

# Procédés de fabrication par usinage

Physique de la coupe, tournage & fraisage, matériaux, formes et défauts

Dr. S. Soubielle



# Dans ce cours, nous allons...



## ... Définir la physique de coupe en usinage

- ... Mouvements outil / matière et formation du copeau
- ... Sollicitations thermomécaniques sur l'outil
- ... Matières et types d'outils

## ... Décrire les procédés de tournage et de fraisage

- ... Types de mouvements de l'outil / de la pièce
- ... Types de machines, d'opérations, terminologie
- ... Topologie d'une pièce de tournage / de fraisage
- ... Paramètres d'usinage et qualité d'usinage

## ... Design et mise en plan de pièces usinées

... Limitations de forme, design vs. coût de fabrication

# Principe de l'usinage



# Usinage = Fabrication par enlèvement de matière Tournage Fraisage

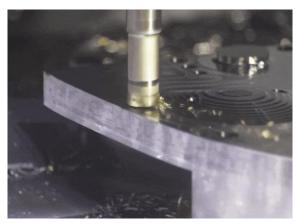


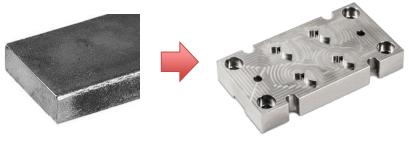




--> Pièces « de révolution »







--> Pièces « prismatiques »

# Principe et cinématique de la coupe



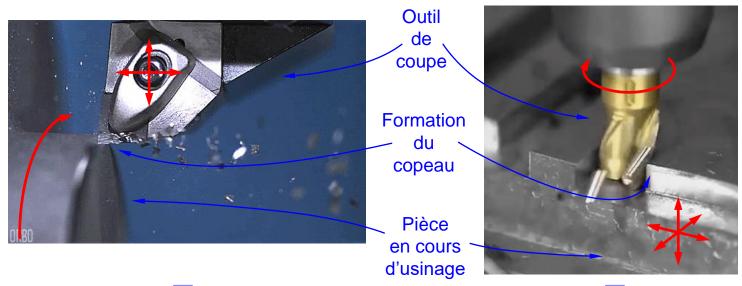
#### **Tournage**

#### **Fraisage**



## Principe de la coupe







## Cinématique de la coupe



Matière à usiner → En translation

(trois axes)

Outil de coupe → En translation

(deux axes)

Outil de coupe

→ En rotation

# Physique de coupe

Doit être le + grand possible (\preceq contraintes dans l'outil)



## Formation du copeau

Mouvement relatif matière / outil

- + Pointe tranchante de l'outil
- → Arrachage de matière (copeau)

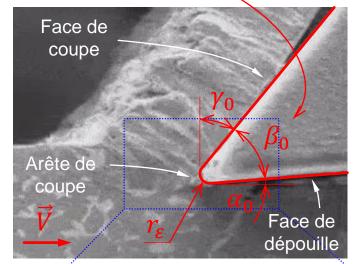
## Physique des matériaux

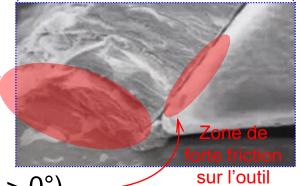
Forte contrainte locale (cisaillement)

- → Déformation plastique intense
- → Echauffement local (→ 600-800 °C)

#### Géométrie de l'outil

- Arête de coupe → Sépare le copeau
- − Face de coupe  $\rightarrow$  Écarte le copeau ( $\gamma_0 > 0^\circ$ )
- − Face de dépouille → Ne doit pas être en contact !  $(\alpha_0 > 0^\circ)$
- Rayon d'outil  $r_{\varepsilon}$  → Empêche un niveau  $\infty$  de contrainte sur l'outil





# Matériaux et types d'outils (1/2)

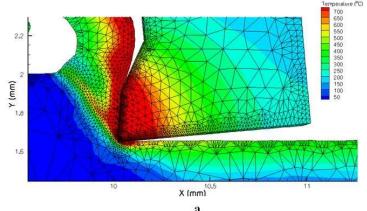


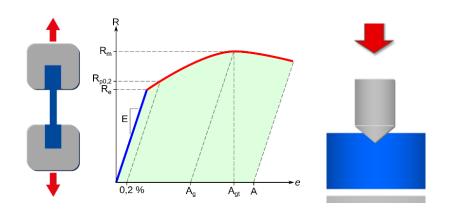
## Sollicitations thermomécaniques sur l'outil

- Contraintes mécaniques de surface (frottements sur la face de coupe)
  - → Très élevées
- Contraintes mécaniques à cœur (pointe d'outil)
  - → Très élevées
- Températures locales
  - → Très élevées



- Résistance à l'abrasion +++
- Limite élastique R<sub>e</sub> +++
- Dureté de surface H+++





# Matériaux et types d'outils (2/2)



## Matière de l'outil de coupe

- Carbures métalliques (cermet)
  - Dureté, limite élastique, et résistance à l'abrasion extrêmement élevées, y compris à haute température
  - → Utilisation très répandue
  - Obtenus par frittage de poudre (WC + Co)
  - Plaquette fixée sur un porte-outil



- Aciers alliés trempés
- Résistance mécanique élevée
- Très bonne tenue à la trempe à hte t°

















# Liquides de coupes



#### Fonctions

- Réduire les frottements
  - → Dégagement de chaleur ↓
  - → Frottements ↓
  - → Contraintes mécaniques ↓
  - → Rendement énergétique ↑
- Évacuer les calories
  - → T° locales (outil et pièce) ↓
- Évacuer les copeaux

## Types

- Huiles de coupe
- Solutions aqueuses (émulsions)



Usinage « à sec » pratiqué dans certains cas : matières pouvant interagir chimiquement avec le liquide de coupe, matières facilement usinables, ...

# Choix des paramètres de coupe (1/3)

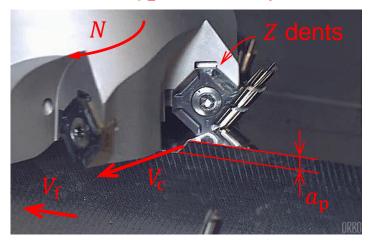


## Principe

# Vitesse relative outil / matière & dim. du copeau → impact sur :

- Contraintes thermomécaniques (vues par la pièce et par l'outil)
- Efforts sur la machine d'usinage
- Puissance nécessaire à la coupe
- Qualité des surfaces usinées

#### $f_z$ = avance par dent



## · Paramètres de coupe

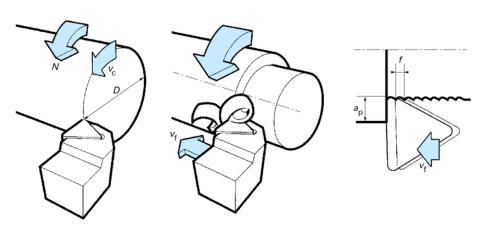
- Vitesse de coupe  $V_c$ :

$$V_{\rm c} = d \cdot \pi \cdot N$$

Vitesse d'avance V<sub>f</sub> :

$$V_{\rm f} = N \cdot f_{\rm z} \cdot Z$$

Profondeur de passe  $a_{\mathfrak{p}}$ 



# Choix des paramètres de coupe (2/3)



## Conséquences d'un choix inapproprié de $V_{\rm c}$ / $V_{\rm f}$ / $a_{ m p}$

- → Usure prématurée de l'outil
- → Piètre qualité des surfaces usinées
- → Puissance insuffisante de la machine
- → Défauts de forme des surfaces usinées



Matière à usiner	Vitesse de coupe $V_{\rm c}$ (m/min)	
	<b>Outil ARS</b>	<b>Outil Cermet</b>
Aciers - fontes	15 - 30	60 - 120
Aluminium	75 - 400	150 - 1000
Cuivre - laiton	46 - 60	120 - 160
PA6 - POM – PC	200 - 400	





Usinage des fontes & aciers 4x plus rapide avec outil cermet vs. ARS!

# Choix des paramètres de coupe (3/3)

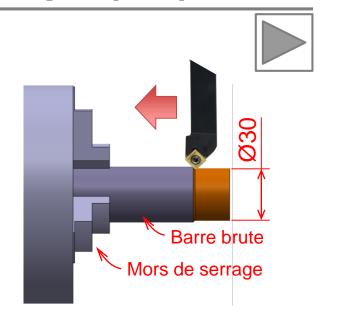


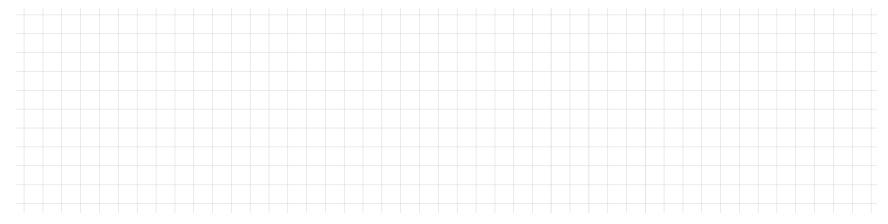
## **Exercice d'application**



On souhaite effectuer l'opération de tournage décrite sur la figure ci-contre. La barre brute est en acier, et l'outil doit avoir une avance par tour de  $f_z = 0.3$  mm.

Calculer la vitesse de rotation minimum  $N_{\min}$  de la barre brute, et la vitesse d'avance  $(V_f)_{\min}$  correspondante.





# Brut d'usinage – serrage et forme



#### **Tournage**

Maintien du brut dans la machine

Mandrin de serrage à trois mors



Serrage conventionnel



**Fraisage** 

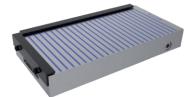






**Autres** 





2 mors

4 mors

Magn.

Brides

Plateau magn.

















# Brut d'usinage – matière



## Métaux (principaux)



Métaux ferreux (aciers & fontes)



**Aluminiums** 



Laitons

#### Autres



Matières plastiques



Céramiques



Bois

# Topologie de la pièce finie



## **Tournage**



Surfaces axisymétriques (y c. face ⊥ axe)



Possibilité de réaliser des filetages et taraudages centrés sur l'axe de révolution

Présence de faces brutes non-axisymétriques

## Fraisage (3-axes)



Surfaces planes ou év. courbées, à génératrice rectiligne





Possibilité de réaliser des trous, év. taraudés, d'axe // à celui des génératrices

# Machines d'usinage



## Tour (2-axes)

## Fraiseuse (3-axes)



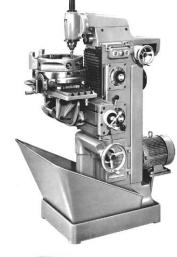
#### Par le passé

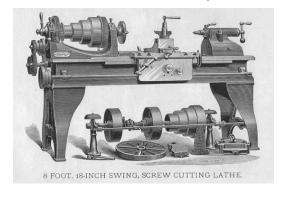


Machines dites « conventionnelles »

1 seul moteur d'entraı̂nement + synchronisation des vitesses  $(V_c, V_f, etc.)$  par réducteurs







# **(**

# Machines actuelles



Dites « à commande numérique » (CNC)

Autant de moteurs que d'axes Gestion électronique des vitesses Machines programmables





# Opérations de tournage – terminologie

@ EPFL

- Surfaces extérieures
  - chariotage (1), dressage (2), chanfreinage (3), tronçonnage (4), saignée (5), filetage (6)
- Surfaces intérieures
   alésage (7), perçage<sup>1</sup>, chanfreinage, chambrage (8), taraudage (9)
- Opération les plus courantes







dressage



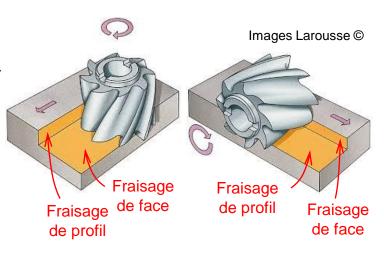
alésage

Le terme perçage est dédié aux opérations d'alésage utilisant un forêt ; il se caractérise par un fond de trou conique à 120°

# Opérations de fraisage – terminologie



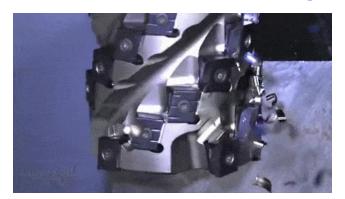
- Fraisage de face / en bout
  - Axe de la fraise ⊥ à la face à usiner
  - Surface générée axialement
- Fraisage de profil / en roulant
  - Axe de la fraise // à la face à usiner
  - Surface générée radialement



## Dans la pratique, fraisage combiné de face / de profil



fraisage majoritairement de face



fraisage majoritairement de profil

# Focus sur le perçage



## Procédé de perçage

- Outil = forêt
- Trou borgne ou débouchant / traversant
- Si borgne → fond de trou conique à 120°
- Peut être obtenu sur un tour ou sur une fraiseuse

#### Limitations

- Evacuation difficile du copeau (espace confiné)
  - → Nécessité d'effectuer des « débourrages » = sorties périodiques et répétées du forêt pour évacuer le copeau
  - → Eviter les perçages longs : opérations lentes (+ risques de casse)
- Qualité médiocre des surfaces obtenues
  - → Nécessité d'utiliser un alésoir pour obtenir des surfaces de finition





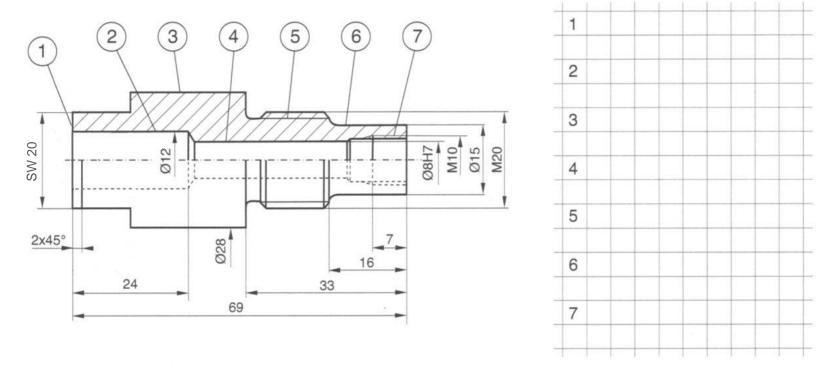
# **Exercice d'application**





Identifier les opérations d'usinage qui ont été mises en œuvre pour chaque position, afin d'obtenir la forme et la dimension spécifiée.





© Construction Mécanique, J.-F. Ferrot, exercice 5.2 (modifié), p. 69

# Et si mes pièces sont + compliquées ?



Comment usiner des pièces ayant...

... Des faces planes non ⊥ à l'axe (si pièces de révolution)

... Des surfaces courbes ayant des génératrices non // entre elles

... Des trous dans plusieurs directions

... Etc.

#### → Fraiseuse 5-axes

2 axes de rotation en plus des 3 axes de translation

## → Centre d'usinage

À la fois tour et fraiseuse (généralement 5-axes)



La description des opérations successives d'usinage (type, dimensions, outil) s'appelle la « gamme d'usinage »

## Arêtes rentrantes et arêtes sortantes



#### Arêtes rentrantes

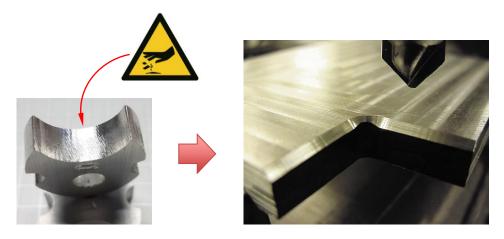
Présence d'un rayon d'outil → Congé d'arête sur arêtes rentrantes



### Arêtes sortantes

Les arêtes vives à 90° sont coupantes

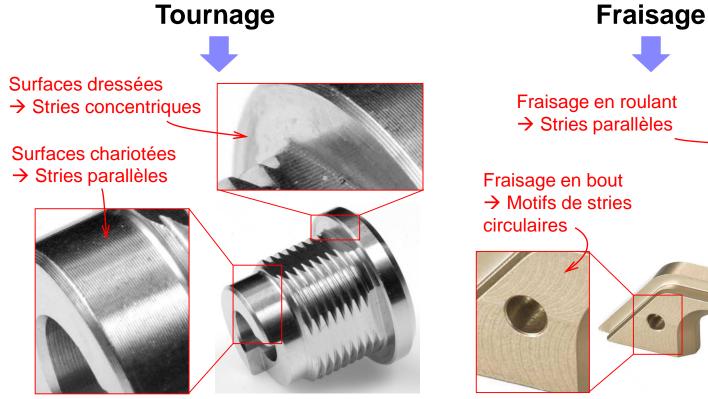
→ Chanfreins à 45° sur toutes les arêtes vives



## Qualités des surfaces usinées



#### Présence de stries sur les surf. usinées



Images: www.decolletage-legendre.com

Fraisage en roulant → Stries parallèles

Images: www. rochmecanique.fr

Les dimensions des stries dépendent 1) de la forme et du rayon de l'outil, et 2) du paramètre d'avance par tour  $f_{z}$ 

# **Exercice d'application**



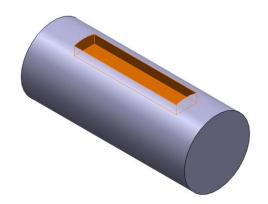
Usinable ou pas usinable ?

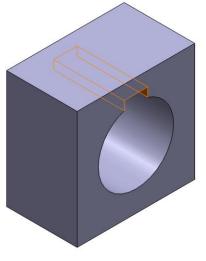


-(0)

Est-il possible d'obtenir les formes suivantes (surfaces

oranges) par usinage?





# Design et plan d'une pièce d'usinage



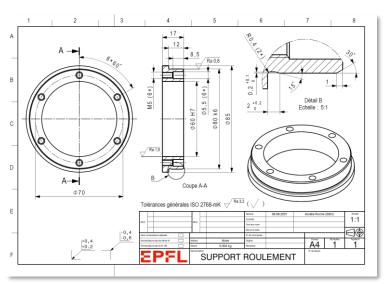
## Coût d'usinage proportionnel au volume de copeau

#### → Il faut minimiser le volume de copeau!

- Ajuster les dimensions extérieures de la pièce au plus près des dimensions du brut
- Séparer une pièce en deux, ou plus (qui seront assemblées) si le volume de copeau est notablement diminué

## Cotation d'une pièce usinée

Partout où c'est possible, les cotes posées doivent correspondre aux volumes de matière à enlever (selon la logique d'usinage prévue)



Pièce issue du projet GrowBotHub 2020-2021

# Des questions?



