

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

Les paramètres de coupe

Pour obtenir une pièce mécanique par enlèvement de matière avec (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler certains paramètres sur la machine dite "les paramètres de coupe".

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, notamment :

- ♣ le type de machine (tournage, fraisage, perçage) ;
- ♣ la puissance de la machine ;
- ♣ la matière usinée (acier, aluminium) ;
- ♣ la matière de l'outil (ARS, carbure) ;
- ♣ le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage).

symbole	Désignation	Unité	Calcul
V_c	La vitesse de coupe	m/min	Imposé par le fabricant d'outil
N	la vitesse de broche	trs/min	$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$
f	l'avance par tour	mm/trs	Fonction de la rugosité désirée, du copeaux mini
a	la profondeur de passe radiale	mm	quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau.

Vitesse de coupe V_c

la vitesses de coupe établies à partir d'expérimentations en laboratoire. Ces expérimentations permettent d'obtenir le meilleur compromis entre la durée de vie maximale de l'outil et l'enlèvement maximum de matière dans un but économique (Le choix de la vitesse de coupe influe sur le prix de revient du produit fabriqué).

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000}$$

V_c : vitesse de coupe en m/min

N : fréquence de rotation en tr/min

D : diamètre de l'élément tournant en mm

tournage D: diamètre de la pièce **fraisage** D: diamètre de la frise **Perçage** D: Périmètre du forêt

De quels facteurs dépend la vitesse de coupe ?

- La matière de la pièce
- La matière de l'outil (ARS ; Carbure...) et sa nuance (plaquette carbure)
- Le choix de l'avance « f »

LA FREQUENCE DE ROTATION « N »

Comment détermine-t-on la fréquence de rotation « N »

1/ Par le calcul :

$$N = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}$$

N en **tour/min**
Vc en **m/min**
D en **mm**

2/ Par des abaques :

De quels facteurs dépend la fréquence de rotation ?

- o Le diamètre de l'élément tournant (pièce ou outil)
- o La vitesse de coupe choisie

L'AVANCE « f » ET LA VITESSE D'AVANCE « Vf »

On appelle l'avance « f » le déplacement du point considéré de l'arête tranchante en millimètre pour 1 tour et pour une dent.

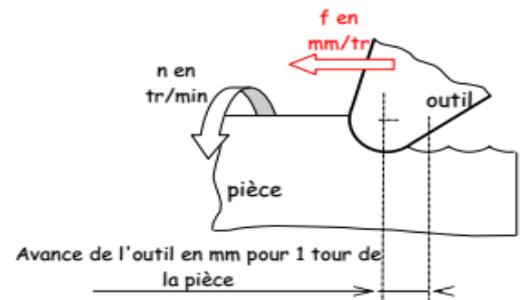
□ En ébauche : L'objectif de l'opération d'ébauche est d'enlever un volume de matière maximal en un temps minimum et un coût minimum.

□ **En finition** : L'objectif du travail en finition est de respecter les intervalles de tolérance et les exigences d'état de surface (rugosité).

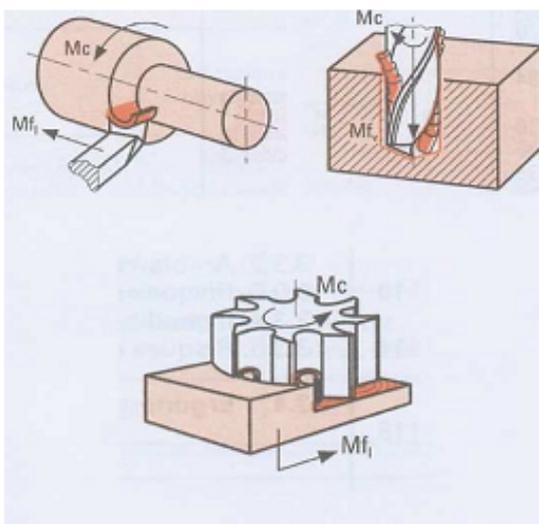
De quels facteurs dépendent la vitesse d'avance « Vf » et donc l'avance

« f » ?

- o La nature de l'opération (ébauche / finition)
- o Le type d'outil (rayon de bec pour les plaquettes carbures)
- o L'exigence de rugosité demandée
- o La fréquence de rotation pour la vitesse d'avance « Vf



Calcul de la vitesse d'avance « Vf » :



Expression générale utilisée en **tournage et en perçage**

$$V_f = f \times N$$

Vf : Vitesse d'avance (mm/min)
f : avance par tour (mm)
N : Fréquence de rotation (tr/min)

Expression qui en **découle, utilisée en fraisage**

$$V_f = f_z \times Z \times N$$

Vf : Vitesse d'avance (mm/min)
fz : avance par dent (mm)
Z : nombre de dent
N : Fréquence de rotation (tr/min)

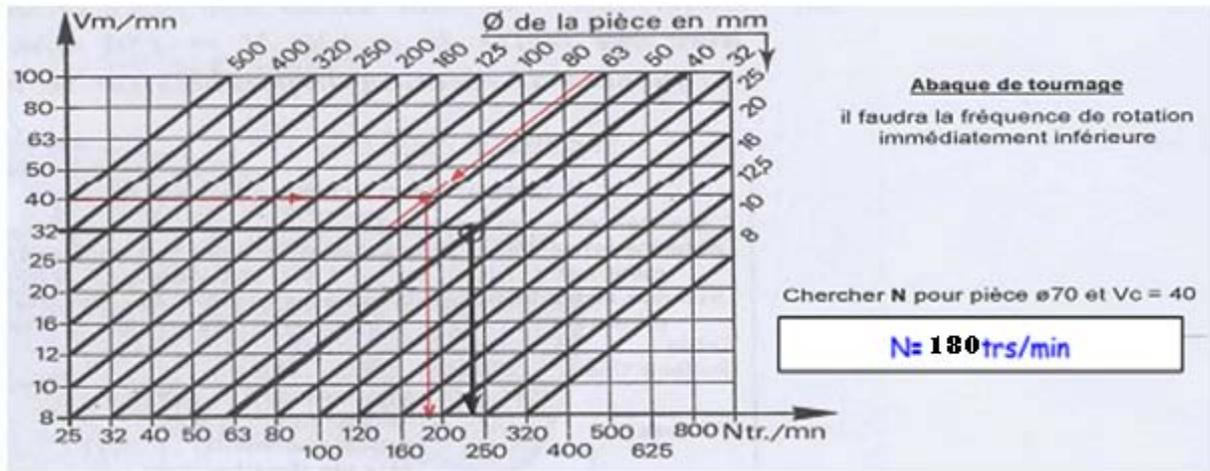
Nota : le produit de l'avance par dent par le nombre de dent donne l'avance pour un tour.

Application : fraisage avec N = 400; Z = 8 et fz = 0.05

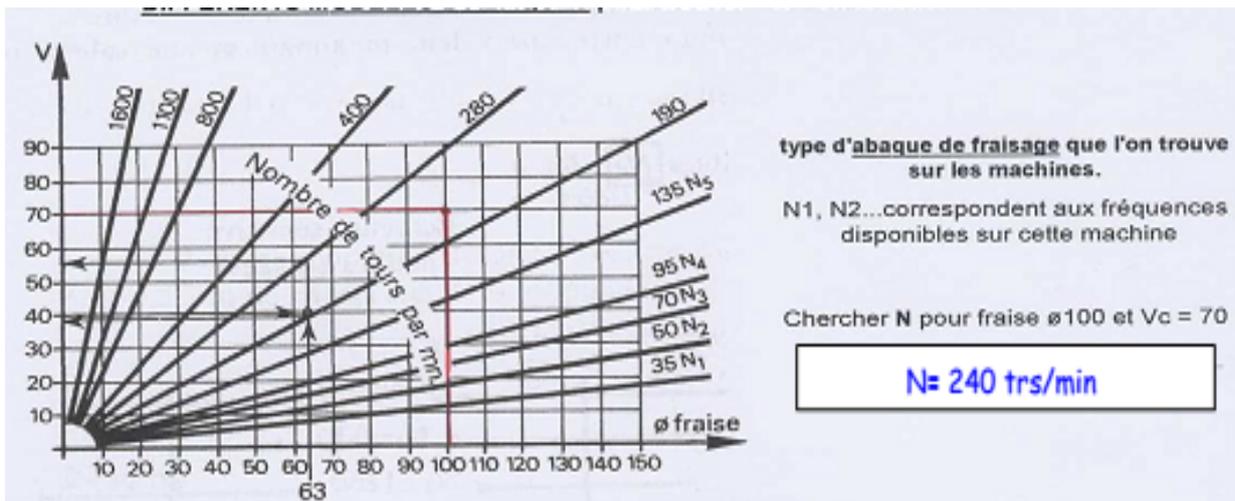
$$V_f = 0.05 \times 8 \times 400 = 160 \text{ mm/min}$$

Pour choisir la meilleure fréquence de rotation, sans avoir à effectuer de calculs, on utilise un abaque comme celui présenté ci-dessous .identique).

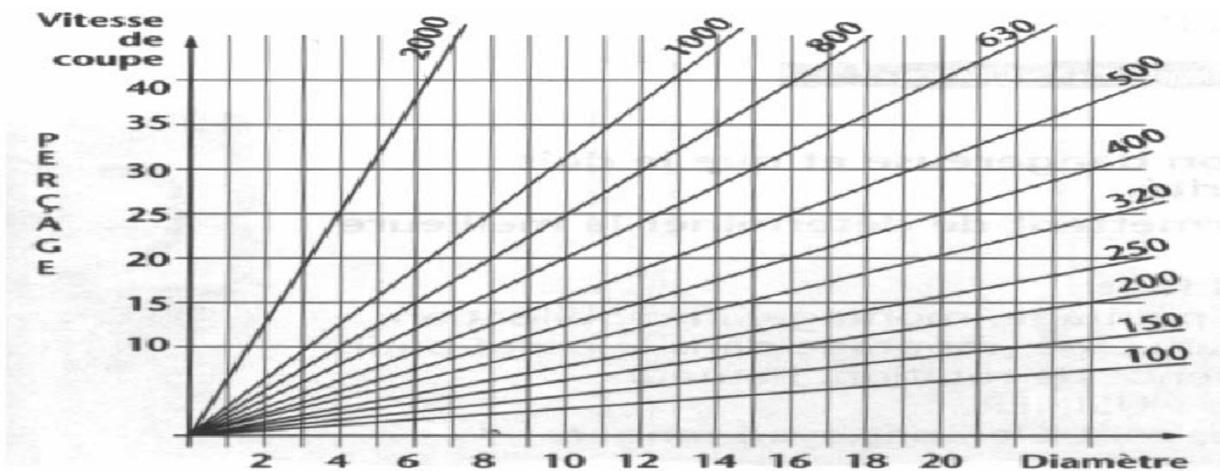
1/ Tournage



2/ Fraisage



3/Perçage



Profondeur de passe en fraisage

La profondeur de passe a_p dépend de la surépaisseur à usiner, ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition). Elle tend à diminuer, lorsque les exigences dimensionnelles, géométriques et d'état de surface deviennent plus rigoureux. Elle ne doit pas être cependant inférieure au copeau minimum. La valeur maximale de a_p est limitée par la rigidité de l'outil et la puissance de la machine.

Critères d'optimisation des paramètres de coupe

Optimisation

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

Exemples	Critères
optimiser le temps d'usinage d'une pièce,	durée minimale
optimiser le prix d'usinage d'une pièce,	coût minimum,
optimiser le temps d'usinage d'une pièce + prix d'usinage	quantité maximale

Étude des temps

Pour un travail de réalisation en série, il est très important de connaître le temps de fabrication d'une pièce, cela permet de déterminer la durée et le coût d'une production

On peut classer les temps dans plusieurs familles

Temps de préparation T_s : noté T_s , c'est le temps nécessaire à la préparation d'un poste d'usinage en vue de la réalisation des pièces en série (installation, réglages,...)

Temps technologiques (T_t)

Temps de travail dont la durée dépend uniquement des conditions techniques d'exécution (temps de coupe).

le temps technologique est donné par la relation est donné par la relation :

$$T_t = \frac{L}{V_f}$$

L : longueur de la course d'usinage

V_f : vitesse d'avance

Temps manuels (T_m)

Ces temps correspondent aux gestes ou mouvement que l'opérateur refait identiquement pour chaque pièce de la série.

Ex : prendre pièce, embrayer

Temps techno-manuels (T_{tm})

Ce sont des temps main-machine qui apparaissent quand le mode de travail de la machine nécessite une intervention manuelle active.

Temps masqués (T_z)

Ces temps représentent les temps T_m pendant lesquels la machine travaille seule en T_t . Ces temps n'interviennent pas dans le calcul du temps de cycle.

Ex : Contrôle ou ébavurage d'une pièce pendant l'usinage d'une autre pièce.

EXEMPLE D'APPLICATION : TOURNAGE

L'usinage étudié est présenté ci-contre :

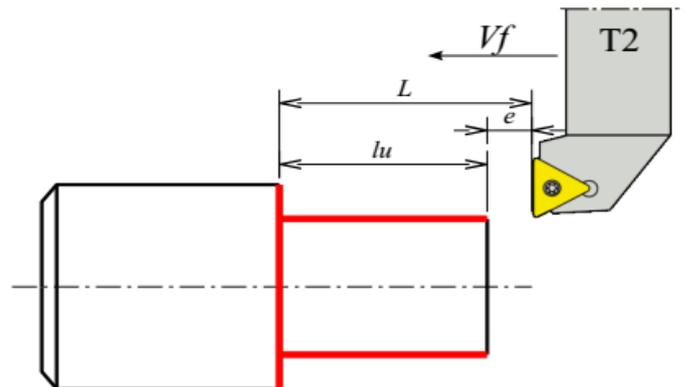
- lu = longueur usinée
- e = distance de sécurité
- V_f = vitesse d'avance

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = lu + e$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

$$T_t = L/V_f$$



Vitesse d'avance de l'outil en tournage :

$$V_f = f \times n$$

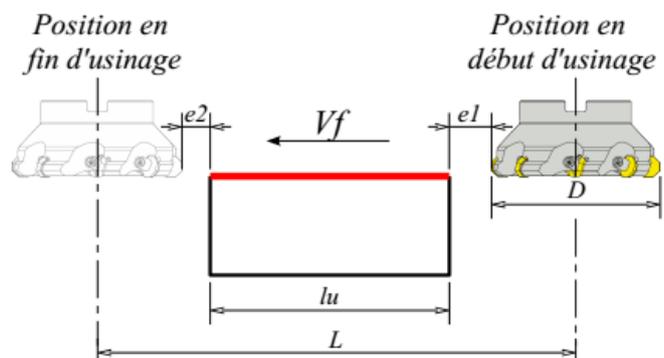
Donc en tournage le temps technologique d'usinage est donné par la formule :

$$T_t = \frac{(lu + e)}{(f \times n)}$$

EXEMPLE D'APPLICATION : FRAISAGE

L'usinage étudié est présenté ci-contre :

- lu = longueur usinée
- $e1$ = dist de sécurité en entrée
- $e2$ = dist de sécurité en sortie
- D = diamètre de la fraise
- V_f = vitesse d'avance



Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = lu + e1 + e2 + D$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

$$T_t = L/V_f$$

Vitesse d'avance de l'outil en fraisage : $V_f = f_z \times Z \times n$

Donc en fraisage le temps technologique d'usinage est donné par la formule :

$$T_t = \frac{(lu + e1 + e2 + D)}{(f_z \times Z \times n)}$$

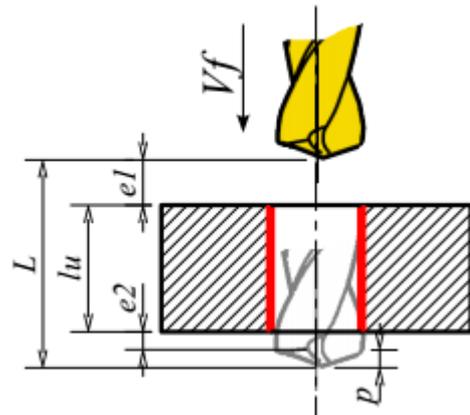
On prend souvent $e1 = e2 = e$ ce qui nous donne :

$$T_t = \frac{(lu + 2e + D)}{(f_z \times Z \times n)}$$

EXEMPLE D'APPLICATION : PERÇAGE

L'usinage étudié est présenté ci-contre :

- lu = longueur usinée
- $e1$ = dist de sécurité en entrée
- $e2$ = dist de sécurité en sortie
- p = dimension de la pointe du foret
- V_f = vitesse d'avance



Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = lu + e1 + e2 + p$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce : $T_t = L/V_f$

Vitesse d'avance de l'outil en perçage : $V_f = f \times n$

Donc en perçage le temps technologique d'usinage est donné par la formule :

$$T_t = \frac{(l_u + 2e + p)}{(f_z \times Z \times n)}$$

Le coût de l'usinage

Le coût de l'usinage comprend :

- coût machine (amortissement, entretien, salaire opérateur) ;
- coût montage (prix du montage à amortir sur l'ensemble de la série) ;
- coût relatif à l'usure de l'outil (plaquettes, porte plaquettes, arrêt machine pour réglage, ...)

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

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

$C_c = \tau m \times T_t$: coût de coupe par pièce

$C_i = \tau m \times t_s$: coût improductif par pièce, avec t_s : temps de préparation (temps improductif sur le poste)

$C_m = C_c + C_i$: coût machine par pièce

$C_s = P_o \times (T_t / T)$: coût outil par pièce avec P_o le prix d'une arête de coupe (d'un outil)

$C_{cs} = \tau m \times (t_{CS} / p)$: coût de changement d'outil (d'arête) par pièce

p : nombre de pièces entre deux changements d'outil (d'arête) : $p = T / T_t$

C_f : coût fixe par pièce (éléments de manutention, outillage, matière, ...)

On note τm le taux machine (en DA/min ou €/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.

Coût minimum d'usinage

Paramètres à maîtriser :

Durée de vie économique de l'outil T_e

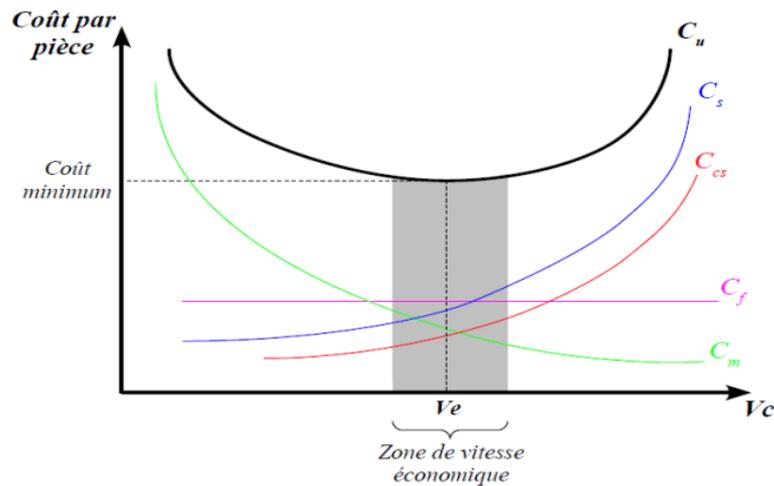
Vitesse de coupe économique V_e

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

$$C_u = C_m + C_s + C_{cs} + C_f \quad (1)$$

La variable principale est la vitesse de coupe

En fonction de la vitesse de coupe (V_c) le coût de l'usinage suit une courbe dont l'allure générale prend la forme de la figure 1



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 la vitesse de coupe V_c et de minimiser cette fonction

Quand la vitesse de coupe augmente, la durée de l'usinage diminue mais la durée de coupe de l'outil diminue (usure plus rapide). En conclusion le coût d'utilisation de la machine diminue tandis que le coût de l'outillage par pièce augmente.

Il existe de nombreux critères selon lesquels on peut optimiser les paramètres de coupe, on peut citer :

Critère 1 : **coût minimum d'usinage,**

Critère 2 : **temps minimal d'usinage – cadence maximale de fabrication,**

L'optimisation du premier critère consiste à exprimer C_u en fonction de V_c et de minimiser cette fonction.

$$\Rightarrow \frac{\partial C_u}{\partial V_c} = 0$$

Recherche du temps de production**Temps de production : T_p**

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

$$T_p = T_t + t_s + (t_{cs} / p) \quad (2)$$

Soient :

T_p : temps de production,

T_t ou t_c : temps réel de coupe

t_s : temps improductif sur le poste (mouvements rapides, montage / démontage de pièces, ...)

t_{cs} : temps de changement d'une arête de coupe (ou temps de changement outil)

p : nombre de pièces entre deux changements d'outil (d'arête) :

$$p = T / T_t$$

T : durée de vie de l'outil (ou de l'arête de coupe)

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

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

où **C**, **x**, **y**, et **n** sont des constantes du matériau usé, **f** est l'avance, **a** la profondeur de passe, **V_c** la vitesse de coupe ; où : **f** : avance (mm/tr),

f : profondeur de passe (mm),

V : vitesse de coupe (m/min),

T : durée de vie de l'outil (min)

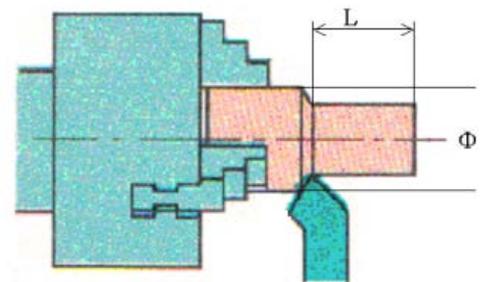
n est le coefficient de Taylor. Influencé par le matériau de l'outil, le matériau usiné ainsi que

le type d'usinage ($-12 < n < -1$)

c_v est la constante de Taylor : $10^4 < c_v < 10^{14}$ (Résultats d'essais pour un couple outil / pièce)

En tournage par exemple,

$$T_t = \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c}$$



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

1- Optimisation selon le critère : coût minimum

Pour une avance donnée (f)

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

$$\frac{\partial C_u}{\partial V_c} = 0$$

On a

$$C_u = \tau m \times T_t + \tau m \times t_s + P_o \times \left(\frac{T_t}{T} \right) + \tau m \left(\frac{T_{cs} \times T_t}{T} \right) + C f$$

$$C_u = \tau m \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \tau m \times t_s + P_o \times \left(\frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V_c \cdot C_v \cdot V_c^n} \right) + \tau m \left(\frac{T_{cs} \times \pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V_c \cdot C_v \cdot V_c^n} \right) + C f$$

$$C_u = \tau m \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \tau m \times t_s + P_o \cdot \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot C_v \cdot V_c^{(n+1)}} + \tau m \frac{T_{cs} \times \pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f \cdot C_v \cdot V_c^{(n+1)}} + C f$$

En factorisant :

$$C_u = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f} \left[\frac{\tau m}{V_c} + \frac{P_o + \tau m \cdot T_{cs}}{C_v \cdot V_c^{(n+1)}} \right] + \tau m \times t_s + C f$$

On cherche à minimiser C_u Donc on cherche V_e tel que $\frac{\partial C_u}{\partial V_c}(V_e) = 0$

Ceci revient à trouver V_c tel que : $\frac{\partial}{\partial V_c} \left(\frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f} \left[\frac{\tau m}{V_c} + \frac{P_o + \tau m \cdot T_{cs}}{C_v \cdot V_c^{(n+1)}} \right] + \tau m \times t_s + C f \right) = 0$

$$\frac{\partial}{\partial V_c} \left(\frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f} \left[\tau m \cdot V_c^{-1} + \frac{V_c^{-(n+1)} (P_o + \tau m \cdot T_{cs})}{C_v} \right] \right) = 0$$

$$\frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot f} \left[\frac{-\tau m}{V_c^2} - \frac{(n+1) (P_o + \tau m \cdot T_{cs})}{C_v \cdot V_c^{(n+2)}} \right] = 0$$

$$\frac{\pi . L . D}{1000 . f} \left[\frac{-\tau m . C v . V c^{(n+2)} - \left((n+1) (P_0 + \tau m . T c s) \right) V c^2}{V c^2 . C v . V c^{(n+2)}} \right] = 0$$

$$-\frac{\pi . L . D}{1000 . f} \left[\frac{V c^2 \left(\tau m . C v . V c^n + (n+1) (P_0 + \tau m . T c s) \right)}{V c^2 . C v . V c^{(n+2)}} \right] = 0$$

$$-\frac{\pi . L . D}{1000 . f} \left[\frac{\tau m . C v . V c^n + (n+1) (P_0 + \tau m . T c s)}{C v . V c^{(n+2)}} \right] = 0$$

$$\tau m . \left[C v . V c^n + (n+1) \left(\frac{P_0}{\tau m} + T c s \right) \right] = 0$$

$\tau m \neq 0$, alors :

$$C v . V c^n + (n+1) \left(\frac{P_0}{\tau m} + T c s \right) = 0$$

$$V c^n = \frac{-(n+1) \left(\frac{P_0}{\tau m} + T c s \right)}{C v}$$

$$V c = \sqrt[n]{\frac{-(n+1) \left(\frac{P_0}{\tau m} + T c s \right)}{C v}}$$

$$V c = \left[\frac{-(n+1) \left(\frac{P_0}{\tau m} + T c s \right)}{C v} \right]^{\frac{1}{n}} . \text{ Cette vitesse est dite « économique » et elle est notée « } V_e \text{ » .}$$

Remarques : $(-12 < n < -1)$

$$\text{et } T e = -(n+1) \left[\left(\frac{p_0}{\tau m} \right) + T c s \right]$$

2- Optimisation selon le critère : temps d'usinage minimal (cadence de production maximale)

Paramètres à maîtriser :

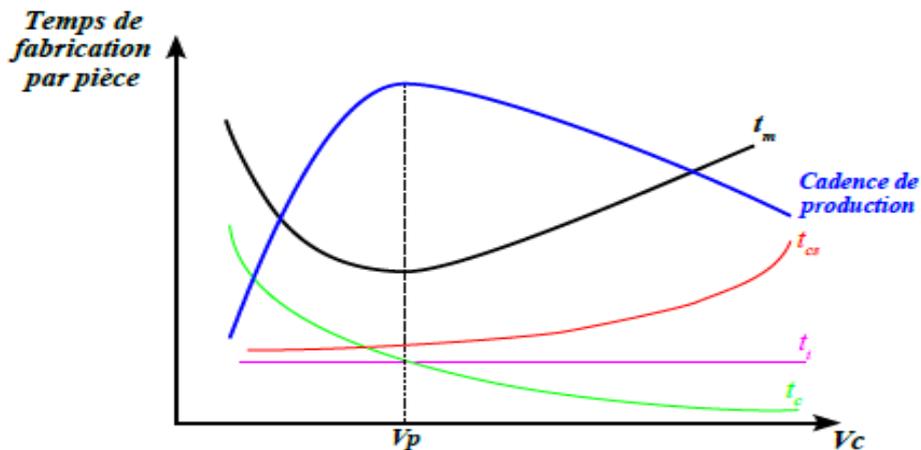
- Durée de vie de l'outil T_p
- Vitesse de coupe pour une production maximale V_p

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 :

$$T_p = T_t + t_s + (t_{cs} / p)$$

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

Temps total d'usinage :

$$T_p = T_t + t_s + (t_{cs} / p)$$

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

$$T_p = \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} + T_s + \frac{L \times \pi \times D}{1000 \times f \times V_c} \times \frac{T_{cs}}{C_v \cdot V_c^n}$$

expression du temps total d'usinage en fonction de v_c :

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

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

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 :

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

3- troisième critère : volume de copeau donné par arête de coupe

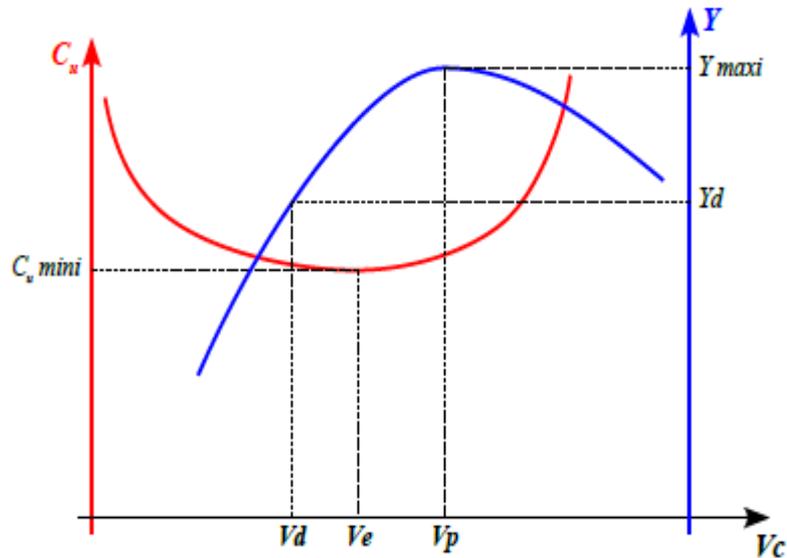
Paramètres à maîtriser :

- 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 $Y = f \cdot a_p \cdot C_v^{-1} \cdot T^{\left(\frac{n+1}{n}\right)}$

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.