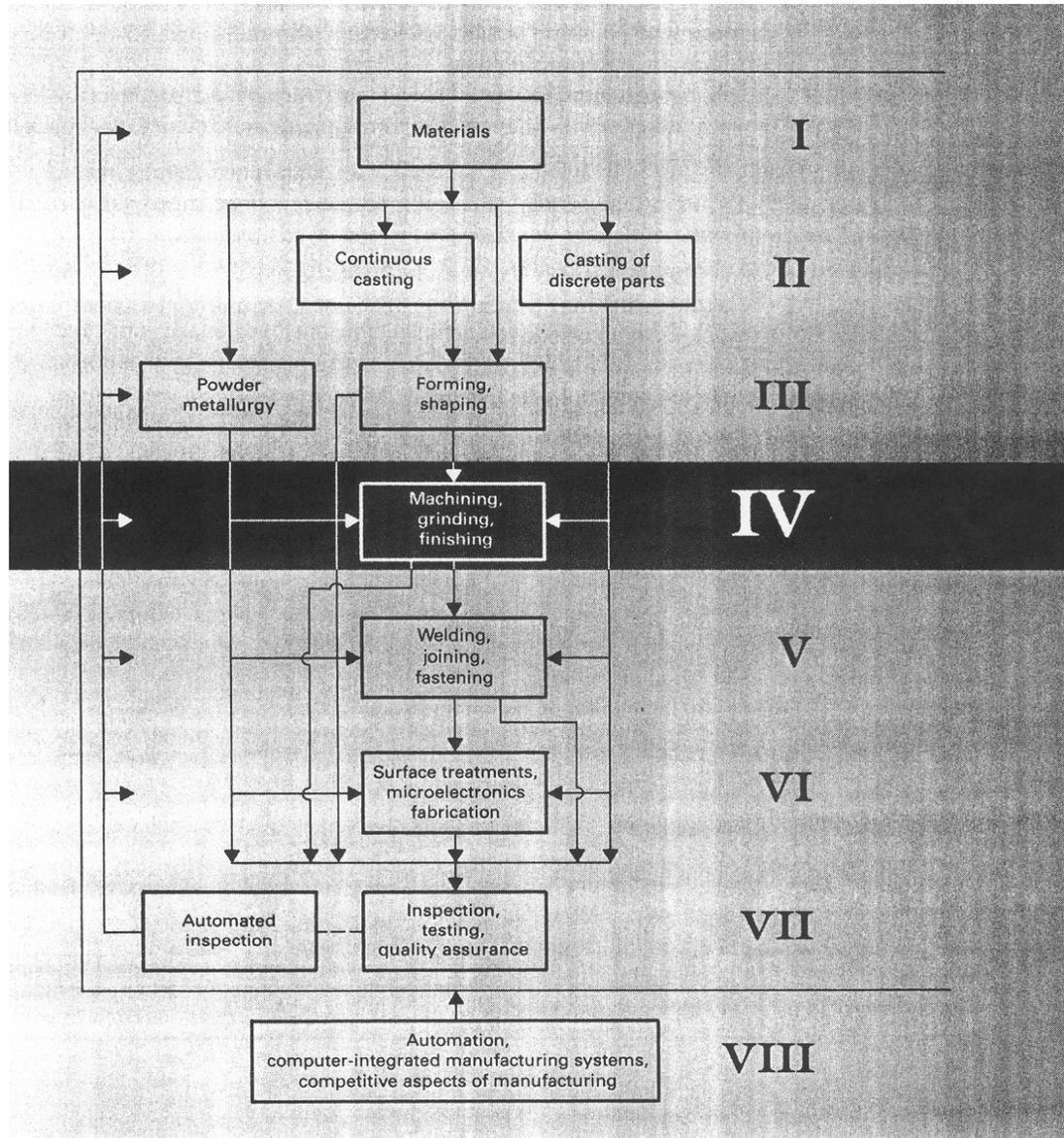
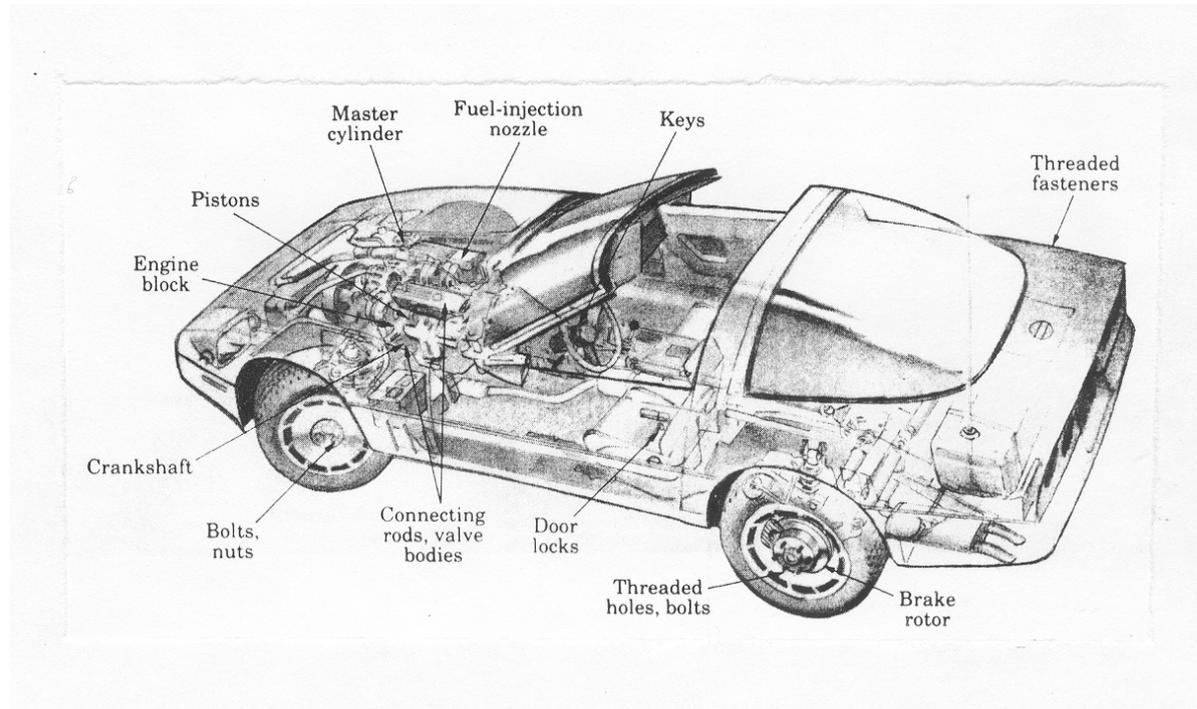


Partie III : l'usinage



L'usinage

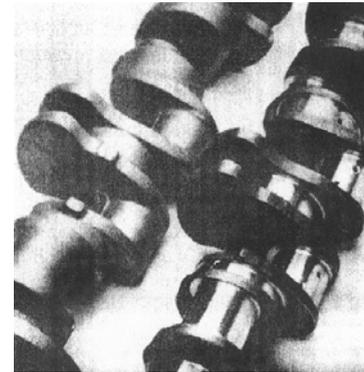


L'usinage (*machining*) couvre les procédés suivants :

- la taille (*cutting*) qui met en oeuvre divers outils, à géométrie bien déterminée,
- les procédés abrasifs tels que le meulage,
- les procédés d'usinage spéciaux utilisant des sources d'énergie électrique, chimique et optique.

Opérations de fabrication où les procédés d'enlèvement de matière sont indispensables ou généralement préférés :

- précision dimensionnelle meilleure que celle issue du moulage, et d'autres procédés de mise en forme.

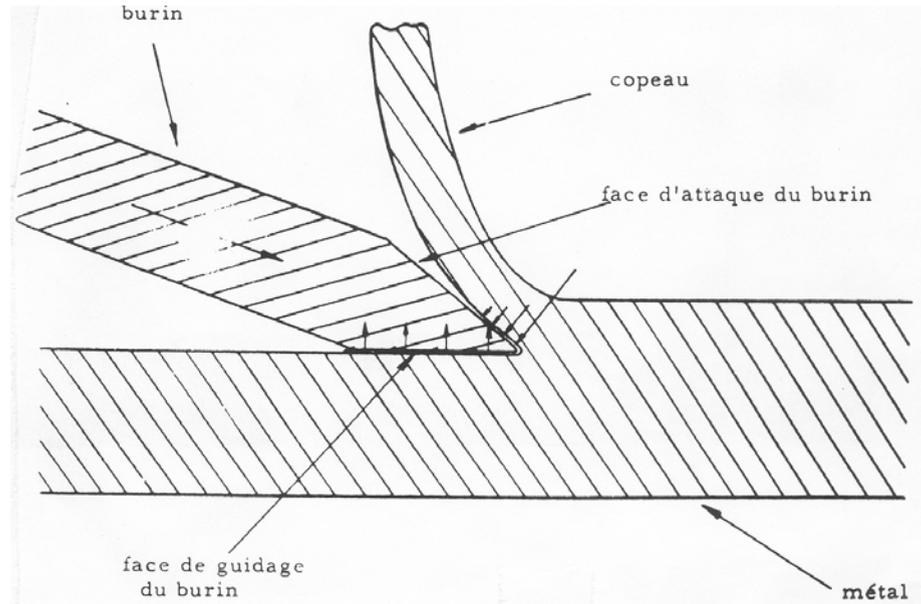


- pièces présentant des profils externes ou internes ainsi que des arêtes tranchantes et des surfaces planes impossibles à produire par des procédés de mise en forme.
- pièces devant être traitées thermiquement pour améliorer leur dureté et leur résistance à l'usure.
- caractéristiques spécifiques d'état de surface qui ne peuvent être produites par d'autres procédés.
- usinage des pièces parfois plus économique que la production par un autre procédé surtout pour les petites séries.

Bien que constituant une technologie indispensable, l'enlèvement de matière présente cependant quelques inconvénients :

- les procédés d'enlèvement produisent de nombreux déchets et nécessitent généralement plus d'énergie, de capital et de travail que les opérations de mise en forme.
- enlever un certain volume de matière d'une pièce prend généralement plus de temps que de la mettre en forme par d'autres procédés.
- s'ils ne sont pas exécutés proprement, les procédés d'enlèvement peuvent avoir des effets négatifs sur la qualité des surfaces et les propriétés du produit.

Etude générale de la taille

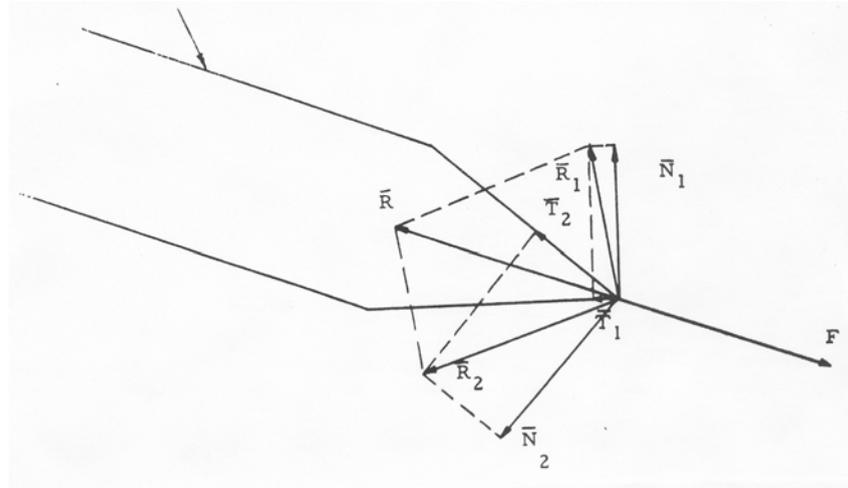


Supposons que le burin se déplace à une vitesse constante, sous l'action d'une force F . On peut décomposer les forces en présence en deux actions :

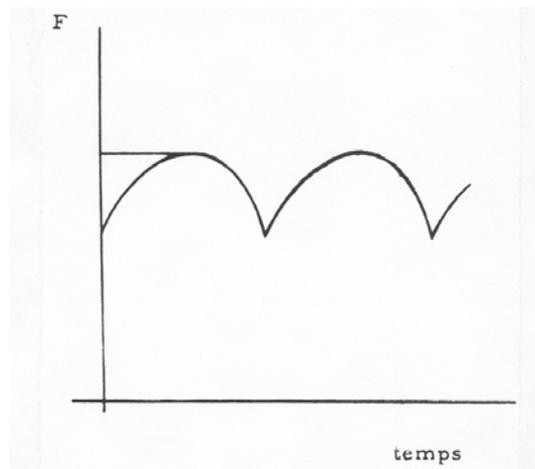
Contact entre la face de guidage du burin et la face formée

Contact entre la face d'attaque du burin et le copeau

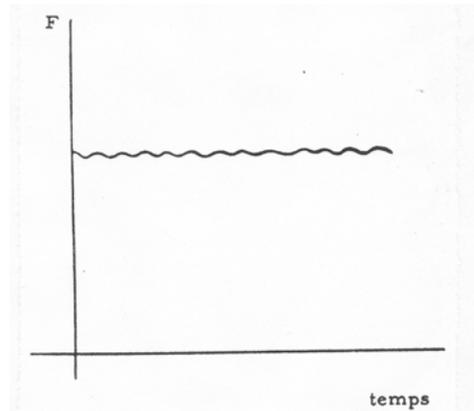
Pour simplifier le problème, faisons une hypothèse : appliquons à la pointe du burin toutes les résultantes des forces de réaction et de frottement.



- au contact burin - face formée : R_1 résultante de
 - N_1 : réaction normale
 - T_1 : force de frottement tangentielle
- au contact burin - copeau : R_2 résultante de
 - N_2 : réaction normale
 - T_2 : force de frottement tangentielle



Force d'enlèvement d'un copeau en fonction de la vitesse
(vitesse lente)

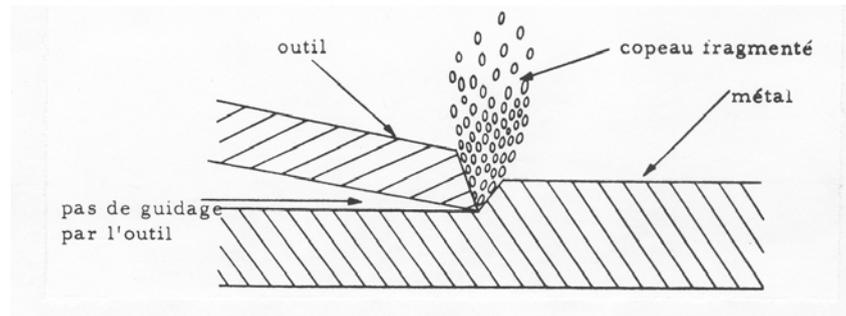


Force d'enlèvement d'un copeau en fonction de la vitesse
(vitesse rapide)

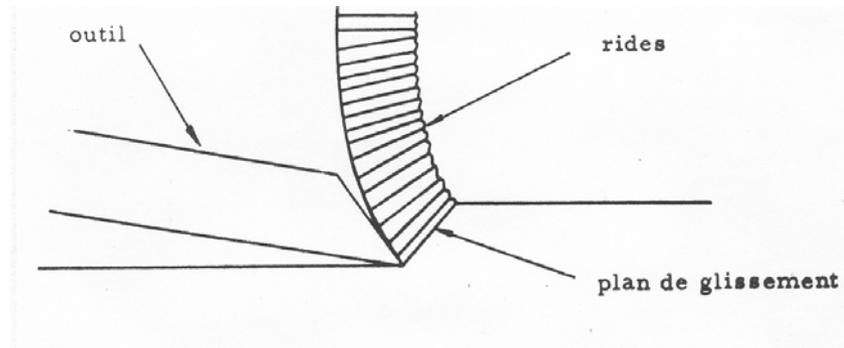
Modes d'enlèvements de copeaux

Mode discontinu

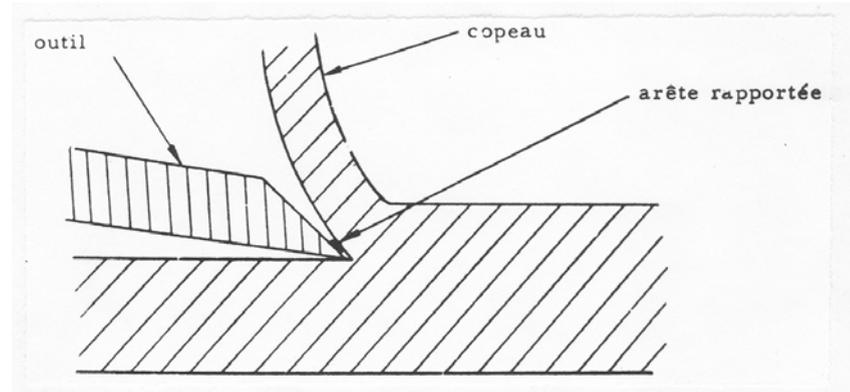
Dans le cas d'usinage de matériaux fragiles, très peu ductiles (exemples: fonte, laiton, bronze), il y a formation d'un copeau fragmenté.



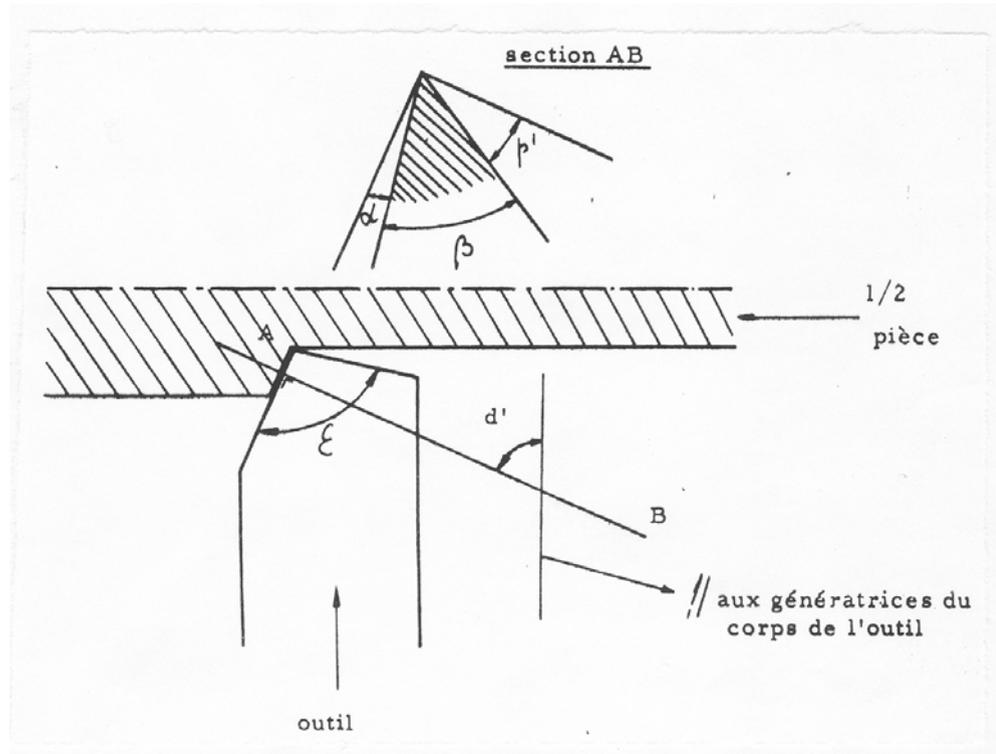
Copeau continu



Formation d'une arête rapportée



Outils à profil rectiligne



Effets des divers angles sur la coupe

Angle de dépouille α

$$4^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$$

Angle de pente effective p'

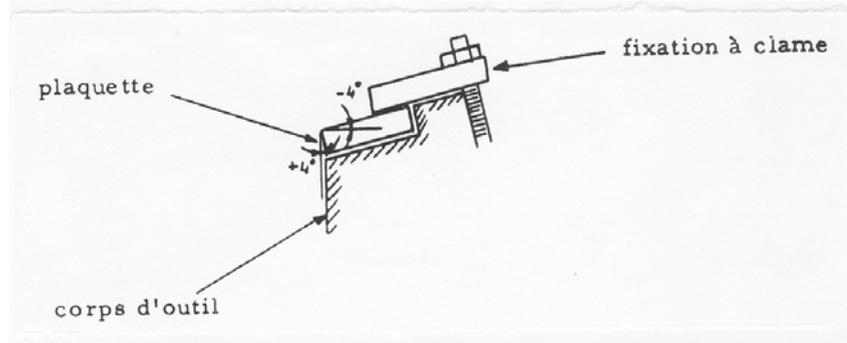
$$\alpha + p' + \beta = \pi / 2$$

Si $\alpha = \text{Cte}$

$$p' \nearrow \quad \rightarrow \quad \beta \searrow$$

- Pour travailler l'aluminium à vitesse réduite, on utilise des pentes de 30° à 40° .
- Pour la fonte, on aura $p' = 10^\circ$
- Pour les aciers au Manganèse, on trouve des pentes de $+3^\circ$ à -3°

Utilisation d'une plaquette



Angle d'obliquité d'arête

Cet angle agit surtout sur la trajectoire du copeau et sur son dégagement.

Si $i = 0$, le copeau se dégage en spirales. Si on incline l'arête taillante, on réalise une hélice et cette hélice donne un bon dégagement du copeau.

Usure de l'outil

Formule empirique de Taylor

$$T = C_v V^n$$

C_v et n sont des constantes en première approximation.

V est la vitesse de coupe.

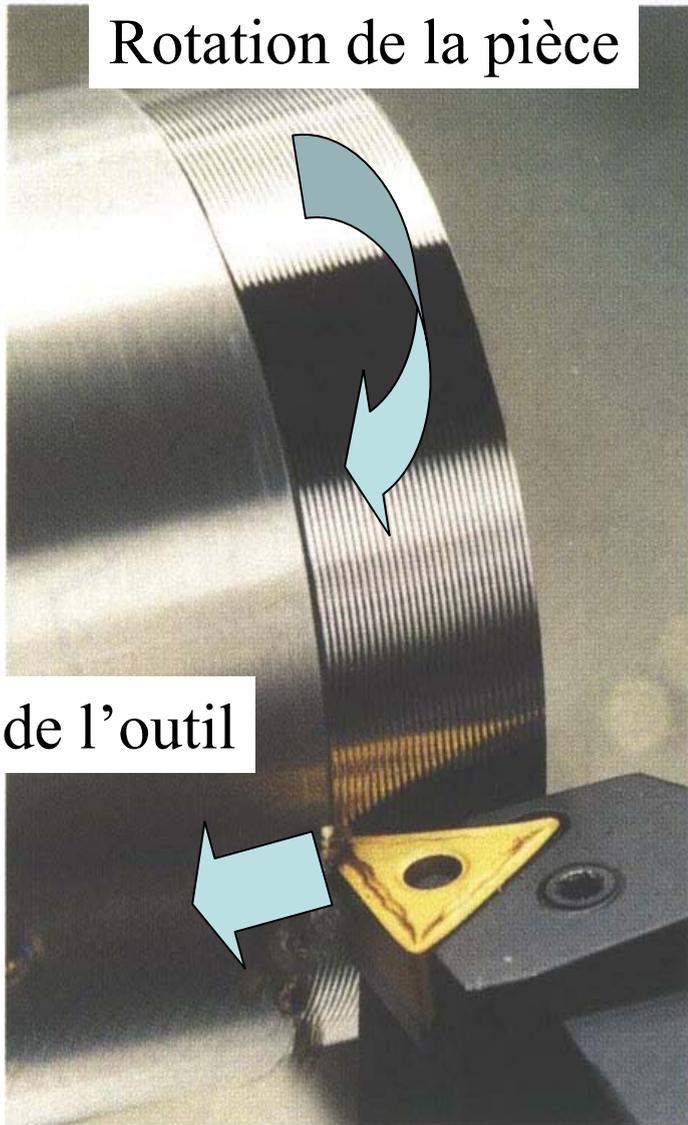
T est en fait le temps entre deux affûtages.

Modèle de Gilbert

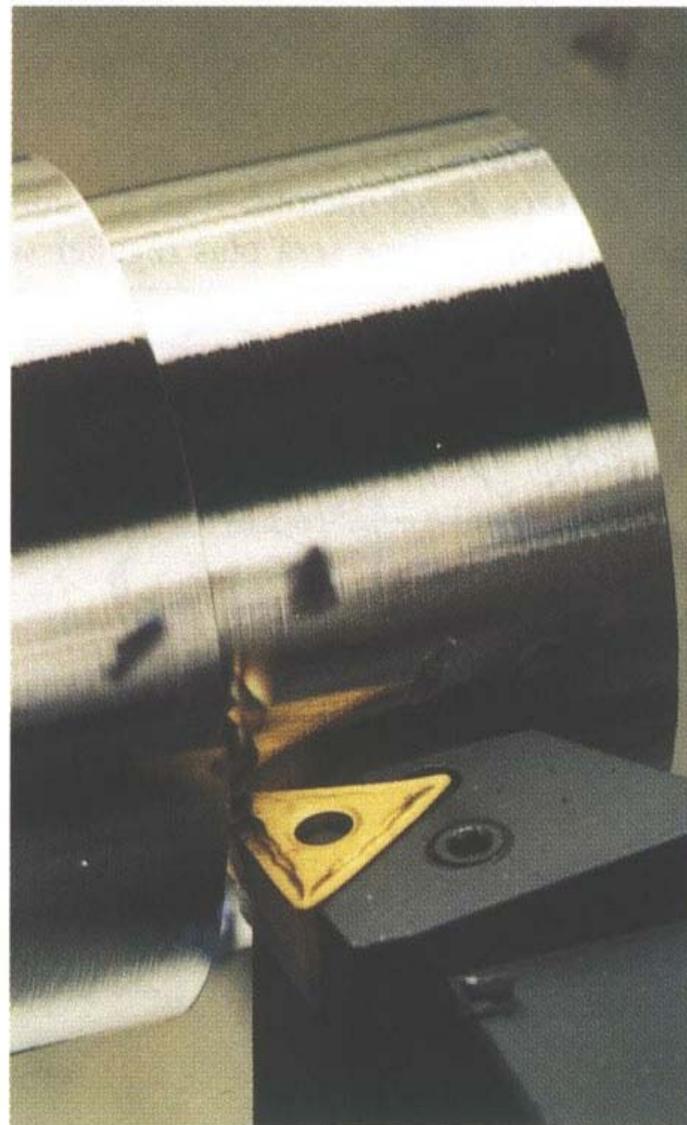
$$T = C s^x a^y V^n$$

où a est l'avance et s le serrage.

Rotation de la pièce



Avance de l'outil



Taylor avait trouvé $n \approx -7$.

Maintenant on a : $-8 \leq n \leq -4$

Par exemple : acier rapide	$n = -8$
acier au Ni	$n = -6.3$
acier Widia	$n = -4,6$

Durée de vie optimale d'un outil

Taylor, pour arriver à un prix de revient minimum, avait déterminé que T devait valoir 90 minutes.

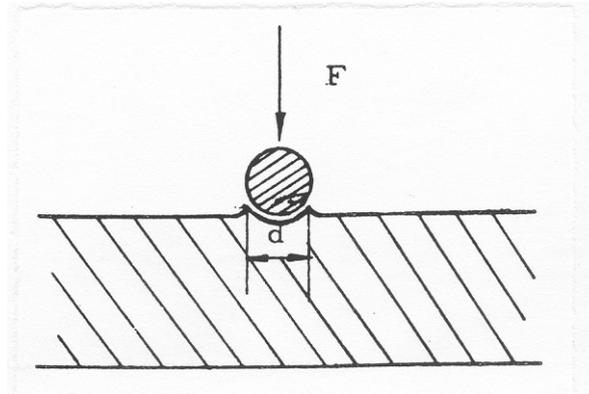
Cette valeur est encore utilisée aujourd'hui, mais en faisant observer que, en passant de 90 minutes à 400 minutes on ne doit réduire la vitesse de coupe que de 22 % ceci n'impliquant qu'une réduction de production de 22 % (pour $n = -7$).

On fait varier T suivant l'outil et le travail à effectuer. Pour réaliser un dégrossissage on prend des durées de vie de l'ordre de 50 minutes même jusqu'à 15 minutes mais rarement.

Critères d'usinabilité

"Les aciers s'usinent comme leur dureté"

Test de Meyer



On applique successivement des forces croissantes F_1 , F_2 , ...
et on mesure à chaque fois le diamètre de l'empreinte d_1 , d_2 ,

...

Si le matériau n'est pas sensible à l'écrasement :

$$F_1 / d_1^2 = F_2 / d_2^2 = \dots = F_i / d_i^2 = \dots = \text{Cte}$$

En pratique on n'aura pas ce cas-là, mais on recherche la valeur de l'exposant x pour avoir :

soit $F_i / d_i^x = \text{Cte}$

soit $F_i / d_i^{x+2} = \text{Cte}$

On aura alors la valeur de l'exposant de Meyer :

soit $x = 2, \dots$

soit $x = 0, \dots$

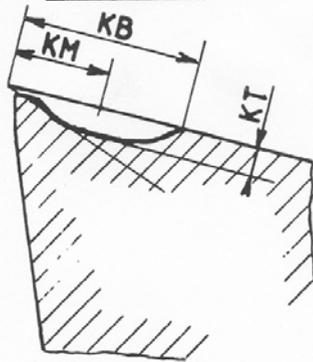
Plus x est grand, plus le matériau est difficile à travailler.

Mesures de l'usure de l'outil

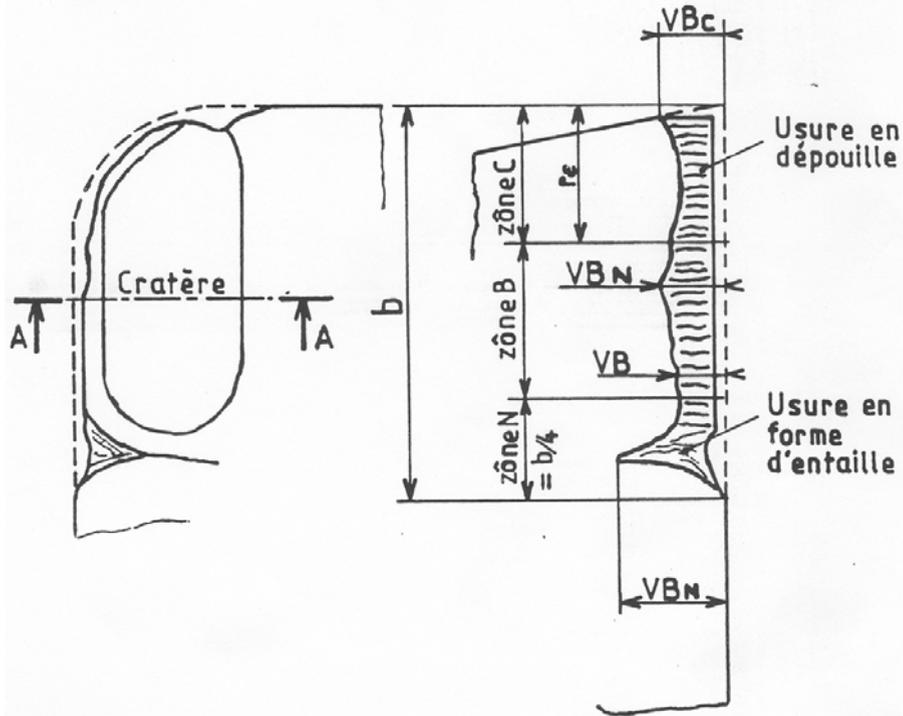
On mesure cette usure de plusieurs manières :

- mesure de l'usure frontale ou en dépouille (VB).
- mesure de l'usure en cratère (KT).
- mesure de l'usure par la température : on utilise pour cela des thermocouples.
- mesure de l'usure par la quantité de matière enlevée.

Section A.A



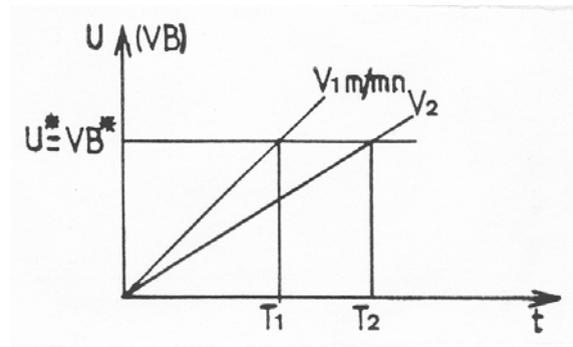
KB = largeur du cratère
 KM = distance du centre du cratère
 KT = profondeur du cratère
 VB = largeur de l'usure en dépouille



Essais d'usure accélérée

$$T = C_v V^n$$

Hypothèse d'évolution linéaire de l'usure en fonction du temps



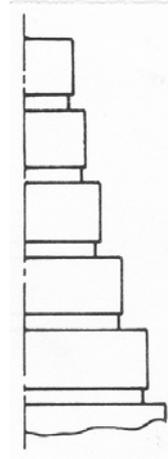
Posons $U^* =$ valeur limite de U

$$\Delta U = \frac{U^*}{T} \Delta T$$

$$\Delta U = \frac{U^*}{C_v V^n} \Delta T$$

Essai d'usure accélérée par paliers (avec ΔT constant)

Mode opératoire : l'essai se pratique sur un tour et consiste à charioter une succession de cylindres étagés animés d'une vitesse de rotation constante.



La longueur des paliers est telle que le temps de chariotage ΔT de chacun d'eux soit identique.

Le nombre des paliers est p .

Les diamètres des cylindres sont tels que la vitesse de coupe soit en progression géométrique de raison r . La vitesse initiale est V_0 .

$$U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots + \Delta U_p = \sum_{i=1}^p \frac{U^*}{C_v V_i^n} \Delta T_i$$

avec $V_i = V_0 r^{(i-1)}$ ($i = 1 \dots p$) et $\Delta T_i = \Delta T = \text{cste}$

$$U = \frac{U^* \Delta T}{C_v V_0^n} \sum_{i=1}^p r^{-n(i-1)}$$

La méthode de KLANG-BARROW consiste à réaliser deux essais avec les conditions opératoires suivantes :

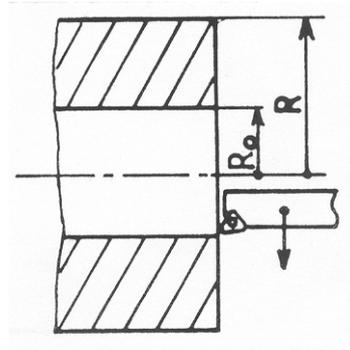
- $\Delta T_1 \neq \Delta T_2$ constant pour chaque palier
- $r_1 = r_2$ raison de la progression identique r
- $V_{01} \neq V_{02}$ vitesse initiale différente
- $p_1 = p_2$ même nombre de paliers p

Dans ces conditions, nous obtenons :

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right) \left(\frac{V_{02}}{V_{01}} \right)^n \quad n = \frac{\ln \frac{U_1 \Delta T_2}{U_2 \Delta T_1}}{\ln \frac{V_{02}}{V_{01}}}$$

Essai d'usure accélérée à croissance continue de la vitesse de coupe

L'essai consiste à dresser la face d'une éprouvette (ϕ 200 mm), animée d'une vitesse de rotation constante, en partant du centre vers la périphérie.



Durant la passe, la vitesse de coupe croît linéairement. On fait l'hypothèse d'une évolution linéaire de l'usure en fonction du temps.

$$dU = \frac{U^*}{C_v V^n} dt$$

A un instant t , la position de l'outil est définie par :

$$r = R_0 + a N t$$

d'où :

$$dr = a N dt$$

Comme $V(\text{m/s}) = 2 \pi r(\text{m}) N(\text{tr/min}) / 60$

$$dU = \frac{U^*}{C_v \left(\frac{\pi}{30} \right)^n N^{n+1}_a r^n} dr$$

L'usure entre R_0 et R sera caractérisée par :

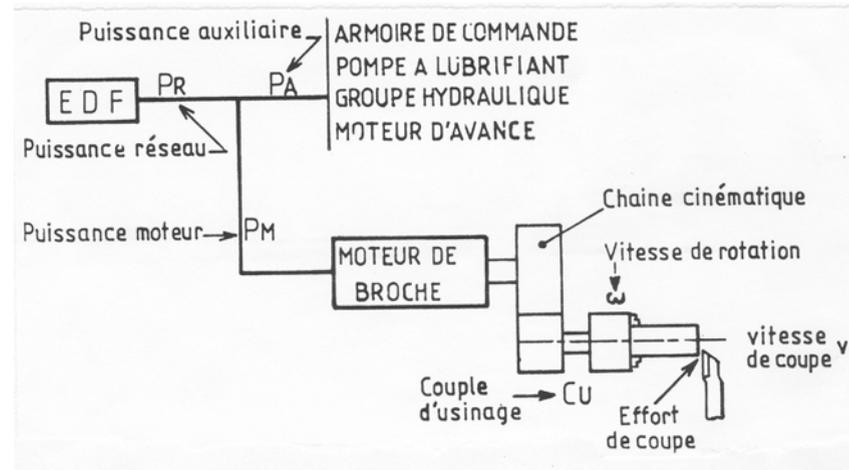
$$U = \int_{R_0}^R dU = \frac{U^*}{C_v \left(\frac{\pi}{30} \right)^n N^{n+1}_a} \int_{R_0}^R \frac{dr}{r^n} = \frac{U^*}{C_v \left(\frac{\pi}{30} \right)^n N^{n+1}_a} \left[\frac{R^{1-n}}{1-n} - \frac{R_0^{1-n}}{1-n} \right]$$

Il suffit alors de pratiquer deux essais avec R et R_0 constants, à deux vitesses de rotation différentes N_1 et N_2 , de relever les valeurs U_1 et U_2 de l'usure et de faire le rapport U_1/U_2 pour obtenir n .

$$n = \frac{\ln \frac{U_1}{U_2}}{\ln \frac{N_2}{N_1}} - 1$$

Puissance et efforts de coupe

Répartition de la puissance dans une machine outil



$$P_C = C_U \cdot \omega = F \cdot V$$

$$P_M = (C_R + C_U) \cdot \omega$$

Mesure de la puissance électrique consommée

$$P_R = P_A + (C_R + C_U) \omega$$

En effectuant l'usinage sans la pièce (tous mouvements enclenchés), on obtient :

$$P_{R0} = P_A + C_R \omega \text{ (pertes par frottement et effet Joule).}$$

En effectuant l'usinage avec la pièce, on a :

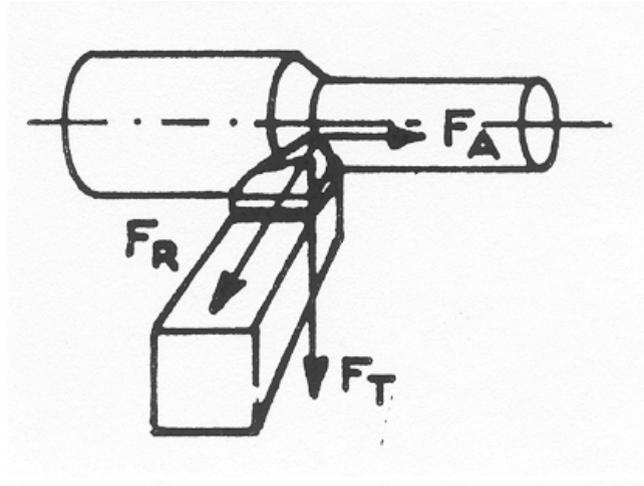
$$P_{Ru} = P_A + (C_R + C_U) \cdot \omega$$

Par calcul, on obtient la puissance dissipée par la coupe

$$P_C = C_U \cdot \omega = P_{Ru} - P_{R0} = F \cdot V$$

Un tachymètre permet alors de connaître C_U

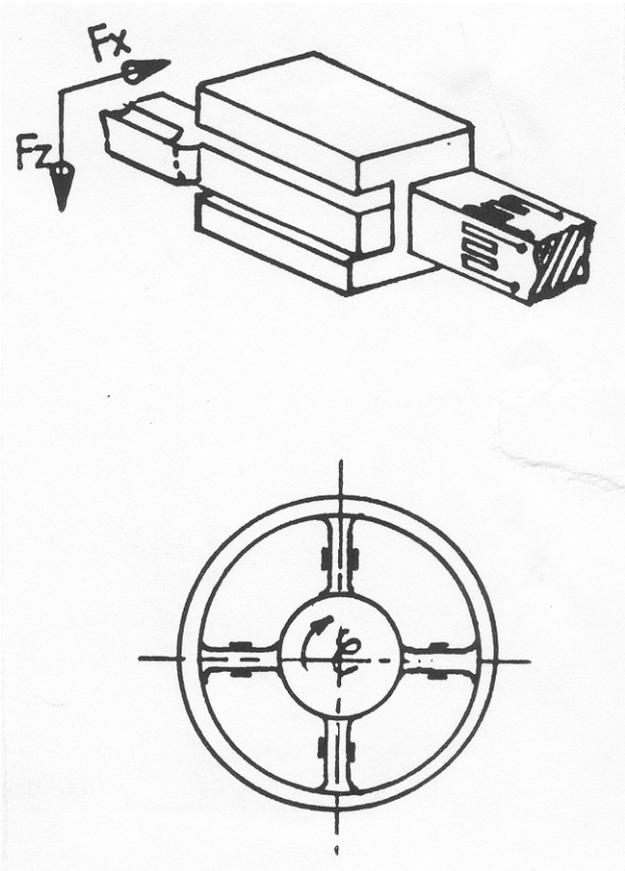
Calcul pratique des efforts de coupe en tournage



F_T : effort tangentiel

F_A : effort axial, $F_A \approx (0,2 \text{ à } 0,3) F_T$

F_R : effort radial, $F_R \approx (0,1 \text{ à } 0,2) F_T$



Généralités sur l'optimisation des conditions de coupe

L'optique actuelle de la production est de chercher à obtenir une pièce à un coût minimum.

Le but est de proposer une méthode permettant de chercher les conditions de coupe optimales (vitesse de coupe et avance). Toutefois, cette recherche ne peut se faire que lorsque tous les choix sont déjà faits :

- machine,
- montage pièce,
- choix outil,
- choix des passes.

Etude des différents paramètres de la production

Temps de production

$$t_t = t_c + t_a + (t_c/T) t_{vb}$$

t_c = temps de coupe (à calculer suivant l'usinage)

t_a = temps auxiliaires (montage pièce, démontage pièce, prise de passes)

t_{vb} = temps de changement d'outil

$$T = c.a^x . s^y . V^n$$

a = avance en mm/tr

s = profondeur de passe en mm

V = vitesse de coupe en m/min

T = durée de vie de l'outil en min

En tournage, si D est le diamètre de la pièce et L la longueur à usiner, exprimés en mm :

$$t_c = \frac{L\pi D}{1000aV} \quad t_t = \frac{L\pi D}{1000aV} + t_a + \frac{L\pi D}{1000aV} \frac{t_{vb}}{ca^x s^y V^n}$$

Coût de production

$$p_t = p_0 t_a + p_0 t_c + p_1 t_c/T + p_a$$

p_0 = coût machine en euro/min

p_1 = coût de revient d'une arête de coupe

p_a = coût auxiliaire de lancement de la série ramené à une pièce

Etude de l'optimisation : critère, coût minimum

Hypothèse : la machine possède un variateur de broche ou une boîte de vitesses suffisamment étagées pour considérer V et a comme des variables réelles.

$$\text{Pour une avance donnée } a \quad \frac{dp_t}{dV} = 0$$

La fonction p_t est de la forme :

$$Y = A + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^{n+1}}$$
$$\frac{dY}{dV} = -\frac{B}{V^2} - \frac{C(n+1)}{V^{n+2}} = 0 \Rightarrow V^n = -\frac{C}{B}(n+1)$$

D'où, on obtient la vitesse économique :

$$V_E = \sqrt[n]{\frac{-(n+1)p_1}{Ca^x s^y p_0}}$$

De cette formule, on peut tirer la durée économique d'utilisation de l'outil :

$$T_E = C a^x s^y V_E^n = -(n+1) \frac{p_1}{p_0}$$

si une machine est coûteuse (emploi de commandes numériques), p_0 est grand; il faut une durée de vie de l'outil faible pour utiliser la machine et l'outil au maximum,

si un outil est coûteux (p_1 grand) il faut augmenter la durée de vie de l'outil en réduisant les conditions de coupe.

Pour une vitesse de coupe donnée

V étant fixée, il faut calculer l'avance a telle que $\frac{dp_t}{da} = 0$

La fonction p_t est de la forme : $Y = A + \frac{B_1}{a} + \frac{C_1}{a^{x+1}}$

$$a_E = \sqrt[x]{\frac{-(x+1)p_1}{cs^y V^n p_0}}$$

La durée économique d'utilisation de l'outil est alors :

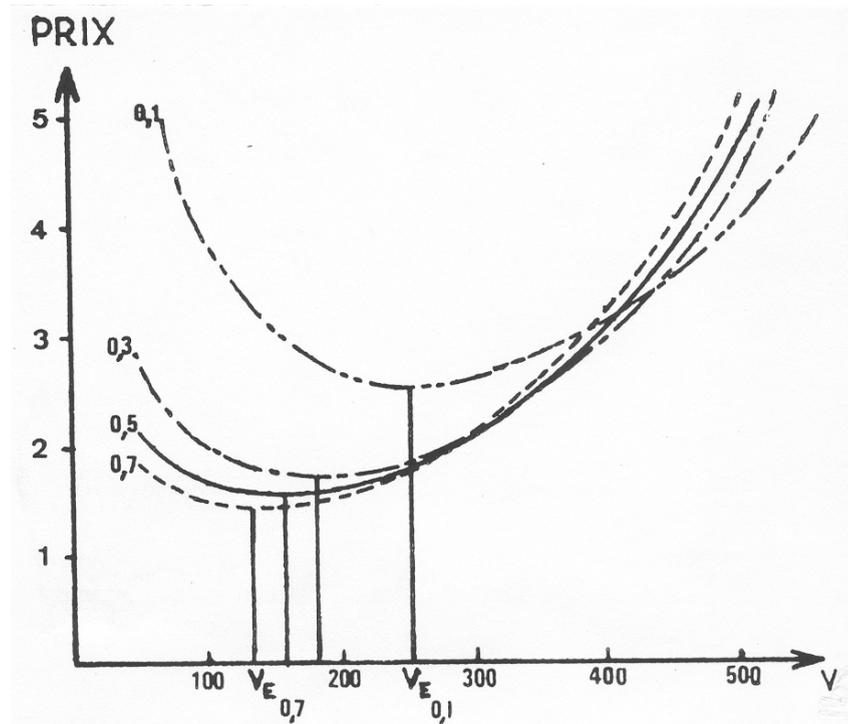
$$T_E = -(x+1) \frac{p_1}{p_0}$$

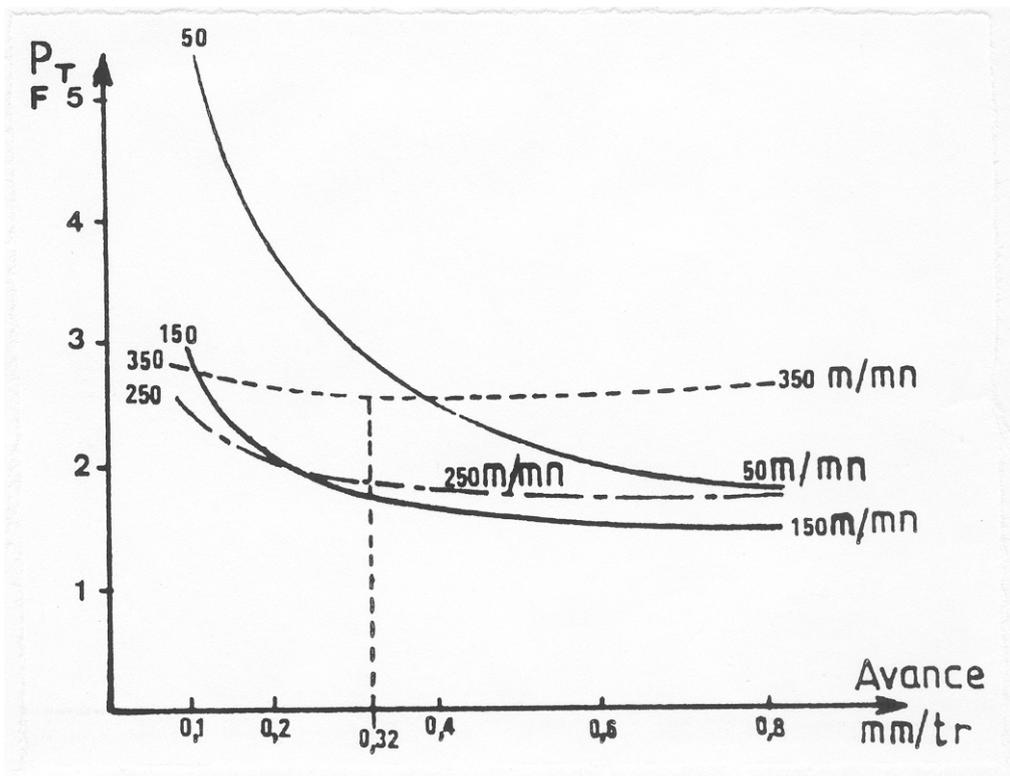
Recherche d'un point optimum

$$T_E = -(n+1) \frac{p_1}{p_0} = -(x+1) \frac{p_1}{p_0}$$

En général, $n \neq x$ et il n'est pas possible d'annuler simultanément les deux dérivées.

Evolution du prix total en fonction de a et V





Etude de l'optimisation : dégrossissage en temps minimum et à puissance constante

On possède une certaine machine dont on connaît les caractéristiques (en particulier sa puissance maximum). On a un outil bien déterminé. On veut effectuer un dégrossissage à puissance constante, le plus rapidement possible.

Il faut donc obtenir un débit de copeaux maximum.

Q : le débit de copeaux

F : la force appliquée à l'outil (force de coupe)

Ω : la section de copeau

V : la vitesse de coupe

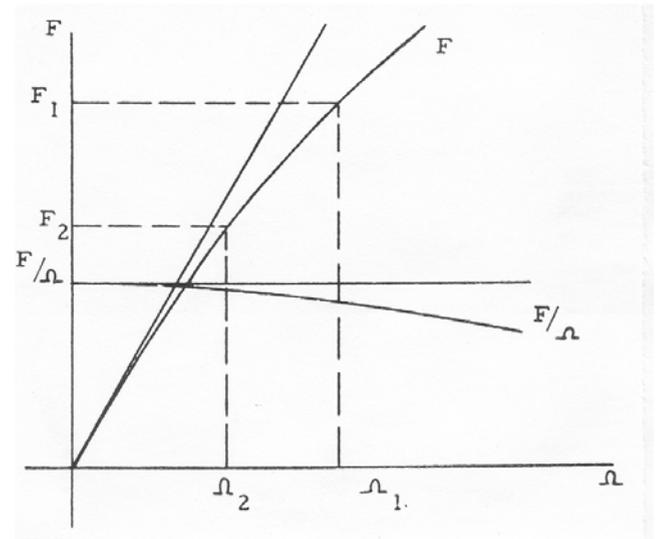
P : la puissance absorbée à l'outil

$$P = F.V = Cte$$

$$Q = \Omega.V$$

$$F_1 V_1 = F_2 V_2 \quad (1)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Omega_1 V_1}{\Omega_2 V_2} = \frac{\frac{F_2}{\Omega_2}}{\frac{F_1}{\Omega_1}} \quad (2)$$



Soit $V_1 < V_2 \Rightarrow F_1 > F_2$

A partir des courbes, $F_2/\Omega_2 > F_1/\Omega_1$

$$(2) \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\frac{F_2}{\Omega_2}}{\frac{F_1}{\Omega_1}} > 1 \Rightarrow Q_1 > Q_2$$

Métaux utilisés pour la fabrication des outils

Aciers rapides

Aciers au Tungstène : 18 % Tg

4 % Cr

1 % Va

Ils acceptent une vitesse de coupe de 25 à 30 m/min.

Aciers ultra-rapides

On les obtient par addition d'environ 14% de Cobalt, par rapport à un acier rapide. Ils supportent une vitesse de coupe de l'ordre de 40 m/min.

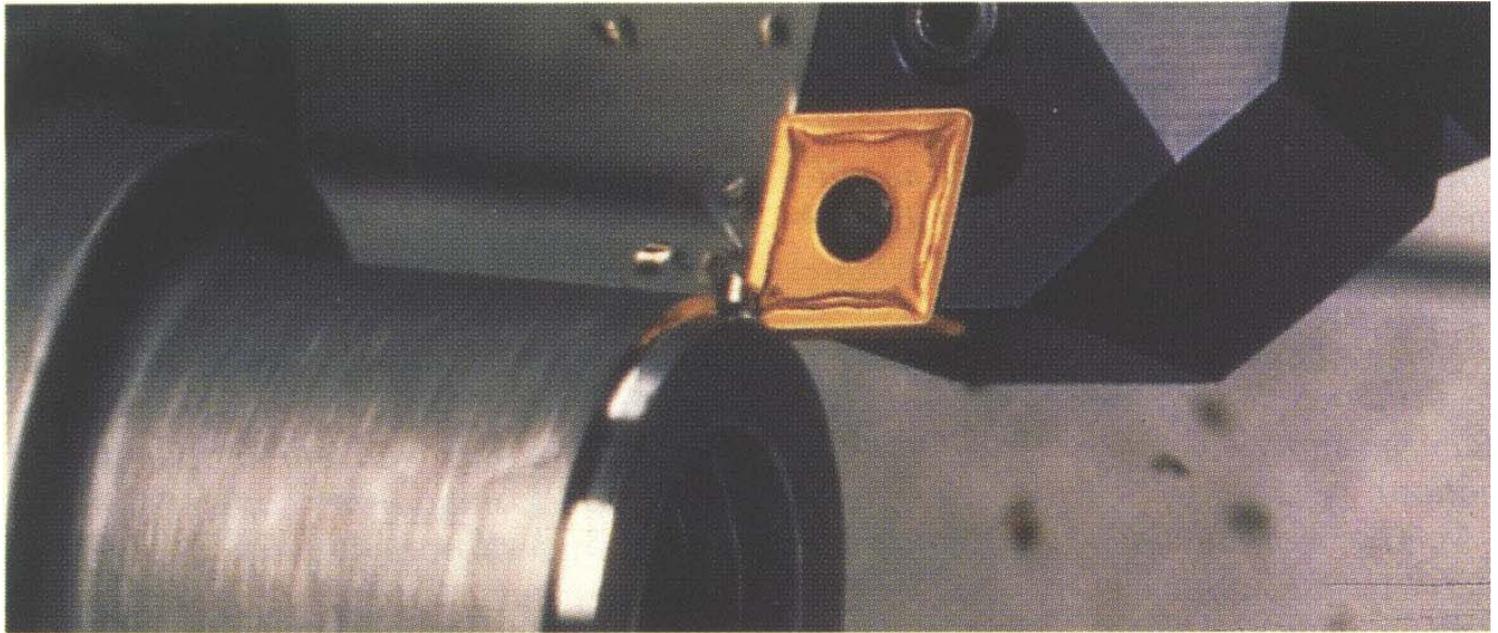
Carbures

Les plus importants sont le carbure de Tg et le carbure de Ti.

Par rapport aux aciers rapides, ils sont plus durs, plus fragiles et supportent des vitesses de coupe 8 à 10 fois plus grandes. La plus grosse production de carbure est celle de carbure de Tungstène, sous forme de plaquettes rapportées.

Céramiques

A l'heure actuelle, on peut atteindre avec ces outils des vitesses de l'ordre de 700 m/min.



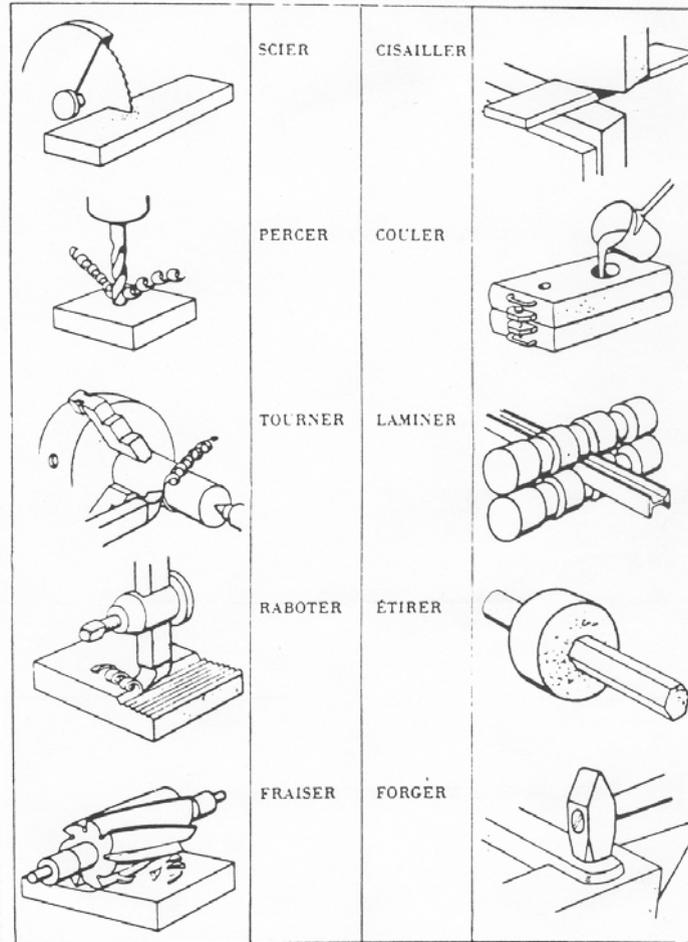
Aspects technologiques de l'usinage

Les pièces mécaniques comportent généralement des surfaces intérieures et extérieures simples :

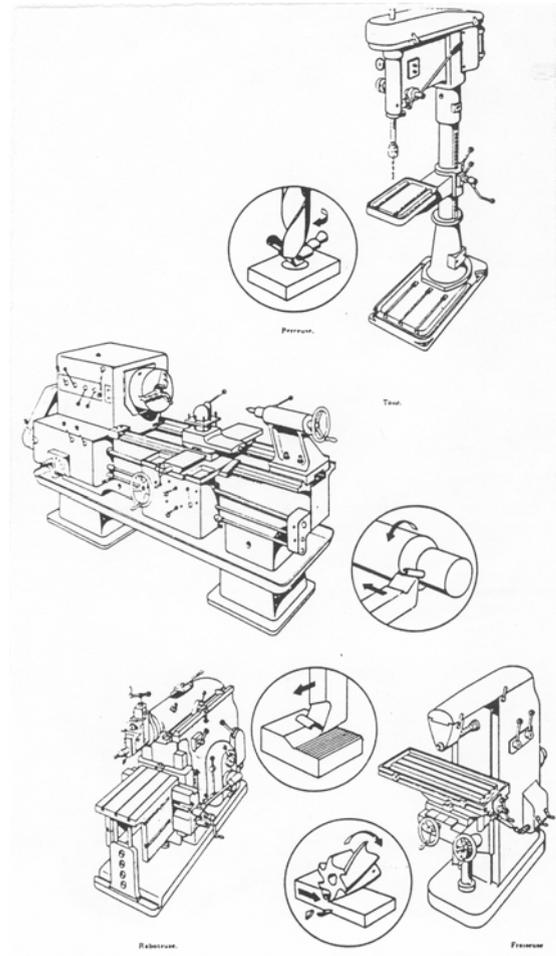
- planes
- de révolution : cylindriques, coniques, sphériques
- hélicoïdales

La réalisation de ces surfaces résulte de la combinaison des 2 mouvements : celui de la pièce et celui de l'outil.

Opérations élémentaires d'usinage mécanique



Opérations sur machines conventionnelles



Réalisation pratique des surfaces élémentaires

Les surfaces de révolution

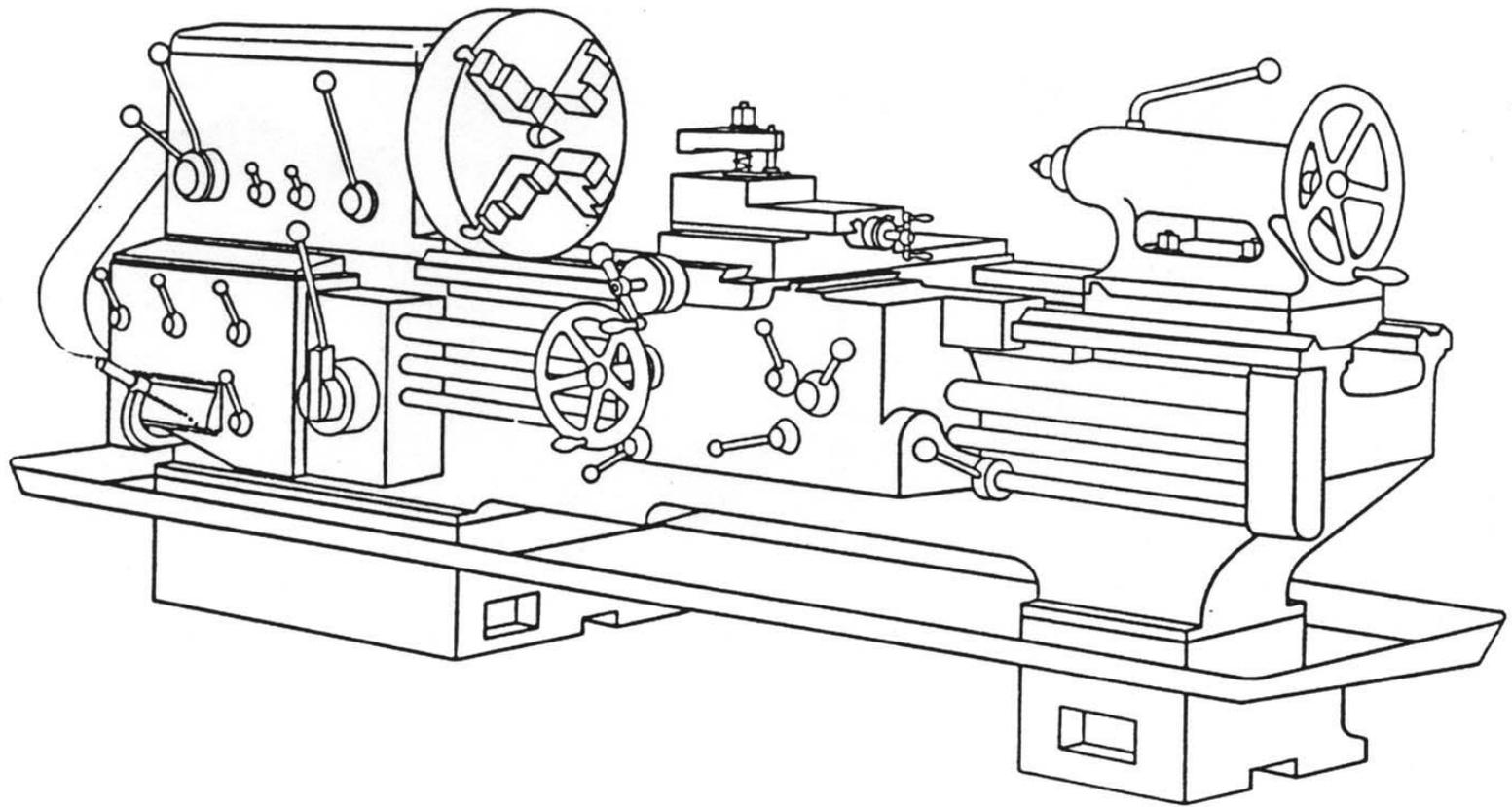
Pour obtenir la forme cylindrique, on met généralement la pièce à usiner, en rotation autour de son propre axe de révolution, au moyen d'un tour en mouvement. Au même moment, on déplace le long de la pièce un outil coupant qui effectue l'arrachement des copeaux d'une façon continue.

C'est l'opération de **tournage**.

On peut, sur un tour, faire des opérations de :

- chariotage cylindrique ou conique pour ébaucher et finir des cylindres et cônes de précision moyenne,
- "dressage" des surfaces planes, perpendiculaires à l'axe longitudinal,
- tronçonnage, saignée, chanfreinage, filetage

Le tour



L'ÉVOLUTION

- Polyvalence accrue, grâce à:
 - la multiplication d'outils, fixés sur une tourelle
 - la multiplication de tourelles
 - la diversité d'opérations réalisables sur les tours modernes (perçage, alésage, tournage, rainurage, ...).
- Robustesse et longévité accrue, grâce à la conception améliorée, aux réductions d'usure et aux outils performants.
- Généralisation de la commande numérique, assurant les commandes programmées des mouvements et des outils.

