

Chapitre III : Usure des outils de coupe

- 1. Introduction**
- 2. Définition**
- 3. Les Mécanismes de l'Usure des Outils de Coupe**
- 4. Evolution des divers mécanismes d'usure en fonction de la [T°]**
- 5. Différentes formes d'usure**
- 6. Mesure de l'usure de l'outil**
- 7. Durée de coupe d'un outil**
 - Exemple.

III.1. Introduction

L'usure des outils de coupe est un phénomène naturel qui se produit lors de l'usinage. Elle est due aux forces mécaniques et thermiques qui s'exercent sur l'outil lors du processus d'enlèvement de matière. L'usure des outils de coupe peut avoir un impact négatif sur la précision, la qualité de surface et la productivité de l'usinage. Elle peut également entraîner une augmentation des coûts de production.



III.2. Définition de l'usure

L'usure d'un outil de coupe est la dégradation progressive de l'arête de coupe de l'outil, qui se traduit par une perte de matière et une diminution de la précision de coupe. L'usure est causée par une combinaison de facteurs mécaniques et thermiques. La figure III.1 représente l'évolution de l'usure en fonction du temps de travail de l'outil, on distingue trois (03) zones de fonctionnements qui peuvent être identifiées comme suite :

- **Zone I** : Phase d'adaptation et de rodage de l'arête au régime de coupe : usure rapide.
- **Zone II** : Phase d'usure quasi-stationnaire à évolution linéaire.
- **Zone III** : Phase de l'accroissement rapide de l'usure, l'effondrement de l'arête est à prédire.

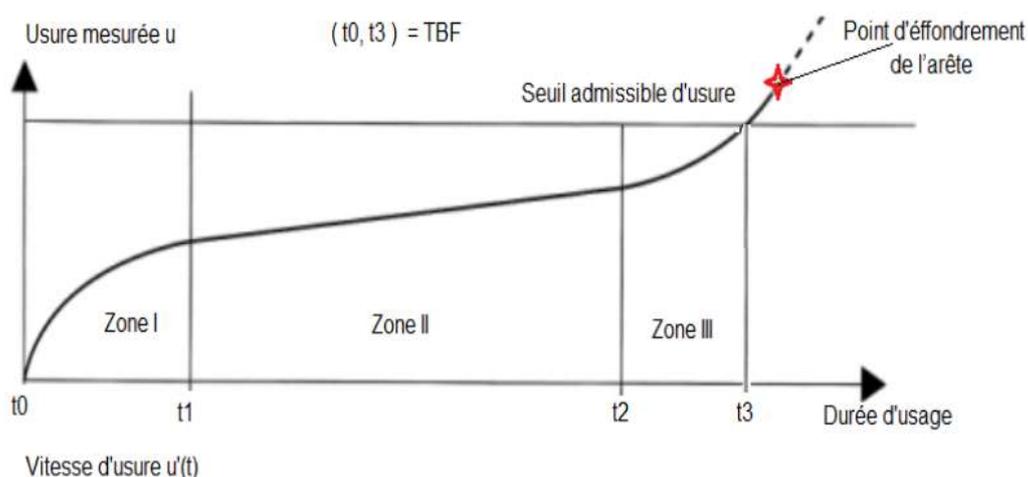
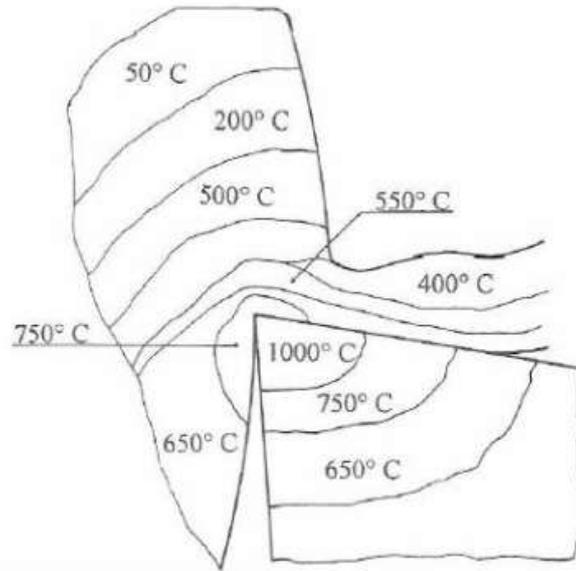
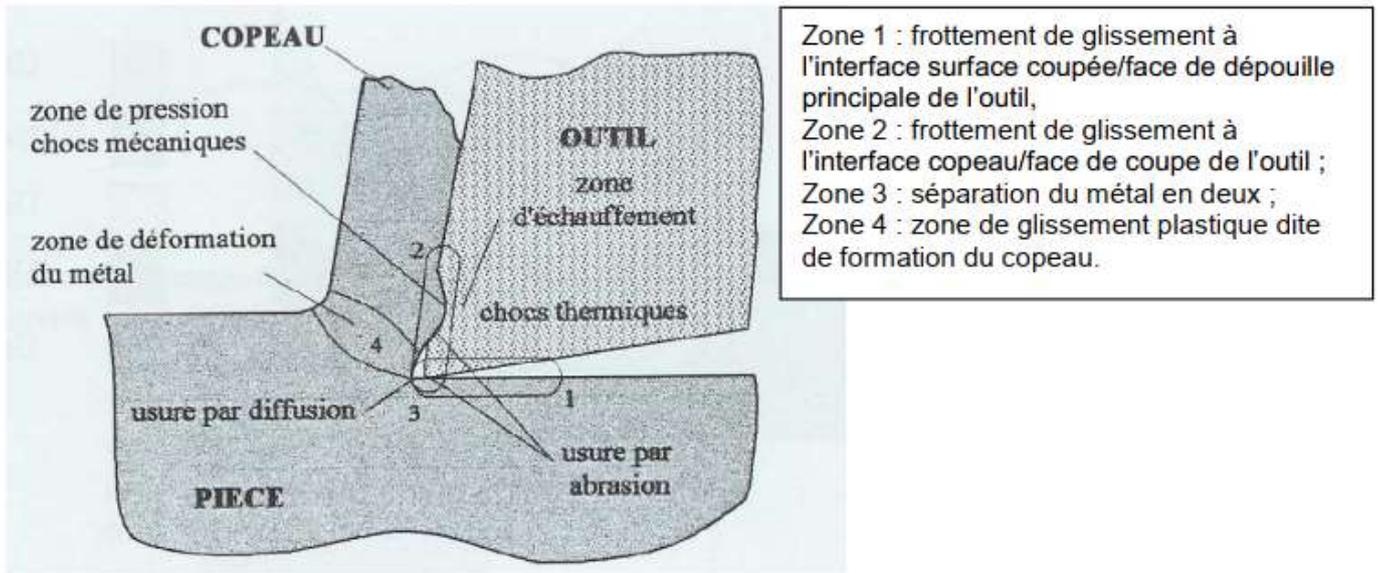


Figure III.1 : Evolution de l'usure dans le temps.

La qualité du travail d'un outil de coupe dans le processus d'usinage dépend entre autre de son degré d'usure. Elle a une influence, sur :

- La qualité de la surface obtenue ;
- La tenue de l'outil dans le temps ;
- La puissance nécessaire à la coupe



Les paramètres de coupe ayant une influence sur l'usure.

- La vitesse de coupe (++++++)
- Le matériau de l'outil (+++++)
- Le matériau usiné (+++++)
- La lubrification (+++)
- L'avance (++)
- La profondeur de passe (+)

Les principaux types d'usure

L'usure en dépouille :

Elle apparaît sur la face de dépouille suivant une bande striée brillante parallèle à l'arrête. Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil.

Le critère d'usure est la largeur de l'usure, nommée V_b .

V_b max = 0,3 mm

L'usure en cratère.

Elle s'observe sur la face de coupe et apparaît sous la forme d'une cuvette créée par le frottement du copeau.
Le critère d'usure est la profondeur de cratère : K_t .

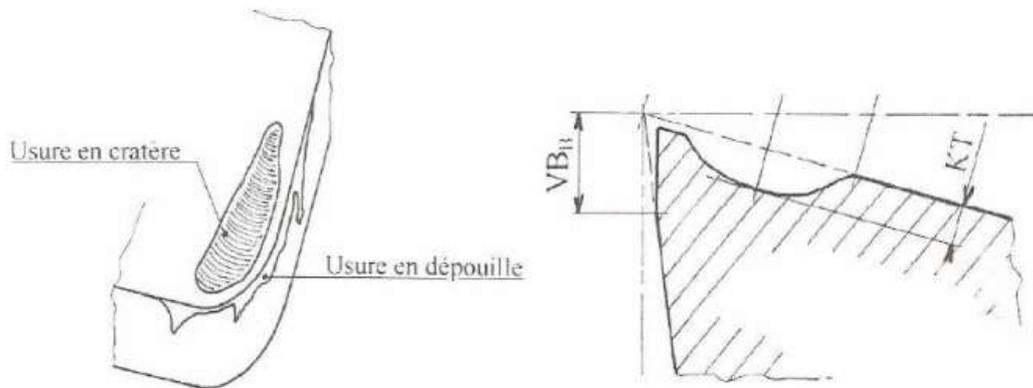


Figure III.2 : Principaux types d'usure.

III.3. Les Mécanismes de l'Usure des Outils de Coupe

Divers mécanismes d'usure sont observés, et selon la littérature, on peut les regrouper en deux grandes catégories :

1. Usure due à des forces mécaniques.
2. Usure due à des phénomènes physico-chimiques.

III.3.1 Par forces mécaniques

- a) Par abrasion (érosion)

L'usure par abrasion est provoquée par la présence d'impuretés et d'inclusions dans le matériau usiné qui sont plus dures que l'outil lui-même. De plus, les petits copeaux qui durcissent au contact de l'outil contribuent à favoriser ce type d'usure (figure III.3). L'abrasion U est proportionnelle à la pression de contact P , au coefficient de frottement K_f et la vitesse de glissement V_g .

$$U = K.P.K_f.V_g$$

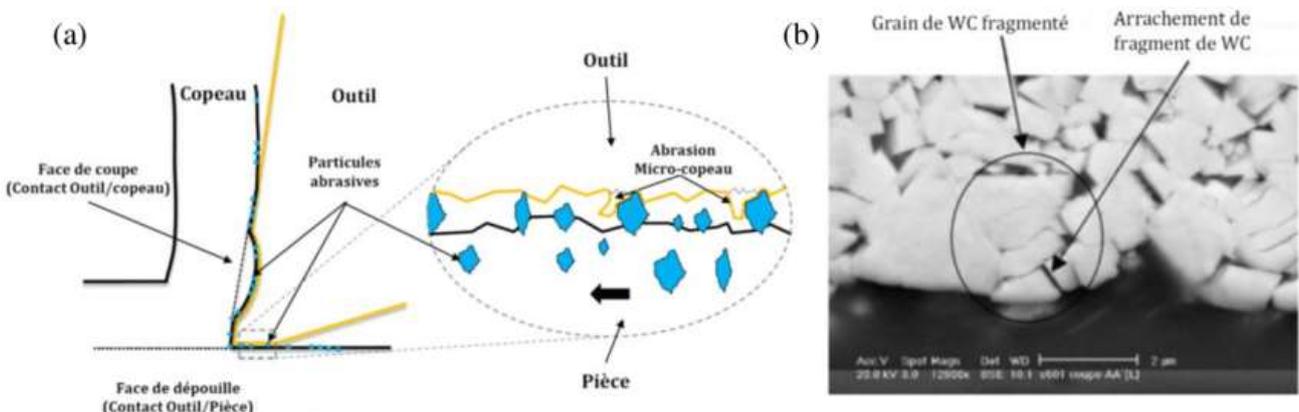


Figure III.3 : Illustration de l'usure par abrasion.

b) Par adhésion

Soit A_r la surface réelle de contact et A_a la surface apparente de contact, on peut avoir :

$$A_r/A_a = 10^{-5}$$

Il se produit des microsoudures sous des pressions élevées entre l'outil et les surfaces rugueuses du copeau. Cela peut entraîner le détachement mécanique de particules, soit du copeau vers l'outil, créant ainsi une arête saillante (rapportée) sur l'outil, soit de l'outil vers le copeau, résultant en une usure de l'outil.

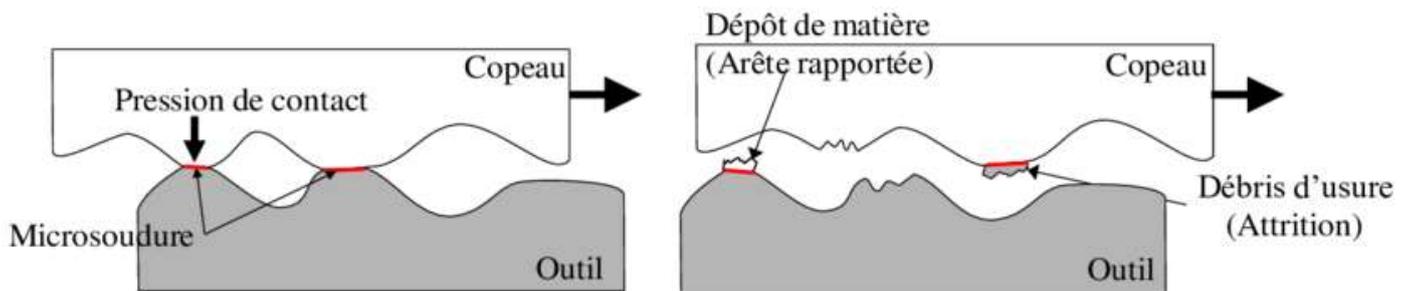


Figure III.4 : Représentation schématique de l'usure par adhésion

c) Usure par fissuration

L'usure par fissuration se réfère à un type d'usure des outils qui résulte des contraintes thermiques et mécaniques extrêmes subies par l'outil pendant le processus d'usinage. Ces conditions extrêmes peuvent entraîner la formation de fissures à l'intérieur de l'outil, ce qui, à terme, conduit à sa défaillance ou à sa ruine (figure III.5).



Figure III.5 : fissures thermiques

d) Usure par déformation plastique de l'outil

Cette forme d'usure se produit lorsque des pressions élevées et des températures élevées à l'interface entre l'outil et le copeau entraînent une déformation plastique du bec de l'outil. En d'autres termes, l'outil subit une déformation permanente, généralement au niveau de ses arêtes tranchantes, à cause des conditions de coupe extrêmes (figure III.6).



Figure III.6 : Déformation plastique

III.3.2 Par phénomènes physico-chimiques

a) Usure par diffusion

L'usure par diffusion survient à des températures élevées lorsque la structure de l'outil subit des modifications en raison de la migration de ses constituants chimiques. Cette migration peut se produire soit de l'outil vers le copeau, soit de la matière usinée vers l'outil (figure III.7). Ce transfert continu d'éléments chimiques résulte en des changements structurels dans l'outil, ce qui peut entraîner son usure progressive. Cette forme d'usure apparaît lorsque la vitesse de coupe et par la suite la température augmente.

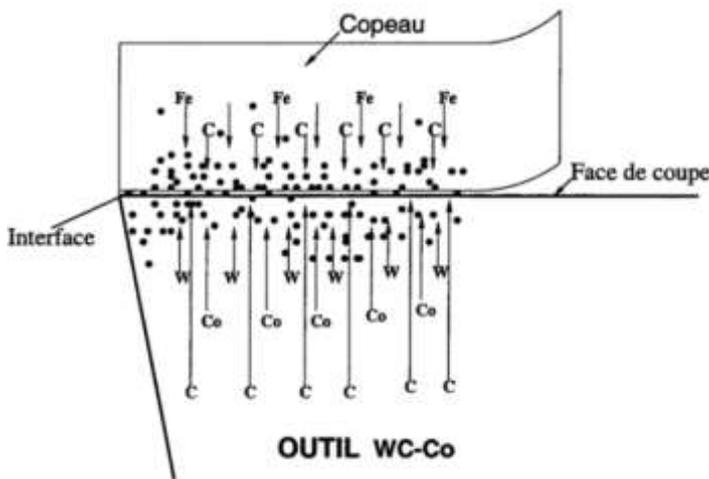


Figure III.7 : Schéma de diffusion à l'interface copeau / outil

b) Usure par Corrosion

L'usure par corrosion se produit lorsque la vapeur d'eau provenant du liquide de coupe (lubrifiant) interagit avec l'oxygène de l'air, favorisant ainsi l'oxydation de l'outil. Cette oxydation affaiblit la structure de l'outil. L'usure corrosive peut également être causée par une oxydation intramoléculaire et/ou des réactions électrochimiques impliquant des ions, ce qui contribue à l'usure de l'outil.

III.4 Evolution des divers mécanismes d'usure en fonction de la [T°]

Sur un graphique unique, il est possible de représenter l'évolution des divers mécanismes d'usure en fonction du régime de coupe et de la température. Les recherches effectuées dans ce domaine ont démontré que les différents modes d'usure évoluent de manière proportionnelle à la fois à la température et au régime de coupe, comme l'ont indiqué Optiz, Konig et Vieregge. (Figure III.8)

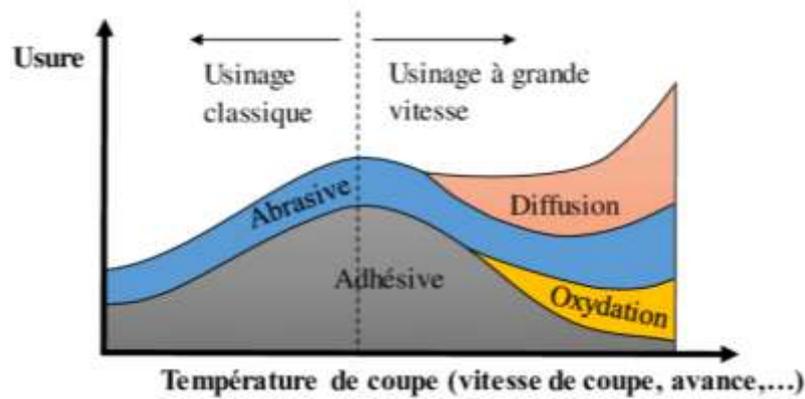


Figure III.8 : Evolution des mécanismes d'usure en fonction de la température

Observation 1

En utilisant une approche tribologique, des études récentes ont révélé que près du bec de l'outil de coupe, dans la zone de cisaillement secondaire et tertiaire, trois (03) sous-zones distinctes sont identifiables (voir Figure III.9.a) :

- Dans la **sous-zone A**, le matériau usiné est fortement comprimé contre l'arête de coupe, ce qui entraîne une adhérence du matériau à l'outil.
- Dans la **sous-zone B**, le matériau adhère à la surface de coupe et au copeau grâce à la formation de microsoudures.
- Dans la **sous-zone C**, le copeau est libéré du contact avec la surface de coupe et glisse sur cette dernière, mettant ainsi fin à sa trajectoire dans le bac de la machine-outil (voir figure III.9.b).

Le mécanisme d'usure sur les faces de coupe et de dévissage est un cisaillement répété, causé par un cycle de détachement, de collage et de nouveau détachement du copeau de la face de coupe.

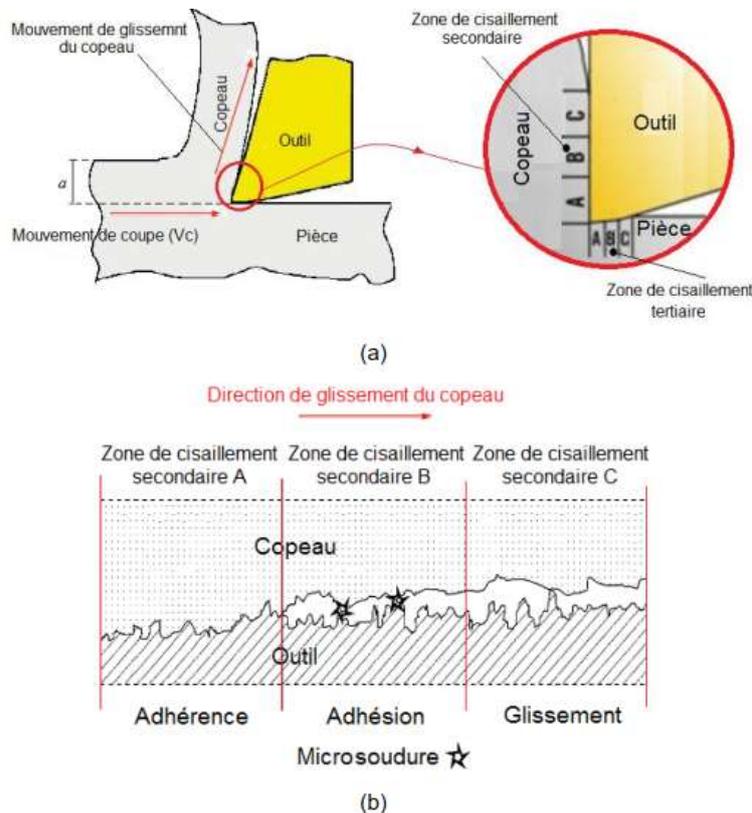


Figure III.9 : Analyse d'usure tribologique

III.5 Différentes formes d'usure

L'usure d'un outil peut être observée objectivement grâce à ses manifestations macroscopiques. Ces manifestations sont fonction de divers paramètres mesurables, tels que la profondeur de coupe, la vitesse de coupe, etc. Il existe 9 formes d'usure (Tableau 2), qui sont décrites dans la norme NF E 66-505.

Avant d'étudier les problèmes d'usure et leurs remèdes, il est important de s'assurer de la stabilité du système de production (machine-outil). En effet, une machine-outil instable peut entraîner une usure prématurée des outils (Tableau 1).

Tableau 1 : Incidents et remèdes

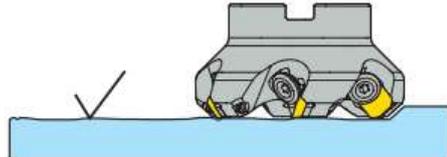
	
<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la stabilité de l'outil et/ou de la pièce. • Changer la position de la fraise. • Diminuer le porte-à-faux. • Diminuer la vitesse de coupe. • Augmenter l'avance. • Réduire la profondeur de coupe. • Sélectionner une géométrie de plaquette différente, • Utiliser des barres antivibratoires Steadyline 	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la stabilité de l'outil et/ou de la pièce. • Diminuer le porte-à-faux. • Réduire l'avance. • Augmenter la vitesse de coupe. • Utiliser un arrosage. • Utiliser des plaquettes de raclage. • Garder une avance/tr dans la valeur du plat de raclage • Utiliser des barres antivibratoire Steadyline

Tableau 2 : 9 formes d'usure

Formes d'usure d'outil		Causes	Remèdes
<p>Usure en dépouille</p> 		<ul style="list-style-type: none"> • Nuance d'outil est trop faible. • Vitesse de coupe V_c est trop élevée. • Angle de dépouille est trop petit. • Taux d'alimentation (vitesse d'avance) V_f est extrêmement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure (plaquette avec revêtement Al_2O_3). • Vitesse de coupe V_c réduite. • Augmenter l'angle de dépouille. • Augmenter le taux d'alimentation V_f.
<p>Usure en cratère</p> 		<ul style="list-style-type: none"> • Nuance d'outil est trop faible. • Vitesse de coupe V_c est trop élevée. • Taux d'alimentation V_f est trop élevé. • Température trop importante 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure. • Vitesse de coupe V_c réduite. • Taux d'alimentation réduit V_f.
<p>Usure en entaille</p> 		<ul style="list-style-type: none"> • Surface dure telle que surface non coupée, pièce refroidie et couche durcie par usinage. • Friction causée par des copeaux de forme irrégulière. (causée par de petites vibrations) 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité d'outil avec une grande résistance à l'usure • Augmentez l'angle de coupe pour améliorer la netteté.
<p>Usure par écaillage</p> 		<ul style="list-style-type: none"> • Arête rapportée. • Mauvaise élimination du copeau. • Géométrie trop fragile. • Nuance d'outil est trop faible 	<ul style="list-style-type: none"> • Outil à ténacité élevée. • Augmentez l'angle de coupe β • Augmentez le chanfrein du bec. • Réduire le taux d'alimentation V_f au début de la coupe

<p>Usure par ébréchure</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Nuance d'outil est trop faible. • Taux d'alimentation V_f est trop élevé. • Manque de résistance des arêtes de coupe. • Manque de rigidité de la tige ou du support. 	<ul style="list-style-type: none"> • Outil à ténacité élevée. • Taux d'alimentation V_f réduit. • Augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc. • Utilisez une tige de grande taille à forte rigidité. • Vitesse de coupe V_c réduite.
<p>Fracture du bec d'outil</p> 			
<p>Usure par déformation plastique</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Nuance d'outil est trop faible. • Vitesse de coupe V_c est trop élevée. • Profondeur de coupe et le taux d'alimentation sont trop importants. • Température de coupe est élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • Outil à haute résistance à l'usure. • Vitesse de coupe V_c réduite. • Diminuez la profondeur de passe et le taux d'alimentation V_f. • Qualité d'outil avec haute conductivité thermique. • Usinage lubrifié
<p>Formation d'arêtes rapportées</p> 		<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse de coupe V_c est faible. • Géométrie d'outil inadapté. 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la vitesse de coupe V_c. • Augmenter l'angle de coupe. • Qualité d'outil avec une faible affinité. (grade enduit, grade cermet)
<p>Usure par fissuration en peigne</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Fluctuations thermique en coupe. • Nuance d'outil est trop faible. • Observé surtout en fraisage. • Arrosage intermittent. • Usinage intermittent 	<ul style="list-style-type: none"> • Coupe à sec. (Pour la coupe humide, inonder la pièce avec du fluide de coupe) • Qualité d'outil avec une ténacité élevée.

En coupe des métaux, les outils sont soumis à des contraintes importantes et à de hautes températures, ce qui les expose à divers types d'endommagements, résultant souvent en des phénomènes d'usures combinées, comme illustré dans la figure III.10. Pour faire face à ces problèmes, des critères d'usure sont développés. Une valeur critique d'usure est déterminée pour chaque type d'usure observée sur l'outil.

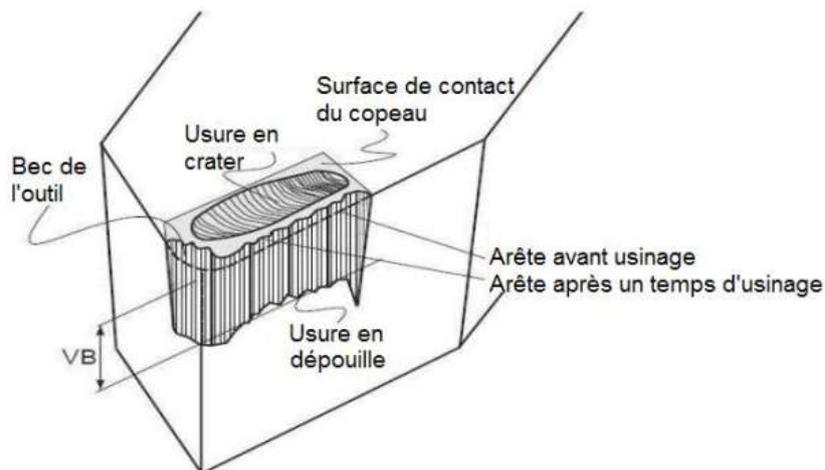


Figure III.10 : Aspects d'usures constatés dans un outil de coupe

L'objectif principal de l'établissement de ces valeurs critiques d'usure est de prévenir la défaillance de l'outil. Lorsque l'une des formes d'usure atteint sa valeur critique correspondante, cela indique que l'outil est sur le point de ne plus être opérationnel de manière efficace ou en toute sécurité. À ce stade, il est nécessaire de procéder au changement de l'outil ou à la rotation de son arête de coupe.

Le choix de la valeur critique dépendra de divers facteurs, notamment le matériau de l'outil, le matériau travaillé, les conditions de coupe, les spécifications de l'opération d'usinage, et les exigences de qualité du produit final. En surveillant attentivement ces valeurs critiques d'usure, il est possible d'optimiser la durée de vie de l'outil tout en maintenant la qualité de l'usinage et en évitant des défaillances coûteuses.

III.6 Mesure de l'usure de l'outil

III.6.1 Usure en dépouille principale, en entaille et par affaissement plastique.

Lorsqu'on observe l'usure sur la face de dépouille principale de l'outil, on peut distinguer trois formes d'usure : l'usure par affaissement plastique, l'usure en dépouille, et l'usure d'entaille. Ces trois formes d'usure peuvent se manifester distinctement ou se superposer en fonction des conditions d'utilisation de l'outil, telles que le matériau travaillé, la profondeur de passe, le type de travail (unitaire ou répétitif), etc.

Dans le cas d'une usure régulière en dépouille, les trois formes d'usure apparaissent de manière distincte, comme illustré dans la figure III.11.

La longueur "a" de la zone de coupe affectée par l'usure est divisée en trois zones distinctes :

La zone "C" correspond à l'usure par affaissement plastique.

La zone "B" correspond à l'usure en dépouille.

La zone "N," d'une longueur "a/4," correspond à l'usure d'entaille.

Chacune de ces zones est caractérisée par les valeurs de VB_C , VB_B , VB_N , et on caractérise l'affaissement plastique par la valeur de SV_P .

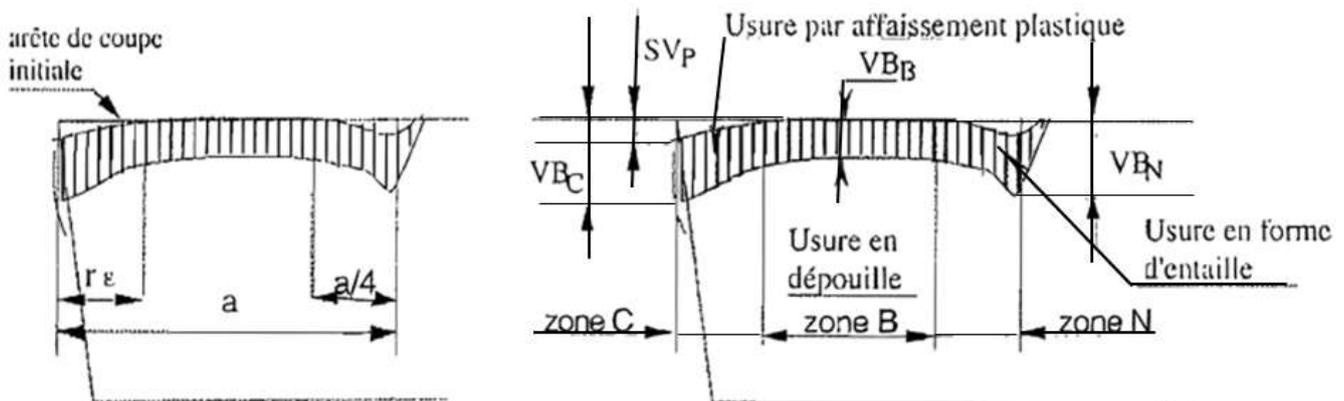


Figure III.11. Usure régulière.

Lorsque l'usure de l'outil est irrégulière, ce qui peut se produire dans des conditions d'usinage où la profondeur de passe varie d'une pièce à l'autre, il est courant de caractériser l'usure frontale par la valeur VB_B maximale mesurée dans la zone B (figure III.12).

La "zone B" fait référence à la zone d'usure en dépouille sur la face de dépouille principale de l'outil, comme mentionné précédemment. Lorsque l'usure est irrégulière, c'est-à-dire que la profondeur de passe varie d'une pièce à l'autre, l'usure peut également varier. Cependant, pour évaluer l'usure de manière pratique, on peut se concentrer sur la valeur maximale de la vitesse de coupe mesurée dans la zone B (VB_B).

En mesurant cette valeur maximale de VB_B , on peut obtenir une indication de l'usure la plus sévère sur l'outil, ce qui peut être utile pour évaluer la durée de vie résiduelle de l'outil dans des conditions d'usinage variables. Cela permet de déterminer quand l'outil atteint un niveau d'usure critique et quand il est nécessaire de procéder à un changement d'outil ou de prendre des mesures correctives pour maintenir la qualité de l'usinage.

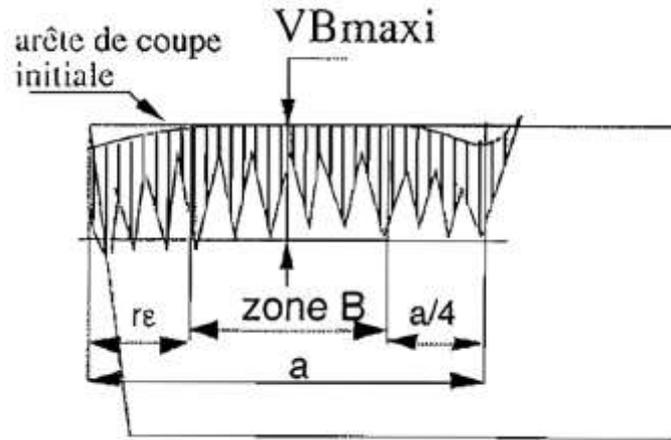


Figure III.12 : Usure irrégulière.

III.6.2 Usure en cratère.

Elle s'observe sur la face de coupe et apparaît sous la forme d'une cuvette créée par le frottement intense du copeau sur cette face. Elle se manifeste principalement lors des travaux d'ébauche à faible vitesse de coupe et à vitesse d'avance élevée. Son critère associé est KT qui est la profondeur du cratère. On peut également caractériser cette usure par les valeurs suivantes : (Figure III.13)

KB : Largeur du cratère,

KM : Distance du centre du cratère,

KT : Profondeur du cratère. C'est par cette valeur, que le critère d'usure par cratère est définis.

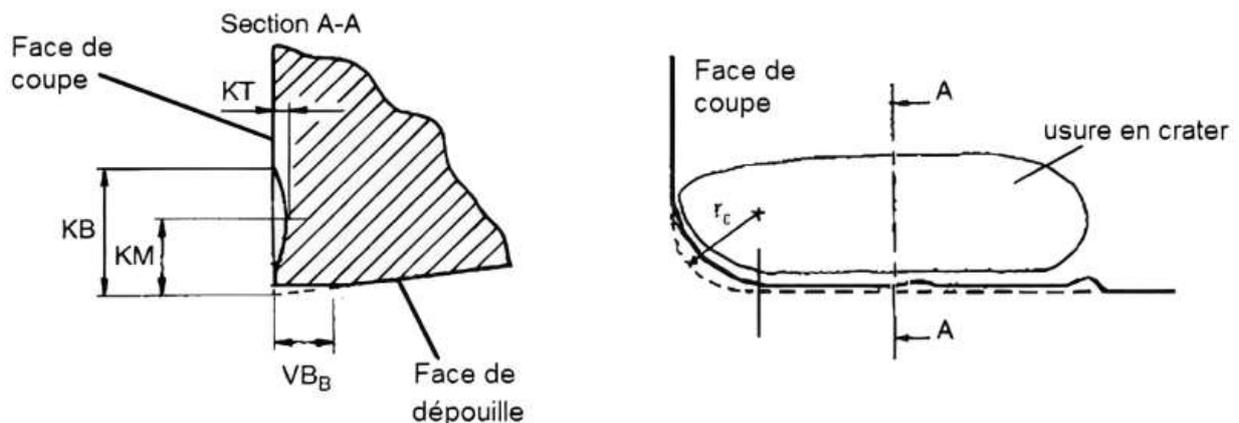


Figure III.13 : Usure en cratère.

III.6.3 Valeurs relatives des différentes formes d'usure.

Le graphique suivant montre pour un carbure P30, l'influence de la vitesse de coupe sur les paramètres d'usure KT , VB_N , SV_P pour une valeur constante de VB_B de 0,3 mm (figure III.14).

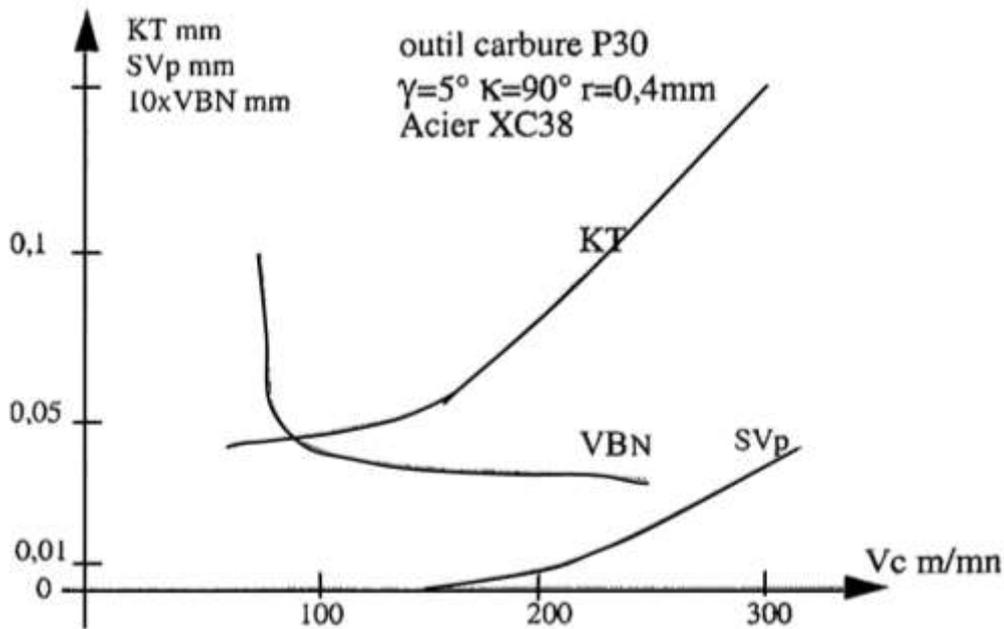


Figure III.14 : Influence de la vitesse de coupe sur les paramètres d'usure

Observation 2

I. La norme NF E66-505 spécifie que, au bout d'un certain temps d'usinage, l'outil peut atteindre les valeurs limites d'usure, ce qui indique que l'outil n'est plus apte à la coupe (fin de vie de l'outil). Les valeurs limites d'usure sont les suivantes :

1. Pour une usure en dépouille régulière, la valeur limite est $VB_B = 0,3$ mm.
2. Si l'usure en dépouille est irrégulière, la valeur limite est $VB_{Bmax} = 0,6$ mm.
3. Pour une usure en cratère, la valeur limite est $KT = 0,06 + 0,3f$, où "f" représente l'avance en mm/tr.

Lorsque l'outil atteint l'une de ces valeurs limites d'usure, il est considéré non apte à la coupe, ce qui signifie qu'il est temps de changer l'outil ou de remplacer son arête de coupe.

II. En plus des critères de mesure directs tels que les valeurs limites d'usure, il existe également des critères indirects pour évaluer l'état d'endommagement d'un outil de coupe. Parmi ces critères indirects, on peut citer :

1. L'état de surface et les tolérances géométriques des pièces finies : Des changements dans la qualité de la surface usinée ou des variations par rapport aux spécifications géométriques peuvent indiquer un endommagement de l'outil.
2. Les efforts et le travail spécifique de coupe : Une augmentation des efforts de coupe ou du travail spécifique (la quantité d'énergie requise pour enlever une unité de matière) peut signaler des problèmes avec l'outil.
3. La température de la pointe de l'outil : Une élévation de la température de la pointe de l'outil peut être le signe d'une surchauffe due à une usure excessive.

Ces critères indirects sont essentiels pour surveiller l'état de l'outil et garantir des performances d'usinage optimales tout en évitant les défaillances coûteuses et les pièces défectueuses. Ils complètent les critères directs de mesure des usures pour assurer la qualité du processus d'usinage.

Tableau 3 : Valeurs moyenne de l'exposant « n » de la loi de Taylor.

Matériau d'outil	ARS/HSS	Carbure	Carbure revêtu	Céramique
<i>n</i>	-6	-4	-3	-2
Valeurs indicatives de <i>n</i> avec des outils ARS				
	Aciers	Fontes grises	Fontes malléables	Alliages aluminiums
Tournage	-8.5	-10	-8.5	-2.5
Fraisage	-5	-6.5	-5	-2
Perçage	-5	-8.5	-8.5	-2.5
Valeurs indicatives de <i>n</i> avec des outils en carbure métalliques				
	Aciers	Fontes grises	Fontes malléables	Alliages aluminiums
Tournage	-4.5	-5	-5	-2.5
Fraisage	-3	-3	-3	-2
Perçage	-3.5	-2.5	-2.5	-2.5

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

L'expression de la loi de Taylor peut être également mis sous la forme suivante :

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

Tableau 4 : ordre de grandeur des paramètres de la loi de Taylor.

Outil	α	<i>n</i>	C_T
Acier rapide	-0.1 -0.125	-8	70
Carbure P30	-0.2 -0.3	-3.7	350
Céramique	-0.95	-1.05	8000

- ✓ On exprime la valeur de la vitesse de coupe V_C pour une durée de vie T sous la forme V_T , par exemple : $V_{20} = 250 \text{ m/min}$ (vitesse de coupe de 250 m/min pour une durée de vie de 20 min)

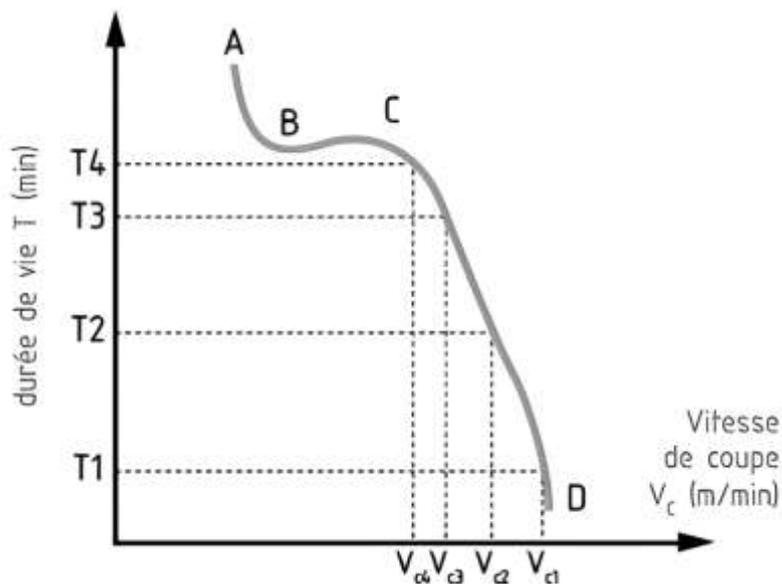


Figure III.16 : Courbe de durée de vie en fonction de la vitesse de coupe

Comme la courbe de la zone CD à une allure d'une droite (Figure III.17), la loi de Taylor serait la plus correcte.

En déterminant les constantes C_v et n des données expérimentaux (Figure III.17) la loi d'usure (l'équation de Taylor) sera déduite. A partir de cette loi, Il serait possible de fixer un temps de coupe et retrouver la vitesse de coupe associée.

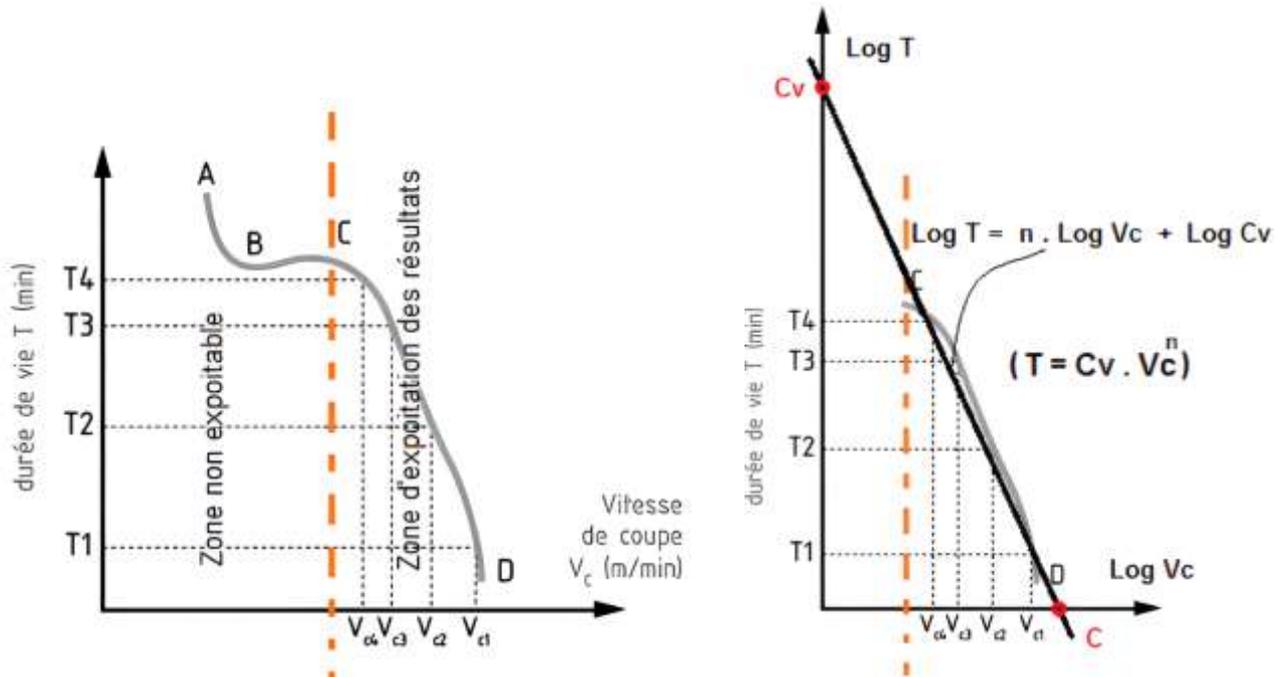


Figure III.17 : Analyse graphique par la loi de Taylor

D'autres modèles empiriques ont été annoncés après Taylor comme :

Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950

Ce modèle est la généralisation du modèle de Taylor dans lequel la constante C_V est mis sous la forme :

$$C_V = C \cdot f^x \cdot a^y$$

Soit : $T = C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V_C^n$ $\log T = \log C + x \cdot \log f + y \cdot \log a + n \cdot \log V_C$

Où f est l'avance, a est la profondeur de passe. La constante C : dépend du Couple Outil / Matière

Les coefficients x , y et n : dépendent que du matériau constituant l'outil, avec $x \approx n/6$ et $y \approx n/3$, et x , y , n sont toujours < 0 .

Modèle de Colding en 1959

$$K + A \cdot x + B \cdot x^2 + C \cdot y + D \cdot y^2 - z + E \cdot z^2 + F \cdot x \cdot y + G \cdot y \cdot z + H \cdot x \cdot z$$

Avec K, A, B, C, D, E, F, G et H sont des constantes, et $x = \ln a$, $y = \ln V_C$, $z = \ln T$

Modèle de Kronenberg en 1968

$$T = C (V + k)^m, \quad k, C \text{ et } m \text{ sont des constantes}$$

Modèle de König-Depiéreux en 1969

$$T = \exp(-\alpha V_C^v - \gamma a^\mu - \sigma a^\lambda)$$

Observation 3

- Bien que d'autres modèles de durée de vie tels que ceux de Kronenberg (1968) et de König-Depiéroux (1669) existent, les modèles de Taylor et de Gilbert demeurent les plus couramment utilisés.
- La valeur de $VB_B = 0,3$ mm représente la limite acceptable pour les opérations d'ébauche. Pendant cette phase d'usinage, les conditions de coupe sont les plus exigeantes, et l'outil est soumis à une sollicitation maximale.
- En revanche, lorsqu'il s'agit de demi-finition et de finition, où la précision des pièces est de rigueur, il est recommandé de choisir une valeur de VB_B inférieure à 0,3 mm.
- La plupart des travaux de fabrication dans l'industrie sont réalisés en série, qu'il s'agisse de petites, moyennes ou grandes séries. Dans ces contextes, l'usure des outils a un impact significatif sur la productivité. Afin d'optimiser la production, il est judicieux de sélectionner un temps d'usure de l'outil inférieur de 10 % à 20 % par rapport au temps calculé pour une usure VB_B définie par les critères de durée de vie.
- Lorsque le coefficient "n" est de grande valeur absolue, cela indique que la loi de Taylor est fortement influencée par la vitesse de coupe. Ceci reflète que le matériau de l'outil présente une résistance à l'usure relativement faible.

Exemple

Pour optimiser les coûts d'usinage, il est essentiel de déterminer la loi d'usure (loi de Taylor) pour une opération réalisée sur une machine-outil. Les données expérimentales sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 5).

- ✓ L'objectif est d'établir la loi d'usure pour cette opération d'usinage à partir de ces données.

Tableau 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]										
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 5 sont représentés graphiquement dans la figure III.18 :

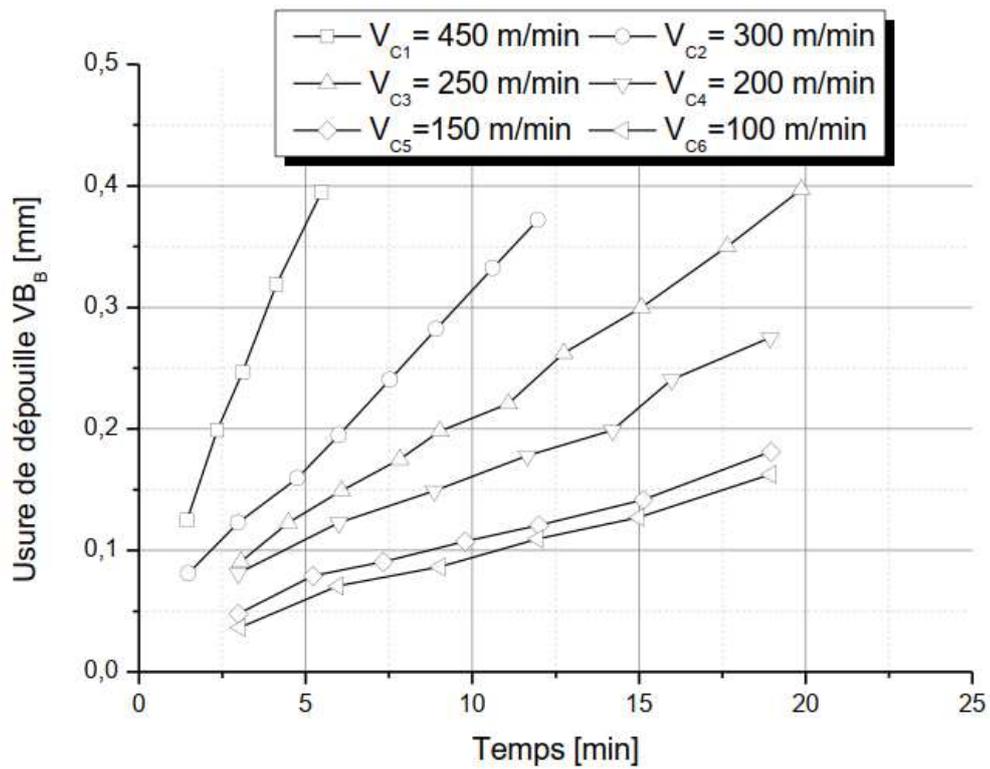


Figure III.18 : Graphe de l'usure de dépouille VB_B en fonction de temps pour différentes vitesses de coupes V_c .

A partir de la figure III.18, 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 $VB_B = 0,3$ mm. (Figure III.19)

La droite qui représente $VB_B = 0,3$ 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 .

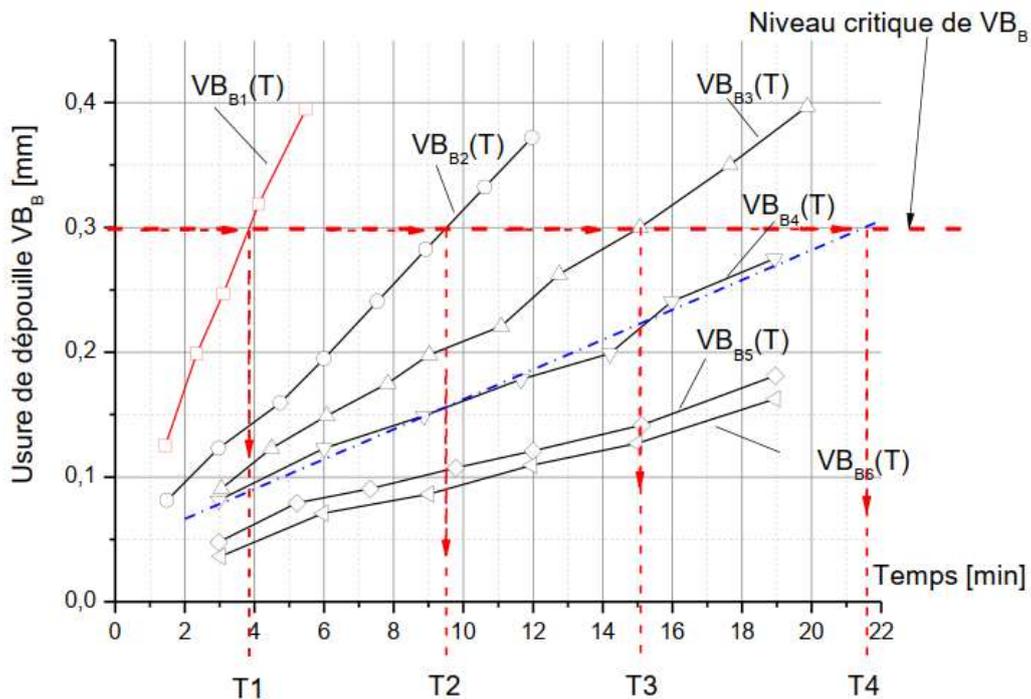


Figure III.19 : Exploitation du graphe pour déterminer les temps d'usure ultimes à $VB_B=0,3$ mm

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 5) où $T_3 = 15,07$ 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 6 en matière de temps d'usure T et la vitesse de coupe V_c .

Tableau 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)

Solution N° 1

Les résultats du tableau 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 III.20.

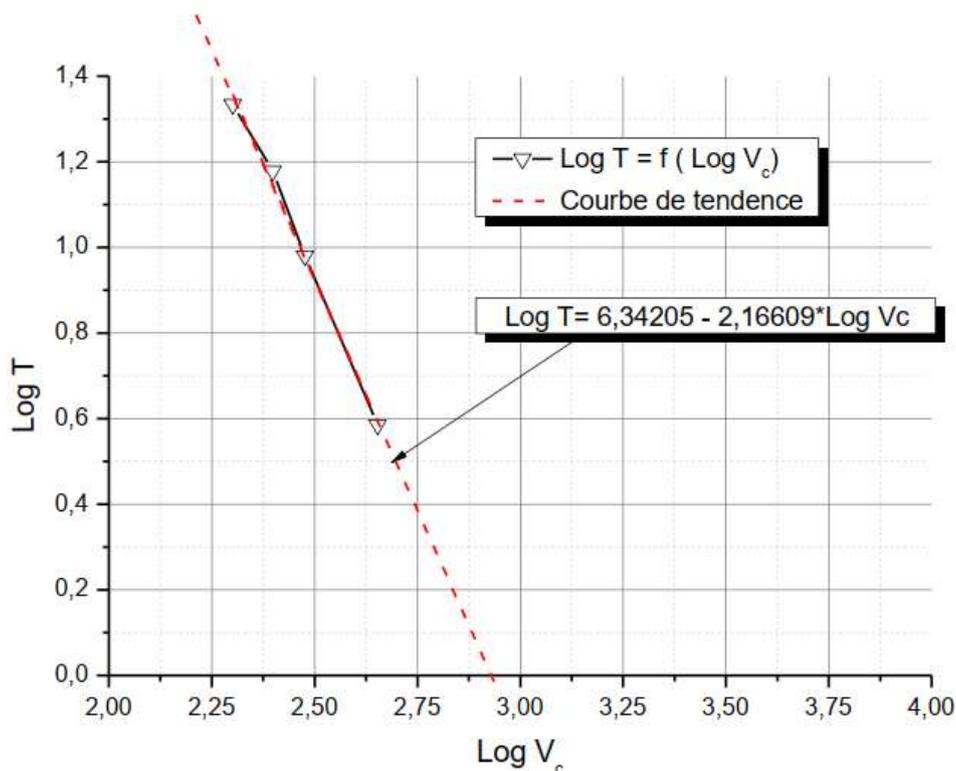


Figure III.20 : Analyse graphique directe sur Excel de $T=f(V_c)$

L'équation de la droite de tendance est de la forme $(y = a \cdot x + b)$. (Figure III.20)

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

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 :

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

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

Solution N° 2

La loi d'usure de Taylor est définie par :

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

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

On reprend la même figure III.20 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 :

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

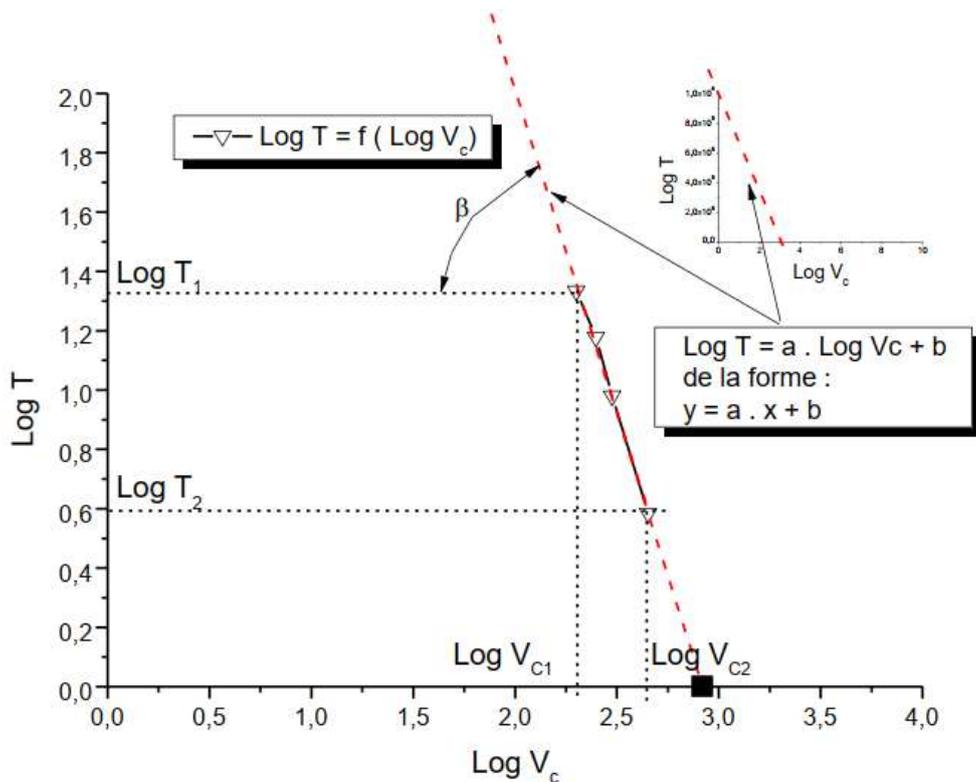


Figure III.21 : Analyse graphique par détermination de coefficients a et b de la droite.

Où n est la pente qu'on détermine à partir de la courbe linéaire de la figure III.21, 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 :

$$a = n = \tan \beta = \frac{\log T_1 - \log T_2}{\log V_{c1} - \log V_{c2}} = \frac{1.33 - 0.58}{2.30 - 2.65} = -2.1428$$

$$n = -2.1428$$

L'intersection avec l'axe des abscisses (l'axe des vitesses (Ox)) donne le point ($\text{Log } V_{c0}$, 0) d'où :

D'une part :

$$n = \tan \beta = \frac{\log T_1 - \log T_0}{\log V_{c1} - \log V_{c0}} = \frac{1.33 - 0}{2.30 - \log V_{c0}} = -2.1428$$

Après calcul :

$$\log V_{c0} = 2.30 + \frac{1.30}{2.1428} = 2.9206$$

D'autre part :

$$0 = \log C_v + n \log V_c$$

D'où :

$$\log C_v = -n \log V_c = -(-2.1428) \times 2.9206 = 6.2582$$

$$C_v = 10^{6.26}$$

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

Observation 4

On peut obtenir cette valeur de même en utilisant le point d'intersection de la courbe linéaire avec l'axe des ordonnées (l'axe de temps (Oy)).

Deuxième méthode

Sans passer par le graphe de l'usure, en utilisant le Tableau 6, on peut déduire la formule de Taylor :

$$T = C_v \cdot V_c^n, \text{ ou la forme logarithmique linéaire est : } \log T = \log C_v + n \log V_c$$

Prenant deux points du tableau

$$\begin{cases} T_1 = 21.5 \text{ min} \\ V_{c1} = 200 \text{ m/min} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} T_2 = 3.85 \text{ min} \\ V_{c2} = 450 \text{ m/min} \end{cases}$$

En remplaçant dans l'équation de forme logarithmique linéaire

$$\begin{cases} \log T_1 = \log C_v + n \cdot \log V_{c1} \\ \log T_2 = \log C_v + n \cdot \log V_{c2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \log 21.59 = \log C_v + n \cdot \log 200 \\ \log 3.85 = \log C_v + n \cdot \log 450 \end{cases}$$

Après résolution du système on obtient

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

$$n = -2.1428$$

Et

$$\log C_v = \log 21.59 + 2.1428 \cdot \log 200 = 6.2586$$

Et

$$C_v = 10^{6.26}$$

L'équation de Taylor est $T = 10^{6.26} \cdot V_c^{-2.14}$