

Coupe des métaux 2

Université de M'sila



DR : ARSLANE Mustapha

MAB / UNIV de M'sila

Table des matières



Objectifs	3
Introduction	4
I - Chapitre I : Aspect économique et optimisation des opérations d'usinage	5
1. LES DONNÉES TECHNIQUES ET FINANCIÈRES	6
1.1. Données géométriques relatives à la pièce	6
1.2. Données relatives au couple outil - matière (COM)	6
1.3. Données relatives à la machine et au porte-pièce :	6
2. L'OPTIMISATION EN USINAGE	7
2.1. DÉFINITION	7
2.2. Optimisation des conditions de coupe pour un coût minimum	7
2.3. Approches pour minimiser le coût de l'usinage	7
2.4. Influence de la vitesse de coupe sur les coûts de production	8
3. Expression du coût d'une opération d'usinage	9
3.1. Étude des temps	9
3.2. Coût de l'usinage	11

Objectifs

L'objectif de la matière "**Coupe de métaux 2**" est d'approfondir les connaissances dispensées dans la matière "**Coupe de métaux 1**". On trouve ainsi, d'autres connaissances avec plus de détails. Ces deux matières visent pour atteindre une bonne compréhension et une maîtrise du phénomène de coupe.

Introduction



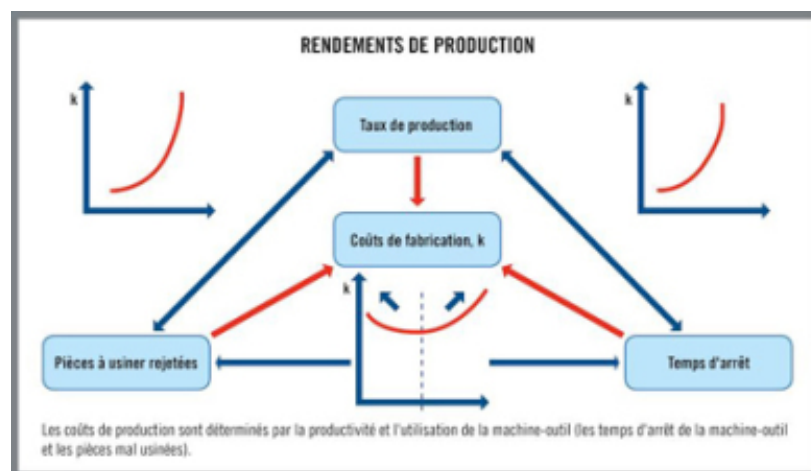
L'usinage est un procédé de fabrication essentiel pour la production de pièces métalliques de précision. Cependant, il est également **un processus coûteux** qui peut représenter **une part importante du coût total** d'un produit. L'optimisation des opérations d'usinage est donc essentielle pour améliorer la rentabilité et la compétitivité des entreprises.



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

I

Ce chapitre examine les aspects économiques de l'usinage et **les différentes techniques d'optimisation** qui peuvent être utilisées pour réduire **les coûts et améliorer** la performance.



1. LES DONNÉES TECHNIQUES ET FINANCIÈRES

1.1. Données géométriques relatives à la pièce

- La géométrie à réaliser et principalement les plus petits rayons de raccordement. Les différents états de surface à obtenir
- Surépaisseur de métal à enlever, déformation de la pièce sous les efforts de coupe.
- En tournage les différents diamètres à usiner avec la même vitesse de rotation.

1.2. Données relatives au couple outil - matière (COM)

Géométrie et nuance de l'outil : celles-ci sont fonction du type d'usinage (super finition, finition, semi-finition, ébauche légère, ébauche lourde) de la matière à usiner, de la forme à réaliser, des états de surfaces et des surépaisseurs à enlever.

Effort spécifique de coupe K_c (en N/mm²): il est donné en fonction de l'outil choisi, de la matière usinée et de sa dureté Brinell

Diagramme brise copeau : en tournage et perçage, il correspond pour le couple outil-matière en une plage de fonctionnement dépendante de l'avance "**f**" et de la profondeur de passe "**a**".

1.3. Données relatives à la machine et au porte-pièce :

- Puissance admissible sur la machine.
- Gamme de vitesses et d'avances.
- Type de porte-pièce et caractéristiques des efforts transmissibles par le "bridage"

2. L'OPTIMISATION EN USINAGE

2.1. DEFINITION

Optimiser c'est choisir **les conditions de coupe** (V_c , f , a) nécessaires à l'obtention d'une **pièce conforme**, et de satisfaire au mieux un "**critère d'optimisation**" compte tenu de contraintes technologiques et économiques imposées

L'un des trois critères d'optimisation suivants est généralement utilisé :

- Coût minimal
- Production maximale
- Coût minimal pour un taux de production fixé

Ces critères sont basés sur une **disponibilité immédiate** et un **taux d'utilisation maximal des moyens de production**. L'optimisation réalisée est locale et ne prend pas en compte les facteurs plus généraux de l'entreprise liés au système de gestion des ressources.

2.2. Optimisation des conditions de coupe pour un coût minimum

L'optimisation des conditions de coupe vise à déterminer les paramètres de coupe qui permettent d'obtenir le coût de production le plus bas possible. Cela implique de trouver le bon équilibre entre plusieurs facteurs, tels que :

Vitesse de coupe (V_c): vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport à la pièce à usiner.

Avance (f): distance parcourue par l'outil par tour de broche.

Profondeur de passe (ap): quantité de matière enlevée par l'outil à chaque passage.

Matériau de la pièce: propriétés du matériau à usiner, telles que sa dureté et sa résistance.

Outil de coupe: type d'outil et caractéristiques, comme le matériau et la géométrie.



Complément

Minimiser le coût de l'usinage implique de prendre en compte plusieurs éléments :

Durée d'usinage: temps nécessaire pour l'usinage de la pièce.

Durée de vie de l'outil: temps pendant lequel l'outil peut couper avant de devoir être remplacé.

Coût de l'outil: prix d'achat et de maintenance de l'outil.

Puissance consommée: énergie nécessaire pour faire fonctionner la machine-outil.

2.3. Approches pour minimiser le coût de l'usinage

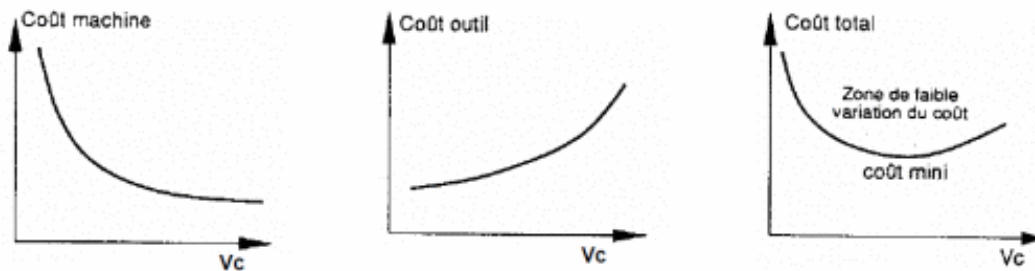
Modèles mathématiques: utilisation d'équations pour déterminer les conditions de coupe optimales en fonction des différents paramètres.

Logiciels d'optimisation: programmes informatiques qui permettent de simuler différentes conditions de coupe et de trouver la solution la plus économique.

Expérimentation: réalisation d'essais de coupe pour déterminer les conditions optimales pour un cas spécifique.

2.4. Influence de la vitesse de coupe sur les coûts de production

- Si la vitesse de coupe augmente, le temps d'usinage diminue, le temps d'occupation également, donc le coût machine diminue.
- Si la vitesse de coupe augmente, l'usure de l'outil est plus rapide; il en résulte une consommation plus importante d'outils et un changement plus fréquent d'où un coût outil qui augmente.
- À ces coûts variables s'ajoutent des frais fixes (frais de lancement, frais d'étude, etc.) indépendants des conditions de coupe.



Influence de Vc sur les coûts de production

En première approche on peut écrire :

coût total = frais fixes + coût machine + coût outil.

Remarque

Ces graphiques illustrent l'évolution de la courbe du coût total en fonction de la vitesse de coupe. En formulant cette courbe mathématiquement et en identifiant son point minimal, nous parvenons à déterminer la vitesse de coupe économique (**Ve**). Cette valeur sera ensuite considérée comme une référence à suivre.

3. Expression du coût d'une opération d'usinage

3.1. Étude des temps

Dans le contexte d'une production en série, il revêt une importance essentielle de pouvoir évaluer le temps nécessaire à la fabrication d'une pièce. Cette information s'avère essentielle pour définir la durée et les coûts associés à la production.

La durée de l'usinage, c'est à dire le temps machine **tm** est :

$$t_m = t_a + t_c + \left(\frac{t_c}{T}\right) * t_{VB}$$

Avec :

ta : somme du temps nécessaire à la préparation de la machine et de tous les temps morts (mouvements rapides, montages et démontages des pièces etc ...) sauf les changements d'outils.

tc : temps copeaux, Il se symbolise aussi **Tt** (temps technologique).

T : durée de vie de l'outil ($T = Cv * Vc^n$)

t_{VB} : temps de remplacement de l'outil (c'est à dire d'une arête).

◆ **Rappel : Calcul du temps tc (temps technologique Tt)**

En Tournage

L'usinage étudié est présenté ci-contre :

- **lu** = longueur usinée (mm)
- **e** = distance de sécurité (mm)
- **Vf** = vitesse d'avance (mm/min)

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = lu + e$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

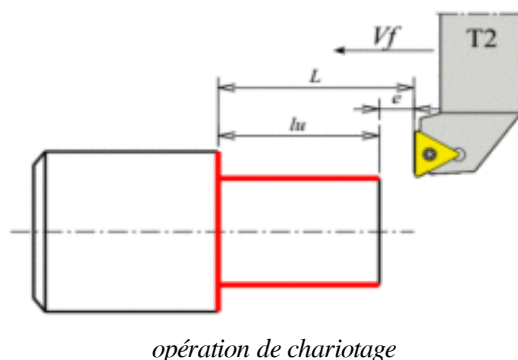
$$tc = L / Vf \text{ (min)}$$

Vitesse d'avance de l'outil en tournage :

$$Vf = f * N, \text{ f : avance de l'outil en (mm/tr) et N : fréquence de rotation en (tr/min)}$$

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

$$tc = \frac{(lu + e)}{f * N}$$



En Fraisage :

L'usinage étudié est présenté ci-contre :

- l_u = longueur usinée
- e_1 = dist de sécurité en entrée
- e_2 = dist de sécurité en sortie
- D = diamètre de la fraise
- V_f = vitesse d'avance en (mm/min)

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = l_u + e_1 + e_2 + D$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

$$t_c = L/V_f$$

Vitesse d'avance de l'outil en fraisage :

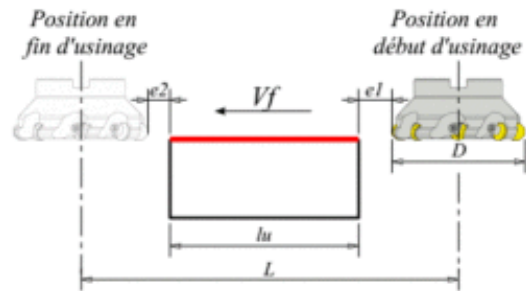
$$V_f = f \times Z \times N$$

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

$$t_c = \frac{l_u + e_1 + e_2 + D}{f_z \times Z \times N}$$

On prend souvent $e_1 = e_2 = e$ ce qui nous donne :

$$t_c = \frac{l_u + 2e + D}{f_z \times Z \times N}$$



Opération de surfacage

En Perçage :

L'usinage étudié est présenté ci-contre :

- l_u = longueur usinée
 - e_1 = dist de sécurité en entrée
 - e_2 = dist de sécurité en sortie
 - p = dimension de la pointe du foret
 - V_f = vitesse d'avance
- Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = l_u + e_1 + e_2 + p$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

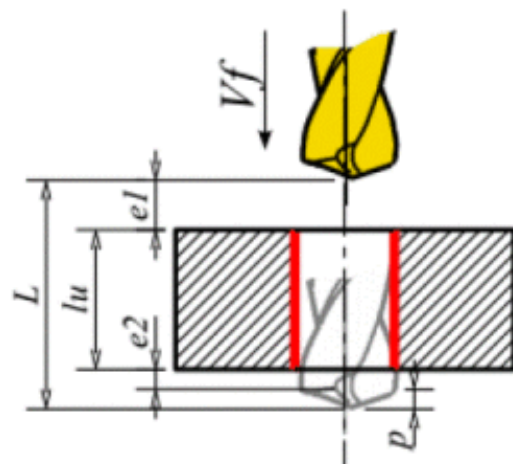
$$t_c = L/V_f$$

Vitesse d'avance de l'outil en perçage :

$$V_f = f \times N \text{ en (mm/min)}$$

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

$$t_c = \frac{l_u + 2e + p}{f \times N}, \text{ prenant } e_1 = e_2 = e.$$



Opération de perçage

3.2. Coût de l'usinage

Fondamental : Le coût total de l'usinage

Si **Po** est le coût de main d'œuvre et de frais généraux en DA/min, et **P1** le coût de changement d'outil et de ré-affûtage par arête en DA. Le coût total C_T est :

$$C_T = Ca + Cc + C_{VB}$$

Ca : somme des coûts nécessaires à la préparation de la machine et de tous les coûts relatifs aux temps improductifs (manutention, outillage, matière, mouvements rapides, montage et démontage des pièces, etc ...).

Cc : coût de coupe par pièce.

CVB : coût de remplacement de l'outil.

$$C_T = Po * t_a + Po * t_c + P1 (t_c / T)$$

	Exemple 1 : outil à affûter	Outil à plaquettes amovibles	
		4 arêtes	8 arêtes
Frais d'achat outil - porte-outil			
Achat de l'outil ou du porte-outil.....	25 €	40 €	40 €
Nombre d'arête de coupe possible.....	11	400	400
Frais d'achat par arête de coupe.....	2,27 €	0,1 €	0,1 €
Frais d'achat plaquettes amovibles.....		4,2 €	4,2 €
Nombre d'arête de coupe : 88%.....		3,5	7
Frais d'achat par arête de coupe.....		1,2 €	0,6 €
Frais d'achat totaux	2,27 €	1,3 €	0,7 €
Frais d'affûtage			
Frais machine à affûter et salaire horaire	30 €		
Temps d'affûtage en minutes.....	6 mn		
Frais d'affûtage.....	3 €		
Frais totaux d'affûtage (10 affûtages pour 11 arêtes)	2,72 €		
Frais de remplacement d'outil			
Frais de machine d'usinage et salaire horaire.....	45 €	45 €	45 €
Temps de remplacement en minutes.....	2 mn	1 mn	1 mn
Frais totaux de remplacement par arête de coupe	1,5 €	0,75	0,75
TOTAL DES FRAIS D'OUTIL PAR ARETE DE COUPE	6,5 €	2,05 €	1,45 €

Exemple type de calcul de P1 pour le tournage

Application à une passe de chariotage

Critère : coût minimum

Si **L** est la longueur usinée par passe (en mm), **f** l'avance en mm/tour, **D** le diamètre (en mm) du cylindre usiné et **Vc** la vitesse de coupe en m/min, le temps copeau pour une passe est :

$$t_c = \frac{L * \pi * D}{1000 * f * V_c}$$

Pour une avance (f) et une profondeur (ap) données. Déterminons la vitesse de coupe Vc qui nous donnera le prix de revient mini ($\partial C_T / \partial V_c = 0$)

La formule du coût total $C_T = Po * t_a + Po * t_c + P1 (t_c / T)$ devient

$$C_T = P_o * t_a + P_o \left(\frac{\pi * L * D}{1000 * f * V_c} \right) + P_1 \left(\frac{\pi * L * D}{1000 * f * V_c * C_v * V_c^n} \right)$$

En factorisant :

$$C_T = \frac{\pi * L * D}{1000 * f} \left(\frac{P_o}{V_c} + \frac{P_1}{C_v * V_c^{n+1}} \right) + P_o * t_a$$

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

Ceci revient à trouver V_c tel que :

$$\frac{\partial}{\partial V_c} \left(\frac{\pi * L * D}{1000 * f} \left[\frac{P_o}{V_c} + \frac{P_1}{C_v * V_c^{n+1}} \right] + P_o * t_a \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial V_c} \left(\frac{\pi * L * D}{1000 * f} \left[P_o * V_c^{-1} + \frac{P_1 * V_c^{-(n+1)}}{C_v} \right] \right) = 0$$

$$\frac{\pi * L * D}{1000 * f} \left[\frac{-P_o}{V_c^2} - (n+1) \frac{P_1}{C_v * V_c^{n+2}} \right] = 0$$

$$\frac{\pi * L * D}{1000 * f} \left[\frac{-P_o * C_v * V_c^{n+2} - (n+1) * P_1 * V_c^2}{V_c^2 * C_v * V_c^{n+2}} \right] = 0$$

$$-\frac{\pi * L * D}{1000 * f} \left[\frac{P_o * C_v * V_c^n + (n+1) * P_1}{C_v * V_c^{n+2}} \right] = 0$$

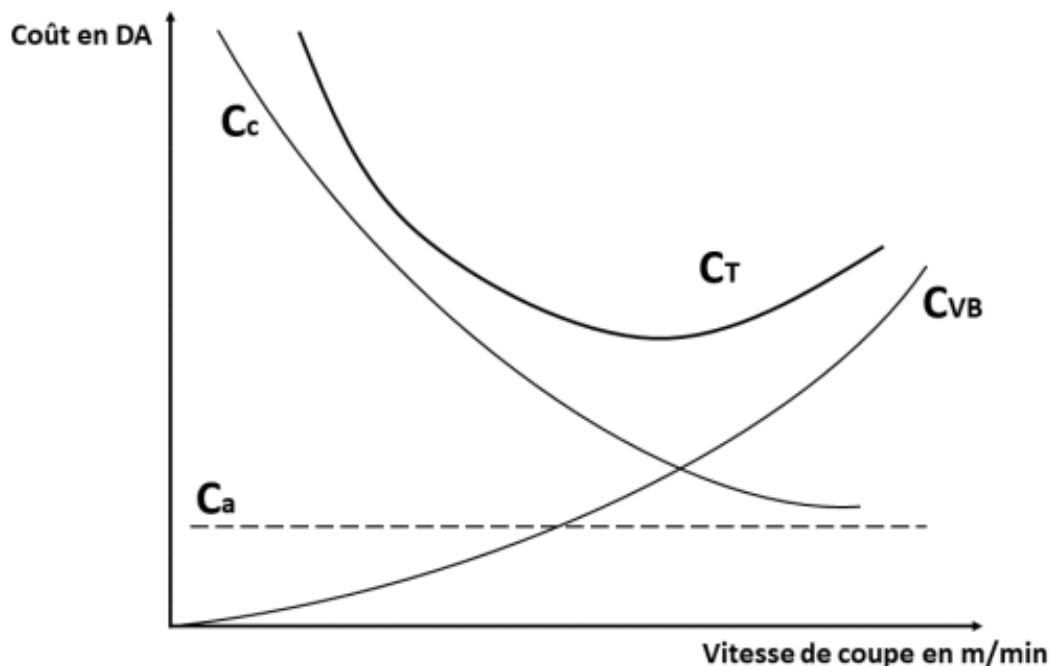
$$P_o [C_v * V_c^n + (n+1) * \frac{P_1}{P_o}] = 0, P_o \neq 0 \text{ alors}$$

$$V_c^n = \frac{-(n+1) * \frac{P_1}{P_o}}{C_v} \Rightarrow V_c = \sqrt[n]{\frac{-(n+1) * \frac{P_1}{P_o}}{C_v}}$$

$$V_c = \left[\frac{-(n+1) * \frac{P_1}{P_o}}{C_v} \right]^{1/n} \quad \text{Cette vitesse est dite « économique » et elle est notée « } V_e \text{ »}$$

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

et $T_e = -(n+1) * \frac{P_1}{P_o}$, T_e est le temps économique.



Différents coûts en fonction de V_c

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:

$$t_m = t_a + t_c + \left(\frac{t_c}{T}\right) * t_{VB}$$

L'optimisation consiste donc à exprimer (**tm**) en fonction de **Vc** et de minimiser cette fonction pour obtenir **Vp** (vitesse de production).

$$t_m = t_a + \frac{\pi * D * L}{1000 * f * V_c} + \left(\frac{\pi * D * L}{1000 * f * V_c * C_V * V_c^n}\right) * t_{VB}$$

En factorisant :

$$t_m = \frac{\pi * D * L}{1000 * f} \left(\frac{1}{V_c} + \frac{t_{VB}}{C_V * V_c^{n+1}} \right) + t_a$$

On cherche à minimiser **tm**, donc on cherche **Vp** tel que :

$$\frac{\partial t_m}{\partial V_c}(V_p) = 0$$

Ceci revient à trouver V_c tel que : $\frac{\partial}{\partial V_c} \left[\frac{1}{V_c} + \frac{t_{VB}}{C_V * V_c^{n+1}} \right] = 0$

Après calcul on trouve la vitesse de coupe et la durée de production maximale suivantes :

$$V_p = \left[\frac{-(n+1)t_{VB}}{C_v} \right]^{1/n}; \text{ et } T_p = - (n+1) t_{VB}$$

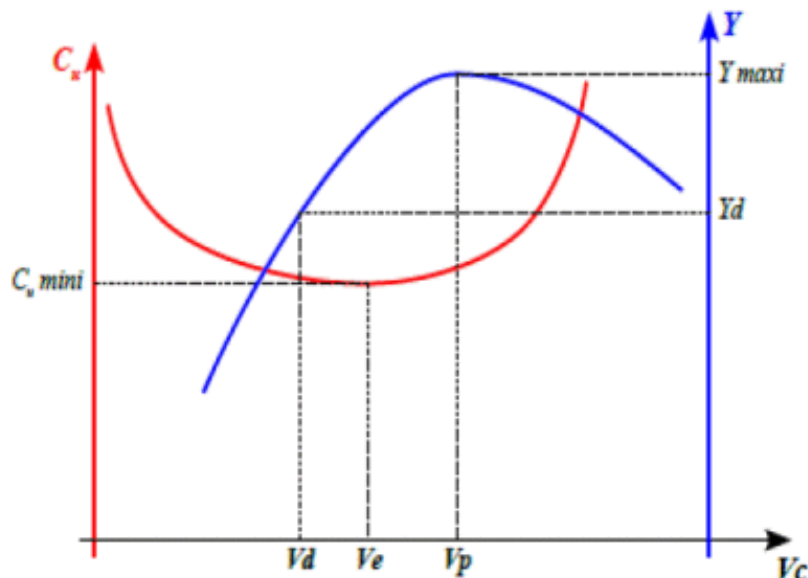
Troisième critère : volume de copeau donné par arête de coupe

Paramètres à maîtriser :

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

On cherche le volume d'un copeau spécifique dans les situations où il est essentiel de minimiser le nombre de changements de bord (ou d'outil) pour maintenir un profil d'outil précis. Cela se produit lorsque le réglage ou l'affûtage de l'outil est particulièrement délicat, ou lorsque la gestion des outils requiert une maîtrise du nombre de pièces produites entre deux changements d'arête.

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 $Y = f * a_p * V_c * t_c$. On souhaite que le temps de coupe soit égal à la durée de vie de l'outil.

Alors le volume coupé par une arête de coupe : $Y = f * a_p * V_c * T$

On obtient alors : $Y = f * a_p * C_v * V_c^{n+1}$ ou $Y = f * a_p * C_v^{-\frac{1}{n}} * V_c^{\frac{n+1}{n}}$

Optimisation :

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