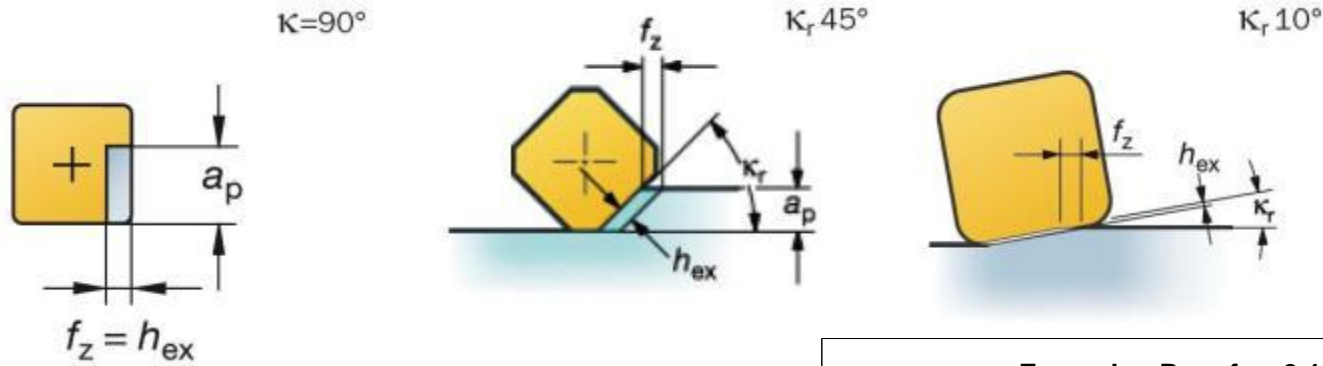
: Prise de passe radiale (mm)

: Vitesse d'avance (mm/min)

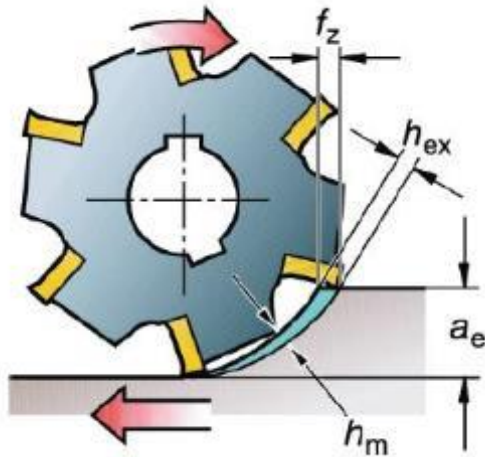
: Rendement de la machine (-)

: Effort spécifique (N/mm²)

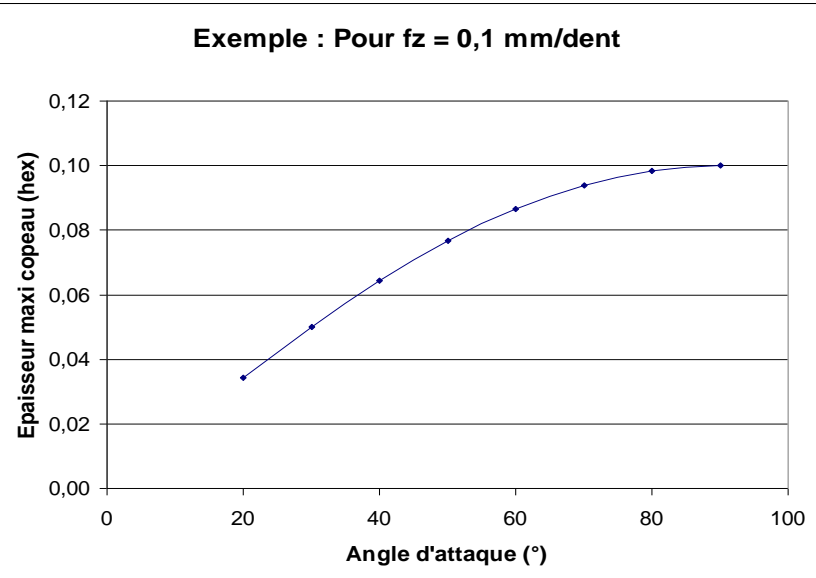
Angle d'attaque



$$h_{ex} = f_z \times \sin K_r$$



Exemple : Pour $f_z = 0,1$ mm/dent

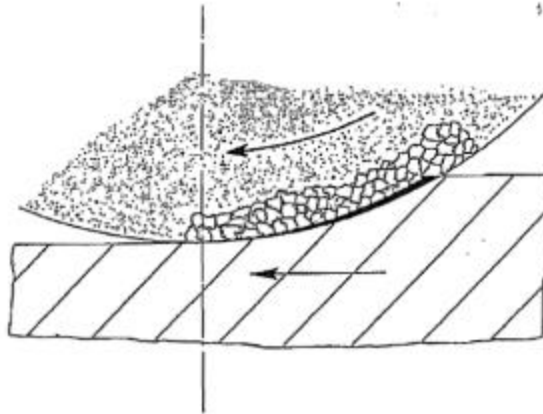


Usage

5. RECTIFICATION

Généralités

- A l'origine, la rectification a été conçu pour corriger les défauts provenant des traitements thermiques, ce qui explique le nom de rectification. Aujourd'hui, ce mot recouvre toutes les techniques d'usinage à l'aide de meules. C'est une des seules techniques pour travailler les alliages très durs.



Les meules

- Les meules
 - Le mouvement de coupe des meules est toujours circulaire.
 - Le mouvement d'avance est donné à la pièce :

$V_{meule} \approx 25\text{m/s}$

$A_{pièce} \approx q \approx 60\text{x plus haut} \approx 25\text{m/min}$

Pendant le travail, les microcopeaux qu'il découpe doivent être stockés dans les vides de la meule.

Constituants des meules

- Les meules sont constituées de 3 éléments :

- Grains :

- Durs ou grains d'abrasifs

- Alumine Al_2O_3
- Carbure de silicium SiC

- Extra durs

- Nitrure de bore cubique CBN (Borazon)
- Diamant

- Liant : permet aux grains de tenir ensemble.

- Céramique
- Résinoïde
- Caoutchouteux
- Métallique

- Pores : stockent les microcopeaux

$$\rightarrow V_{total} = V_{grains} + V_{liant} + V_{pores}$$

Plus le volume des pores est grand, plus la meule est « ouverte » et moins elle s'écrasera facilement.

Les grains

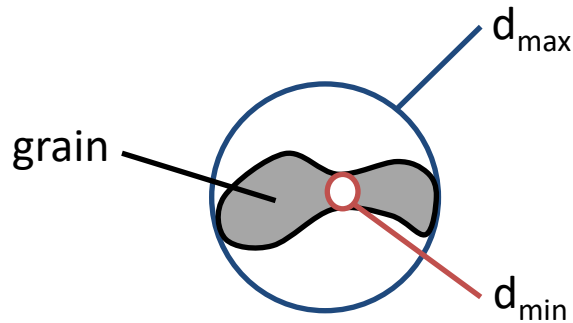
- Dimensions et granulométries
 - Classement par tamisage (grains de 8 à 220)
Le chiffre indique le nombre de maille par pouce linéaire (25,4mm) du tamis. Plus il est élevé, plus le grain est fin.
 - Classement par vitesse de sédimentation (grains 240 à 600)
On mesure le temps de descente d'un grain dans 1m d'eau.

Les grains

Gros Ebauche	Moyen ½ finition	Fin Finition / affutage	Très fin Super finition / rodage
8	30	90	220
10	36	100	240
12	46	120	280
14	54	150	320
16	60	180	400
20	70		500
24	80		600

Forme et rugosité des gains

- La forme et la rugosité de surface influence le pouvoir d'accrochage et rétention du grain d'abrasif par le liant, donc sa durée d'utilisation.
- Les grains longs sont mieux retenus que les grains sphériques



$$\frac{d_{min}}{d_{max}} = \begin{cases} 1 : \text{forme sphérique} \\ 0,2 : \text{forme aiguille} \end{cases}$$

Dureté des grains

- Les abrasifs sont classés suivant l'échelle de Mohs. Celle-ci classe les éléments métallurgiques et les minéraux par ordre de dureté croissante, chaque élément pouvant rayer les éléments qui les précèdent.

Talc → Gyse → Calcite → Spathfluor → Apatite → Orthoclase → Quartz
→ Topaze → Saphir → Diamant

Espèces d'abrasifs

- Dans 99% des cas, on utilise les abrasifs courants qui sont :
 - Alumine.
 - On la trouve à l'état naturel pour 91% à 70% dans l'emmeri et pour 94% dans le corindon.
 - Carbure de Silicium
 - Se fabrique à partir de sable et de coke.
 - Plus dur que l'alumine
 - Convient mieux pour rectifier les fontes
 - À éviter pour rectifier les aciers
 - Nitrure de bore
 - S'obtient par frittage à haute T°
 - Convient pour les aciers très durs
 - Diamant
 - Est l'abrasif le plus dur
 - Ne convient pas pour les aciers car affinité chimique pour le fer

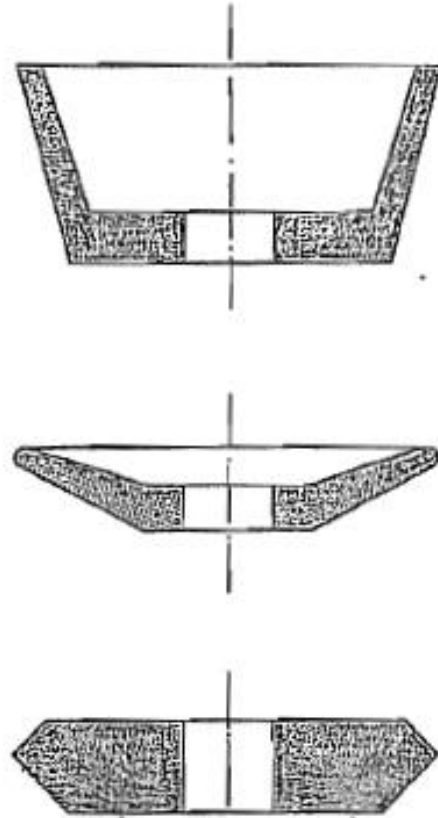
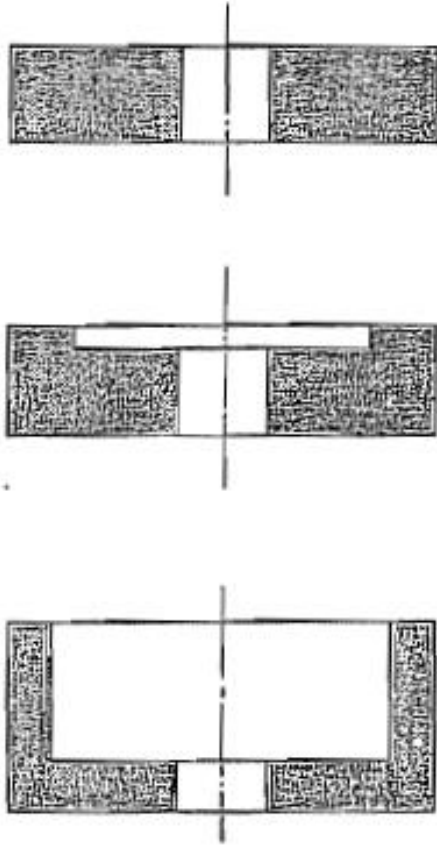
Les liants

- Les liants sont caractérisés par :
 - Leur mode d'élaboration
 - Leur mode d'adhérence aux grains
 - Leur caractéristiques mécaniques
 - Leur affinités chimiques
- Liants céramiques ou vitrifiés
 - Ce sont les liants pour presque toutes les meules de rectifications (Al_2O_3 et SiC)
 - Leur structure poreuse facilite la lubrification
 - Les moules vitrifiés sont utilisés sans problème jusqu'à 35m/s
- Liants résinoïdes
 - Enrobent les grains dans une structure continue
 - Obtenues par réaction du phénol et du formol, les résines fondent et polymérisent à 180°
 - Utilisées pour les meules diamants ou au nitrure de bore
 - Permettent des vitesses de 80m/s

Les liants

- Liants caoutchouc
 - Meule pour rectification à grande vitesse de gorges de roulement
 - Meules pour la rectification de finition
 - Meules pour la rectification sans centre
- Liants métalliques
 - Force de rétentions des grains très grande
 - Meules diamants et en nitrure de bore
- Liants gomme laque
 - Meules minces de tronçonnage
 - Meules destinés à donner un poli miroir
- Liants à base de magnésie
 - Résistance mécanique faible
 - Utilisée en coutellerie

Formes des meules



Retailage

- Lors du travail de la meule, les grains s'émousent, c-à-d perdent leur qualité tranchante. La force nécessaire à la coupe par un grain croît avec leur émoussement.
 - Soit le grain se rompt, et présente un nouveau tranchant vif.
 - Soit le grain se détache et découvre un nouveau grain tranchant.
- Ceci provoque des vibrations de coupes, d'où nécessité de retailer la meule à l'aide d'un diamant (industriel), puisqu'il faut être capable de couper les grains.
- Le diamantage se fait sur la rectifieuse même en simulant le travail d'un tour.

Mode d'utilisation de la rectification

- La surface active de la meule peut être:
 - Parallèle à l'axe de rotation de la meule
 - Rectification cylindrique en plongée
 - Rectification cylindrique longitudinale
 - Rectification plane tangentielle
 - Perpendiculaire à l'axe de rotation de la meule
 - Rectification d'un épaulement
 - Rectification plane en boret
 - Oblique par rapport à l'axe de rotation de la meule
 - Rectification extérieure en plongée oblique
 - Rectification cylindrique en plongée droite
 - Rectification des filets
- Le déplacement relatif de la meule et de la pièce peut se faire :
 - Parallèlement à l'axe de rotation de la meule
 - Rectification cylindrique pour générer des cylindres, des cônes, des hélices
 - Perpendiculairement à l'axe de rotation de la meule
 - Formes de révolution variées
 - Rainures de formes complexes

Opérations de rectification

- Suivant la forme des surfaces usinées
 - Rectification cylindrique
 - Rectification plane
 - Rectifications de profils
- Suivant le déplacement relatif pièce-meule
 - Rectification en plongée droite
 - Rectification en plongée oblique
 - Rectification longitudinale
 - Rectification en balayage
 - Rectification en enfilade
- Suivant le mode de tenue et mise en mouvement de la pièce
 - Rectification entrepointes
 - Rectification sans centres
 - Rectification en l'air
- Suivant la partie active et le mode d'action de la pièce
 - Rectification tangentielle
 - Rectification dans la masse

Aspect économique

- La rectification est une opération COUTEÛSE car nécessite :
 - Investissement de base assez lourd
 - Formation de techniciens spécialisés

Usinage

6. LUBRIFICATION

Généralités

- Paramètre très important de l'usinage des métaux :
- Différents types de lubrifiants :
 - Huiles
 - Émulsions
 - Aérosols
 - Air
 - D'autres gaz
- Deux exceptions : la fonte et le laiton se travaillent à sec.

Fonctions

- Fonctions des lubrifiants :
 - Maintenir la pièce à température stable lorsque les tolérances sont réduites.
 - Maximiser la durée de vie des outils de coupe en lubrifiant l'arête de coupe et en réduisant de phénomène de copeau rapporté.
 - Évacuer la chaleur pour empêcher le collage des copeaux sur les outils.
 - Évacuer les copeaux de la zone d'usinage.
 - Assurer aux opérations de bonnes conditions de coupe.

Composition des fluides

- En fonction de l'usinage, ils sont élaborés par des formulaires qui font appel à de nombreux produits de base :
 - Huiles minérale (issues du pétrole)
 - Graisses animales
 - Huiles végétales
- On peut distinguer parmi ces huiles :
 - Huiles entières
 - minérales additionnées ou non

Composition des fluides

- Émulsions contenant
 - Une base type d'huile minérale
 - Un émulseur
 - Un agent anticorrosion
 - Additifs type extrême pression
 - Des bactéricides et/ou fongicides
 - Agents antimousse
 - De l'eau
 - Des parfums
- Ces fluides sont fournis sous forme de concentrés qu'il faut diluer dans l'eau (2 à 10%)
- Fluide type microémulsion (idem + solvant 1,5 à 5%)
- Fluide synthétique

Risques liés aux fluides

- Au cours de l'usinage, les fluides se chargent :
 - De métaux plus ou moins solubilisés
 - De composés issus de la dégradation technique des huiles de coupe
 - De contaminants biologiques moisissures bactéricides
- Il convient donc :
 - De vérifier régulièrement la qualité des fluides
 - PH
 - Dureté de l'eau
 - teneur en bactérie
 - d'assainir le poste de travail à l'aide de ventilation/aspiration
 - d'éviter tout contact cutané avec les produits : EPI (équipement de protection individuel)

Utilisation

- Émulsions huileuses

Cette solution est la plus utilisée car elle permet d'évacuer le plus de **calories** par kilogramme de lubrifiant

- Perçage
- Tournage
- Graissage

- Huile de coupe entière

- Forage profond
- Honage
- Brockage

Evacuation des copeaux

- Dans l'industrie grande série, le liquide de coupe permet également d'évacuer les copeaux de la zone de coupe vers un dispositif de centralisation des copeaux.

Usinage

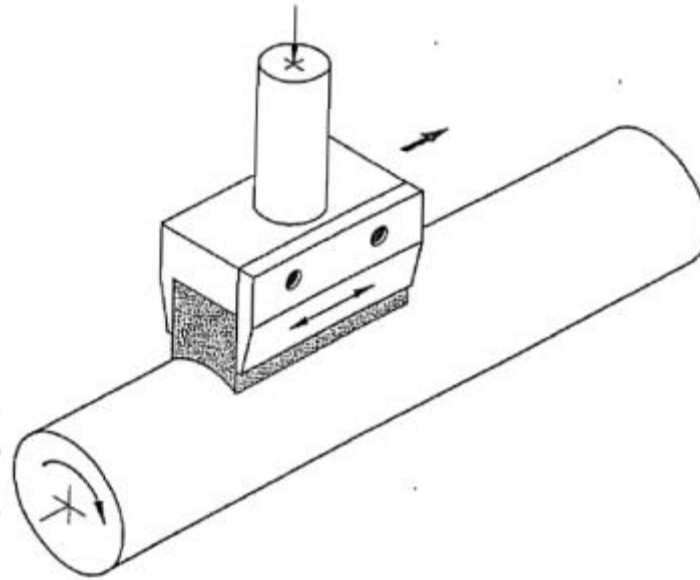
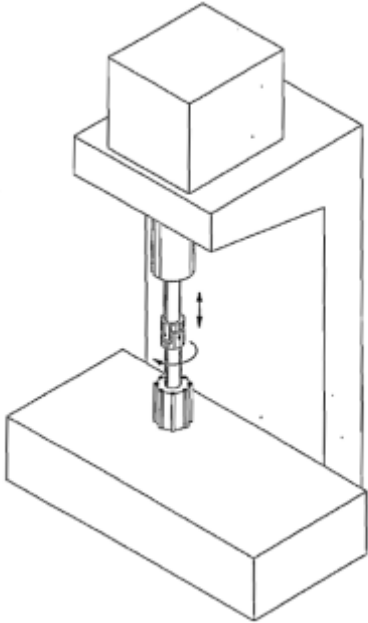
7. HONAGE OU RODAGE À LA PIÈCE

Généralités

- Le honage consiste à apporter une haute finition à la pièce à l'aide de pierres abrasives.
- L'outil est un ensemble de pierres longues montées sur un cylindre.
 - L'objectif :
 - Améliorer la cylindricité
 - Améliorer son état de surface
- L'outil est animé d'un mouvement de rotation (vitesse circonférentielle), d'un mouvement de reciprocation (va et vient ou montée et descente)
 - L'objectif est d'obtenir une rugosité à traits croisés (circulaire dans le cas du tournage ou de la rectification).

Généralités

- On peut distinguer :
 - Le houeage rapide : rotation rapide + déplacement lent
 - Le houeage lent: rotation lente + déplacement rapide
- Il permet de corriger les erreurs de formes suivantes :



Usinage

8. POLISSAGE

Généralités

- Le polissage est exclusivement destiné à améliorer l'état de surface de manière à ??
 - Un poli miroir
- La surface reflète les mirages de manière satisfaisante pour la vue.

On utilise :

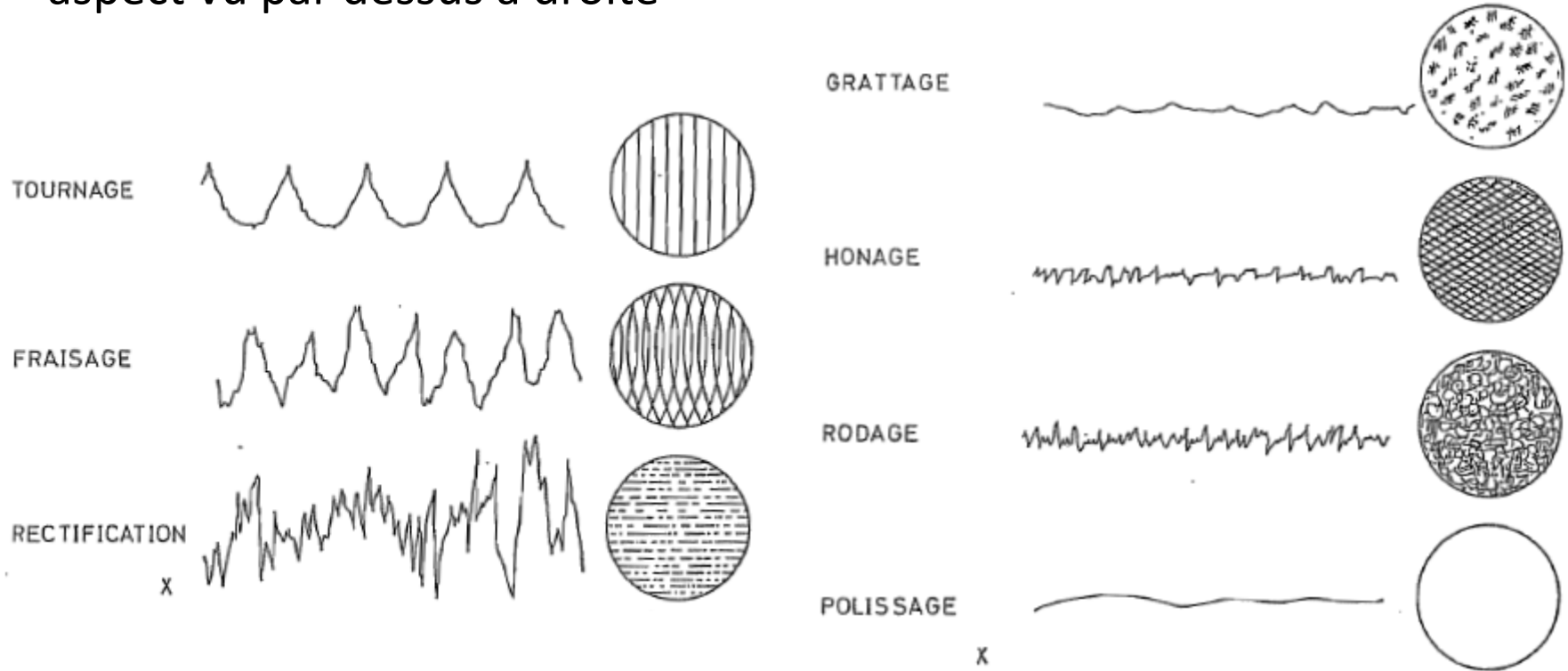
- Une pâte abrasive
- Des tissus
- Des cuirs

Usinage

9. COMPARAISONS DES ÉTATS DE SURFACE OBTENUS PAR DIVERS PROCÉDÉS D'USINAGE

Généralités

La figure ci-dessous représente le profil des rugosités à gauche et son aspect vu par dessus à droite



Usinage

10. PROCÉDÉS PARTICULIERS DE FINITION

Généralités

- Sablage
 - Consiste à projeter sur la pièce du sable ou un abrasif à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse.
- Effets :
 - Décape, désoxyde une couche superficielle
 - Crée une rugosité qui facilite l'accroche d'un revêtement (ex : ???)
 - Dépolit Le verre
 - À forte pression, les impacts provoquent une déformation plastique , création de contraintes de compression → shot peening
- Évolution : sable est remplacé par des
 - ??? (oxyde de l'Al)
 - Carbure de silicium

Machines

- Machine :
 - Grenailage : Consiste à projeter à grande vitesse
 - Des petites billes d'acier
 - Des petites billes de verre
 - Des petites billes de céramique
- Procédés de projection
 - Pneumatique : La grenaille est mélangé à de l'air comprimé
 - Mécanique : utilise une turbine, une roue à palette tourne rapidement et la force centrifuge projette la grenaille.

2^{ème} partie

Additive manufacturing

Usinage

1. GÉNÉRALITÉS

Définitions

- La fabrication additive désigne les procédés de fabrications
 - D'ajout de matière
 - La plupart du temps assistés par ordinateur
- Procédé de mise en forme par empilement de couches successives
- En opposition à l'usinage retrait de couches successives

Usage

2. APPLICATIONS

Applications

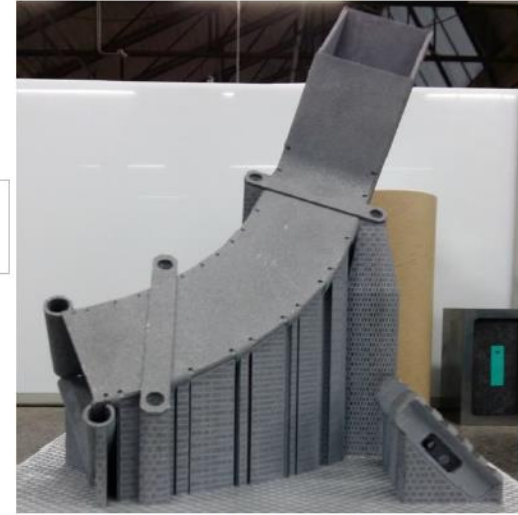
- La fabrication additive est économiquement appropriée à :
 - La production de très petits composants en grande série
 - La production de pièce avec une grande complexité géométrique

AISI10Mg : Alliage d'aluminium pour applications légères

Fourche
DTM



Couloir
d'éjection



42CrMo4 : Acier allié pour applications usuelles armurières

A venir prochainement



ADDITIVE MANUFACTURING: Design Rules

3. Matériaux utilisés : Propriétés

Propriétés

	MS1	17-4PH	AlSi10Mg	42CrMo4
Epaisseur de couche (µm)	40	20	30	à venir
Précision de la pièce (mm)				
- Petites pièces (Max 50 mm)	± 0,05	± 0,05	± 0,1	
- Pièces + grandes	± 0,2%	± 0,2%	± 0,5	
Epaisseur de paroi minimale (mm)	0,4			
Rugosité - Ra (µm)				
- Après micro-billage	4 à 6,5	7,5	5 à 9	
- Après polissage	< 0,2	< 0,2	< 0,8	
Volume construit (cm ³ /h) en M280	~ 10	~ 7	~ 25	
Résistance à la traction (MPa)				
- état fusionné	1100 ± 100	770 ± 100	460 ± 20	
- état traité	1950 ± 100	1310 ± 100	350 ± 10	
Limite d'élasticité (Rp 0,2%) (MPa)				
- état fusionné	1000 ± 100	720 ± 100	250 ± 10	
- état traité	1900 ± 100	1200 ± 100	230 ± 15	
Elongation à la rupture (%)				
- état fusionné	8 ± 3	21	6 ± 2	
- état traité	2 ± 1	12,5	12 ± 2	
Module de Young (GPa)	180 ± 20		70 ± 10	
Dureté (HRC)				
- état fusionné	33-37			
- état traité	50-54	41	119 ± 5 HBW	

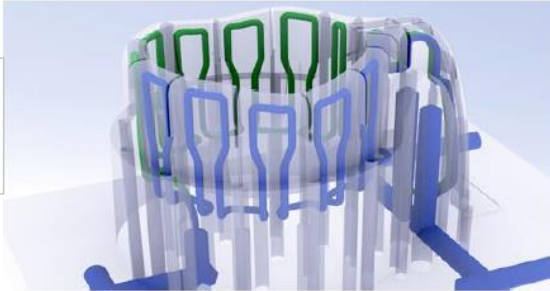
Conduite de fluides :

La technologie permet de conduire les fluides (gaz, liquides) via des canaux de formes complexes

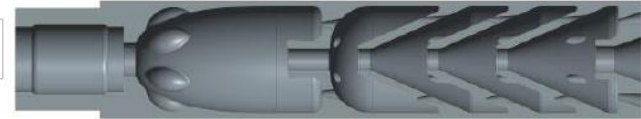
Il n'y a pas de limitation de forme ni de trajectoire

Seule l'imagination est la limite !

Inserts pour
moule
d'injection

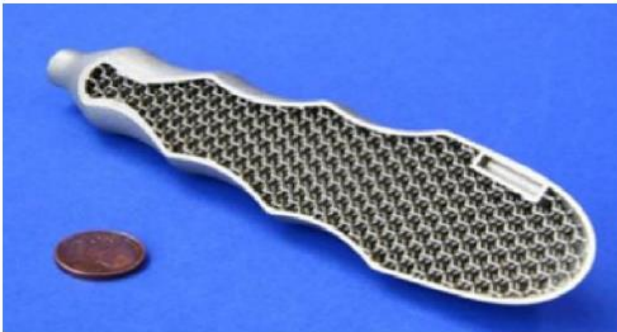


Atténuateur



Allègement :

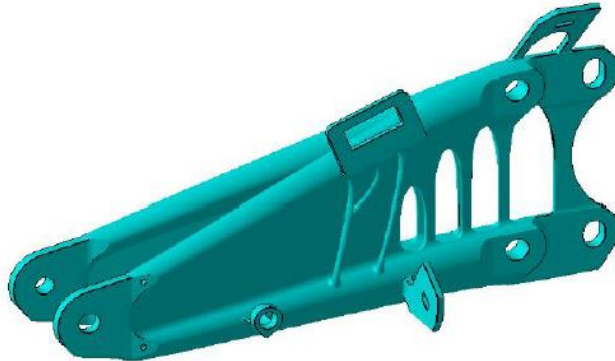
On ajoute la matière là seulement où c'est nécessaire



4. Avantages : Fonctions

Complexité :

La technologie permet de réaliser des formes complexes à ISO-coûts
Il n'y a cependant quelques limitations de forme liées à la mise en œuvre des pièces
Seule l'imagination est la limite !



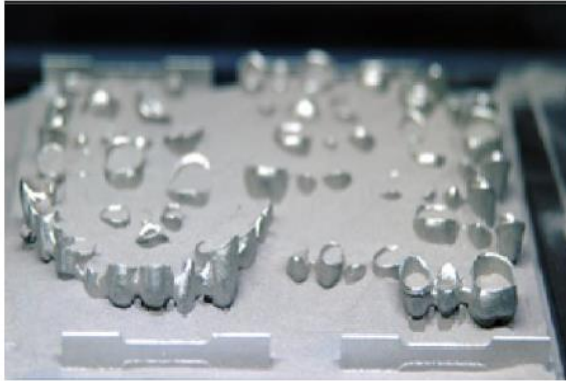
Assemblage :

Permet de regrouper des fonctions au sein d'une même pièce



Variabilité :

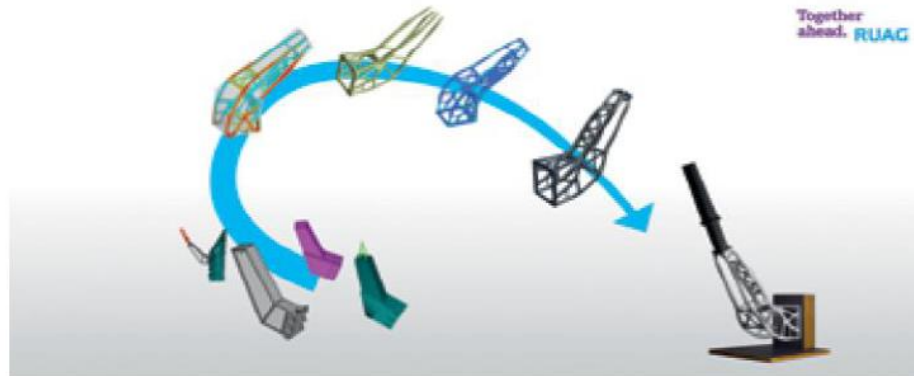
La technologie permet de réaliser des pièces avec des géométries paramétrables à ISO-coûts
La variable est gratuite



Chape pour bridge

Optimisation topologique

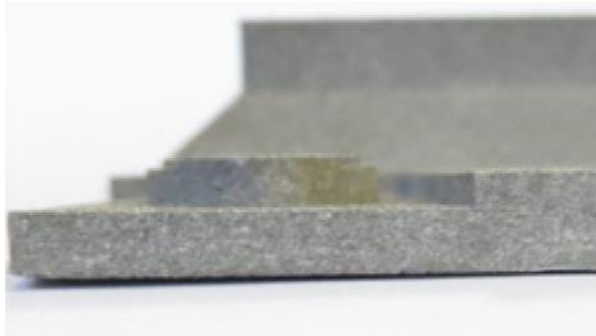
Permet d'optimiser les structures en fonction des charges appliquées



Déformations

La solidification rapide crée des contraintes dues à la solidification rapide.

Les contraintes internes peuvent provoquer des déformations si les supports ne sont pas suffisants ou si la géométrie les favorise



Déformation liée aux contraintes résiduelles



Séparation entre la pièce et les supports

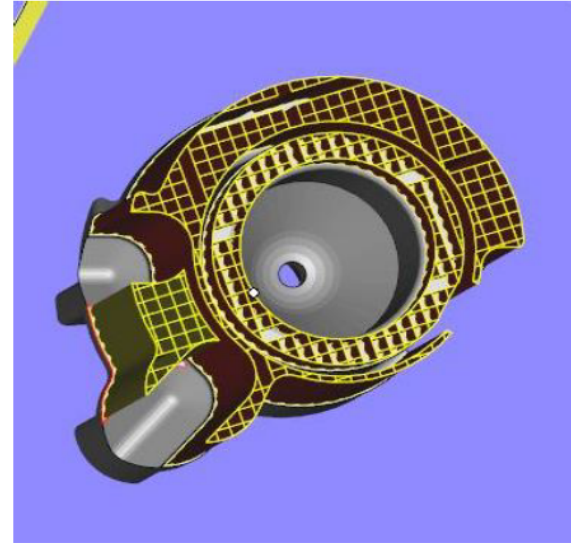
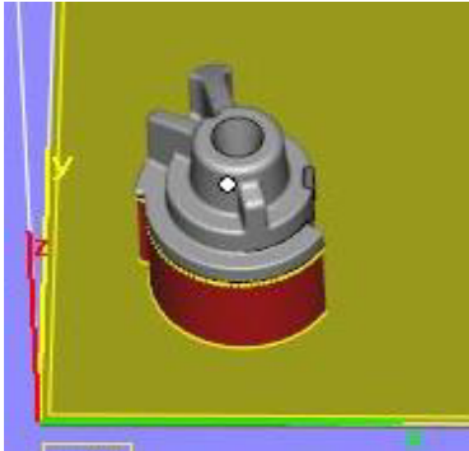
Positionnement

Les imprimantes 3D, à l'instar des autres technologies, a ses propres avantages et ses inconvénients.

Le référentiel ci-dessous a but de déterminer les limites liées à la géométrie des pièces et d'en apporter une solution.

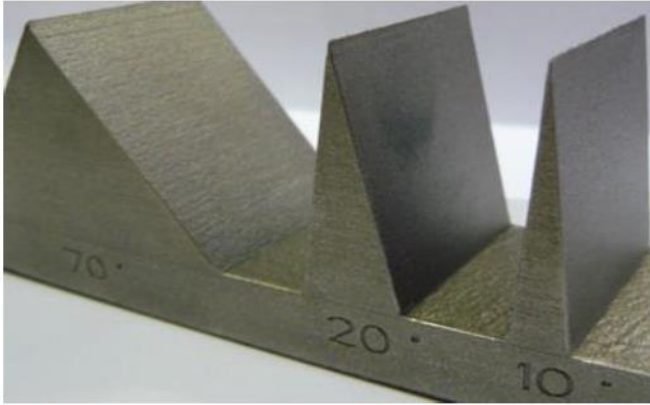
Le deuxième but de ce référentiel est d'aider à concevoir des pièces dépourvues au maximum de supports. En effet, les supports nécessitent des usinages supplémentaires pour les retirer et donc augmente le coût de fabrication.

Il est très important de comprendre qu'inclinant la pièce selon les axes X, Y, Z ou en positionnant la pièce sur ses faces latérales, vous pourrez peut-être sortir de certains cas critiques et/ou limiter l'utilisation de support



Les angles 70°, 20°, 10°

MS1 / 17-4PH

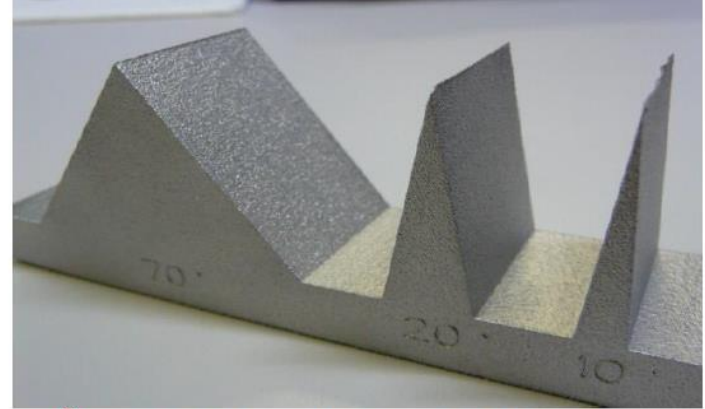


< 20° => Sommet légèrement denté

Solution : prévoir une surépaisseur et usiner.

Précision : +/- 0.6°

AlSi10Mg



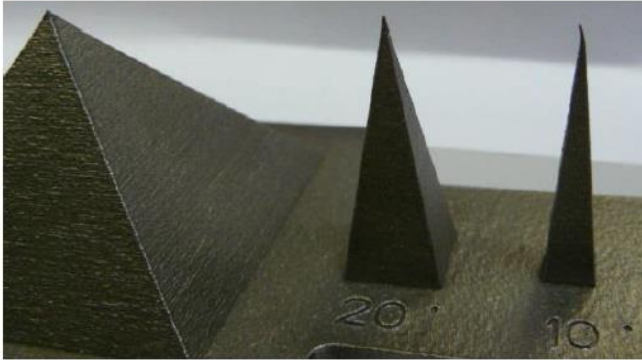
< 30° => Sommet légèrement denté

Solution : prévoir une surépaisseur et usiner.

Précision : +/- 0.3°

Les angles

MS1 / 17-4PH

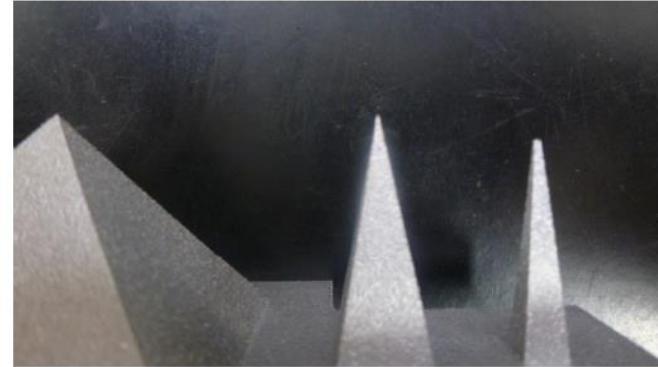


$< 20^\circ \Rightarrow$ Pointe tordue

Solution : prévoir une surépaisseur et usiner.

Précision : $\pm 0.5^\circ$

AlSi10Mg



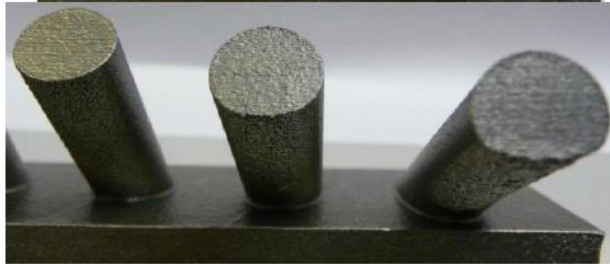
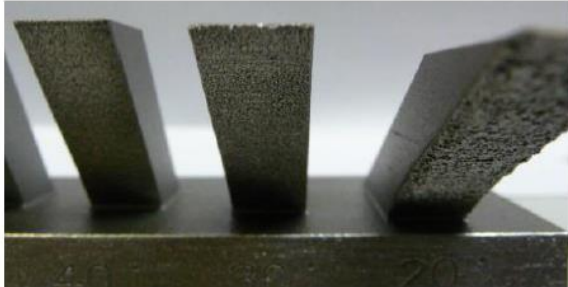
$< 20^\circ \Rightarrow$ Pointe cassée

Solution : prévoir une surépaisseur et usiner.

Précision : $\pm 0.3^\circ$

Inclinaisons

MS1 / 17-4PH

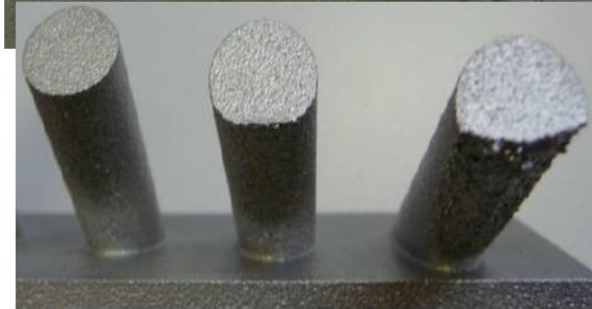
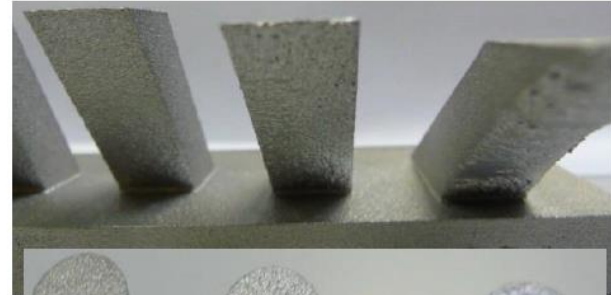


$< 45^\circ \Rightarrow$ Effondrement, perte de matière et rugosité \uparrow

Solution : prévoir des supports et/ou surépaisseur

Précision : +/- 0.03mm

AlSi10Mg



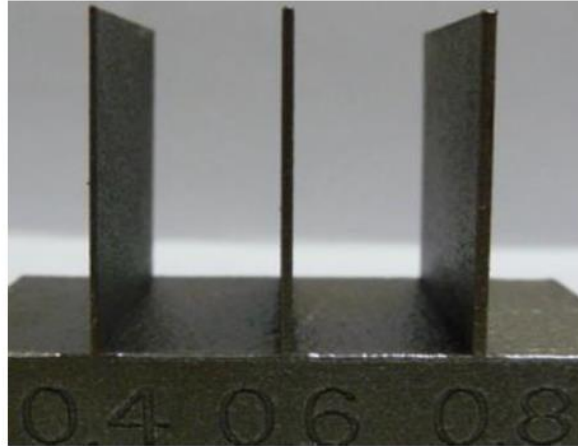
$< 45^\circ \Rightarrow$ Effondrement, perte de matière et rugosité \uparrow

Solution : prévoir des supports et/ou surépaisseur

Précision : +/- 0.03mm

Epaisseurs minimum 0,4; 0,6 et 0,8 mm - Hauteur : 20 mm

MS1 / 17-4PH

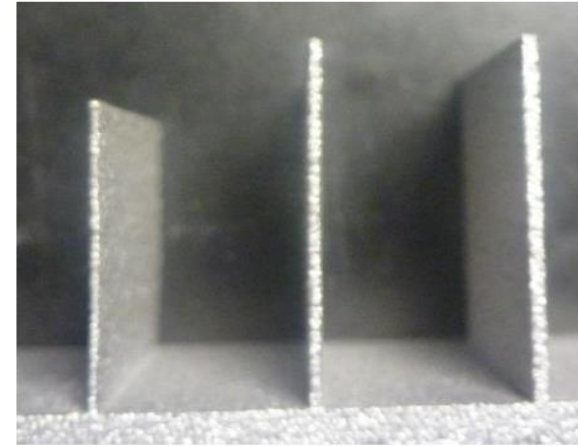


< 0,4 mm => Ondulation ou impossible à imprimer

Solution : prévoir une surépaisseur et usiner.

Précision : +/- 0.05 mm

AlSi10Mg



< 0,8 mm => Ondulation ou impossible à imprimer

Solution : prévoir une surépaisseur et usiner.

Précision : +/- 0.05 mm

Alésages

MS1 / 17-4PH



< 8 mm => effondrement du haut jusqu'à 0.3mm

Solution : incliner à 30° ou passage d'un alésoir

Précision : +/- 0.05 mm

Solution alternative : forme en goutte d'eau pour minimiser la surface non supportée



AlSi10Mg



< 8 mm => effondrement du haut jusqu'à 0.5 mm

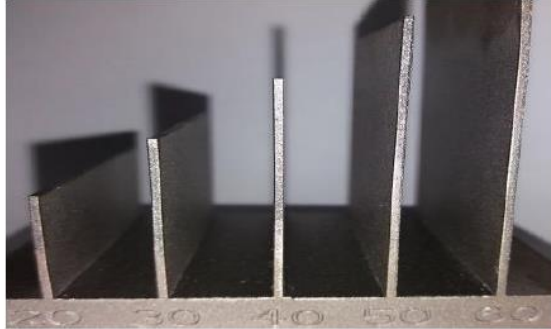
Solution : incliner à 45° ou passage d'un alésoir

Précision : +/- 0.05 mm

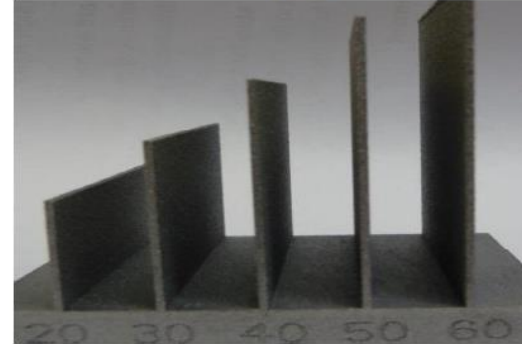
Ratio hauteur/épaisseur

Parois

MS1 / 17-4PH



AlSi10Mg

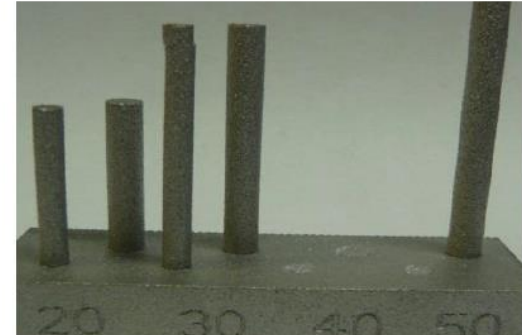


Rapport max hauteur/épaisseur conseillé : 50:1

Cylindres



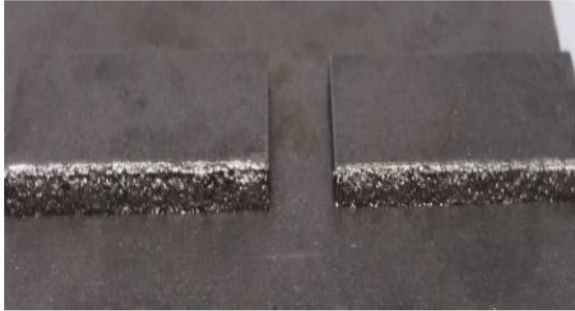
Rapport max hauteur/épaisseur conseillé : 50:1



Rapport max hauteur/épaisseur conseillé : 20:3

Les porte à faux

MS1 / 17-4PH



AlSi10Mg



Effondrement

Solution : prévoir un support et usiner.



Effondrement

Solution : prévoir un support et usiner.

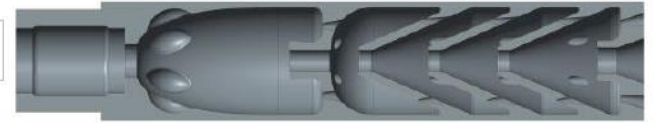
MS1 : Acier Maraging

Acier hautes performances pour outillages et ingénierie mécanique

Inserts pour
moule
d'injection



Atténuateur



17-4 PH : Acier Inox

Acier inox résistant à l'abrasion pour pièces d'ingénierie mécanique

Bouchon de
frette



Couloir
d'alimentation



Principe SLM (Selective Laser Melting)



Pour refroidir le métal en fusion, nous avons besoin d'enlever les calories
Les supports vont guider les calories vers la plateforme afin de refroidir la pièce



Pour maintenir la pièce en place (dû aux contraintes thermiques), nous avons besoin de clamer la pièce à la plateforme
Les supports vont jouer le rôle de clame

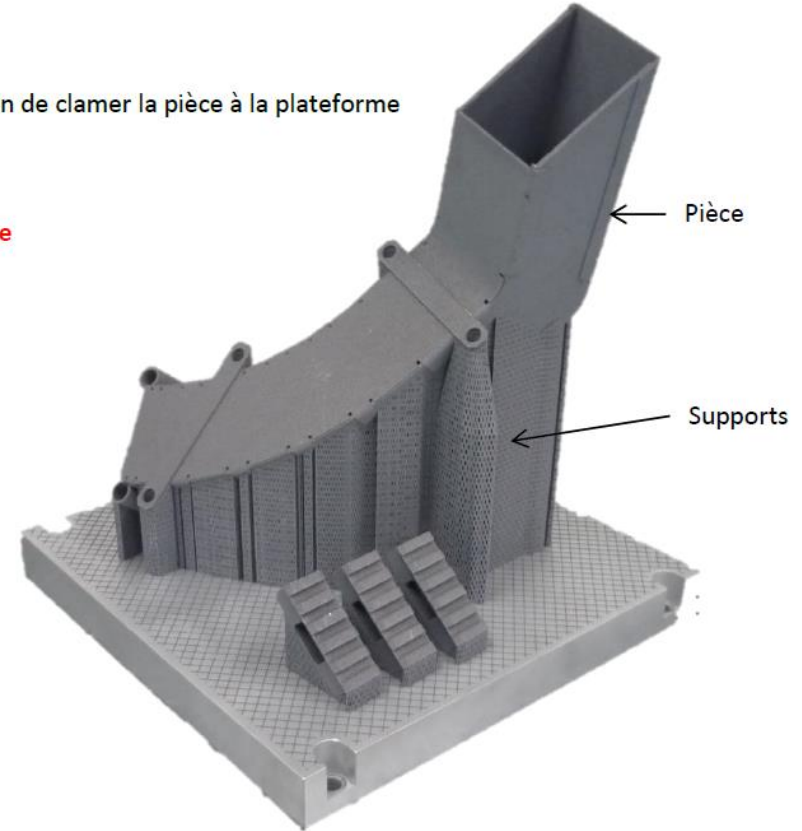
Les supports sont donc nécessaires à toute pièce créée par fabrication additive métallique

=> Supports = perte de matière

=> Supports = perte de temps

=> Supports = contrainte de fabrication

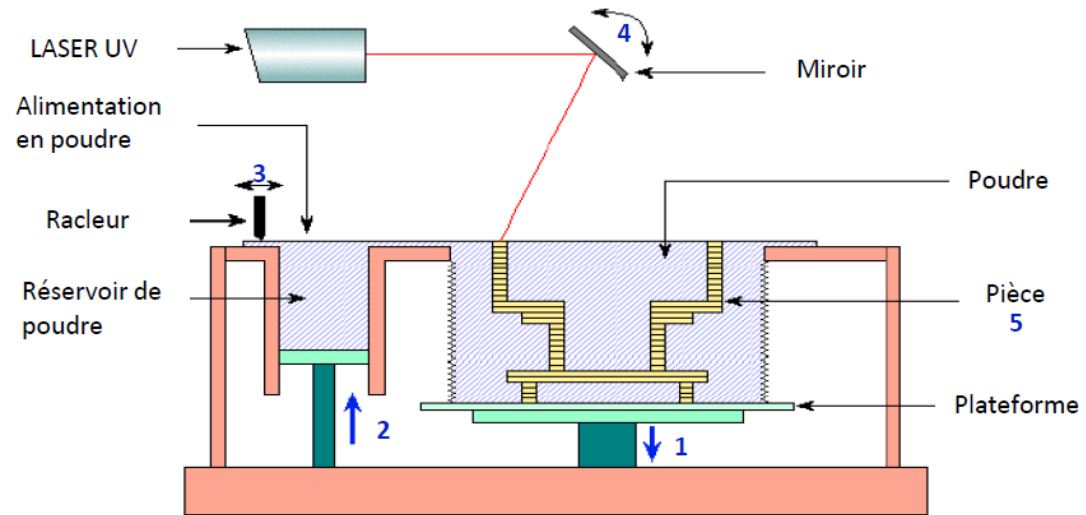
=> Supports = coûts supplémentaires



Principe SLM (Selective Laser Melting)

Il s'agit d'un mouvement à 5 temps :

- 1 -> La plateforme descend de 1 épaisseur de couche
- 2 -> Le réservoir monte la poudre pour 1 épaisseur de couche
- 3 -> Le racleur étale la poudre sur la plateforme
- 4 -> La poudre est fusionnée au moyen d'un faisceau laser dont la trajectoire est déterminée par des miroirs
- 5 -> La tranche de la pièce est terminée
- 6 -> Le cycle peut recommencer ->1



Principe Software

