

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'INFLUENCE DE LA RIGIDITE STATIQUE DES TOURS SUR LE COMPORTEMENT A L'USURE DES PLAQUETTES EN CARBURE METALLIQUE «NUANCE P25 »

Reçu le 26/02/2001 – Accepté le 07/11/2002

Résumé

Ce travail consiste à étudier expérimentalement l'influence de quelques machines-outils sur le comportement à l'usure des plaquettes en carbure métalliques. Les essais ont été réalisés dans des conditions opératoires proches de celles industrielles. Les machines-outils utilisées sont caractérisées par leurs rigidités. Le suivi de l'évolution de l'usure des plaquettes en fonction du temps (τ) et des éléments du régime de coupe (v , f et d) sur chaque machine a été établi conformément à la méthode de planification des expériences. Les résultats obtenus ont été traités, analysés et interprétés physiquement.

Mots clés : Rigidité, Usure, Machine-outil, Carbures, Contact, Frottements.

Abstract

This work consists in studying in experiments the influence of some machine tools on behavior with the wear of the metal carbide plates. The tests were carried out under operating conditions close to that industrial. The machine tools used are characterized by their rigidities. The follow-up of the evolution of the wear of the plates according to time (τ) and the elements of the mode of cut (v , f and d) on each machine was established in accordance with the method of planning of the experiments. The results obtained were treated, analyzed and interpreted physically.

Key words : Rigidity, Wear, Machine-Tool, Carbides, Contact, Frictions.

L. BOULANOUAR
F. MAHFOUDI

Département de Génie Mécanique
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université de Annaba
B.P. 12, Annaba 23000, Algérie

ملخص

موضوع هذا البحث يتمحور حول دراسة تجريبية لتأثير الماكينات على تآكل أدوات القطع المصنوعة من الكريبيدات المعدنية. وقد أجريت التجارب في ظروف قربية من تلك التي تطبق في القطاعات الصناعية. كما أن الماكينات المستعملة لإجراء الاختبارات اللازمة تم تمييزها اعتمادا على معامل صلابتها، أما عن عملية متابعة تطور تآكل أدوات القطع المستعملة بدلالة الزمن (τ) وعناصر نظام القطع (V , f , d) لكل مكنة وضعت طبقا لطريقة تخطيط التجارب. وبعد الحصول على النتائج قمنا بمعالجتها وتحليلها ثم شرحها فيزيائيا.

الكلمات المفتاحية: الصلابة، تآكل، مكنات ناعية، كريبيدات، وصل، احتكاك.

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur les paramètres technologiques en productique mécanique (processus de coupe notamment), tels que la précision d'usinage, la qualité de la surface usinée, la puissance de coupe, le coût de fabrication et la productivité de travail, on peut citer la machine-outil. En effet, pendant la réalisation des essais dans ce domaine, on considère généralement que la machine-outil est un facteur invariable, ou qui a une influence relativement négligeable, alors qu'en réalité, le parc machines-outils existant se distingue par une grande diversité. Autrement dit, les machines-outils diffèrent les unes des autres par leurs caractéristiques techniques, tels que la rigidité, la précision, la cinématique, le degré d'automatisation, etc.

En ce basant sur ce bref constat, on se pose souvent la question sur la reproductibilité et l'éventail de validité des résultats expérimentaux obtenus dans les laboratoires de recherche. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle nous avons mené cette étude afin de trouver une réponse à cette question. Pour ce faire, nous avons réalisé des essais dans des conditions de travail identiques sur quelques machines-outils (tours) ayant différentes rigidités statiques. La méthodologie entreprise est celle de planification des expériences [1, 2, 4]. Ceci permet, d'une part, le suivi de l'évolution de l'usure de l'outil en fonction du temps de travail (τ) et des éléments du régime de coupe (V , f et d) sur chaque machine et, d'autre part, la déduction de modèles statistiques exprimant la relation quantitative et qualitative entre la durée de vie (T) de l'outil, les éléments du régime de coupe et la rigidité de la machine-outil.

1. GENERALITES SUR LA RIGIDITE STATIQUE DES TOURS ET SUR L'USURE DES OUTILS DE COUPE

1.1. Rigidité statique des tours

Lors du façonnage des pièces mécaniques, la machine-outil, le montage d'usinage, la pièce elle-même, l'outil et le porte-outil (mandrins, pinces, barres d'alésage, etc.) forment un système élastique que nous désignerons sommairement par le terme de système élastique "Machine - Pièce - Outil". Ce système est sollicité en usinage par l'effort de coupe qui produit des déformations élastiques, ainsi que par les déplacements des éléments du système résultant des jeux dans les articulations. La grandeur des déformations élastiques et des refoulements est définie par l'effort de coupe d'une part, et par la rigidité du système élastique d'autre part, c'est-à-dire par son aptitude à résister à l'effort appliqué. La variabilité de l'effort de coupe produit des déformations et des refoulements irréguliers des éléments du système élastique. Il en résulte des défauts de forme de la surface usinée et des dispersions de côtes à observer. Par conséquent, la précision d'usinage est définie par la rigidité du système élastique "Machine - Pièce - Outil".

Les variations de l'effort de coupe les plus importantes sont celles de sa composante normale à la surface usinée. Ainsi, sous le terme de rigidité d'un système élastique, on comprend la relation entre cette composante de l'effort de coupe normale à la surface usinée et le refoulement des éléments du système produit par cette force [5]. Elle peut être calculée d'après la formule suivante :

$$J = \frac{F_y}{y}, \quad \text{daN/mm} \quad (1)$$

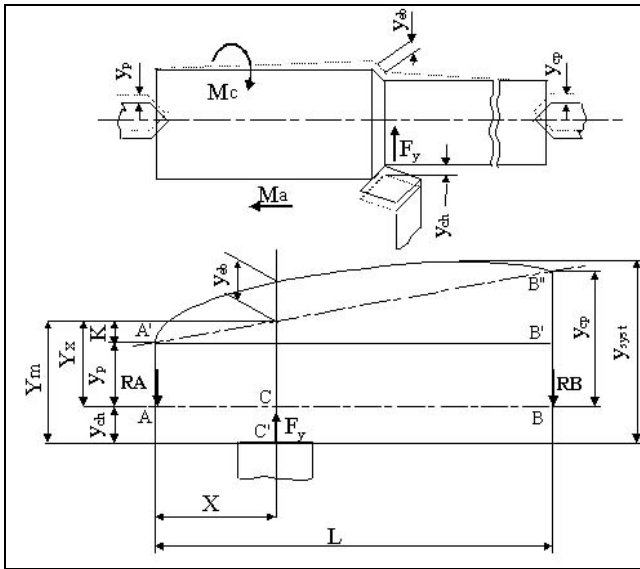


Figure 1: Schéma de calcul de la rigidité du système élastique "machine-pièce-Outil".

La rigidité d'un tour lors de l'usinage d'un arbre entre pointes s'obtient sur la base des considérations suivantes :

L'action de la composante F_y de l'effort de coupe appliqué à un point quelconque de la portée (Fig.1) déplace la poupée de A en A' à la grandeur de refoulement Y_p , la

contre poupée de B en B'' à la grandeur Y_{cp} , le chariot de C en C' à la grandeur Y_{ch} et l'axe de rotation de l'ébauche de AB en $A'B''$. Dans la section x , l'axe se déplace à la grandeur Y_x , alors :

$$Y_x = Y_p + K, \quad Y_p = \frac{R_A}{J_p}, \quad Y_{cp} = \frac{R_B}{J_{cp}}, \quad Y_{ch} = \frac{F_y}{J_{ch}},$$

$$Y_m = Y_{ch} + Y_x, \quad R_A = F_y \cdot \frac{(l-x)}{l}, \quad R_B = F_y \cdot \frac{x}{l}.$$

où R_A et R_B sont les réactions de la poupée et de la contre poupée, suite à l'application de la composante F_y de l'effort de coupe.

La valeur de K est déterminée à partir du triangle $A'B'B''$ (Fig.1) :

$$K = (Y_{cp} - Y_p) \frac{x}{l}$$

Après des substitutions et des transformations correspondantes, on obtient l'expression suivante de la rigidité de la machine J_m :

$$J_m = \frac{F_y}{Y_m} = \frac{1}{\frac{1}{J_{ch}} + \frac{1}{J_p} \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 + \frac{1}{J_{cp}} \left(\frac{x}{l} \right)^2} \quad (2)$$

1.2. Usure des outils de coupe

L'usure des outils de coupe est un processus très complexe durant lequel, sur les surfaces de contact de la partie active de l'outil avec le copeau et la pièce à usiner, apparaissent des phénomènes physico-chimiques très variés. Autrement dit, l'usure des outils est un processus de destruction des couches superficielles, qui conduit à la modification progressive de sa forme et de son état de surface. Elle affecte également la géométrie de l'outil, la température, les efforts de coupe, la précision d'usinage et la rugosité de la surface usinée. L'usure d'un outil de coupe se manifeste sur les surfaces de sa partie active. Elle se traduit avant tout par un arrachement de petites particules de métal de ses surfaces d'attaque et de dépouille principale et auxiliaire. L'usure, suivant la surface d'attaque, est due à son frottement avec le copeau, alors que celle des surfaces de dépouille principale et auxiliaire est due respectivement à leur contact avec la surface de coupe et la surface usinée de la pièce. Il est à noter que l'usure des outils se manifeste dans des conditions de travail beaucoup plus difficiles que celles des pièces de machines. En effet la pression spécifique dans les surfaces de contact des pièces de machines ne dépassent pas quelques MPa et la température d'échauffement est inférieure à 100°C, alors que la pression spécifique dans les surfaces de contact de la partie active d'un outil est de l'ordre de 10^3 à 2.10^3 MPa et la température d'échauffement est de 100°C à 1000°C, voire plus [6,7]. Par conséquent, durant le processus de coupe et suite à l'action intensive et mutuelle aux interfaces "outil-pièce", surgissent de grands efforts de coupe, de hautes températures et d'autres facteurs, qui provoquent l'apparition de l'usure sur les facettes de la partie active de l'outil.

Il existe une série d'hypothèses, éclaircissant la nature physique du mécanisme d'usure des outils, travaillant dans différentes conditions. D'après ces hypothèses, ce

mécanisme peut être expliqué par l'usure: par effritement, abrasion, adhésion et diffusion [1,3,5,7,8,9]. En fonction des conditions de travail, l'usure des outils se manifeste d'une manière très variée. En règle générale, l'outil s'use suivant la surface d'attaque et les surfaces de dépouille. Néanmoins, les conditions de travail (propriétés physico-chimiques et mécaniques de la matière à usiner et celles du matériau de l'outil, éléments du régime de coupe, liquide de lubrification, rigidité du système usinant "MODOP", etc.) peuvent faire dominer tel ou tel type d'usure [1,10]. Les éléments caractéristiques de l'usure d'un outil de tour, recommandés d'après ISO 3685-1977 (F), sont illustrés sur la figure 2 [11].

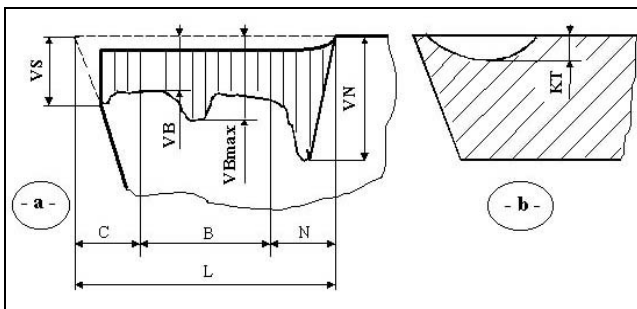


Figure 2: Manifestation de l'usure des outils de coupe.
(a) Usure en dépouille. (b) Usure en cratère.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les essais consistent à faire des opérations de chariotage longitudinal à sec sur une longueur d'usinage constante. La méthodologie entreprise et celle de longue durée, associée à celle de planification des expériences [1,2,4,7]. Les trois machines-outils utilisées sont des tours parallèles à charioter et à fileter. La rigidité à l'état statique de chaque machine est déterminée expérimentalement d'après la méthode décrite au paragraphe 1.1. En déterminant la rigidité, nous avons utilisé une barre étalon ayant une longueur de 300 mm et un diamètre de 70 mm. L'effort de pression radial appliqué au milieu de la barre est mesuré à l'aide d'un anneau dynamométrique. Les refoulements (v_i) des éléments du système, causés par cet effort, sont relevés par les comparateurs à cadran (Fig.3). Les caractéristiques techniques de ces machines ainsi que les valeurs calculées de leur rigidité sont données dans le tableau 1.

Machine Outil	Rigidité (J) (daN/mm)	Modèle machine	Puissance Moteur (kW)	Distance entre-pointe (mm)	Poids (daN)	Année de fabrication
Tour N°1	3046,55	1A616	4,4	700	---	1972
Tour N°2	1848,68	SN40C	6,6	1500	1720	1986
Tour N°3	1514,32	SN40C	6,6	1000	1620	1986

Tableau 1: Valeurs de la rigidité et caractéristiques des machines-outils utilisées.

Ces machines d'essais ont été soumises également aux différents contrôles de précision géométrique dans les deux plans (horizontal et vertical). A titre indicatif, on peut citer le parallélisme entre l'axe du tour et le déplacement longitudinal du traînard, le parallélisme entre la direction de

déplacement de la contre poupée et celle du traînard, ainsi que le battement axial et radial de la broche. Les résultats de contrôle ont montré qu'ils sont conformes aux normes de précision des tours parallèles [12].

Le suivi de l'évolution de l'usure en dépouille de l'outil a été effectué à l'aide d'un microscope d'atelier (type MMU2), équipé d'une table à mouvements croisés, ayant une précision de 0,005 mm. Quant à celui de l'usure en cratère, il a été assuré par un dispositif, doté d'un comparateur à cadran de 0,001mm de précision.

Les essais d'usinage ont été réalisés sur des rondins en acier C22, de 70 mm de diamètre et de 450 mm de longueur usinée avec des plaquettes (SNMN1204MO réversibles) en carbure métallique "nuance P25". Le porte-plaquettes est du type CSBNR322512, ayant les paramètres géométriques: $R_r = 75^\circ$, $R_{r1} = 0^\circ$ (sur une longueur de 1,4mm), $\gamma = -6^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\lambda = -6^\circ$. Le montage de la pièce est mixte (Mandrin - Contre pointe) et le porte-à-faux de l'outil est de 25 mm. Les intervalles de variation de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe sont respectivement (100 à 200) m/min, (0,11 à 0,22) mm/tr et (1 ÷ 2) mm. En se référant à la norme ISO 3685-1977 (F), nous avons retenu les critères d'usure admissible: $[VB_{max}] = 0,5$ mm et $[KT] = 0,15$ mm [11].

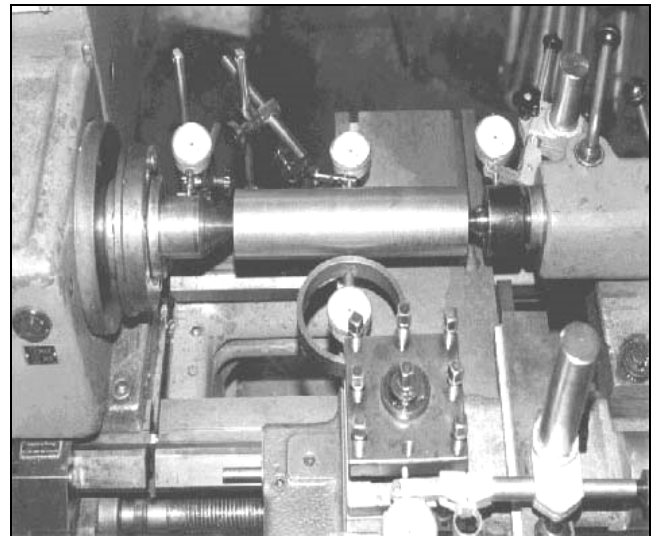


Figure 3: Illustration du montage de mesure de la rigidité.

3. RESULTATS

Le suivi de l'évolution de l'usure des plaquettes sur les différentes machines utilisées, en fonction du temps de travail et des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe, est illustré sur les figures 4 à 11. Le traitement graphique de ces résultats a permis la détermination des tenues (T) pour

chaque régime et pour chaque machine utilisée. Le traitement statistique de ces tenues a abouti à la déduction de :

1. Modèles mathématiques spécifiques à chaque machine testée exprimant la relation entre la durée de vie de l'outil et

les éléments du régime de coupe (Tab.2).

Machine outil	Modèles mathématiques de la tenue	Coefficient de détermination (R ²)
Tour N°1	$T = \frac{e^{16,617}}{V^{3,104} \cdot f^{1,012} \cdot d^{0,537}}$	0,87
Tour N°2	$T = \frac{e^{17,158}}{V^{3,219} \cdot f^{0,883} \cdot d^{0,723}}$	0,95
Tour N°3 (série n°1)	$T = \frac{e^{16,190}}{V^{3,128} \cdot f^{1,126} \cdot d^{1,045}}$	0,89
Tour N°3 (série n°2)	$T = \frac{e^{16,283}}{V^{3,165} \cdot f^{1,165} \cdot d^{0,956}}$	0,89

Tableau 2 : Modèles mathématiques de la tenue en fonction des éléments du régime de coupe pour les différentes machines-outils utilisées.

2. Modèles de la durée de vie de l’outil en fonction de la rigidité de la machine, ceci pour chaque combinaison du plan des expériences (Tab.3).

N°	Valeurs réelles des facteurs			Modèles trouvés	R ²	Valeurs de la constante et de l’exposant du modèle	
	V	f	d			C	b
1	100	0,11	1	$T = 13,479 \cdot J_m^{0,206}$	0,998	13,479	0,206
2	200	0,11	1	$T = 0,017 \cdot J_m^{0,851}$	0,923	0,017	0,851
3	100	0,22	1	$T = 0,171 \cdot J_m^{0,727}$	0,990	0,171	0,727
4	200	0,22	1	$T = 0,536 \cdot J_m^{0,246}$	0,755	0,536	0,246
5	100	0,11	2	$T = 0,130 \cdot J_m^{0,750}$	0,998	0,130	0,750
6	200	0,11	2	$T = 0,192 \cdot J_m^{0,434}$	0,992	0,192	0,434
7	100	0,22	2	$T = 0,029 \cdot J_m^{0,895}$	0,952	0,029	0,895
8	200	0,22	2	$T = 7,590 \cdot J_m^{1,045}$	0,962	7,590	1,045

Tableau 3 : Modèles mathématiques de la tenue en fonction de la rigidité pour chaque régime de coupe du plan des expériences.

3. Modèle général (6) décrivant la relation fonctionnelle de l’influence des éléments du régime de coupe ainsi que celle de la rigidité de la machine sur la durée de vie de l’outil.

4. DISCUSSION

L’analyse des résultats de l’usure en fonction du temps et des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe pour les trois machines utilisées (Fig. 4 à 11), montrent que les courbes d’usure se subdivisent en trois zones distinctes. En effet, la première se caractérise par une évolution rapide, la seconde présente une évolution stable avec une tendance pratiquement linéaire, alors que la troisième zone se distingue par une intensification remarquable de l’usure, qui conduit ultérieurement à la destruction du bec de l’outil.

Le suivi de l’évolution de l’usure suivant les surfaces en dépouille principale et d’attaque a fait ressortir que l’usure en dépouille *VBmax* se caractérise par une vitesse d’accroissement plus importante par rapport à l’usure en cratère KT, ce qui justifie son adoption comme critère

d’usure admissible.

Les résultats montrent également que sur les machines moins rigides, l’usure de l’outil s’intensifie au voisinage de la valeur admissible de l’usure, ce qui signifie que la durée de vie des plaquettes s’accroît avec l’augmentation de la rigidité de la machine. La quantification de cette différence des tenues pour les différentes combinaisons du plan des expériences peut être illustrée par le pourcentage moyen suivant :

- Si les essais sont répétés sur la même machine (Rapport des rigidités, $R_r = 1$), La différence relative moyenne en % et en valeur absolue est estimée à 1,59 %.

- Si le travail s’effectue sur des machines ayant les rapports de rigidités $R_r = 1,22$ et $2,01$, alors la différence relative moyenne en % des tenues est respectivement égale à 14,33 % et 35,50 %. En se basant sur cette analyse, nous pouvons dire qu’avec l’augmentation de la rigidité de la machine, l’usure des outils diminue. Ceci est justifié également par l’évolution des courbes d’usure, relative à chaque machine (Fig. 4 à 11).

L’analyse des modèles mathématiques déduits (Tab.2), montre que l’augmentation des éléments du régime de coupe provoquent une diminution de la tenue. Il est à noter aussi que la vitesse de coupe a le degré d’influence le plus grand, suivi par l’avance et enfin la profondeur de passe. On constate également que les valeurs des degrés d’influence des éléments du régime de coupe sur la tenue diminuent avec l’augmentation de la rigidité de la machine-outil.

Pour une exploitation industrielle de ces résultats, nous avons jugé utile de proposer un modèle mathématique général qui prend en considération non seulement l’influence des éléments du régime de coupe mais aussi celle de la rigidité statique de la machine-outil. Pour ce faire, une analyse approfondie a permis la déduction de modèles mathématiques exprimant pour chaque régime du plan des expériences établi, la relation entre la durée de vie (*T*) de l’outil et la rigidité statique de la machine-outil (Tab.3). Ces modèles ont la forme suivante:

$$T = C \cdot J_m^b \tag{3}$$

L’analyse de ces modèles révèle que les valeurs de *C* et celles de l’exposant *b* ne sont pas constantes, mais elles sont fonction des éléments du régime de coupe. Cette constatation fortuite nous a incité à chercher une expression mathématique reliant ces paramètres. Le traitement statistique des valeurs de *C* et *b* en fonction de *V*, *f* et *d* (Tab.3) a permis la déduction des modèles suivants :

$$C = e^{9,391} \cdot V^{-3,169} \cdot f^{-2,867} \cdot d^{-3,805} \tag{4}$$

$$b = e^{-0,042} \cdot V^{-0,021} \cdot f^{0,388} \cdot d^{0,82} \tag{5}$$

En substituant (4) et (5) dans (3), on obtient le modèle général (6) escompté qui exprime la relation qualitative et quantitative entre la tenue de l’outil d’une part, et les éléments du régime de coupe (*V*, *f*, *d*) et la rigidité statique (*J_m*) de la machine-outil d’autre part :

$$T = e^{9,391} \cdot V^{-3,169} \cdot f^{-2,867} \cdot d^{-3,805} \cdot J_m^{(e^{-0,042} \cdot V^{-0,021} \cdot f^{0,388} \cdot d^{0,82})} \tag{6}$$

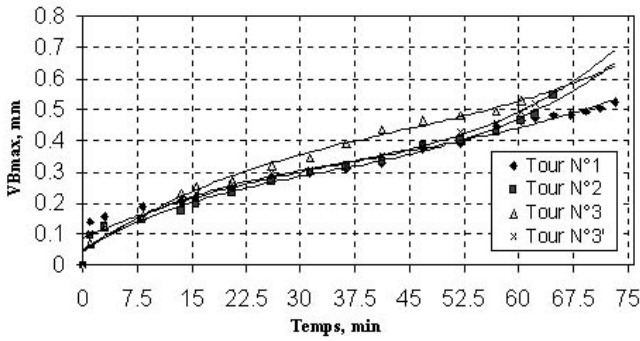


Figure 4: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 1 : $V = 200, f = 0,11, d = 1$).

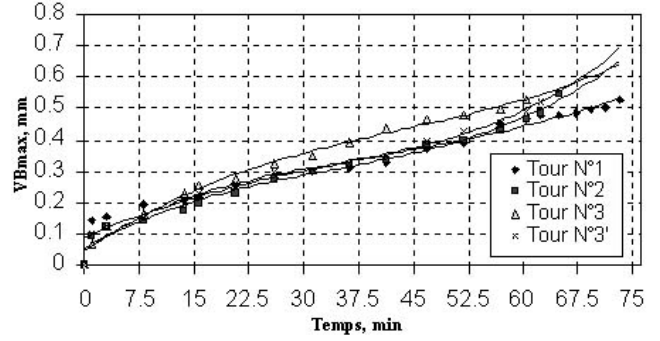


Figure 5: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 2 : $V = 200, f = 0,11, d = 1$).

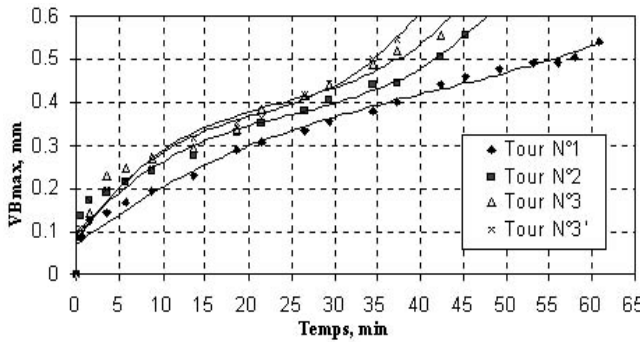


Figure 6: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 3 : $V = 100, f = 0,22, d = 1$).

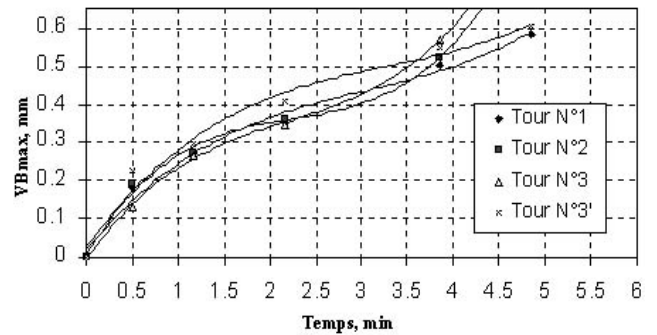


Figure 7: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 4 : $V = 200, f = 0,22, d = 1$).

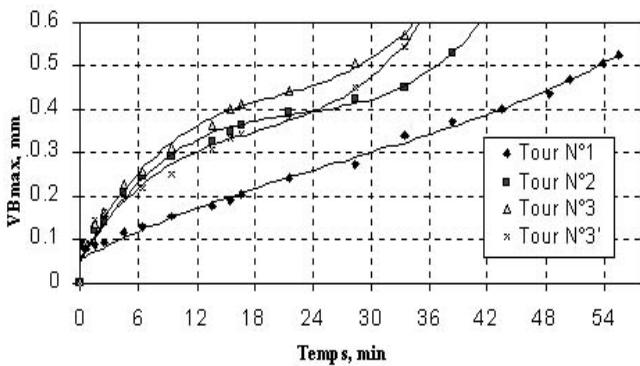


Figure 8: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 5 : $V = 100, f = 0,11, d = 2$).

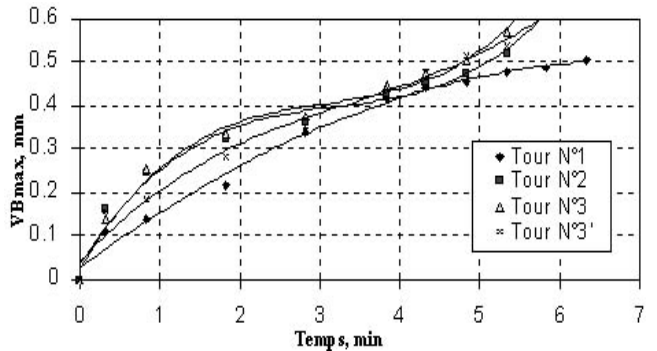


Figure 9: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 6 : $V = 200, f = 0,11, d = 2$).

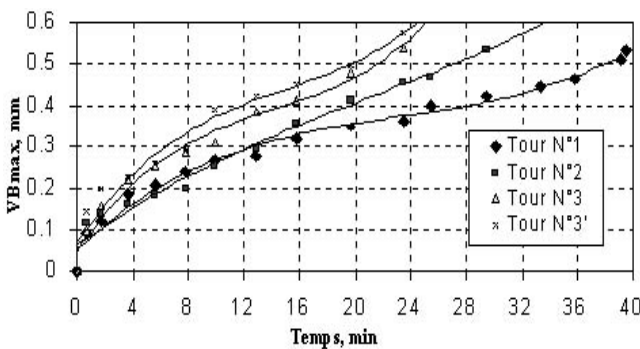


Figure 10: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 7 : $V = 100, f = 0,22, d = 2$).

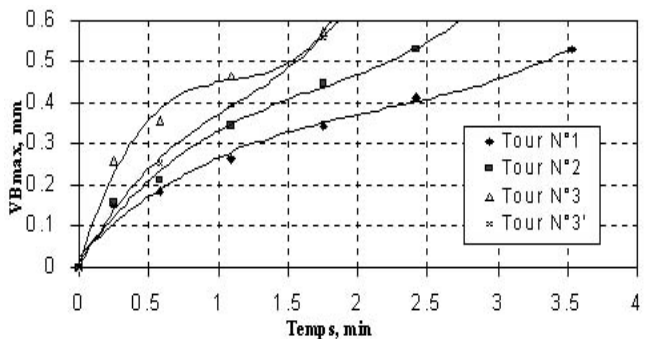


Figure 11: Usure en fonction du temps pour les différentes machines (Régime 8 : $V = 200, f = 0,22, d = 2$).

L'intégration de la rigidité de la machine dans le modèle habituel de la tenue a une grande importance technique et économique. En effet, le coût de fabrication et la précision macro et micro géométrique des pièces mécaniques ainsi que la gestion de flux de production sont en étroite relation avec la durée de vie de l'outil de coupe. Ce modèle présente une information très précieuse, notamment pour les systèmes de production intégrés.

CONCLUSIONS

En se basant sur l'analyse précédente, on peut dégager les principales conclusions suivantes :

* Les valeurs de l'usure (Tenues), relevées sur la même machine se reproduisent avec une différence relative moyenne d'environ $\pm 1,59\%$.

* La rigidité statique des machines-outils a des répercussions sur la vitesse d'accroissement de l'usure et par conséquent sur la durée de vie des outils. A cet effet, si le rapport de rigidité varie de 1.0 à 2.0, les tenues des outils augmentent de 0 à 35,5 %.

* En travaillant sur des machines-outils (tours parallèles) ayant des rigidités statiques qui varient entre 1514,32 et 3046,55 daN/mm, nous avons trouvé des modèles mathématiques permettant de calculer:

1/ la durée de vie de l'outil en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe appartenant au plan des expériences établi. Evidemment, ces modèles sont spécifiques aux machines testées, mais ils sont valables également pour toute autre machine ayant une rigidité statique équivalente (Tab.2).

2/ la durée de vie de l'outil en fonction non seulement des éléments du régime de coupe, mais aussi en fonction de la rigidité statique de la machine. Dans ce cas, le modèle (6) trouvé est valable pour toute autre machine du même type ayant une rigidité appartenant à l'intervalle 1514,32 et 3046,55 daN/mm et travaillant dans les intervalles de variation des éléments du régime de coupe adopté.

* Les modèles mathématiques déduits sont nécessaires pour l'établissement des abaques et l'optimisation du processus de coupe. Ils expriment également la relation qualitative et quantitative entre la durée de vie, les éléments du régime de coupe et la rigidité statique de la machine-outil.

NOMENCLATURE

J	: Rigidité [daN/mm]
J_m	: Rigidité de la machine-outil [daN/mm]
J_{ch}	: Rigidité du chariot [daN/mm]
J_p	: Rigidité de la poupée fixe [daN/mm]
J_{cp}	: Rigidité de la contre-poupée [daN/mm]
F_y	: Composante normale de l'effort de coupe [daN]
R_A et R_B	: Réaction de la poupée fixe et de la contre-poupée [daN]

y	: Refoulement (déplacement) des éléments du système, produit par la force F _y [mm]
y_m	: Refoulement total des ensembles de la machine, quelle que soit la position de l'outil le long de l'axe de la pièce [mm]
x	: Distance entre le bec de l'outil et la poupée fixe [mm]
l	: Longueur de la pièce [mm]
T	: Durée de vie (Tenue) de l'outil [min]
τ	: Temps d'usinage [min]
VB_{max}	: Usure en dépouille maximale dans la zone B [mm]
[VB_{max}]	: Usure en dépouille admissible [mm]
KT	: Usure en cratère [mm]
[KT]	: Usure en cratère admissible [mm]
V	: Vitesse de coupe [m/min]
f	: Avance [mm/tr]
d	: Profondeur de passe [mm]
MODOP	: Machine-Outil – Dispositif – Outil – Pièce
γ	: Angle d'attaque [°]
λ	: Angle d'obliquité de l'arête tranchante principale [°]
α	: Angle de dépouille principale [°]
ϕ_r	: Angle de direction principale [°]
ϕ_{r1}	: Angle de direction auxiliaire [°]

REFERENCES

- [1]- Boulanouar L. et Andonov, "Statistical modelling of the machinability of cutting tool steel X40 Cr Mo6-2", *Revue de métallurgie CIT*, n°10, Octobre (1996), pp. 1311-1318.
- [2]- Adler Y.P. et Markova E.V., "Planification des expériences pour rechercher les conditions optimales", Nauka, Moscou (1971).
- [3]- Boulanouar L. *et al.*, "The effect of high speed steel tool lathe geometry on tool life", International Colloquium, évolution of cutting materials, Cercle d'Etude des Métaux, St- Etienne, France, 13 et 14, Novembre (1996).
- [4]- Boulanouar L. *et al.*, "Détermination statique de l'usinabilité d'un acier donné dans le cas du perçage", *Proceeding du 1^{er} Séminaire National de Mécanique*, Guelma les 29 et 30 Novembre (1994).
- [5]- Kovan V., "Technologie de construction mécanique", Edition Mir, Moscou (1970).
- [6]- Popov S., "Coupe des métaux", Technica, Sofia (1975).
- [7]- Boulanouar L., Khéhana M. et Belhadi S., "Comportement à l'usure des plaquettes en carbure métallique P25, face à l'acier XC30", 4^{ème} Séminaire National de Mécanique, E.N.S.E.T. d'Oran, 25 et 26 avril (1995).
- [8]- Weill R., "Les phénomènes d'usure au contact du copeau et de l'outil", *Revue Française de mécanique*, n°18-19, (1971), pp.63-72.
- [9]- Maamar M., Girot F., "Etude de l'usure des outils de coupe lors de l'usinage d'un composite (AS7G06 + 15 % de SiC particulière)", *Mécanique industrielle et matériaux*, *Revue du G.A.M.I.*, Vol. 47, n°3, Septembre (1994).
- [10]- Pomey J., "Phénomènes de mécanique physique qui régissent la coupe des métaux", *Mécanique, Matériaux*, Novembre (1970).
- [11]- Norme Internationale ISO 3685-1977 (F), Tool-life testing with single-point turning tools, 1^{ère} édition, 1977-05-15.
- [12]- Déforge Y., Leynaud A. et Ortis C., "Manipulations et travaux pratiques de métrologie", Dunod (1971). □

