

DUREE DE VIE D'UN OUTIL DE COUPE : LOI DE TAYLOR

DUREE DE COUPE D'UN OUTIL:

Par définition la durée de coupe ou de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685 : *C'est le temps de coupe totale d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique.*

Il est nécessaire de passer par une approche expérimentale, pour arriver à estimer le temps de service d'un outil de coupe pour des conditions de coupe bien définies, en général c'est le critère d'usure VB_B ou KT qui est pris en compte. Des mesures de VB_B sont prises au cours du temps d'usinage jusqu'à la ruine de l'outil, pour différents niveaux de vitesse de coupe.

Un tracé des données expérimentales est présenté dans la figure IV.7. les courbes donnant l'évolution de l'usure en dépouille ou en cratère en fonction du temps suivent le modèle mathématique de Koren et Lenz (Equation IV.1):[5]

$$VB_B = A.(1 - e^{-at}) + B.(e^{\beta t} - 1) \quad (IV.1)$$

l'équation IV.1 est dite loi d'usure de l'outil, elle regroupe deux termes distincts. Le premier représente l'évolution de l'usure abrasive et le second celle de l'usure par diffusion.

Des derniers résultats de la figure IV.7 et pour un critère d'usure donné, on peut tracer la courbe de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe. Dans la courbe $T = f(V_c)$ figure IV.8 on remarque trois zones qui la caractérise :

- **Zone AB** : zone des faibles vitesses de coupe, cette partie de la courbe est inexploitable,
- **Zone BC** : zone stationnaire, le temps est constant (usure stable),
- **zone CD** : le temps décroît (usure accélérée) en suivant une droite de pente négative en fonction de la vitesse de coupe, ce domaine est exploitable et il donc possible d'interpréter le phénomène par un modèle mathématique.

C'est en 1907 que Taylor a proposé son modèle pour estimer la durée de vie d'un outil (loi de Taylor). (Equation IV.2)

$$T = C_V V_c^n \quad (IV.2)$$

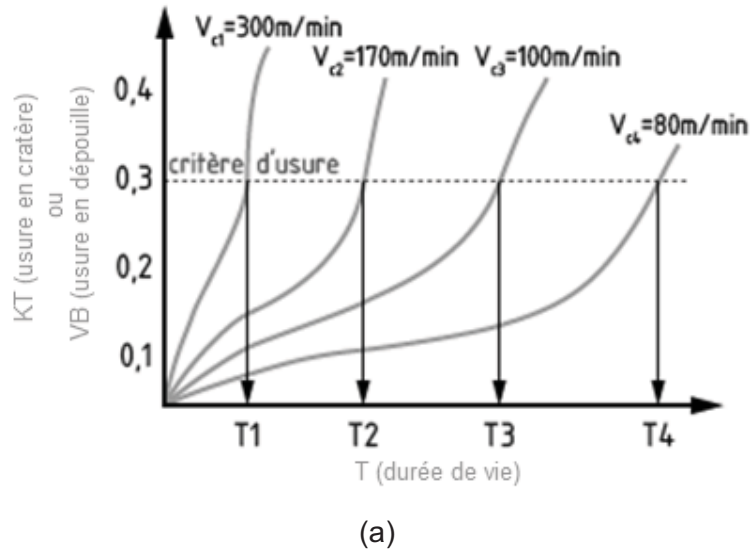


Figure.IV.7. Evolution de l'usure frontale en fonction du temps [6,7]

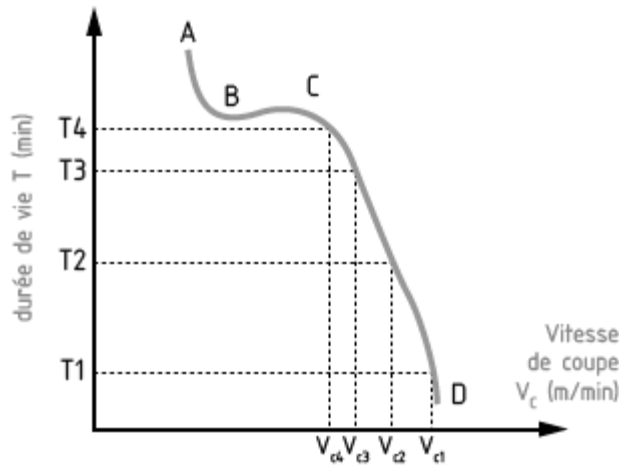


Figure.IV.8. Courbe de durée de vie en fonction de la vitesse de coupe [6]

- L'exposant n dépend : de la profondeur de passe, avance, matériau usiné et matériau constituant de l'outil et il a une valeur : $-10 < n < -1$. (Tableau IV.2)

Tableau IV.2 Valeurs moyenne de l'exposant n de la loi de Taylor.

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

- La constante C_v dépend essentiellement du matériau usiné et des conditions de coupe. Sa valeur est très variable : $10^4 < C_v < 10^{14}$.

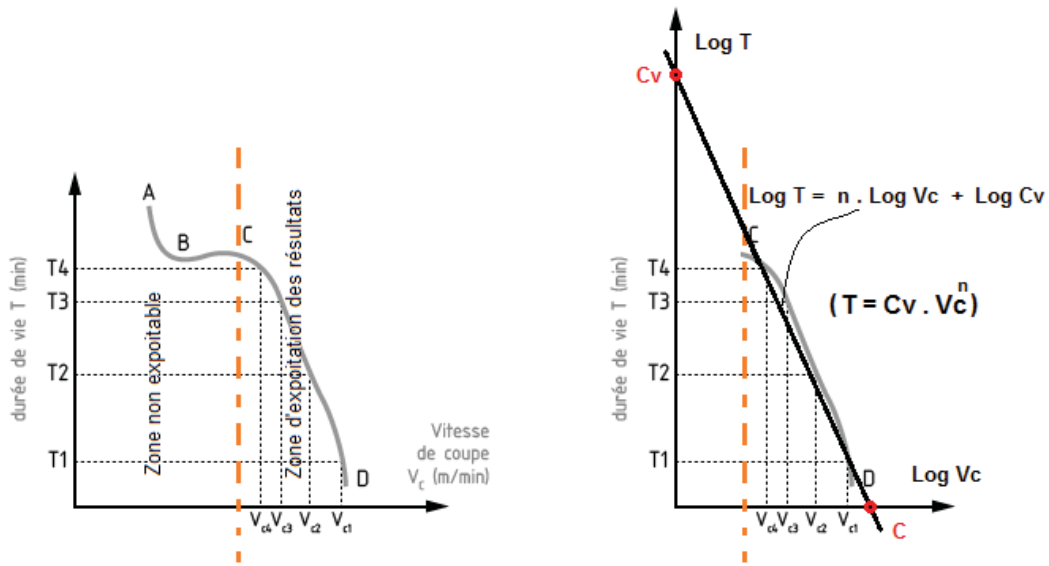


Figure IV.9. Analyse graphique par le loi de Taylor[6]

Comme la courbe de la zone CD à une allure d'une droite (Figure IV.9), la loi de Taylor serais la plus correcte.

On déterminant les constantes C_v et n des données expérimentaux (Figure IV.9) la loi d'usure (l'équation de Taylor) sera déduite. A partir de cette loi, Il serais possible de fixé un temps de coupe et retrouver la vitesse de coupe associée.

L'équation IV.2 peut être formulée comme suite :

$$V_c = C_T \cdot T^\alpha \tag{IV.3}$$

avec $\alpha = 1/n$ et $C_T = (1/C_v)^{1/n}$

Tableau IV.3 Valeurs du coefficient α .

Matériau d'outil	Acier rapide	Carbure métallique	Céramique
α	0,1 – 0,125	0,2 – 0,3	0,4 – 0,5

D'autres modèles empiriques ont été annoncées après Taylor comme : [8]

Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950

$$V_c = C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V_c^n \tag{IV.4}$$

où f est l'avance, a est la profondeur de passe et x, y, n sont .

La constante C : dépend du Couple Outil / Matière

Les coefficients x, y et n : dépendent que du matériau constituant l'outil,

avec

$$x \approx n/6 \text{ et } y \approx n/3$$

et

x, y, n sont toujours < 0 .

Modèle de Colding en 1959

$$k + A.x + B.x^2 + C.y + D.y^2 - z + E.z^2 + F.x.y + G.y.z + H.x.z \tag{IV.5}$$

avec k, A, B, C, D, E, F, G et H des constantes, $x = \ln a, y = \ln V_c$ et $z = \ln T$

Modèle de König-Depiéreux en 1969

$$T = \exp(-\alpha V_c^v - \gamma a^\mu - \sigma a^\lambda) \tag{IV.6}$$

Modèle de Kronenberg en 1970

$$T = C (V + k)^m \tag{IV.7}$$

k, C et m sont des constantes.

Remarque IV.3

- La valeur de $VB_B = 0,3 \text{ mm}$ est la limite acceptable pour les opérations d'ébauche. En usinage d'ébauche les conditions de coupe sont les plus défavorables et l'outil est le plus sollicité pendant cette période.
- Par contre en demi-finition et finition, la précision des pièces est de rigueur, il est donc judicieux de choisir une valeur inférieure à $VB_B = 0,3 \text{ mm}$.
- La plupart des travaux de fabrication dans l'industrie sont en série (petite, moyenne et grande série) où l'usure des outils affecte considérablement la productivité. Afin d'optimiser la production, il est conseillé de choisir un temps d'usure d'outil inférieur de **10 % à 20 %** du temps calculer pour une usure VB fixée par les critères de durée de vie.
- Lorsque le coefficient n est très conséquent (grand en valeur absolue), il indique que la loi de Taylor a une forte dépendance à la vitesse, cela traduit que le matériau de l'outil a une faible résistance à l'usure.
- Les valeurs usuelles du coefficient n pour des opérations en tournage, fraisage et perçage peuvent regrouper dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 Valeurs du coefficient n selon l'opération et la matière usinée.

Outil de coupe	Opération d'usinage	Matériau de la pièce à usiner			
		Aciers	Fontes grises	Fontes malléables	Alliages d'aluminium
Acier rapide RAS	Tournage	-8,5	-10	-8,5	-2,5
	Fraisage	-5	-6,5	-5	-2
	Perçage	-5	-8,5	-8,5	-2,5
Carbure métallique	Tournage	-4,5	-5	-5	-2,5
	Fraisage	-3	-3	-3	-2
	Perçage	-3,5	-2,5	-2,5	-2,5

Exemples

Afin d'optimiser les coûts d'usinage, il est nécessaire de déterminer la loi d'usure de l'outil pour une opération effectuée dans la machine-outil. Les données expérimentales sont données dans le tableau ci-dessous (Tableau VI.5).

- Déterminer la loi d'usure (**loi de Taylor**) pour cette opération d'usinage.

Tableau IV.5 Valeurs expérimentales de l'usure d'un outil de coupe après un temps d'usinage.

Vc1 [450 m/min]		Vc2 [300 m/min]		Vc3 [250 m/min]		Vc4 [200 m/min]		Vc5 [150 m/min]		Vc6 [100 m/min]	
Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]	Temps [min]	VBB [mm]
1,43	0,13	1,49	0,08	3,05	0,09	2,97	0,08	2,97	0,05	3,02	0,04
2,35	0,20	2,97	0,12	4,48	0,12	6,00	0,12	5,21	0,08	5,97	0,07
3,10	0,25	4,74	0,16	6,07	0,15	8,86	0,15	7,33	0,09	9,02	0,09
4,12	0,32	6,00	0,19	7,82	0,18	11,65	0,18	9,78	0,11	11,97	0,11
5,47	0,39	7,53	0,24	9,02	0,20	14,21	0,20	11,99	0,12	14,99	0,13
		8,92	0,28	11,08	0,22	15,98	0,24	15,12	0,14	18,95	0,16
		10,61	0,33	12,75	0,26	18,93	0,28	18,95	0,18		
		11,97	0,37	15,07	0,3						
				17,65	0,35						
				19,86	0,40						

Réponse

1. Les données du tableau IV.5 sont représentés graphiquement dans la figure VI.10 :

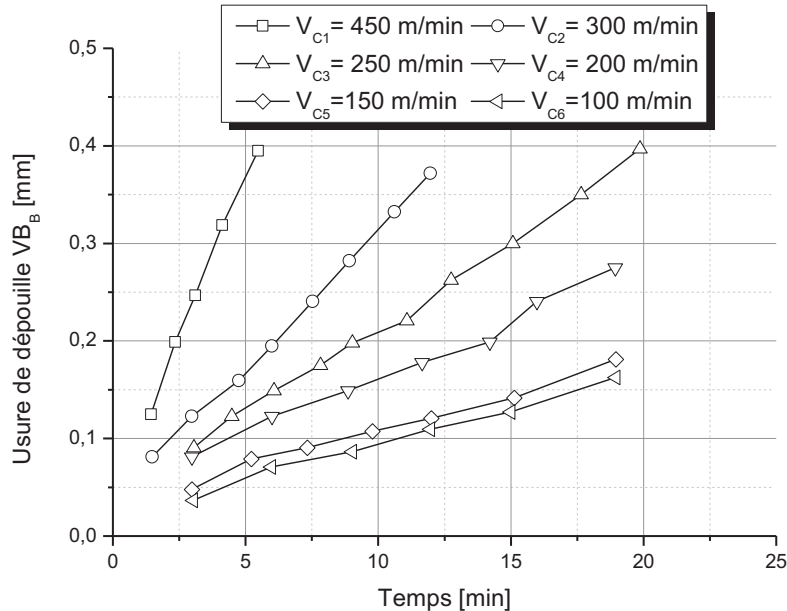


Figure.IV.10. Graphe de l'usure de dépouille VB_B en fonction de temps pour différentes vitesses de coupes V_c .

A partir de la figure IV.10, on peut déterminer le temps d'usure ultime pour chaque régime de coupe V_c , à un critère d'usure de dépouille qu'on prend généralement $VB_B = 0,3 \text{ mm}$. (Figure IV.11)

La droite qui représente $VB_B = 0,3 \text{ mm} = Cst$ a des points d'intersection avec les courbes $VB_{B1}(T)$, $VB_{B2}(T)$, $VB_{B3}(T)$ et $VB_{B4}(T)$ qui correspondent respectivement aux vitesses V_{C1} , V_{C2} , V_{C3} et V_{C4} . Chaque point d'intersection a respectivement un temps d'usure T_1 , T_2 , T_3 et T_4 .

Les temps T_1 et T_2 sont déterminés par simple interpolation linéaire des courbes $VB_{B1}(T)$ et $VB_{B2}(T)$, le temps T_3 est tiré directement du tableau des données expérimentales (Tableau IV.5) où $T_3 = 15,07 \text{ min}$ et le temps T_4 est déduit par extrapolation linéaire de la courbe $VB_{B4}(T)$. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.6 en matière de temps d'usure T et vitesse de coupe V_c .

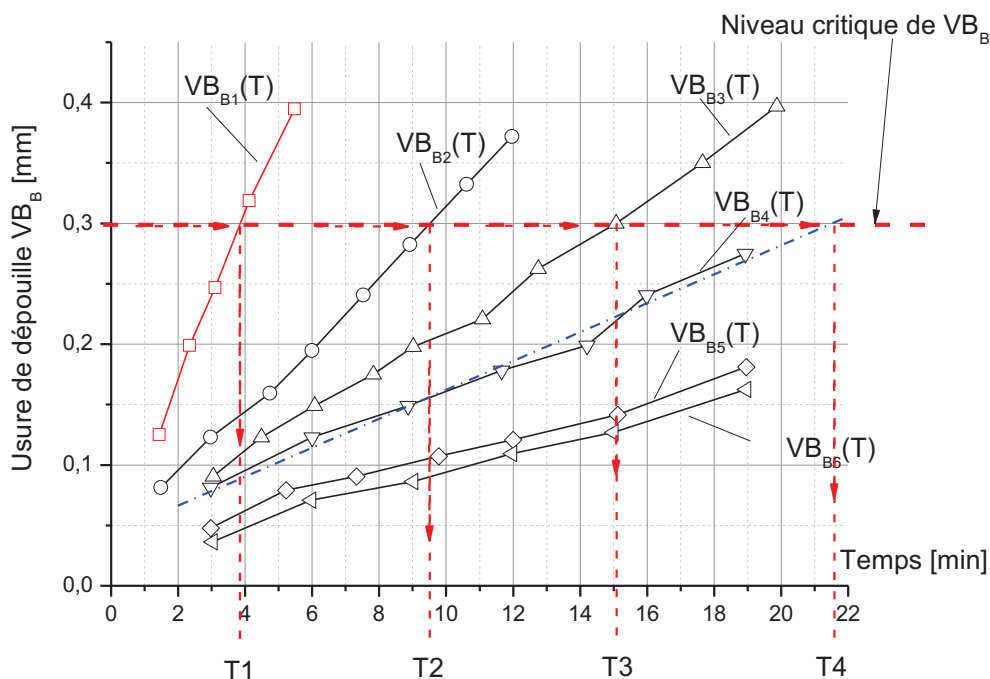


Figure IV.11. Exploitation du graphe pour déterminer les temps d'usure ultimes à $VB_B=0,3\text{mm}$

Tableau IV.6 Temps d'usure à $VB_B=0,3\text{mm}$ pour des vitesses variables V_c

Points	V_{Ci}	T_i	$\text{Log } V_{Ci}$	$\text{Log } T_i$
1	450	3,85	2,65	0,58
2	300	9,55	2,48	0,98
3	250	15,07	2,40	1,18
4	200	21,59	2,30	1,33

Première méthode (Méthode graphique)

Résolution N° 1

Les résultats du tableau IV.6 peuvent être exploitées directement sur Excel pour tracer la courbe $T = f(V_c)$ sur des axes logarithmiques. Ensuite tracer la courbe de tendance et déduire son équation, comme le montre la figure IV.12.

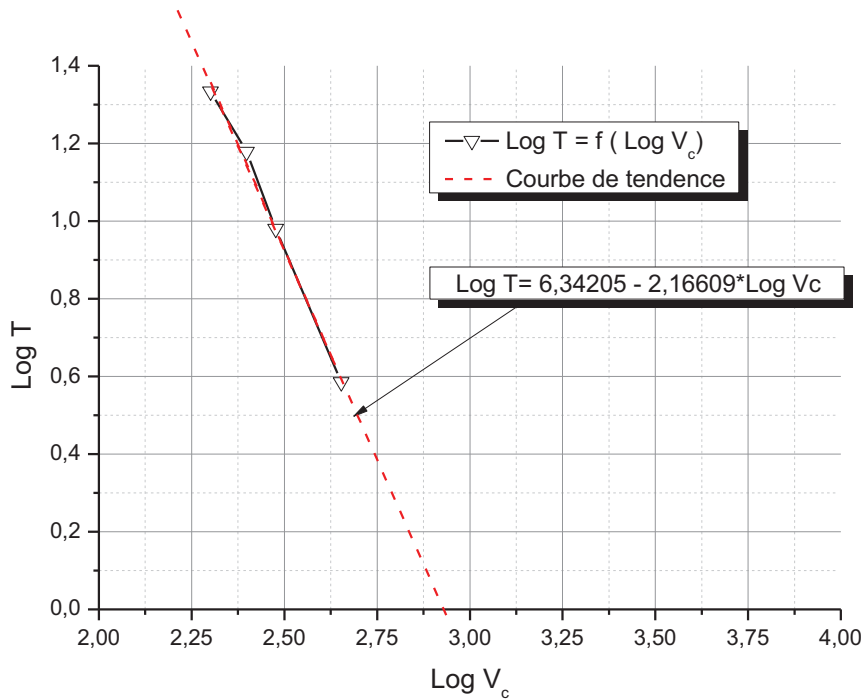


Figure.IV.12. Analyse graphique directe sur Excelle

L'équation de la droite de tendance est de la forme $(y = a \cdot x + b)$. (Figure IV.12)

$$\text{Log } T = 6,34205 - 2,16609 \cdot \text{Log } V_c$$

le modèle de Taylor peut-être écrit sous la forme :

$$\text{Log } T = \text{Log } C_v - n \cdot \text{Log } V_c$$

par similitude on a :

$$\text{Log } C_v = 6,34205 \Rightarrow C_v = 10^{6,34}$$

et

$$n = - 2,16$$

$$\text{on obtient alors : } T = 10^{6,34} \cdot V_c^{-2,16}$$

Résolution N° 2

La loi d'usure de Taylor est définie par :

$$T = C_v V_c^n$$

** Le but de cette résolution est de déterminer les constantes C_v et n

on reprend la même figure VI.12 et on trace une droite passant par les quatre points expérimentaux où la fonction logarithmique $\text{Log } T$ est de la forme $y = a \cdot x + b$

on obtient alors : $\text{Log } T = a \cdot \text{Log } V_c + b$

on a aussi la forme logarithmique de la loi de Taylor est :

$$\text{Log } T = \text{Log } C_v + n \text{Log } V_c$$

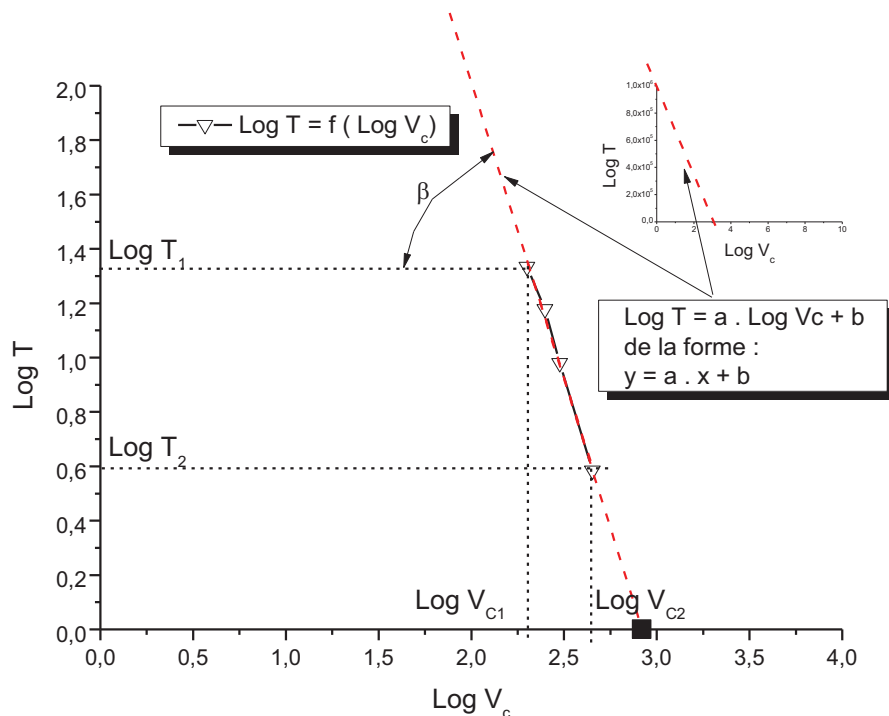


Figure.IV.13. Analyse graphique par détermination de coefficients a et b de la droite.

Où n est la pente qu'on détermine à partir de la courbe linéaire de la figure IV.13, on dispose des points suivants $(\text{Log } V_{c1}, \text{Log } T_1)$ et $(\text{Log } V_{c2}, \text{Log } T_2)$ par exemple $(2.30 ; 1.33)$ et $(2.65 ; 0.58)$.

La pente est donnée par :

$$a = n = \text{tg}\beta = \frac{\text{Log } T_1 - \text{Log } T_2}{\text{Log } V_{c1} - \text{Log } V_{c2}} = \frac{1.33 - 0.58}{2.30 - 2.65} = -2,1428$$

L'intersection avec l'axe des ordonnées (l'axe des vitesses (Ox)) donne le point $(\text{Log}V_{c_0}, 0)$
d'où :

D'une part

$$n = \text{tg}\beta = \frac{\text{Log}T_1 - \text{Log}T_0}{\text{Log}V_{c_1} - \text{Log}V_{c_0}} = \frac{1.33 - 0}{2.30 - \text{Log}V_{c_0}} = -2.1428$$

$$n = -2,1428$$

après calcul

$$\text{Log}V_{c_0} = 2.30 + \frac{1.33}{2.1428} = 2.9206$$

d'autre part,

$$0 = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_{c_0}$$

d'où

$$\text{Log}C_v = -n \text{Log}V_{c_0} = 2.1428 \times 2.9206 = 6.2582$$

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

et enfin l'équation de Taylor devient : $T = 10^{6.26} \cdot V_c^{-2,14}$

Remarque IV.4

- On peut obtenir cette valeur de même en utilisant le point d'intersection de la courbe linéaire avec l'axe des abscisses (l'axe de temps (Oy));
- La différence entre les résultats la première et la deuxième résolution est due essentiellement à l'erreur de troncature.

Deuxième méthode

Sans passé par le graphe, en utilisant le Tableau IV.6, on peut déduire la formule de Taylor $T = C_v V_c^n$ ou la forme logarithmique linéaire est : $\text{Log}T = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_c$

Prenant deux points du tableau

$$\begin{cases} T_1 = 21.59 \text{ min} \\ V_{c_1} = 200 \text{ m/min} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} T_2 = 3.85 \text{ min} \\ V_{c_2} = 450 \text{ m/min} \end{cases}$$

En remplaçant dans l'équation (2)

$$\begin{cases} \text{Log}T_1 = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_{c_1} \\ \text{Log}T_2 = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_{c_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Log } 21.59 = \text{Log } C_v + n \text{Log } 200 \\ \text{Log } 3.85 = \text{Log } C_v + n \text{Log } 450 \end{cases}$$

après résolution du système on obtient

$$n = \frac{\text{Log } 21.59 - \text{Log } 3.85}{\text{Log } 200 - \text{Log } 450} = -2.1428$$

$$n = -2.1428$$

et

$$\text{Log } C_v = \text{Log } 21.59 + 2.1428 \cdot \text{Log } 200 = 6.2586$$

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

et enfin l'équation de Taylor est : $T = 10^{6.26} \cdot V_c^{-2.14}$