

Chapitre I : Aspect économique et optimisation des opérations d'usinage

1 - Généralités sur l'optimisation

L'optimisation est l'action et l'effet d'optimiser. Ce verbe veut dire chercher la meilleure manière de réaliser une activité.

Dans le cadre des mathématiques, l'optimisation cherche à apporter des réponses à un type général de problèmes qui consistent à sélectionner le meilleur élément parmi plusieurs appartenant au même ensemble.

Au niveau général, l'optimisation peut se réaliser dans de différents domaines, toujours avec le même objectif : améliorer le fonctionnement de quelque chose au moyen d'une gestion perfectionnée des ressources. L'optimisation peut avoir lieu à n'importe quelle étape quoiqu'il est conseillé de la mener à bien jusqu'à la fin du processus visé.

Une personne qui souhaite optimiser son temps de travail, par exemple, peut changer l'organisation de ses activités, faire appel à la technologie ou bien travailler avec quelqu'un qui puisse l'aider. Si l'optimisation est plutôt réussie, la personne pourra travailler ou produire davantage en moins de temps.

L'optimisation est la recherche de la solution la plus satisfaisante suivant un critère choisi.

Exemples	Paramètres variables	Critères
- Optimiser le prix d'usinage d'une pièce, - Optimiser le temps d'usinage d'une pièce, - Optimiser le stock de matériel, - Optimiser la qualité d'usinage, - Optimiser la production, - Optimiser	- Vitesse de coupe V_c - Avance de coupe f - Profondeur de passe a_p - Propriétés des couples de Matériaux, - Forces et Puissances de coupe, - Autres.....	- coût minimum, - durée minimale, - quantité maximale, - usure d'outil ou durée de vie d'outil, - état de surface, - autres.....

2- Les paramètres variables de coupe

- La vitesse de coupe en m/min
- L'avance de coupe en mm/tr
- La profondeur de passe en mm
- La géométrie de coupe (forme de l'outil, angles et rayons)
- Les caractéristiques des matériaux (outil et pièce)
- ...etc

3- Les principaux paramètres économiques de la production

- Le coût total de production d'une pièce C_t ou prix de revient d'une pièce est constitué des composantes suivantes :
 - coût machine (**usage**, amortissement, entretien, salaire opérateur) ;
 - coût montage (prix du montage à amortir sur l'ensemble de la série) ;

- coût relatif à l'outil (plaquettes, porte plaquettes, arrêt machine pour réglage, **usure** ...);

➤ Position du problème de minimisation du Coût de fabrication est :

$C_t = f(\text{ébauche, machine, nombre de passes, vitesse de broche } (N), \text{ vitesse d'avance } (f))$

Le problème est de chercher les conditions de coupe « N » et « f » tel que C_t soit minimal,

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial C_t}{\partial N} = 0 \\ \frac{\partial C_t}{\partial f} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

- Le temps total de production d'une pièce T_t ou temps de fabrication d'une pièce est constitué des composantes suivantes :
 - Le temps de coupe;
 - Les temps auxiliaires (changement de pièce, prises de passes,...);
 - Les temps de changement d'outils.

➤ Position du problème de minimisation du Temps de fabrication

si $T_t = f(\text{Temps de coupe, Temps auxiliaires, Temps de changement d'outils}),$

Le problème consiste donc à rechercher les conditions de coupe « N » et « f » tel que T_t soit minimal,

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{\partial T_t}{\partial N} = 0 \\ \frac{\partial T_t}{\partial f} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

4 - Recherche du coût de production C_t (ou coût total)

Soient : C_m : coût machine (da/min),

C_{ar} : prix de revient d'une arête de coupe,

C_{aux} : coût auxiliaire de lancement de la série ramené à une pièce.

$$C_t = C_m \cdot T_c + C_m \cdot T_{aux} + C_{ar} \cdot (T_c/T) + C_{aux} \quad (3)$$

Optimisation selon le critère : coût minimum

- Pour une avance donnée "f "

Déterminons la vitesse de coupe qui nous donnera le prix de revient mini.

$$(3) \quad \begin{aligned} &\Longrightarrow \frac{\partial C_t}{\partial V} = 0 \\ &\Longrightarrow V_e = \sqrt[n]{\frac{-(n+1)C_{ar}}{(cste).f^x.a^y.C_m}} \end{aligned}$$

Cette vitesse est dite économique et elle est notée "Ve"

Remarques : $n < -1$,

Ve dépend de l'avance choisie.

La durée économique d'utilisation de l'outil :

$$\begin{aligned} \text{on a} \quad V_e &= \sqrt[n]{\frac{-(n+1)C_{ar}}{(cste).f^x.a^y.C_m}} \\ \underbrace{(cste).f^x.a^y.V_e^n}_{T_e} &= -(n+1)\frac{C_{ar}}{C_m} \\ T_e &= -(n+1)\frac{C_{ar}}{C_m} \end{aligned}$$

- T_e est indépendant de l'avance choisie,
- T_e est fonction du rapport : coût arête d'outil / coût machine,

donc si $C_m \uparrow$ alors $T_e \downarrow$ (commande numérique)

et si $C_{ar} \uparrow$ alors $T_e \uparrow$

- Pour une vitesse de coupe donnée

à V constant, cherchons l'avance tel que : $\frac{\partial C_t}{\partial f} = 0$

$$(3) \quad \Longrightarrow \quad f_e = \sqrt[x]{\frac{-(x+1)C_{ar}}{cste.a^y.V^n.C_m}}$$

de même, à une vitesse V constante, le temps économique d'utilisation de l'outil est :

$$T_e = -(x+1)\frac{C_{ar}}{C_m}$$

- Recherche du point optimum
Etant donné que n est généralement différent de x , alors les deux dérivées ne s'annulent pas simultanément.
- Allures du Coût total C_t en fonction de f et de V :

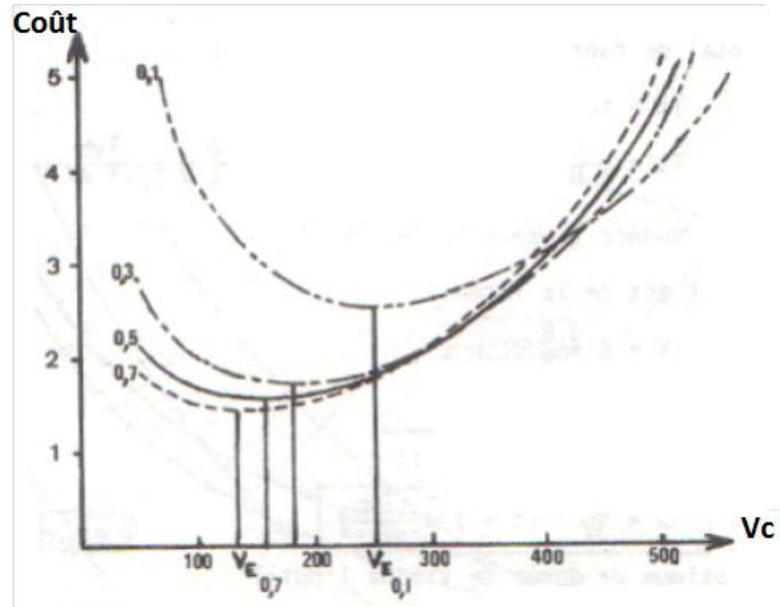


Figure 1 : Evolution du Coût de production en fonction de la Vitesse de coupe, à vitesse d'avance constante

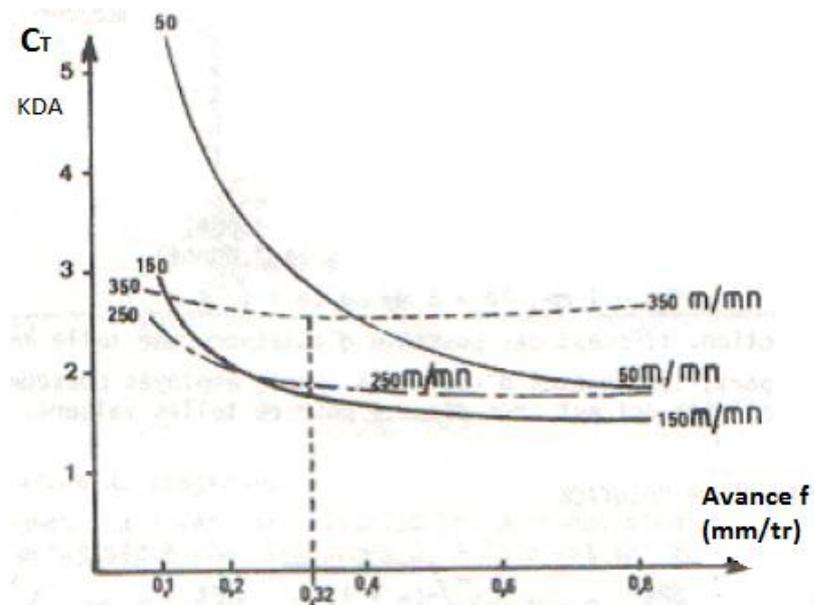


Figure 2 : Evolution du Coût de production en fonction de la vitesse d'Avance, à Vitesse de coupe constante

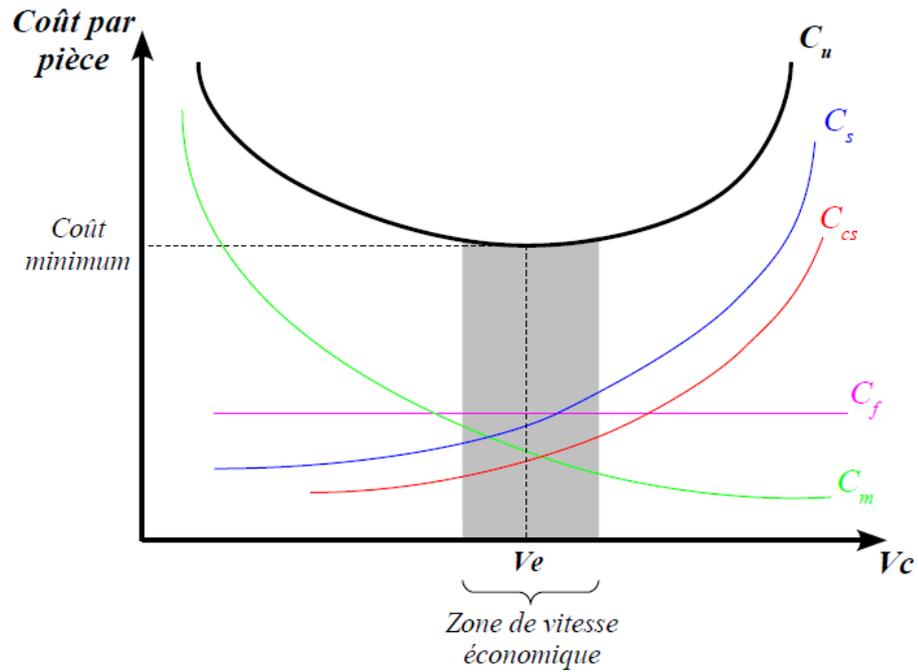


Figure 3 : Vitesse de coupe Economique (V_e) et Coût de production Minimum ($C_{u_{\text{mini}}}$)

- ou C_u - Coût d'usinage,
 $C_c = \tau_m \cdot t_c$: Coût de coupe par pièce,
 $C_i = \tau_m \cdot t_i$: Coût improductif par pièce,
 $C_m = C_c + C_i$: Coût machine par pièce,
 $C_s = C_o \cdot (t_c/T)$: Coût outil par pièce ($1/p = t_c/T$) avec C_o le prix d'une arête de coupe,
 $C_{cs} = \tau_m \cdot (t_{cs}/p)$: Coût de changement d'outil (d'arête) par pièce,
 C_f : Coût fixe par pièce (éléments de manutention, outillage, matière,...).

On note τ_m le taux machine (en da/min) qui comprend en général :

- le salaire de l'ouvrier,
- l'amortissement de la machine-outil,
- un coût d'exploitation lié directement à l'usinage (électricité, lubrifiant, air comprimé, entretien), dont l'évaluation est souvent globale.

5- Recherche du temps de production

Soient : T_t : temps de production,

T_c : temps de coupe,

T_{aux} : temps auxiliaires (montage pièce, démontage, prise de passes),

T_{vb} : temps de changement d'outil (à répartir sur le nombre de pièces usinées),

T : durée de vie de l'outil, avec :

$$T = k \cdot V^n \quad (\text{modèle de Taylor})$$

$$T = C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V^n \quad (\text{modèle de Gilbert})$$

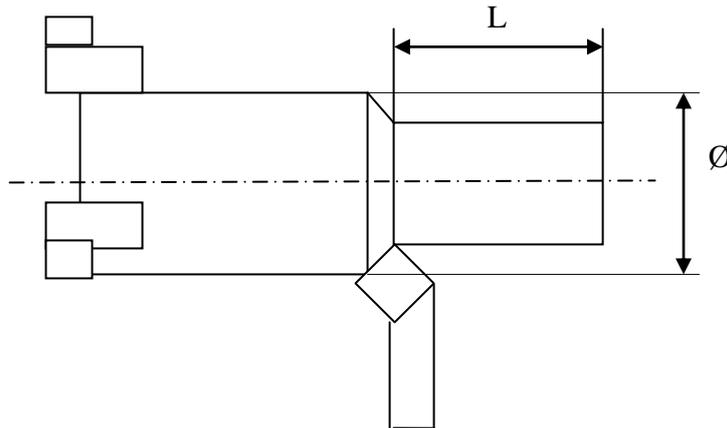
où :

f : avance (mm/tr),
a : profondeur de passe (mm),
V : vitesse de coupe (m/min),
T : (min)

$$\mathbf{T_t = T_c + T_{aux} + (T_c/T) \cdot T_{vb}} \quad \text{ou} \quad \mathbf{T_t = T_c + T_{aux} + T_{vb}/p} \quad (4)$$

T_{vb} divisé par le nombre de pièces usinées par un même outil.
avec $p =$ nombre de pièces entre deux changements d'outil (d'arête) : $p=T/T_c$

❖ En tournage par exemple le temps de production



On a :
$$\mathbf{T_c = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V}} \quad (5)$$

avec D ou Ø : diamètre de la pièce,
L : longueur à usiner.

(4) devient
$$\mathbf{T_t = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V} + T_{aux} + \frac{L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V} \cdot \frac{T_{vb}}{C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V^n}} \quad (6)$$

Représentation des temps de production de pièce

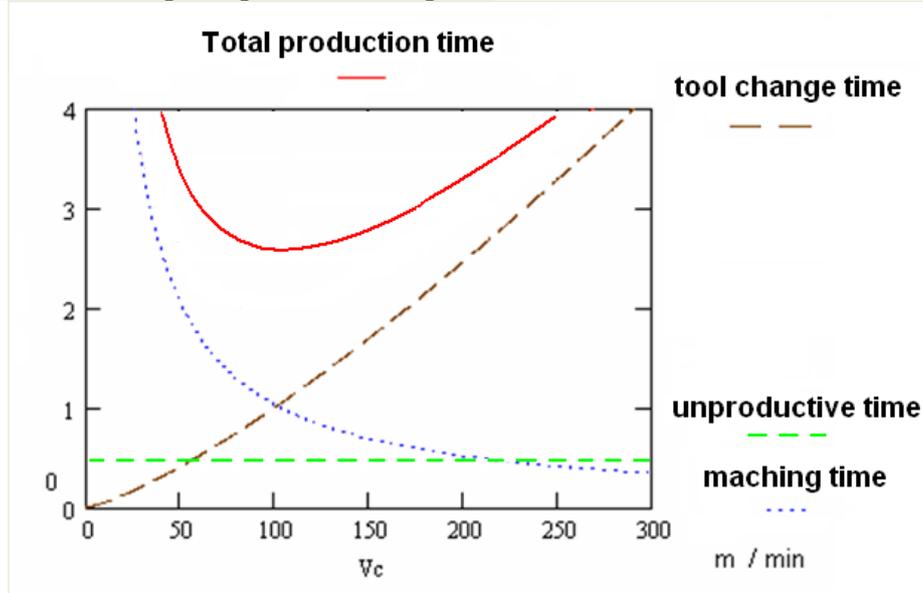


Figure 4 : Courbes des temps en fabrication

Le temps de fabrication est la somme du temps d'usinage et du temps pour la substitution des outils. L'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) et de la vitesse d'avance (f) réduit le temps d'exécution d'une opération d'usinage (courbe). Par contre l'usure des outils sera probablement moins rapide et le temps pour le changement des outils augmentera avec la vitesse de coupe (V_c) ou la vitesse d'avance (f) (courbe - - -).

La recherche de l'optimum du point de vue de la productivité consiste à identifier l'ensemble des paramètres de coupe qui permet la réalisation d'une certaine opération d'usinage dans le temps total plus bref.

(L'identification de cet optimum peut facilement engendrer un avantage très important).

Exemple de détermination du temps total de production d'une pièce pour vitesse de coupe 1

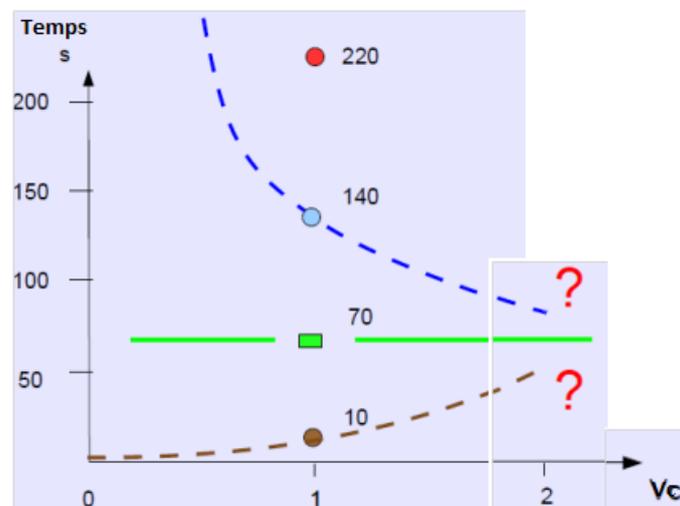


Figure 5 : Exemple de détermination du temps total de production

● Temps total = ● T d'usinage + ■ T improductif fixe + ● T recharge magasin

$$\text{Temps total} = 140 + 70 + 10 = 220 \text{ s}$$

Optimisation selon le critère : temps minimum

L'objectif recherché est la production d'un maximum de pièces.

On a :

$$T_t = T_c + T_{aux} + (T_c/T) \cdot T_{vb} \quad T_t = \frac{L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V} + T_{aux} + \frac{L \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V} \cdot \frac{T_{vb}}{C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V^n}$$

- Pour une avance choisie :
La vitesse optimale V_0 est :

$$V_0 = \sqrt[n]{\frac{-(n+1) \cdot T_{vb}}{C \cdot a^y \cdot f^x}}$$

d'ou le temps optimum de durée de vie de l'outil :

$$T_0 = -(n+1) \cdot T_{vb}$$

- Pour une vitesse de coupe choisie :
L'avance optimale f_0 est :

$$f_0 = \sqrt[x]{\frac{-(x+1) \cdot T_{vb}}{C \cdot a^y \cdot V^n}}$$

et le temps optimum de durée de vie de l'outil :

$$T_0 = -(x+1) \cdot T_{vb}$$

- Remarque :
Pour les outils en carbure, $n \approx -4$ et $x \approx -1,2$ donc :
 - ✓ à f donné : $T_0 = 3 \cdot T_{vb}$,
 - ✓ à V donné : $T_0 = 0,2 \cdot T_{vb}$.

6 - Choix d'une solution

- Rappels :

$$\checkmark \text{ Prix de revient mini : } V_e = \sqrt[n]{\frac{-(n+1)P_{ar}}{C f^x a^y P_m}} \quad f_e = \sqrt[x]{\frac{-(x+1)P_{ar}}{C a^y V^n P_m}}$$

$$\checkmark \text{ Production maximale : } V_0 = \sqrt[n]{\frac{-(n+1) \cdot T_{vb}}{C \cdot a^y \cdot f^x}} \quad f_0 = \sqrt[x]{\frac{-(x+1) \cdot T_{vb}}{C \cdot a^y \cdot V^n}}$$

- Limitation en puissance :
Pour une avance et une puissance données, il existe une vitesse de coupe limite V_1 qu'il ne faut pas dépasser.
- Limitation des avances :
L'état de surface et les tolérances de la pièce à usiner dépendent de la vitesse d'avance. Des recommandations générales sont données sous forme de tableaux.
- Choix des vitesses
La plupart des machines possèdent une gamme limitée d'avances et de vitesses de broche. Il faudra choisir une vitesse proche de la vitesse optimale.

Étude de quelques temps technologiques ou durée de travail d'outil

Définition : Le temps technologique représente la durée du travail effectué par un (plusieurs) outil(s). Il est fonction uniquement des moyens matériels et tient compte de l'engagement et du dégagement de l'outil.

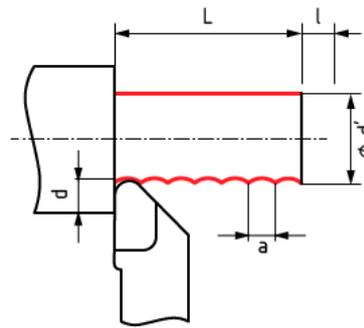
$$T_t = \frac{L[mm]}{A[mm/min]} \times 100 [cmn]$$

(*cmn* = centièmes de min)

Temps technologique de chariotage (tournage)

Le temps technologique de chariotage dépend des paramètres suivants :

- nombre de passes **n**
- la longueur d'usinage **L**
- la fréquence de rotation **N**
- l'avance par tour **a**
- la distance d'approche **l_i**
- la vitesse de coupe **V_c**



Le Calcul du temps technologique T_t en tournage (chariotage)

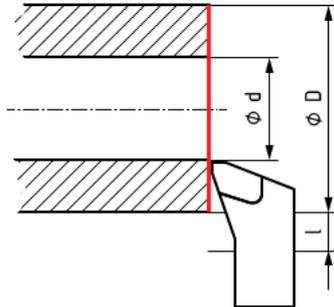
On exprime alors le temps technologique en chariotage sous la forme :

$$T_{tc} = \frac{n(L+l)}{aN} \quad \text{où : } N = \frac{1000V_c}{\pi d}$$
$$\Rightarrow T_{tc} = \frac{n(L+l)\pi d}{aV_c}$$

Temps technologique de dressage (tournage)

Le temps technologique d'une opération de dressage s'exprime sous la forme suivante :

$$T_{tc} = n \frac{(D - d) + l}{aN}$$

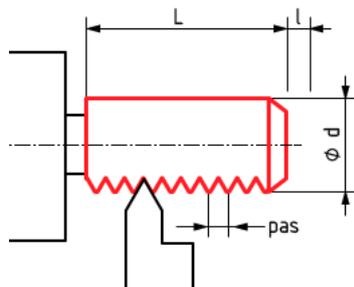


Calcul du Tt en tournage - dressage

Temps technologique en filetage (tour)

En filetage il faut prendre en compte, pour la calcul du temps d'usinage, le **pas du filetage p**. On introduit un coefficient **k** qui dépend de la vitesse de retour du chariot. Cette vitesse peut être égale à la vitesse de travail, ou inférieure.

$$T_{tc} = \frac{kn(L + l)}{pN}$$



Calcul du Tt pour le filetage

Pour une vitesse de retour égale au temps de travail on aura :

$$T_{tc} = \frac{2n(L + l)}{pN}$$

Si on réalise une vis à plusieurs filets (avec m le nombre de filets) alors :

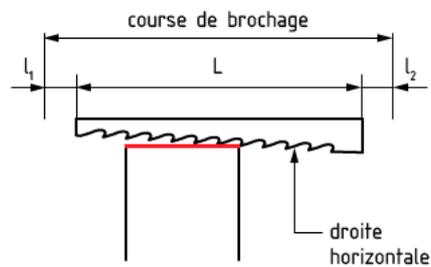
$$T_{tc} = \frac{kmn(L + l)}{pN}$$

Temps technologique en brochage

$$T_{tc} = \frac{C}{V_c} + \frac{C}{V_r}$$

* V_r : vitesse de retour; l_1, l_2 : longueur d'approche / de dégagement

* $C = L + l_1 + l_2$: course de brochage

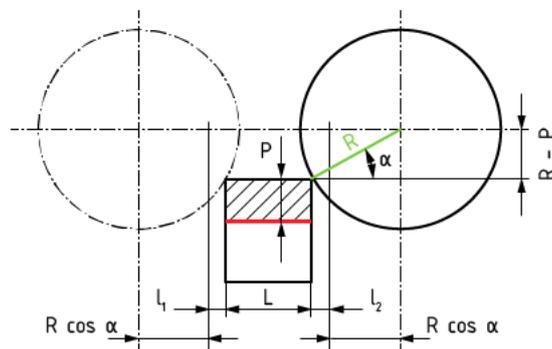


Calcul du T_t en brochage

Temps technologique pour le fraisage en roulant

Pour les opérations de fraisage on fait intervenir dans le calcul des temps technologiques le **nombre de dents Z** et le **diamètre D** de l'outil (fraise). On exprime alors ce temps sous la forme suivante :

$$T_{tc} = k \frac{(D \sin \alpha + l_1 + l_2 + L)}{aZN}$$

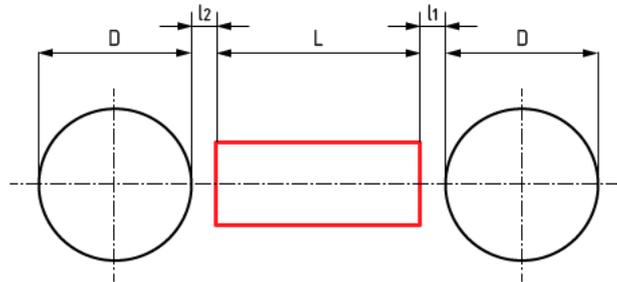


Calcul du T_t en fraisage (en roulant)

Temps technologique pour le fraisage en bout

Dans le cas d'un travail de fraisage en bout nous avons :

$$T_{tc} = k \frac{(D + l_1 + l_2 + L)}{aZN}$$



Calcul du Tt en fraisage (en bout)

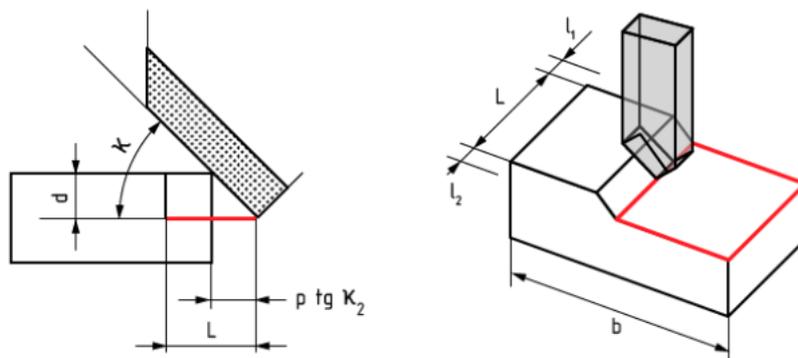
Temps technologique pour le rabotage

Le rabotage est une opération d'usinage dont le calcul du temps technologique de coupe fait intervenir des paramètres géométriques liés à la pièce ou encore une vitesse moyenne V_m , exprimée à l'aide de la vitesse de coupe V_c et à la vitesse de retour V_r .

$$V_m = 2 \frac{V_c V_r}{V_c + V_r}$$

$$T_{tc} = n \frac{(L + l_1 + l_2)(b + l + p \tan k_r)}{1000 V_m a}$$

- k est l'angle entre l'arête de coupe et le plan à réaliser (souvent identique avec k_r , l'angle d'arête),
- a désigne ici l'avance par double course (mm).



Calcul du Tt en rabotage

Ce procédé est peu utilisé de nos jours.

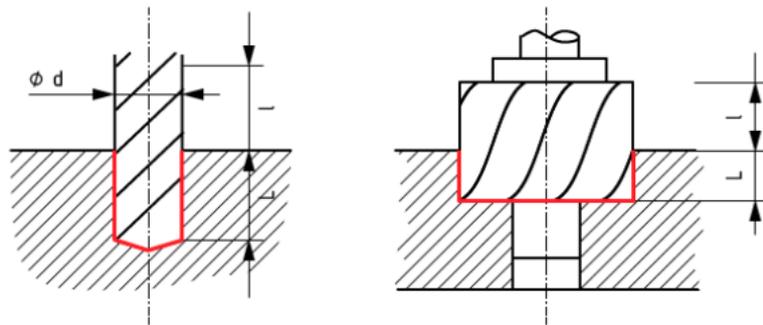
Temps technologique pour les opérations de perçage, lamage, alésage

Le temps technologique relatif à une opération de la catégorie perçage, alésage, lamage s'exprime sous la forme suivante :

$$T_{tc} = \frac{k(L + l + \frac{d}{2})}{aN}$$

où k est un coefficient tenant compte de la vitesse de retour, donné pour un trou ou un lamage.

Remarque. Pour le travail de lamage par en dessous, il est nécessaire de majorer le temps en fonction de la complexité du travail.



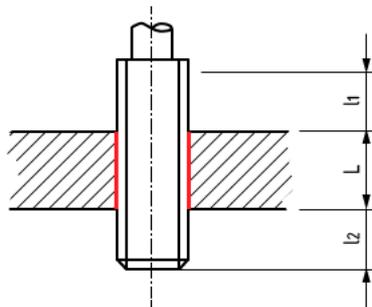
Calcul du T_t en perçage, lamage, alésage

Temps technologique pour l'opération de taraudage

En taraudage il est nécessaire de prendre en compte, outre la longueur d'approche l_1 :

- l_2 , qui représente la longueur d'entrée du taraud + longueur de dégagement
- un coefficient k , fonction de la vitesse de retour $1 < k < 4$

$$T_{tc} = k \frac{(L + l_1 + l_2)}{pN}$$



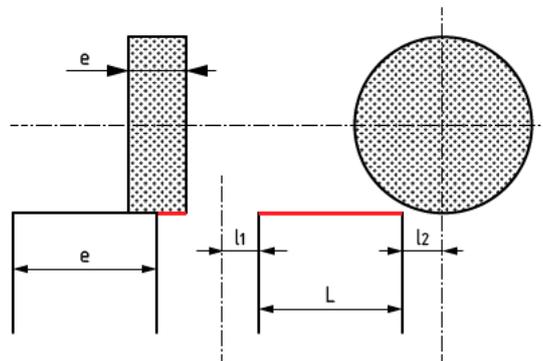
Calcul du T_t en taraudage

Temps technologique pour la rectification plane

Pour les opérations de rectification plane, outre des paramètres de coupe ou des paramètres géométriques relatifs à la pièce ou à l'outil qui ont déjà été introduits précédemment, on calcule le temps technologique de coupe à l'aide des paramètres suivants :

- k_1 désigne le nombre passes,
- a est l'avance par double course [mm]
- V c'est la vitesse de déplacement de la table
- e désigne l'épaisseur du meule.
- $k_2=1$ si enlèvement matière 1 fois pour 1 aller-retour table
- $k_2=2$ si on enlève de la matière à chaque fin de course

$$T_{tc} = k_1 \frac{(L + l_1 + l_2) \left(\frac{a}{b} k_2\right)}{V}$$

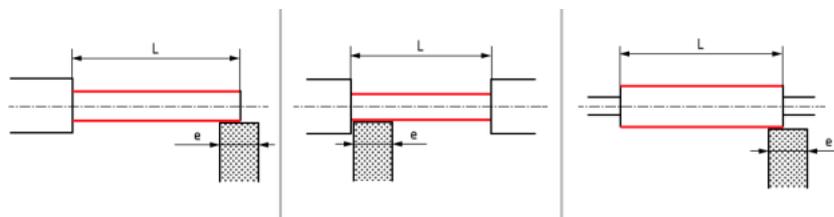


Calcul du T_t en rectification plane

Temps technologique pour la rectification cylindrique

La rectification cylindrique concerne des pièces sans épaulement, avec un ou deux épaulements. On utilise respectivement les formules suivantes :

- avec 1 épaulement : $T_{tc} = k \frac{(1 - \frac{e}{2})}{V}$
- avec 2 épaulements : $T_{tc} = k \frac{(L - e)}{V}$
- sans épaulement : $T_{tc} = k \frac{L}{V}$



Rectification cylindrique avec 1 épaulement, avec 2 épaulements et sans épaulement

Représentation temporelle : les simogrammes

Ce sont des représentations graphiques, chronologiques, des différents temps d'exécution, simultanés ou successifs, intervenant dans une phase. Elles sont faites à partir d'une échelle de temps.

Par convention la représentation est la suivante :

- les temps manuels sont représentés par un double trait continu ;
- les temps technologiques par un trait fort continu ;
- les temps technico-manuels par deux segments parallèles reliés par un trait continu en diagonale.

L'identification des différents temps est assurée par un numéro correspondant à leur rang d'intervention dans la phase. La figure suivante donne un exemple de simogramme.

