

Optimiser, c'est rechercher la solution la plus satisfaisante tout en respectant un certain nombre de contraintes. Dans le cas d'une mise en oeuvre d'une nouvelle production ou d'une amélioration d'une production existante, il peut être nécessaire d'optimiser le choix des paramètres de coupe.

Il existe de nombreux critères selon lesquels on peut optimiser les paramètres de coupe mais on ne présentera ici que les trois plus utilisés :

- x coût minimum d'usinage,
- x temps minimal d'usinage – cadence maximale de fabrication,
- x volume de copeau donné par arête de coupe.

PRÉLIMINAIRES

Durée de vie outil : T

La durée de vie d'un outil T est selon l'ISO 3685 le "temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique". Cette durée de vie n'étant pas infinie, elle impose un arrêt régulier pour le changement de l'arête ou de l'outil. Elle conditionne donc le temps d'usinage et donc le coût d'usinage d'une pièce.

Temps d'usinage : t_m

Le temps d'usinage d'une pièce peut être calculé à l'aide de la formule :

$$t_m = t_c + t_i + \frac{t_{cs}}{p}$$

- x t_c : temps réel de coupe (pendant lequel l'outil produit du copeau)
- x t_i : temps improductif sur le poste (mouvements rapides, montage / démontage de pièces, etc)
- x t_{cs} : temps de changement d'une arête de coupe (ou t_o temps de changement outil)
- x T : durée de vie de l'outil (de l'arête)
- x p : nombre de pièces entre deux changements d'outil (d'arête) : $p = \frac{T}{t_c}$

Coût d'usinage : C_u

Le coût d'usinage d'une pièce peut être calculé à l'aide de la formule :

$$C_u = C_c + C_i + C_s + C_{cs} + C_f$$

- x $C_c = c_m \times t_c$: coût de coupe par pièce
- x $C_i = c_m \times t_i$: coût improductif par pièce
- x $C_m = C_c + C_i$: coût machine par pièce
- x $C_s = P_o \times \frac{t_c}{T}$: coût outil par pièce avec P_o le prix d'une arête de coupe (d'un outil)
- x $C_{cs} = c_m \times \frac{t_{cs}}{p}$: coût de changement d'outil (d'arête) par pièce
- x C_f : coût fixe par pièce (éléments de manutention, outillage, matière, etc)

On note c_m le taux machine (en €/min) qui comprend en général le salaire de l'ouvrier, l'amortissement de la machine outil et un coût d'exploitation lié directement à l'usinage (électricité, lubrifiant, air comprimé, entretien), dont l'évaluation est souvent globale.

PREMIER CRITÈRE : COÛT MINIMUM D'USINAGE

Paramètres à maîtriser :

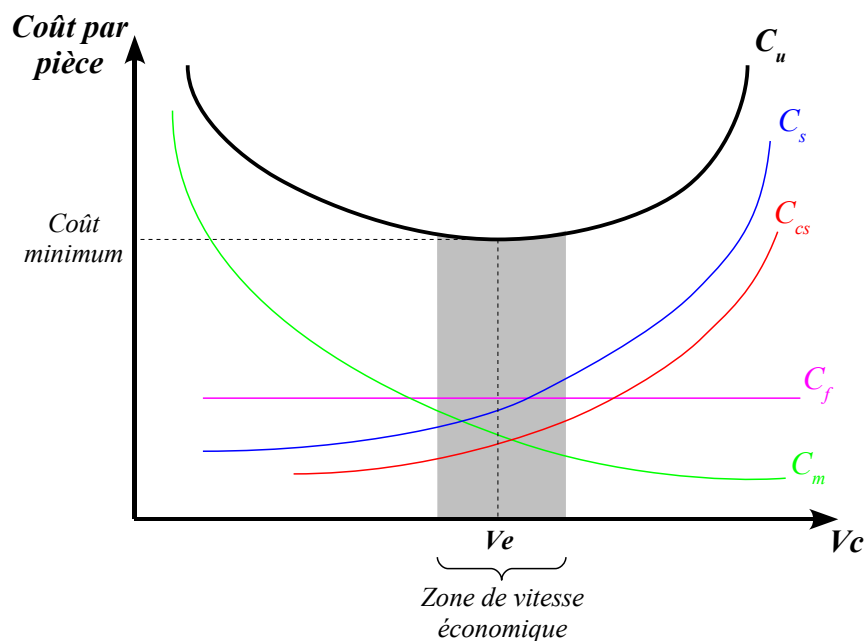
- Durée de vie économique de l'outil T_e
- Vitesse de coupe économique V_e

Le calcul du coût d'usinage se heurte à des problèmes difficiles à résoudre. En effet, les conditions d'usinage ne sont pratiquement jamais identiques d'une opération à l'autre (surépaisseurs diverses, limite d'usure acceptable variable, etc). On ramènera donc le calcul à **une** pièce pour **une** opération d'usinage avec **un seul** outil (dressage d'une face, chariotage).

Il s'agit de minimiser le coût d'usinage par pièce. Ce coût est la somme de quatre coûts :

$$C_u = C_m + C_s + C_{cs} + C_f$$

La variable principale est la vitesse de coupe. Le diagramme suivant représente l'influence des différents coûts sur le coût total en fonction de la vitesse de coupe.



On observe que le coût total d'usinage atteint une valeur minimale pour une vitesse donnée. Cette vitesse est appelée **vitesse économique** et est notée V_e .

L'optimisation consiste donc à exprimer C_u en fonction de V_c et de minimiser cette fonction.

Exemple en tournage

$$\text{Coût total : } C_u = c_m \cdot t_c + c_m \cdot t_i + P_o \cdot \frac{t_c}{T} + c_m \cdot \frac{t_{cs} \cdot t_c}{T} + C_f$$

$$\text{Si on appelle } L \text{ la longueur à usiner pour une seule passe, on a : } t_c = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Vc}$$

$$\text{Loi de Taylor : } T = C_v \cdot Vc^n$$

Expression du coût total d'usinage en fonction de Vc :

$$\text{On a : } C_u = c_m \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot Vc} + c_m \cdot t_i + P_o \cdot \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot C_v \cdot Vc^{(n+1)}} + c_m \cdot t_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot C_v \cdot Vc^{(n+1)}} + C_f$$

$$\text{En factorisant : } C_u = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f} \cdot \left[\frac{c_m}{Vc} + \frac{P_o + c_m \cdot t_{cs}}{C_v \cdot Vc^{(n+1)}} \right] + c_m \cdot t_i + C_f$$

$$\text{On cherche à minimiser } C_u. \text{ Donc on cherche } Vc \text{ tel que } \frac{\partial C_u}{\partial Vc}(Vc) = 0.$$

$$\text{Ceci revient à trouver } Vc \text{ tel que : } \frac{\partial}{\partial Vc} \left[\frac{c_m}{Vc} + \frac{P_o + c_m \cdot t_{cs}}{C_v \cdot Vc^{(n+1)}} \right] = 0$$

Après calcul, on trouve les vitesse de coupe et durée de vie économiques suivantes :

$$Vc = \left[\frac{-(n+1) \left(\frac{P_o}{c_m} + t_{cs} \right)}{C_v} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{et :} \quad Tc = -(n+1) \left[\left(\frac{P_o}{c_m} \right) + t_{cs} \right]$$

Remarques :

- Il est intéressant de noter que si l'on doit retrouver ces formules, il est plus aisé d'exprimer C_u en fonction de T puis de chercher Tc telle que $\frac{\partial C_u}{\partial T}(Tc) = 0$ pour finalement retrouver Vc à l'aide de la formule de Taylor.
- Ces formules sont aussi valables en fraisage.

SECOND CRITÈRE : TEMPS D'USINAGE MINIMAL (CADENCE DE PRODUCTION MAXI)

Paramètres à maîtriser :

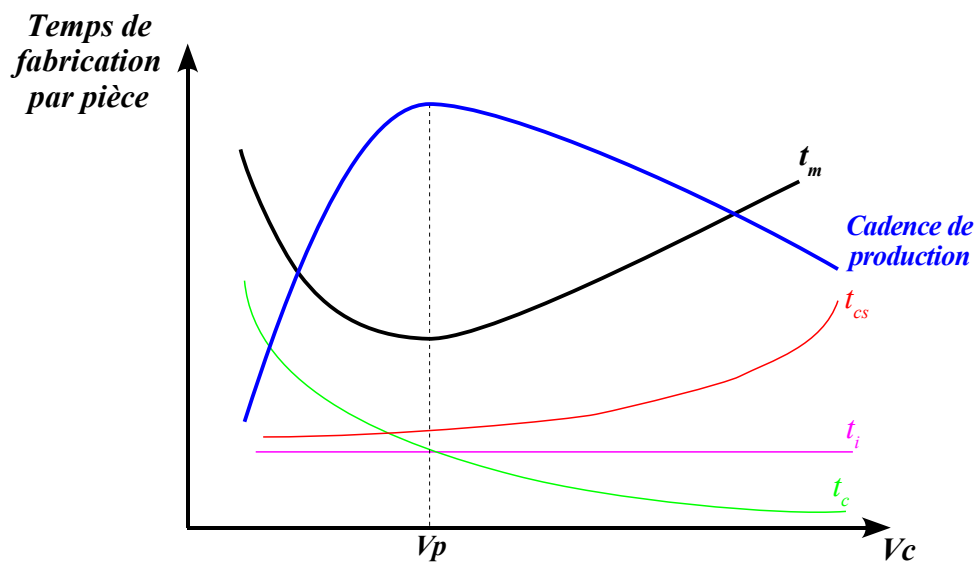
- Durée de vie de l'outil T_p
- Vitesse de coupe pour une production maximale V_p

La cadence maximale est recherchée indépendamment du coût de fabrication lorsqu'on souhaite fabriquer le plus grand nombre de pièce dans le minimum de temps pour des raisons de délai.

Il s'agit de minimiser le temps d'usinage d'une pièce. Ce temps est donné par la formule :

$$t_m = t_c + t_i + \frac{t_{cs} \times t_c}{T}$$

La variable principale est la vitesse de coupe. Le diagramme suivant représente l'influence des différents temps sur le temps total et la cadence de production en fonction de la vitesse de coupe.



On observe que le temps d'usinage par pièce atteint une valeur minimale pour une vitesse donnée. Cette vitesse est appelée **vitesse de production maxi** et est notée V_p .

L'optimisation consiste donc à exprimer t_m en fonction de V_c et de minimiser cette fonction pour obtenir V_p .

Exemple en tournage

$$\text{Temps total d'usinage : } t_m = t_c + t_i + \frac{t_{cs} \cdot t_c}{T}$$

$$\text{Si on appelle } L \text{ la longueur à usiner pour une seule passe, on a : } t_c = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V_c}$$

$$\text{Loi de Taylor : } T = C_v \cdot V_c^n$$

Expression du temps total d'usinage en fonction de V_c :

$$\text{On a : } t_m = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V_c} + t_i + \frac{t_{cs} \cdot \pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot C_v \cdot V_c^{(n+1)}}$$

$$\text{En factorisant : } t_m = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f} \cdot \left[\frac{1}{V_c} + \frac{t_{cs}}{C_v \cdot V_c^{(n+1)}} \right] + t_i$$

On cherche à minimiser t_m . Donc on cherche V_p tel que $\frac{\partial t_m}{\partial V_c}(V_p) = 0$.

$$\text{Ceci revient à trouver } V_c \text{ tel que : } \frac{\partial}{\partial V_c} \left[\frac{1}{V_c} + \frac{t_{cs}}{C_v \cdot V_c^{(n+1)}} \right] = 0$$

Après calcul, on trouve les vitesse de coupe et durée de vie de production maxi suivantes :

$$V_p = \left[\frac{-(n+1)t_{cs}}{C_v} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \text{et :} \quad T_p = -(n+1)t_{cs}$$

Remarques :

- Il est intéressant de noter que si l'on doit retrouver ces formules, il est plus aisé d'exprimer t_m en fonction de T puis de chercher T_p telle que $\frac{\partial t_m}{\partial T}(T_p) = 0$ pour finalement retrouver V_p à l'aide de la formule de Taylor.
- Ces formules sont aussi valables en fraisage.

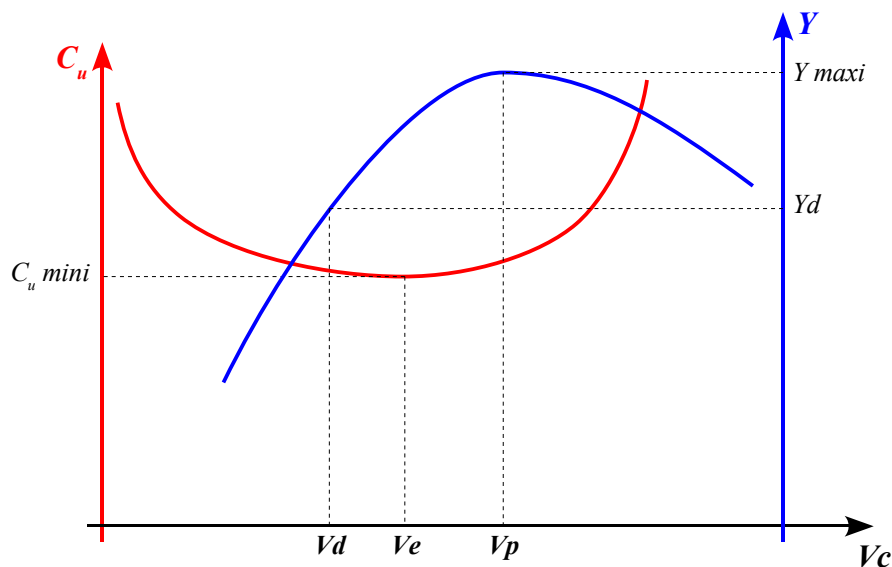
TROISIÈME CRITÈRE : VOLUME DE COPEAU DONNÉ PAR ARÊTE DE COUPE

Paramètres à maîtriser :

- Durée de vie de l'outil T_d
- Vitesse de coupe pour un volume donné V_d
- Avance, profondeur de coupe

Le volume de copeau donné est recherché quand on souhaite réduire au minimum le nombre de changement d'arête (ou d'outil) par nécessité de conserver un profil exact de l'outil, lorsque le réglage ou l'affûtage de cet outil est très onéreux, ou lorsqu'on désire maîtriser le nombre de pièces entre deux changements d'arêtes dans le cas d'une gestion d'outils (cas où la recherche de la vitesse économique donne des résultats aberrants).

La variable principale est encore la vitesse de coupe. Le diagramme suivant représente le coût d'usinage par pièce ainsi que le volume Y de copeau entre deux changements d'arête fonction de la vitesse de coupe.



L'optimisation consiste donc à exprimer Y en fonction de V_c et de déterminer V_d de telle sorte à obtenir un volume de copeau taillé égal à Y_d (imposé).

Volume coupé par pièce : $y = f \cdot a_p \cdot V_c \cdot t_c$. On souhaite que le temps de coupe soit égale à la durée de vie de l'outil. Volume coupé par une arête de coupe : $Y = f \cdot a_p \cdot V_c \cdot T$.

On obtient alors : $Y = f \cdot a_p \cdot C_v \cdot V_c^{(n+1)}$ ou $Y = f \cdot a_p \cdot C_v^{\frac{-1}{n}} \cdot T^{\left(\frac{n+1}{n}\right)}$

Optimisation :

Pour un volume Y_d donné : $V_c = \left(\frac{Y_d}{f \cdot a_p \cdot C_v} \right)^{\frac{1}{n+1}}$ ou $T_d = \left(\frac{Y_d \cdot C_v^{\frac{1}{n}}}{f \cdot a_p} \right)^{\frac{n}{n+1}}$

C_v sera en général déterminée à l'aide d'un couple ($V_0 ; T_0$) donné.