

USURE DES OUTILS DE COUPE

Document ressource

Objet

Le but de ce TP est la compréhension de l'usinage dans l'optique d'une optimisation des paramètres de coupe pour la production. Une opération d'ébauche et les phénomènes d'usure associés seront particulièrement étudiés.

Fournitures

- Sujet de TP
- Document ressource
- Tour Somab *Transmab* T400
 - Rondin en XC 48
 - Plaquette Sandvik SNMG 120408-SR
- Appareils de mesure
- Classeur Excel, document réponse.

1. Généralités

1.1. Introduction

L'usinage par enlèvement de copeaux représente en France, environ 5% du PIB. Sous réserve d'une bonne organisation et d'un environnement efficace, une machine-outil produit pendant 70 à 80% de son temps. L'un des enjeux actuels est d'optimiser ce temps pour améliorer la productivité. Le choix rationnel des conditions de coupe concourt largement à cet objectif.

Les principaux critères d'optimisation sont :

- Production horaire maximale
- Coût global de fabrication minimal
- Durée effective de coupe de l'outil imposée

1.2. Productivité

Le temps total de fabrication d'une pièce T_F peut se décomposer de la façon suivante :

- Temps annexes par pièces t_a , indépendants des conditions de coupe. Ce sont essentiellement des temps résultant des opérations annexes effectuées avant ou après l'usinage de chaque pièce (montage, démontage, réglages, contrôle,...), et qui sont indépendants des conditions de coupes adoptées. Ces temps peuvent être liés à certains coûts annexes
- Temps d'usinage t_u , aussi appelé *temps copeaux*. Il correspond à la durée – pour chaque pièce – pendant laquelle l'outil est en contact avec la matière
- Temps de changement d'arête t_c , qu'il faut rapporter à une pièce en considérant le ratio entre le temps d'usinage par pièce t_u et la durée de vie d'une arête de coupe T .

On obtient ainsi l'expression générale du temps de fabrication d'une pièce, exprimé en minutes/pièces :

$$T_F = t_u + t_c \cdot \frac{t_u}{T} + t_a$$

Le volume horaire de production Q varie de façon inverse au temps de fabrication. Il est exprimé en nombre de pièces par heure :

$$Q = 60 / T_F$$

En considérant que le temps d'usinage diminue lorsque la vitesse de coupe augmente, alors le volume horaire de production augmente avec la vitesse de coupe. Néanmoins, si l'on augmente très fortement cette vitesse, l'usure de l'outil devient très rapide, il est alors nécessaire d'interrompre fréquemment l'usinage pour le remplacement de l'arête, et le gain sur le temps d'usinage (*temps-copeaux*) est alors neutralisé par la perte de temps pour ce remplacement. Il existe donc une production maximale théorique en fonction de la vitesse de coupe.

Pour une avance donnée le volume horaire est maximal pour la vitesse de coupe V_0 . Le choix de cette vitesse de coupe, dans une fabrication en série, conduit à la plus grande production, mais pour un coût de fabrication plus élevé que celui donné par la vitesse de coupe économique.

1.3. Coût de fabrication

Le coût global d'une opération d'usinage se décompose de la façon suivante :

- Coûts annexes par pièce C_a , indépendants des conditions de coupe. Ce sont essentiellement les frais résultant des opérations annexes effectuées avant ou après l'usinage de chaque pièce (montage, démontage, réglages, contrôle,...), et qui sont indépendants des conditions de coupes adoptées. Pour un travail déterminé, ces dépenses par pièce sont constantes, et peuvent être liées du coût horaire (ou *coût minute*) du poste de travail.
- Coûts d'usinage par pièce C_u : $C_u = p_u \cdot t_u$ avec p_u le coût machine par minute et t_u le temps d'usinage. Le coût minute du poste comprend :
 - les coûts de main-d'œuvre d'usinage (personnel conduisant la machine) ;
 - l'amortissement de la machine (ventilation des frais d'achat et installation par heure d'utilisation, déterminée a priori d'après la durée de vie probable de la machine) ;
 - les frais de maintenance, et divers.
- Coût d'outillage C_o (quote-part nécessaire pour l'usinage d'une pièce) : $C_o = p_o \cdot (t_u/T)$ avec p_o le prix de revient d'une arête de coupe (€) et T la durée de vie de l'outil (min). Le prix de revient d'une arête de coupe comprend :
 - les frais d'achat des outils, l'amortissement des porte-outils ;
 - les frais d'affûtage, l'amortissement du matériel d'affûtage ;
 - les frais de réglage.
 Le rapport (T/t_u) représente le nombre de pièces usinées par une arête.
- Coût du changement d'arête C_c : $C_c = t_c \cdot p_u \cdot (t_u/T)$. Il dépend du temps de changement d'arête t_c et du coût minute du poste de travail.

soit globalement :

$$C_g = C_a + C_u + C_o + C_c$$

$$C_g = C_a + p_u \cdot t_u \cdot \left(1 + \frac{t_c + Z}{T}\right)$$

avec $Z = p_o/p_u$, qui caractérise l'importance relative des coûts d'outillage et d'usinage, laquelle dépend des conditions particulières de chaque poste de travail.

On remarque que, outre des paramètres de coût, le coût global va dépendre du temps d'usinage, du temps de changement d'arête, et de la durée de vie de l'outil. En première approche, on pourra considérer que :

- le temps d'usinage diminue si on augmente la vitesse de coupe,
- la durée de vie diminue si on augmente la vitesse de coupe (tendance à bruler l'outil).

Si tous les autres paramètres restent constants, le coût global pourra donc présenter un minimum en fonction de la vitesse de coupe : la vitesse de coupe économique V_{eco} .

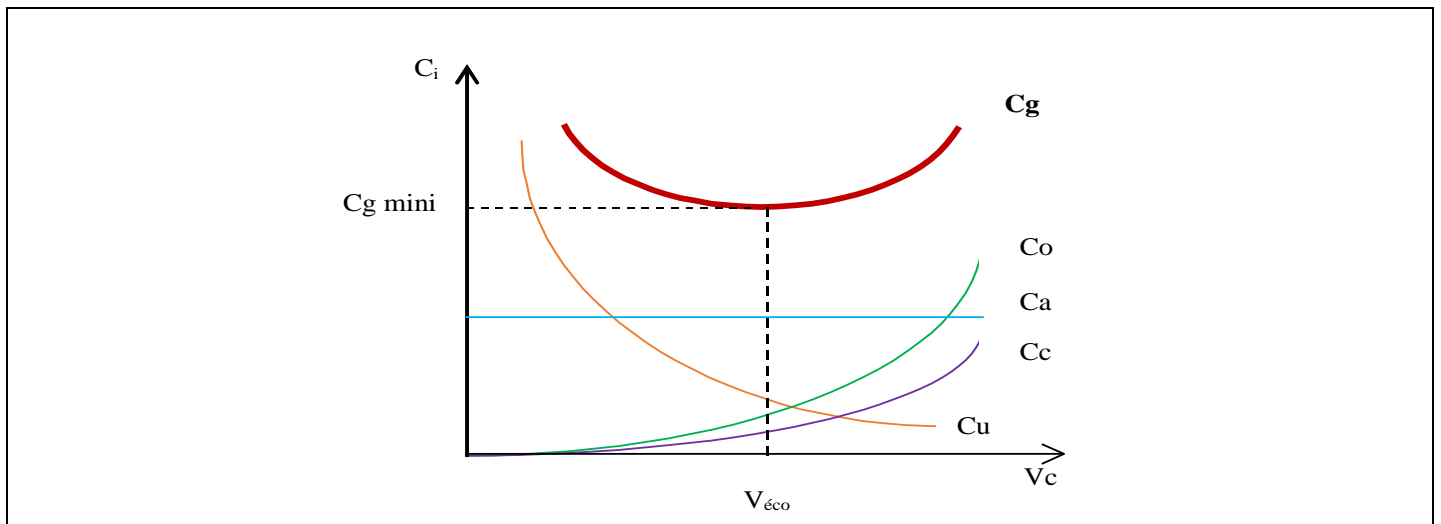


Figure 1 : Coûts en fonction de la vitesse de coupe, les autres paramètres restent constants

1.4. Durée effective de coupe imposée

Dans les usinages en grande série, on impose souvent une durée d'outil correspondant à une séance de travail ; les outils en service étant systématiquement échangés contre des outils neufs en fin de série. Ou encore, une durée d'outil déterminée par l'importance de la série de pièces à usiner, l'outil étant alors systématiquement échangé à la fin de chaque série.

En travaillant ainsi à "**durée imposée**", on abandonne volontairement le régime économique ou le régime de production maximale ; on consent ainsi à une majoration du coût de l'usinage ou/et à une perte de production pour bénéficier en contrepartie, de facilités de distribution, de montage et d'entretien de l'outillage. Il est bon, toutefois, de s'assurer que cette contrepartie est globalement suffisante pour justifier la perte ainsi consentie au niveau du coût d'usinage.

2. Usure des outils

Le chapitre précédent a démontré l'importance de la durée de vie d'un outil, rapportée au temps d'usinage, dans la planification pratique des coûts et de la productivité d'une opération d'usinage. Si le temps d'usinage est aisé à estimer en fonction des paramètres de programmation, la durée de vie d'un outil fait appel à des mécanismes d'usure de physiques différentes. Seuls des modèles expérimentaux pourront être exploités pour estimer cette durée de vie en fonction des paramètres de coupe.

Ce chapitre décrit l'évolution de l'usure généralement constatée pour un outil de coupe, ainsi que le type de modèle pouvant être mis en place pour la durée de vie de l'outil.

2.1. Évolution de l'usure des outils de coupe

L'usure de l'outil se manifeste essentiellement sous deux aspects (Fig.2) :

- L'**usure "en cratère"** sur la face de coupe de l'outil, par frottement du copeau. Au cours de l'usure, la profondeur " K_T " et la position du cratère évoluent et influent, en particulier, sur le rayon d'enroulement du copeau ; le flanc arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'un brise-copeau naturel.
- L'**usure frontale** sur les faces en dépouille, par frottement sur la pièce. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande brillante et striée, parallèle à l'arête. Dans la zone B, la largeur " V_B " de cette bande évolue (dans le temps) parallèlement à la profondeur " K_T " du cratère jusqu'à la destruction de la pointe par la conjonction de ces deux effets.

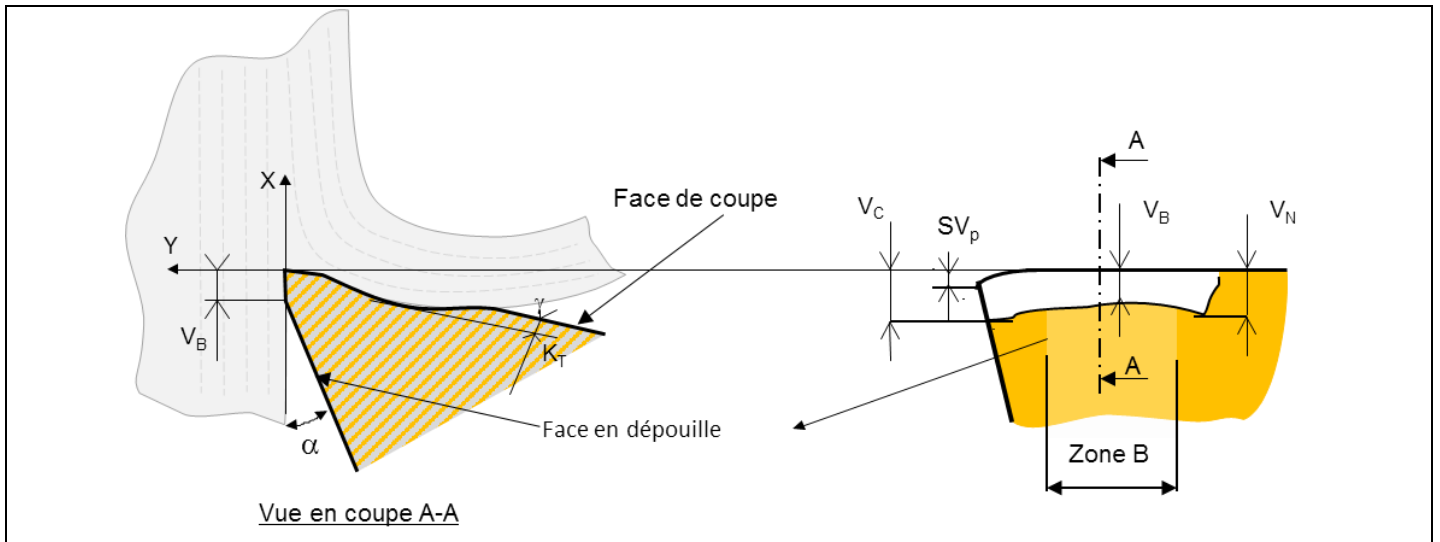


Fig.2: Définition des principaux paramètres caractéristiques de l'usure (Suivant Normes NF et I.S.O).

À noter toutefois :

- l'accroissement de la largeur de la bande d'usure à ses extrémités, due à l'usinage des zones superficielles de la pièce, qui donne lieu à des phénomènes particuliers ;
- dans des conditions de coupe sévères, l'apparition d'une déformation plastique de la pointe de l'outil caractérisée par son affaissement "SV_p" ;
- dans le cas de chocs répétés ou de variations périodiques des efforts (coupe discontinue, vibrations) la possibilité d'un effritement de l'arête de coupe.

Les mesures de l'usure frontale "V_B" en fonction du temps de coupe (Fig.2) permettent en général de suivre l'évolution de l'usure. Cette évolution n'est pas rigoureusement continue et des irrégularités peuvent apparaître autour de la courbe traduisant la tendance moyenne.

Dans le cas des outils carbures, on explique l'évolution de cette usure par la superposition de deux types principaux d'usure :

- l'usure par adhésion favorisée par les pressions locales et les températures importantes,
- l'usure par diffusion, transfert de certains constituants de l'outil dans le copeau, favorisée par les fortes températures à l'interface outil/copeau.

On observe 3 zones :

Zone 1 : période d'adaptation du tranchant au régime de coupe.

Zone 2 : Stabilisation du gradient d'usure, évolution sensiblement linéaire en fonction du temps.

Zone 3 : croissance rapide de l'usure qui précède l'effondrement de l'arête ; dans cette zone les risques de rupture d'outil sont importants.

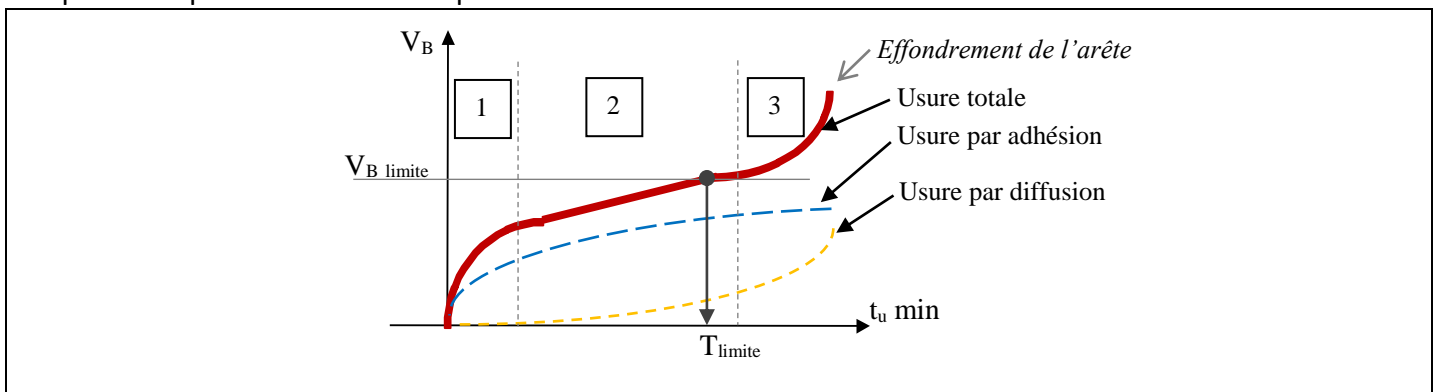


Fig.3 : Évolution de l'usure frontale

2.2. Critères d'usure

Les critères usuellement utilisés pour les outils en carbure et, notamment, ceux recommandés par la norme NF E 66 505, sont basés sur l'évolution de l'usure frontale ou de la cratérisation. Du point de vue pratique,

l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle.

De plus, l'expérience montre que l'évolution de l'usure des outils à plaquette carbure, qui permettent des vitesses de coupe élevées, peut être définie de façon satisfaisante par la seule mesure de l'usure frontale, dans une large plage des paramètres de coupe. Toutefois, pour des valeurs élevées des paramètres de coupe provoquant une forte élévation de la température à l'interface outil-copeau, l'accélération de l'usure par diffusion devient très sensible, et favorise une évolution rapide de la cratérisation.

Le critère principal défini pour les outils carbure et céramique est le suivant :

- largeur de la bande d'usure frontale $V_B = 0,3$ mm si elle est uniforme dans la zone B ;
- sinon, largeur maximale de cette bande $V_B = 0,6$ mm.

Ces valeurs limites de V_B correspondent sensiblement à celles relevées à la frontière des zones 2 et 3 de la figure 3, le risque de rupture accidentelle de l'outil pendant la production est ainsi minimisé. La durée de vie de l'outil T est définie à l'instant où le critère maxi est atteint ($V_B = V_{B_limite}$).

2.3. Loi de durée de vie des outils de coupe

La loi de durée de vie définit la variation de la durée effective de coupe T des outils en fonction des conditions géométriques et cinématiques de l'usinage. La durée effective de coupe T est définie comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite définie par le critère d'usure précédent.

De nombreux modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, parmi lesquels le modèle de TAYLOR (~ 1902):

$$T = C \cdot V_c^n$$

Ce modèle a été par la suite généralisé, en intégrant les paramètres de profondeur de passe et d'avance (modèle de Gilbert - 1950) :

$$T = K \cdot a_p^l \cdot f^m \cdot V_c^n$$

(on retrouve Taylor par $C = K \cdot a_p^l \cdot f^m$)

La détermination des coefficients d'un modèle de durée de vie se fait à partir d'essais à paramètres de coupe constants. Il est important de noter que les modèles proposés sont linéaires dans le domaine logarithmique (Fig. 4). Pour chaque jeu de paramètres, la surveillance de l'évolution de l'usure frontale V_B en fonction du temps de coupe permet de définir un point figuratif de la loi de durée de vie. Ces modèles reflètent correctement la moyenne des résultats expérimentaux dans la plage des paramètres de coupe couramment utilisés, mais peut s'écarter rapidement de la réalité en dehors du domaine exploré.

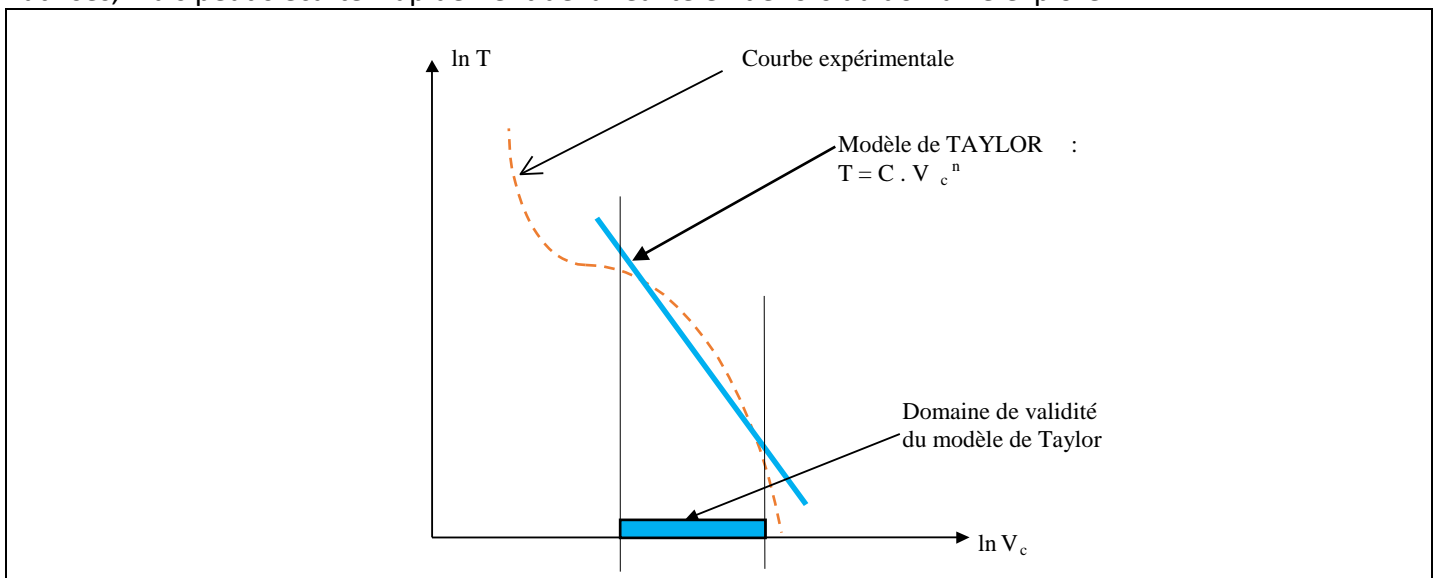


Fig.4 : Modélisation de la loi de durée de vie.

En première approximation, on pourra considérer les valeurs suivantes pour l'exposant de la loi de Taylor :

Matériau outil	ARS / HSS	Carbure	Carbure revêtu	Céramique
n=	-6	-4	-3	-2

3. Optimisation des conditions de coupe

3.1. Cadre général

On considérera un usinage de type chariotage, de diamètre D et de longueur L , réalisé en une seule passe à paramètres constants $[a_p, f]$. On considèrera la vitesse de coupe V_c comme variable d'optimisation.

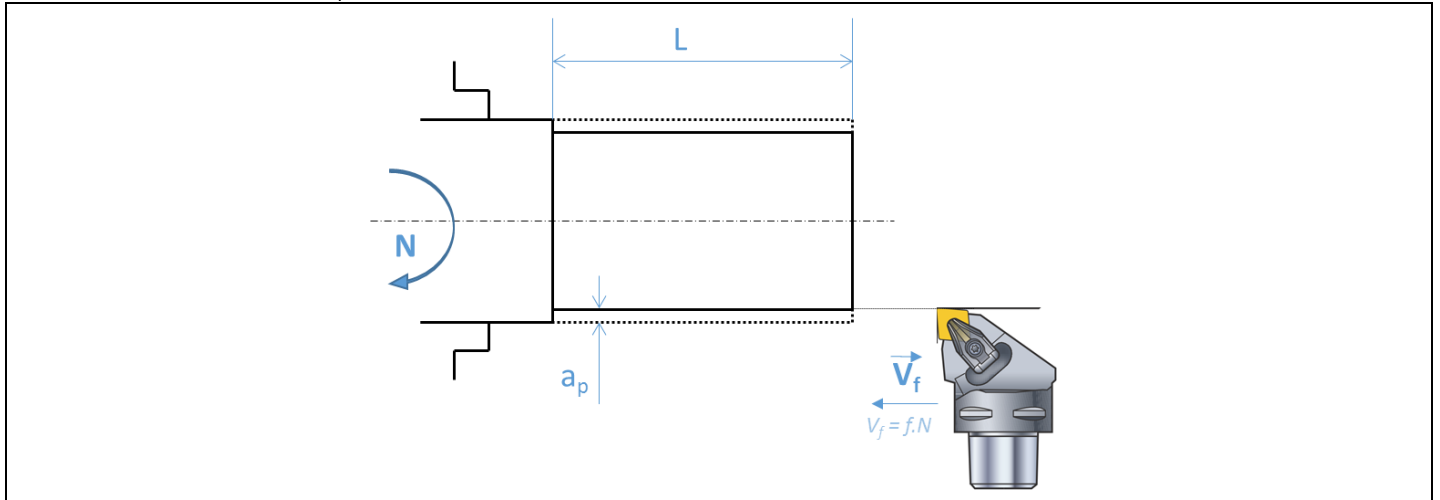


Figure 5 : schématisation d'une passe de chariotage

Dans ces conditions, il est aisé de déterminer la durée pratique d'usinage, soit :

$$t_u = \frac{L}{N.f} \text{ en minutes}$$

Il est rappelé la définition de la fréquence de rotation, utilisée en usinage :

$$N = \frac{1000.V_c}{\pi.D} \text{ en tour/minutes}$$

3.2. Productivité maximale

Le volume horaire Q sera maximal pour la valeur V_Q de la vitesse de coupe solution de l'équation différentielle :

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

Soit, en considérant le modèle de Taylor :

$$V_Q = \left[\frac{C}{(-n-1).t_c} \right]^{-\frac{1}{n}}$$

La durée effective de coupe correspondante est :

$$T_Q = (-n-1).t_c$$

La valeur de durée de vie en production maximale T_Q est indépendante de la constante C ; elle n'est donc pas, en première approximation, fonction du matériau usiné, ni de la géométrie du copeau. Par contre, T_Q dépend de l'exposant n du modèle de Taylor c'est-à-dire du matériau outil. Elle dépend aussi du temps de changement d'arête t_c .

La vitesse de coupe optimale pour la productivité dépend du paramètre C , elle sera donc différente suivant le jeu de paramètres de coupe utilisé (Taylor => Gilbert $\Leftrightarrow C = K.a_p^l.f^m$).

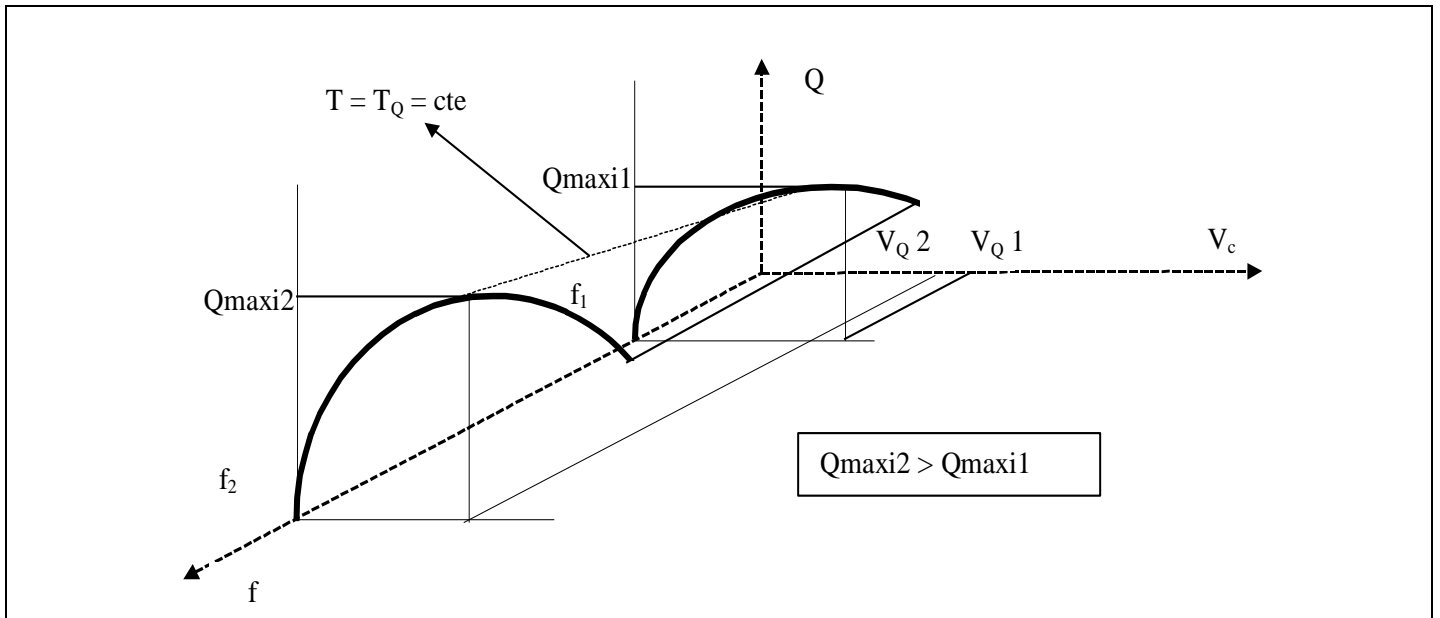


Fig.6. Volume de production horaire en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance.

3.3. Coût minimal

Compte-tenu du cadre retenu et du modèle de Taylor, on peut exprimer le coût global d'un usinage de la façon suivante :

$$C_g = C_a + \frac{p_u L \times D}{1000 f V_c} \left[1 + (t_c + Z)/C \cdot V_c^n \right]$$

Pour une profondeur de passe donnée ($a_p = a_{p1}$), l'évolution du coût global de fabrication en fonction de l'avance et de la vitesse de coupe est représentée graphiquement par une surface en forme de gouttière dont le fond est continuellement décroissant quand l'avance croît : le minimum du coût est alors obtenu pour la **valeur maximale possible** de l'avance (Fig.7).

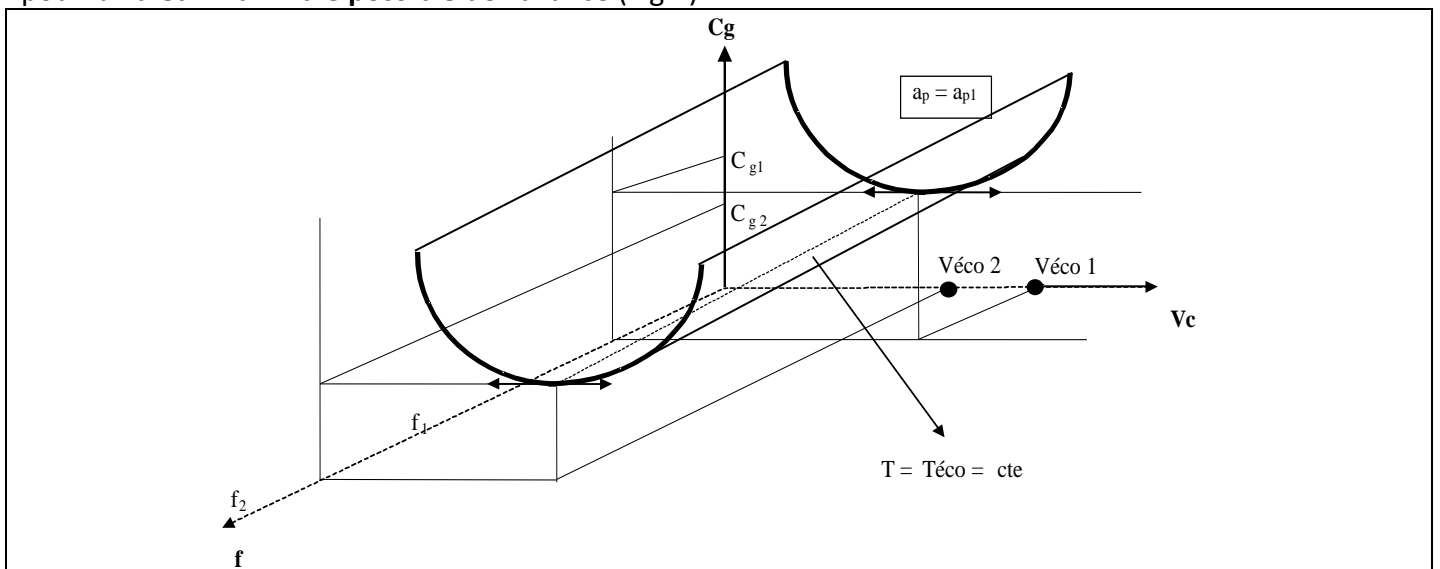


Figure 7 : Coût global en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance

Le coût global par pièce est minimal pour la valeur de la vitesse de coupe V_{eco} dite *économique*, solution de l'équation différentielle :

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

$$\text{soit : } V_{eco} = \left[\frac{C}{(-n-1) \cdot (t_c + Z)} \right]^{-\frac{1}{n}}$$

La durée effective de coupe de l'outil correspondante, dite *économique* est :

$$T_{eco} = (-n-1) \cdot (t_c + p_o/p_u)$$

La valeur de la durée de coupe économique T_{eco} est indépendante de la constante C, elle n'est donc pas fonction du matériau usiné, ni de la géométrie du copeau.

Par contre, T_{eco} dépend de l'exposant n , c'est-à-dire du matériau outil (fig.8). Les valeurs de T_{eco} pour chaque matériau outil sont en moyenne :

- Acier rapide : $T_{ec} \in [40 ; 120]$ min
- Carbure : $T_{ec} \in [15 ; 40]$ min
- Céramique : $T_{ec} \in [5 ; 15]$ min

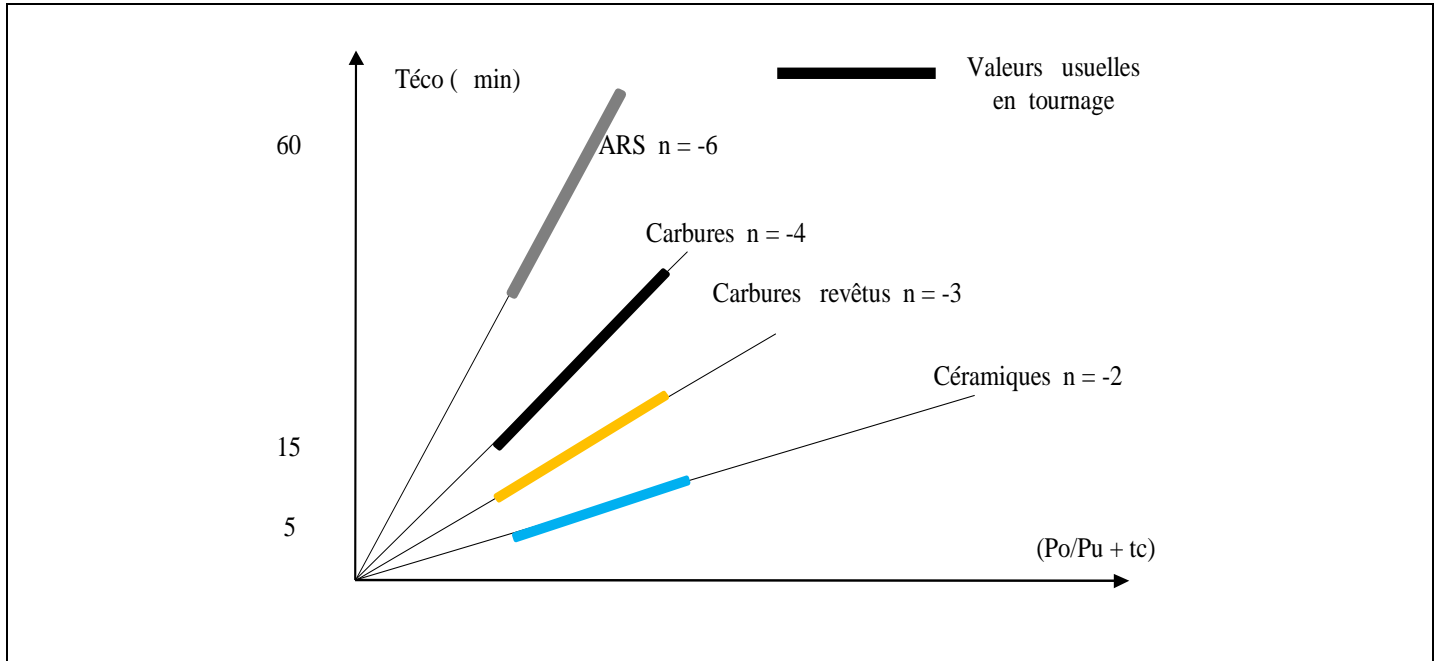


Figure.8: $T_{eco} = f \left(\frac{p_o}{p_u} + t_c \right)$

Ainsi, les valeurs des vitesses de coupe indiquées dans les tableaux des données correspondent généralement à une durée effective de coupe voisine de l'optimum économique. La détermination des vitesses de coupe pour une durée effective de coupe différente se fait facilement à partir du modèle de Taylor.