

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**ÉTUDE DE L'USURE D'UN OUTIL DE COUPE
LORS DU TOURNAGE ÉBAUCHE AVEC VARIATION
DE L'AVANCE DE L'ACIER AU CHROME-MOLYBDÈNE 4140**

**CHARLES AUGUSTIN MPAKO ÉMÈNÈ ETHY
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
SEPTEMBRE 1997**

© Charles A. MPAKO ÉMÈNÈ ETHY, 1997.



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

Our file *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33163-6

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

**ÉTUDE DE L'USURE D'UN OUTIL DE COUPE
LORS DU TOURNAGE ÉBAUCHE AVEC VARIATION
DE L'AVANCE DE L'ACIER AU CHROME-MOLYBDÈNE 4140**

présenté par: Charles Augustin MPAKO ÉMÈNÈ ETHY

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. MASCLE Christian, Doctorat ès sciences, président et rapporteur

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CIOBANU Bogdan, M.Sc.A., membre

À tous les BUNA LONG MUNGO.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier ici mon directeur de recherche, M. Marek BALAZINSKI pour ses nombreux conseils, son encadrement, la disponibilité et la confiance dont il a fait preuve à mon égard tout au long de mes études.

Je remercie également l'ensemble du personnel de l'atelier central de fabrication mécanique du département de génie mécanique, pour son étroite collaboration et la bonne ambiance qui règne dans leur milieu de travail. J'aimerais citer ici MM. Gérald LAFORTUNE, chef d'atelier, Louida LALIBERTÉ, technicien, avec qui j'ai réalisé l'ensemble de mes usinages, de même que Gilles SAUVÉ, Clément BISSON, André DUBÉ et Serge LEMIRE.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Madame Carole MASSICOTTE, technicienne au département de métallurgie qui n'a pas hésité un seul instant à m'ouvrir les portes de plusieurs laboratoires de son département et à m'initier à l'utilisation de divers appareils.

J'exprime ma profonde reconnaissance aux autorités de l'université de DOUALA qui m'ont permis de poursuivre cette formation, à la coopération CANADA-CAMEROUN qui a financé les présentes études, et à travers cette

coopération, j'aimerais dire un grand merci à M. Jacques MARTIN pour sa constante sollicitude.

Je remercie M. Clément FORTIN, et à travers lui toute l'équipe de recherche en fabrication de l'École Polytechnique de Montréal pour sa disponibilité à l'égard des étudiants et la dynamique qu'il ne cesse d'insuffler à son équipe.

Je tiens enfin à remercier la compagnie M. BOULAY qui nous a fourni la matière d'œuvre ayant servi aux essais préliminaires.

RÉSUMÉ

L'usure des outils constitue un des nombreux problèmes à résoudre dans la plupart des unités de fabrication mécanique à cause des frais qu'elle génère et des pertes de temps dues aux changements répétés d'outils et aux temps de réglages occasionnés.

L'usinage avec variation de l'avance en cours d'usinage est une approche de solution pour la réduction de l'usure des outils. La méthode consiste à faire varier l'avance dans le but de déplacer le point de frottement maximal entre la face de coupe de l'outil et le copeau et, de provoquer par le fait même le déplacement du point de température maximale sur la face de coupe, donc de provoquer ainsi une répartition de l'usure sur une plus grande surface comme le montrent les travaux de Fortin et al. [FOR90], BAZERUKE [BAZ92], ENNAJIMI [ENN92], SONGMÉNÉ [SON93] et BALAZINSKI et al. [BAL94], [BAL95].

Les travaux antérieurs relatifs à la variation de l'avance en cours d'usinage effectués lors de l'usinage de l'inconel 600 et de l'acier inox 17-4PH et utilisant des cycles de variation linéaire et sinusoïdal arrivent à la conclusion selon laquelle une variation appropriée de l'avance permet d'améliorer l'usure des

outils de 30%. La comparaison des résultats entre l'usinage avec avance variable et celui avec avance constante est faite à volume de matière enlevée identique.

Les connaissances liées à la théorie de l'usinage avec avance variable restent assez limitées. Nous nous sommes donc proposés d'étudier un peu plus profondément quelques phénomènes qui se déroulent dans la zone de coupe pendant l'usinage avec avance variable. Pour cela nous avons étudié le comportement de l'usure des outils pendant le tournage en ébauche de l'acier au chrome molybdène 4140.

Les relations fondamentales suivantes ont donc été testées :

- L'influence de l'avance sur la longueur de contact outil-copeau,
- Le temps de début de formation de l'usure,
- L'influence de l'avance sur la profondeur et la position du centre du cratère,
- Le développement du cratère dans le temps.

Ces expériences de base nous ont permis de développer une nouvelle approche de variation de l'avance basée sur l'utilisation de deux avances seulement, contrairement aux modes de variation (sinusoïdal et linéaire) jusque

là utilisés qui requièrent un nombre élevé d'avances de coupe. Cette approche nous permet ainsi de simplifier considérablement les cycles d'usinage, d'écourter les programmes de commande numérique et de faciliter leur élaboration.

Il se dégage des résultats expérimentaux que les paramètres les plus importants sont les valeurs choisies pour chaque avance et le temps de maintien dans chaque cas. Il n'est pas nécessaire en outre de garder ces temps de maintien identiques pour les cycles utilisés.

Les gains d'usure obtenus en avance variable par rapport à ceux en avance constante atteignent des valeurs de 70 % dans les cas les plus réalistes.

ABSTRACT

Tool life considerably affects production efficiency and is still a preoccupation for many machining manufacturers. Repetitive changes of tools and associated set-up time cause elevated costs. Some research has been made with the objective of improving tool life.

The machining method based on feed variation which has been developed at École Polytechnique de Montréal, is one of the directions taken for increasing tool life. This method consists of varying feed while machining in order to move the point of maximum wear on the tool. This results in less depth and a more regular wear shape on the tool face as shown by Fortin et al. [FOR90], BAZERUKE [BAZ92], ENNAJIMI [ENN92], SONGMÉNÉ [SON93] et BALAZINSKI et al. [BAL94], [BAL95].

Previous works on this method involved machining of Inconel 600 and Stainless steel 17-4PH using linear and sinusoidal cycles. Using proper feed variation, it has been proven that it is possible to increase tool life by 30%. Comparison between constant and variable feed is based on a constant volume of material removed over time.

At the present time, knowledge of the theory of variable feed is very limited, and we do not know exactly what occurs in the cutting zone while varying feed. So, in our latest work, we have studied the behavior of tool wear during the rough turning of a chrome-Molybdenum steel 4140.

In order to enrich our existing knowledge, we proceed using some fundamental experiments. The following relationships were analysed :

- the influence of the feed on the chip contact length,
- the time of the beginning of the wear formation,
- the influence of the feed on the depth and position of the centre of the crater,
- the development of wear in time.

These basic experiments have enabled us to develop a new approach of varying feed during machining. This new method is based on the use of just two levels of feed instead of using a large range of feed as it has been done in the previous works. With this new method, the variation cycles are simpler and the NC programs are shorter.

The results of the experiments show an increase of 70% of the tool wear versus that at constant feed. The main parameters are the value of the two levels of feed and the duration of time at those levels.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	x
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvi
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xx
LISTE DES ANNEXES	xxi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1	
REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
1-1 SUR LA LONGUEUR / SURFACE DE CONTACT OUTIL-COPEAU	4
1-2 EFFET DE L'AVANCE SUR L'USURE	9
1-3 TRAVAUX RELATIFS À LA VARIATION DE L'AVANCE	11
1-3-1 Cycles de variation utilisés	12
1-3-1-1 Cycle linéaire	12
1-3-1-2 Cycle sinusoïdal	13
1-3-2 Résultats	15

CHAPITRE 2

USURE ET DURÉE DE VIE DES OUTILS.....	17
2-1 PRINCIPALES CAUSES D'USURE DES OUTILS.....	18
2-1-1 Usure par adhésion.....	18
2-1-2 Usure par abrasion.....	20
2-1-3 Usure par diffusion.....	21
2-1-4 Usure par oxydation	23
2-1-5 Usure par fatigue	23
2-2 DESCRIPTION DE L'USURE DES OUTILS	24
2-2-1 L'usure en dépouille.....	25
2-2-2 L'usure en cratère	25
2-2-3 L'usure du bec de l'outil	26
2-3 ÉVOLUTION DE L'USURE.....	27
2-4 MESURE DE L'USURE DES OUTILS	28
2-5 CRITÈRES DE DURÉE DE VIE DES OUTILS	29

CHAPITRE 3

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES	33
3-1 MATÉRIAU USINÉ	33
3-2 CHOIX DES CONDITIONS DE COUPE	36
3-3 CHOIX DES OUTILS	37
3-3-1 Choix des pastilles	38
3-3-2 Choix d'un porte-plaquette :	40

3-4 CARACTÉRISTIQUES DE LA MACHINE-OUTIL UTILISÉE.....	41
3-5 MATÉRIEL UTILISÉ	43
CHAPITRE 4	
DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS OBTENUS.....	44
4-1 ESSAIS D'USINAGE EN AVANCE CONSTANTE	46
4-1-1 Mesure de la longueur de contact outil-copeau en fonction de l'avance..	46
4-1-2 Mesure du temps de début de formation de l'usure.	48
4-1-3 Usure en fonction de l'avance et détermination du centre du cratère.	50
4-1-4 Calcul du volume de métal enlevé par unité de temps.....	54
4-1-5 Mesure de l'usure en fonction du temps	55
4-1-6 Mesure de l'usure en fonction de l'avance à volume constant	57
4-2 ESSAIS D'USINAGE EN AVANCE VARIABLE	61
4-3 MESURE DE L'USURE EN FONCTION DU VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ .	70
CHAPITRE 5	
CONSÉQUENCES DE LA VARIATION DE L'AVANCE SUR LA QUALITÉ DE LA PIÈCE.....	75
5-1 CONTRAINTES INDUITES DANS LA PIÈCE.....	75
5-2 INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'AVANCE SUR L'ÉTAT DE SURFACE DE LA PIÈCE.....	80
CHAPITRE 6	
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	85
6-1 CONFIRMATION DES NOTIONS DE BASE	85

6-2 TRAVAUX EFFECTUÉS	86
6-2-1 Avance constante	86
6-2-2 Avance variable.....	86
6-3 RECOMMANDATIONS :.....	88
BIBLIOGRAPHIE.....	89
ANNEXES	98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Composition chimique du matériau d'essai	34
Tableau 3.2 Compositions chimiques du 4140 selon certains catalogues.	34
Tableau 3.3 Conditions de coupe préconisées pour l'usinage du 4140.	36
Tableau 3.4 Gamme des vitesses de rotation et d'avances du tour BRIDGEPORT ...	42
Tableau 4.1 Tableau de mesures : longueur de contact en fonction de l'avance.	46
Tableau 4.2 Tableau de mesures : temps de début de formation de l'usure.	48
Tableau 4.3 Tableau de mesures : usure en fonction de l'avance - T = 10 minutes. ..	51
Tableau 4.4 Tableau de mesures : évolution de l'usure pour l'avance 0,381 mm/tr....	55
Tableau 4.5 Tableau de mesures : usure en fonction de l'avance - volume constant.	58
Tableau 4.6 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 45/30.	62
Tableau 4.7 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 20/10.	64
Tableau 4.8 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 180/60.	66
Tableau 4.9 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 150/150/150. ...	67
Tableau 4.10 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 45/30/10.	69
Tableau 4.11 Longueurs usinées.....	70
Tableau 4.12 Mesure de l'usure en fonction du volume de copeau.	71
Tableau 4.13 Temps moyens d'usinage (N = 375 tr/mn).	73
Tableau 5.1 Tableau de mesures : contraintes provoquées par l'avance.	78
Tableau 5.2 Contraintes induites dans la zone de variation de l'avance.....	79

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 1.1</u> Influence de l'avance sur la position de l'axe du cratère. [BLA55]	9
<u>Figure 1.2</u> Modèle linéaire de variation d'avance. [SON93]	12
<u>Figure 1.3</u> Modèle sinusoïdal de variation d'avance. [SON93].....	13
<u>Figure 1.4</u> Schématisation du taux d'usure en fonction du temps. [ENN92]	14
<u>Figure 1.5</u> Étude comparative : avance constante vs avance variable. [SON93].....	15
<u>Figure 2.1</u> Illustration de l'usure par adhésion. [KAL95].....	19
<u>Figure 2.2</u> Illustration du phénomène d'usure abrasive. [KAL95].....	20
<u>Figure 2.3</u> Illustration de l'usure par diffusion.....	21
<u>Figure 2.4</u> Modèle de FICK de l'usure par diffusion. [BHA68].....	22
<u>Figure 2.5</u> Illustration de l'usure par oxydation.....	23
<u>Figure 2.6</u> Illustration de l'usure par fatigue.	24
<u>Figure 2.7</u> Principales formes d'usure des outils.....	24
<u>Figure 2.8</u> Évolution de l'usure dans le temps.....	27
<u>Figure 2.9</u> Critères d'usure des outils.....	28
<u>Figure 2.10</u> Courbe de TAYLOR - durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse.....	31
<u>Figure 3.1</u> Influence de l'angle de coupe.	38
<u>Figure 3.2</u> Éléments de calcul de la longueur de pastille.	39
<u>Figure 3.3</u> Mode d'action de l'outil choisi.....	41
<u>Figure 4.1</u> Longueur de contact en fonction de l'avance.....	47
<u>Figure 4.2</u> Usure en fonction du temps - avance 0,254 mm/tr.	49

<u>Figure 4.3</u> Usure en fonction du temps - avance 0,508 mm/tr.	49
<u>Figure 4.4</u> Profondeur du cratère KT en fonction de l'avance - T = 10 minutes.	51
<u>Figure 4.5</u> Largeur (KB) et centre du cratère (KM) en fonction de l'avance - T = 10 minutes.	52
<u>Figure 4.6</u> Profilogrammes obtenus pour différents cas d'avances. T = 10 mn	52
<u>Figure 4.7</u> Illustration d'une pièce de tournage.	54
<u>Figure 4.8</u> Profondeur du cratère en fonction du temps - avance 0,381 mm/tr.	56
<u>Figure 4.9</u> Largeur (KB) et centre du cratère (KM) en fonction du temps - avance 0,381 mm/tr.	56
<u>Figure 4.10</u> Superposition des profilogrammes obtenus (avance 0,381mm/tr)	57
<u>Figure 4.11</u> Profondeur du cratère en fonction de l'avance - volume constant.	58
<u>Figure 4.12</u> Largeur (KB) et centre du cratère (KM) en fonction de l'avance - Volume constant.	59
<u>Figure 4.13</u> Superposition des profils d'usure pour plusieurs avances à volume constant.	59
<u>Figure 4.14</u> Évolution de l'usure dans le temps.....	60
<u>Figure 4.15</u> Cycle de variation de l'avance - cycle 45/30.	62
<u>Figure 4.16</u> Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycle 45/30.	63
<u>Figure 4.17</u> Cycle de variation de l'avance - cycle 20/10.	64
<u>Figure 4.18</u> Profilogrammes de la face de coupe -avance constante vs cycle 20/10..	64
<u>Figure 4.19</u> Cycle de variation de l'avance - cycle 180/60 (séquence croissante).	65
<u>Figure 4.20</u> Cycle de variation de l'avance - cycle 180/60 (séquence décroissante).	66
<u>Figure 4.21</u> Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycle 180/60.	66

<u>Figure 4.22</u> Cycle de variation de l'avance - cycle 150/150/150.	67
<u>Figure 4.23</u> Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycle 150/150/150.	68
<u>Figure 4.24</u> Cycle de variation de l'avance - cycle 45/30/10.	68
<u>Figure 4.25</u> Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycle 45/30/10.	69
<u>Figure 4.26</u> Évolution de la profondeur du cratère en fonction de la quantité de métal enlevé.	73
<u>Figure 5.1</u> Mesure des contraintes induites : différents angles d'inclinaison du faisceau.	77
<u>Figure 5.2</u> Contraintes en fonction de l'avance.	80

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AFNOR : Association Française de NORmalisation

ANSI : American National Standard Institute

CN : Commande Numérique

CPS : Count Per Second

IPR : Inch Per Revolution

ISO : International Standard Organisation

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I

EXEMPLE DE PROGRAMME UTILISE EN AVANCE CONSTANTE 98

ANNEXE II

EXEMPLE DE PROGRAMME UTILISE EN AVANCE VARIABLE 99

ANNEXE III

EXEMPLE DE RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES CONTRAINTES 100

INTRODUCTION

Dans le domaine de la production industrielle, l'usure des outils est un des problèmes fondamentaux. Elle a une influence sur la précision, le fini de la surface usinée et entraîne des frais élevés à cause des temps morts dus aux changements répétés d'outils, pour achat renouvelé ou pour affûtage.

De plus, les industries de production manufacturière telles que celles de l'aéronautique et de l'automobile, à cause des exigences de plus en plus fortes qui ont trait à la fiabilité et à la sécurité, requièrent pour leurs différents produits, des matériaux ayant des caractéristiques mécaniques particulières. Parmi ces matériaux, on peut citer les alliages à base de nickel tels que l'Inconel et l'acier inoxydable reconnus comme difficiles à usiner. L'usinage de ces matériaux s'accompagne d'une usure rapide de l'outil de coupe.

Toutes ces raisons ont conduit de nombreux chercheurs à s'intéresser non seulement aux différents facteurs qui sont à l'origine de l'usure des outils, mais également à rechercher les voies et les moyens pour réduire celle-ci; c'est le cas des travaux présentés dans ce mémoire basés sur la variation de l'avance en cours d'usinage.

Des travaux précédents, relatifs à l'influence de la variation de l'avance en cours d'usinage, effectués par Fortin et al. [FOR90], BAZERUKE [BAZ92], ENNAJIMI [ENN92], SONGMÉNÉ [SON93] et BALAZINSKI et al. [BAL94], [BAL95] et bien d'autres ont montré qu'en faisant varier de façon judicieuse l'avance en cours d'usinage, on peut améliorer de 30% la durée de vie des outils de coupe.

Le présent travail s'inscrit dans la suite des travaux ci-dessus mentionnés. Mais les travaux effectués jusqu'à ce jour ne se sont pas fondamentalement intéressés aux différents phénomènes qui se passent dans la zone de coupe lorsqu'on fait varier l'avance.

Nous nous sommes proposés dans le cadre de ce mémoire d'étudier le comportement de l'usure des outils, à l'interface outil-copeau, aussi bien en avance constante qu'en avance variable, lors de l'usinage ébauche de l'acier au Chrome - Molybdène 4140 (42CD4 d'après la norme AFNOR).

Ceci nous permettra de mieux expliquer la théorie de l'avance variable et de mettre en place un modèle de variation beaucoup plus réaliste que ceux développés jusque-là.

Les expériences effectuées nous ont permis d'observer le comportement de l'usure dans le temps, de comparer son évolution en fonction de plusieurs avances et de la quantité de matière enlevée, mais aussi de mettre sur pied une nouvelle approche de variation de l'avance de coupe en cours d'usinage en vue d'améliorer la durée de vie des outils.

Le présent mémoire comporte six chapitres. Le chapitre un fait un tour d'horizon des différents travaux qui sont à la base de l'usinage avec variation de l'avance en cours d'usinage, mais aussi des premiers travaux ayant trait à cette technique. Le chapitre deux quant à lui fait un bref rappel du phénomène d'usure, des différentes formes d'usure régulièrement observées et des facteurs qui en sont la cause. Le chapitre trois traite des conditions expérimentales, du choix des différents équipements et matériels utilisés tout au long des travaux. Le chapitre quatre retrace tous les essais effectués et les résultats observés. Le chapitre cinq étudie certaines conséquences qui peuvent résulter de l'utilisation de la technique de variation de l'avance en cours d'usinage, c'est-à-dire les contraintes induites dans la pièce dans la zone de changement d'avance, et les conséquences sur le fini de surface. Enfin, le chapitre six tire les conclusions qui découlent de nos travaux et formule des recommandations pour des travaux futurs ou débouchés potentiels.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1-1 SUR LA LONGUEUR / SURFACE DE CONTACT OUTIL-COPEAU

Ibrahim SADEK et al [SAD93] définissent la longueur de contact outil-copeau comme étant la longueur de contact entre l'outil et le copeau dans la direction d'écoulement du copeau.

Divers travaux rencontrés dans la littérature pertinente [SAD93], [SAD95] et [TAK58] montrent que la longueur ou la surface de contact outil-copeau constitue un paramètre important de contrôle lors de l'usinage des métaux.

H. TAKEYAMA et al. [TAK58] montrent que la surface de contact outil-copeau a une influence sur l'angle de cisaillement et bien d'autres caractéristiques de coupe telles que les efforts de coupe, la rugosité de surface, la durée de vie de l'outil, la stabilité de l'outil et la température de l'outil.

TAKEYAMA et al [TAK58] montrent également que la force de coupe tangentielle (T) sur la face de coupe est proportionnelle à la surface de contact outil-copeau,

$$T = C + f \times A \quad (\text{Éqn 1.1})$$

avec f = coefficient de proportionnalité,

A = surface de contact outil-copeau,

C = Force tangentielle sur la face de coupe lorsque $A = 0$.

LENTZ et al. [LEN76] montrent que l'usure en cratère dépend directement de la longueur de contact entre l'outil et le copeau. Ils établissent que plus la longueur de contact est grande, plus le taux d'usure est élevé.

MONDALSKI [MON78] note lors de l'étude de l'usure par fissuration thermique qu'il est possible d'améliorer la durée de vie de l'outil en faisant varier pendant l'usinage, l'aire de contact du copeau sur la face de coupe de l'outil.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour améliorer l'usinage des métaux, l'objectif des concepteurs d'outils étant en général de produire des copeaux acceptables

et de réduire les forces de coupe. La plupart d'entre elles conduisent à la réduction de la surface de contact outil-copeau.

Nous pouvons citer :

- l'utilisation d'un fluide de coupe qui permet de séparer le copeau de la face de coupe,
- l'utilisation d'un angle de coupe plus grand crée une surface de contact plus petite,
- l'usinage à haute vitesse de coupe [SAD93] réduit la surface de contact par une localisation de l'effort de cisaillement due à une déformation plastique adiabatique causée par une vitesse de coupe plus grande.

Les facteurs qui influencent la longueur de contact outil-copeau sont:

- les paramètres de coupe
 - a) lorsque la vitesse de coupe augmente la longueur de contact décroît,
 - b) la longueur de contact augmente avec l'augmentation de la profondeur de coupe et de l'avance.
- la géométrie de l'outil de coupe notamment l'angle de coupe et le rayon du bec de l'outil,

- le matériau d'outil, le matériau de revêtement et le matériau usiné : la longueur de contact est plus grande avec un outil non revêtu qu'avec un outil revêtu. De plus la longueur de contact décroît avec l'augmentation du pourcentage en carbone dans la pièce.
- le fluide de coupe utilisé,
- le mode d'usinage utilisé.

Par contre, la longueur de contact outil-copeau peut avoir une grande influence sur:

- ♦ la durée de vie de l'outil : une réduction de la longueur de contact, par exemple par l'utilisation des outils à contact réduit, diminue de façon significative l'usure en dépouille,
- ♦ la forme des copeaux,
- ♦ la température dans la zone de coupe,
- ♦ les forces de coupe,
- ♦ la stabilité de l'outil,
- ♦ le fini de surface, etc.

Dans la conclusion à leurs travaux, SADIK et al. [SAD93] montrent que parmi les différents paramètres de coupe, l'avance est celui qui a la plus grande influence sur la longueur de contact outil-copeau. Ils montrent également que

l'usure en dépouille est fonction de la longueur de contact outil-copeau et du temps d'engagement de l'outil. Une réduction de la longueur de contact outil-copeau réduit à la fois l'usure en dépouille, la force de coupe tangentielle et la température à l'interface outil-copeau. Ils font toutefois remarquer que si la longueur de contact est excessivement réduite (plus de 65%) on observe plutôt les effets contraires.

Ces deux conclusions rejoignent celles de V. SONGMENE [SON93] et expliquent en partie les résultats de ses travaux sur la variation d'avance en cours d'usinage.

A la lumière de tout ce qui précède, nous pouvons dire que la longueur de contact outil-copeau constitue effectivement un paramètre de contrôle très important en usinage, sa maîtrise pouvant permettre d'avoir un assez bon contrôle sur plusieurs phénomènes de coupe et plus particulièrement sur l'usure des outils de coupe qui est la préoccupation du présent travail.

1-2 EFFET DE L'AVANCE SUR L'USURE

Plusieurs auteurs dont BLANPAIN [BLA55] et SADIK [SAD93] ont montré dans leurs études que parmi les paramètres de coupe, l'avance et la vitesse de coupe sont ceux qui ont le plus d'influence sur l'usure des outils.

En effet, lorsque les avances augmentent, la distance de l'arête de coupe à l'axe du cratère s'agrandit. Le cratère étant produit par le frottement continu du copeau sur la face de coupe de l'outil, les fortes avances protègent mieux l'arête de coupe que les faibles [BLA55].

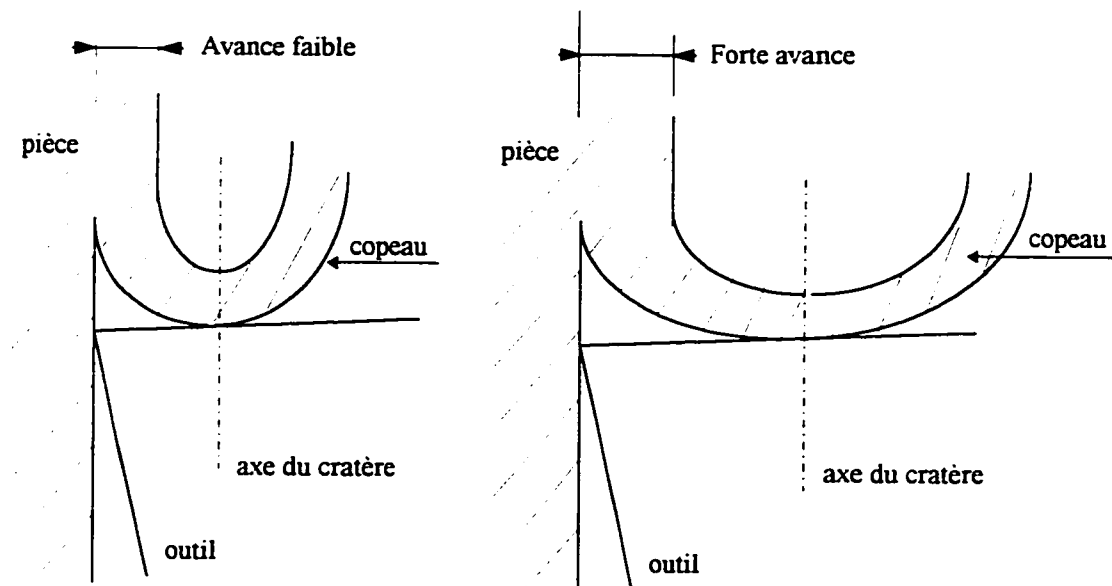


Figure 1.1 Influence de l'avance sur la position de l'axe du cratère. [BLA55]

OPITZ et WEBER ont établi que la position de l'axe du cratère (KM) reste équidistante de l'arête de l'outil, et que la situation du cratère n'est pas influencée par le temps de coupe [BLA55].

$$KM(t) = C \quad (\text{Éqn 1.2})$$

JEMIELNIAK quant à lui observe qu'il y a une différence substantielle sur le développement de l'usure en cratère lorsqu'on usine avec des séquences différentes d'avances. Il observe également que la distance entre l'arête de coupe et le point le plus profond du cratère dépend de la séquence utilisée.

CHAO et al [CHA67] montrent que pendant l'usinage de l'acier 1018 avec une vitesse de coupe unique et une séquence d'avance, une augmentation de l'avance conduit à une augmentation de la température aussi bien à l'interface outil-copeau que sur la face de coupe.

BROWN [BRO83] montre quant à lui que la longueur de contact outil-copeau varie avec l'avance et par conséquent, la zone de température la plus élevée. Ceci donne une relation directe entre l'avance et la position de la pointe de température. Nous verrons plus tard dans le chapitre consacré à l'étude du

phénomène d'usure quelle est l'influence de la température sur la formation de celle-ci.

Les conclusions relatives aux travaux sur la longueur de contact outil-copeau, l'influence de l'avance sur cette longueur et par conséquent sur la position du centre du cratère sont la base et le fondement des travaux sur la variation de l'avance en cours d'usinage en vue d'améliorer la tenue des outils de coupe.

1-3 TRAVAUX RELATIFS À LA VARIATION DE L'AVANCE

Jusqu'au début des années 1990, les travaux reliés à la variation de l'avance afin de déplacer le centre du cratère ont été faits de façon interrompue, avec arrêt de la machine. Les tous premiers travaux portant sur la variation de l'avance en cours d'usinage ont eu lieu à l'École Polytechnique de Montréal. Ils ont été menés par R. BAZERUKE [BAZ92], Elmekki ENNAJIMI [ENN92] et Victor SONGMÉNÉ [SON93] sous la conduite du professeur Marek BALAZINSKI. Ces travaux utilisent des modèles linéaire et sinusoïdal comme modèles de variation de l'avance.

1-3-1 Cycles de variation utilisés

1-3-1-1 Cycle linéaire

L'équation du modèle linéaire est la suivante :

$$a(t) = a_m \left[1 + \frac{a\%}{100} \left\{ 2 \left(\frac{t}{P} - E \left(\frac{t}{P} \right) \right) - 1 \right\} \right] \quad (\text{Éqn 1.3})$$

où E est la fonction partie entière, t le temps de coupe, P la période de variation, a_m l'avance moyenne et $a\%$ l'amplitude de variation de l'avance,

$$a\% = 100 \frac{a_{\max} - a_{\min}}{a_m}$$

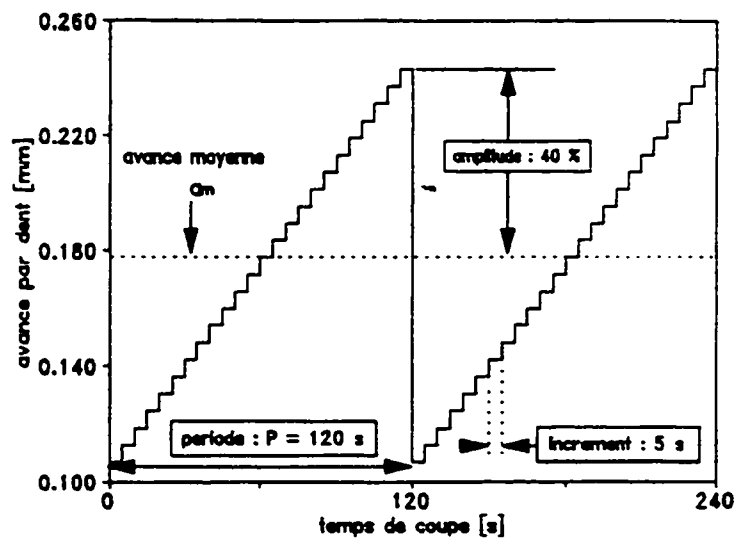


Figure 1.2 Modèle linéaire de variation d'avance. [SON93]

1-3-1-2 Cycle sinusoïdal

L'équation du modèle sinusoïdal est la suivante :

$$a(t) = a_m \left[1 + \frac{a\%}{100} \sin \left(2\pi \frac{t}{p} + \frac{3\pi}{2} \right) \right] \quad (\text{Éqn 1.4})$$

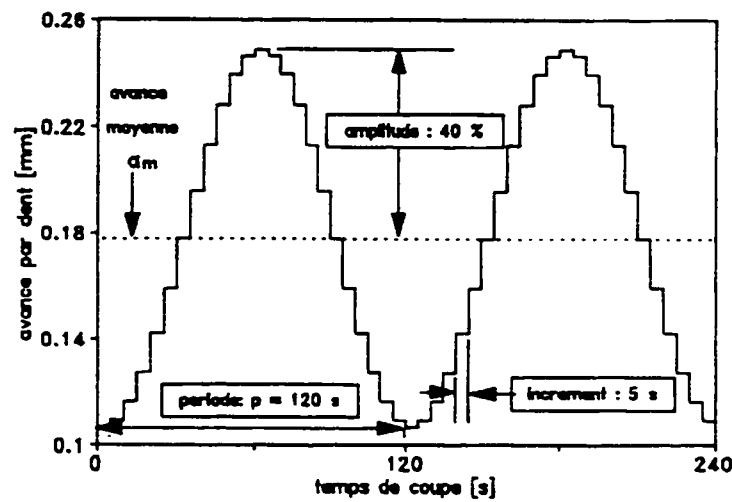


Figure 1.3 Modèle sinusoïdal de variation d'avance. [SON93]

ENNAJIMI [ENN92], utilise la figure 1.4 ci-dessous pour illustrer l'évolution du taux d'usure en avance variable.

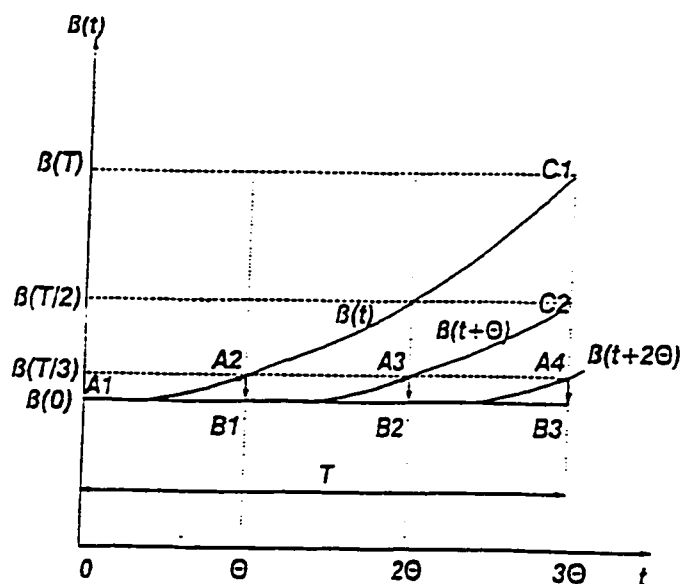


Figure 1.4 Schématisation du taux d'usure en fonction du temps. [ENN92]

- La courbe A_1C_1 représente le taux d'usure $\beta(t)$ en avance constante.
- En avance variable, le taux d'usure serait représenté par :
 - ♦ la courbe A_1A_2 pour le premier incrément de temps θ
 - ♦ la courbe B_1A_3 pour le deuxième incrément de temps $(2\theta - \theta)$ après changement de l'avance,
 - ♦ la courbe B_2A_4 pour le troisième incrément de temps $(3\theta - 2\theta)$, après le deuxième changement de l'avance.

En avance variable, le taux d'usure ne dépasserait donc pas la valeur $\beta(T/n)$, n étant le nombre d'incrément.

1-3-2 Résultats

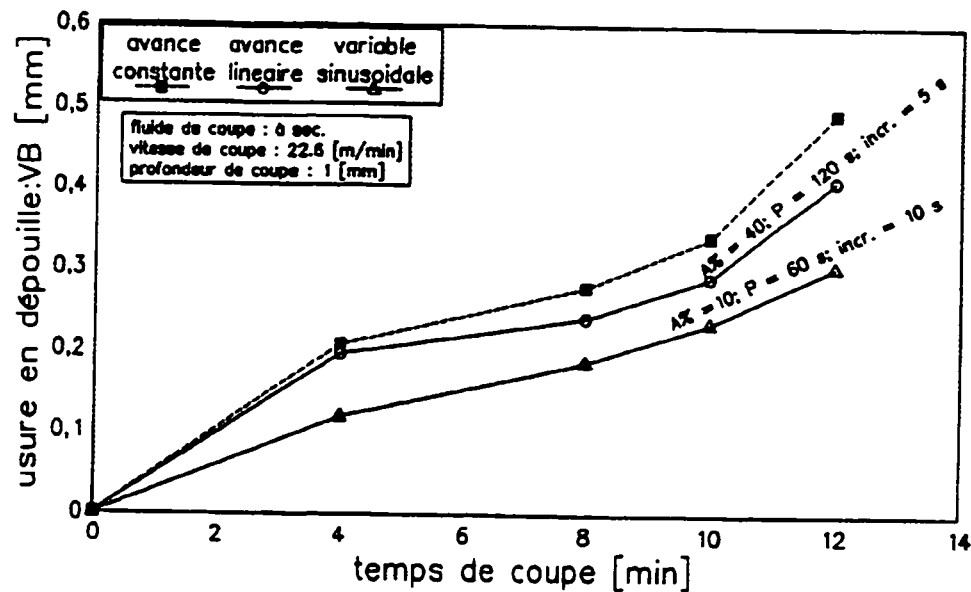


Figure 1.5 Étude comparative : avance constante vs avance variable. [SON93]

Ces travaux arrivent tous à la conclusion selon laquelle une variation appropriée de l'avance améliore la durée de vie de l'outil de près de 30% par rapport à celle observée en avance constante. Les paramètres les plus influents étant l'amplitude de variation de l'avance et l'incrément de temps entre deux avances.

Les conclusions des résultats des différents travaux mentionnés aux différents paragraphes de ce chapitre nous seront fort utiles pour la conduite de nos expériences.

Les premiers travaux relatifs à la variation de l'avance en cours d'usinage ne se sont pas fondamentalement intéressés aux phénomènes qui ont lieu pendant l'usinage. Afin d'enrichir la connaissance liée à la théorie de l'usinage avec avance variable, nous nous proposons d'étudier plus profondément les phénomènes qui se déroulent dans la zone de coupe pendant la variation de l'avance. Pour cela nous allons étudier le comportement de l'usure des outils pendant le tournage en ébauche de l'acier au chrome molybdène 4140 avec pour objectifs :

- d'enrichir la connaissance sur la théorie de l'usinage avec avance variable,
- d'améliorer les cycles de variation.

CHAPITRE 2

Ce chapitre fait un bref rappel du phénomène d'usure des outils de coupe. Il est présenté les différentes formes d'usure régulièrement observées et les principaux facteurs qui en sont la cause.

USURE ET DURÉE DE VIE DES OUTILS

La norme ISO 3685-1977 définit l'usure des outils comme étant tout changement lors de la coupe, de la forme de l'outil par rapport à sa forme initiale résultant de la perte progressive de matériau de l'outil ou de déformation.

L'usure des outils a une très grande importance, tant du point de vue technologique qu'économique, parce qu'elle peut avoir une influence considérable sur la qualité des pièces et des ensembles mécaniques. La façon dont l'usure des outils a lieu, la partie de l'outil qui s'use le plus et les conséquences pratiques de l'usure des outils varient avec les conditions de coupe et la qualité des spécifications des parties usinées.

L'usure des outils est en général un processus graduel. Le taux d'usure des outils dépend essentiellement des matériaux d'outils et des pièces, de la géométrie des outils, des paramètres de coupe (Vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe), des fluides de coupe utilisés et des caractéristiques des machines outils.

2-1 PRINCIPALES CAUSES D'USURE DES OUTILS

L'usure des outils est souvent classifiée selon les causes qui la provoquent. Les mécanismes d'usure les plus communément rencontrés sont l'usure par adhésion et l'usure par abrasion. Toutefois, les importantes élévations de températures et de contraintes observées sur l'outil pendant les opérations d'usinage influencent la nature de ces deux mécanismes de base, mettant ainsi en jeu d'autres processus : l'usure par diffusion, par oxydation, par fatigue, par érosion, etc. Les différentes causes d'usure sont décrites dans les paragraphes ci-après:

2-1-1 Usure par adhésion

Les surfaces de l'outil et du copeau ont une micro-géométrie qui comporte des aspérités. A cause des efforts de coupe tangentiels, il se forme des jonctions

(micro-soudures) entre l'outil et le copeau qui sont rompues en continu grâce au mouvement relatif outil-copeau. Des fragments de copeau viennent adhérer sur l'outil, formant ainsi une arête rapportée. Si ces jonctions sont moins résistantes que le métal voisin, les ruptures s'effectuent là où elles se forment: l'usure est alors négligeable. Par contre si ces jonctions sont à la fois plus résistantes que le métal voisin et la surface du matériau de l'outil, les ruptures se produisent en majorité dans la masse du copeau et pour quelques uns à la surface de l'outil.

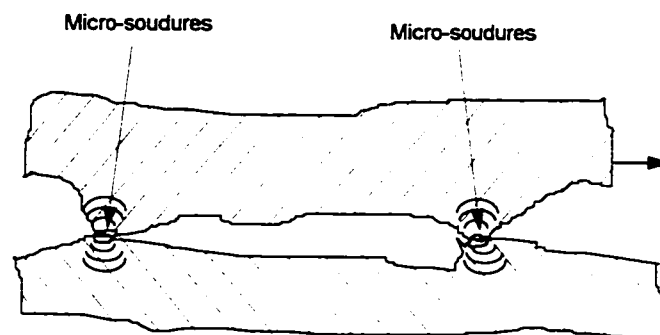


Figure 2.1 Illustration de l'usure par adhésion. [KAL95]

Ce type d'usure a surtout tendance à se produire lors de l'usinage des matériaux tels que l'aluminium à faible vitesse ou l'acier.

On peut réduire l'usure par adhésion en:

- choisissant des matériaux qui ne forment pas de liaisons adhésives fortes,
- choisissant un matériau de l'outil beaucoup plus dur que celui de la pièce,

- utilisant des matériaux qui s'oxydent facilement: des films d'oxydes peuvent agir comme un film protecteur,
- appliquant des revêtements durs sur la surface de l'outil.

2-1-2 Usure par abrasion

Elle est causée par le glissement d'une surface dure et rugueuse - ou une surface contenant des particules anguleuses dures - sur une autre surface.

Elle se manifeste par l'arrachement sur la face de l'outil de micro-copeaux occasionnant ainsi des sillons ou des rayures sur la pièce.

La résistance à l'usure par abrasion est directement proportionnelle au nombre, à la grosseur, à la distribution et à la dureté des particules du matériau usiné.

L'usure par abrasion peut être réduite par une augmentation de la dureté des matériaux d'outils.

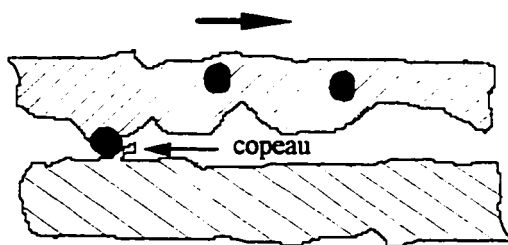


Figure 2.2 Illustration du phénomène d'usure abrasive. [KAL95]

Les rayures longitudinales sur la surface sont un indicateur d'une usure par abrasion.

2-1-3 Usure par diffusion

Elle a lieu lorsqu'il y a un contact intime entre le matériau usiné et le matériau d'outil. Elle est intimement liée à un phénomène d'élévation de température dans la zone de coupe. Le taux de diffusion croît de façon exponentielle avec l'augmentation de la température. Il se passe des mouvements d'atomes des zones de grande concentration vers celles de moindre concentration, ceci a été proposé comme étant la principale cause de la formation du cratère lors de l'usinage à des vitesses de coupe élevées.

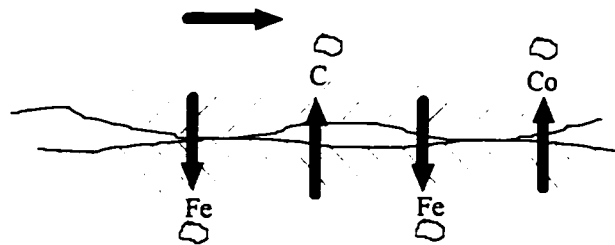


Figure 2.3 Illustration de l'usure par diffusion.

Le phénomène d'usure par adhésion est modélisé d'après les lois de FICK [Appendix A [BHA68]] :

Première loi de FICK :
$$\frac{\partial m}{\partial C} = J = - \frac{\partial C}{\partial x}$$

Deuxième loi de FICK :
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial D}{\partial X} \cdot \frac{\partial C}{\partial X} + D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}$$

avec : D = coefficient de diffusion = $D_o e^{-\frac{Q_o}{RT}}$

Q_o = énergie d'activation

T = température absolue

D_o = facteur de fréquence

R = constante des gaz parfaits

m = masse de matière déplacée

J = taux d'écoulement de matière

C = concentration de matière d'outil dans la pièce

t = temps.

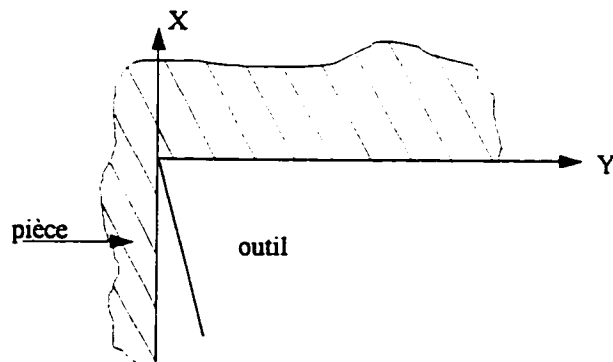


Figure 2.4 Modèle de FICK de l'usure par diffusion. [BHA68]

2-1-4 Usure par oxydation

Aussi appelée usure par corrosion ou usure chimique, elle est causée par les réactions chimiques ou électrochimiques du matériau avec le milieu environnant. On peut la réduire en choisissant des matériaux qui résistent aux attaques du milieu environnant ou en réduisant les températures à l'interface de contact.



Figure 2.5 Illustration de l'usure par oxydation.

2-1-5 Usure par fatigue

Elle est due à la fatigue superficielle du matériau et aux effets thermiques. Comme nous pouvons le constater, la température de coupe joue un rôle très important dans l'usure des outils de coupe. Ceci a fait énoncer la loi suivante à Edward HERBERT : **“L'usure de l'outil n'est fonction que de la température de coupe”**. En effet, tous les phénomènes physiques et chimiques qui sont à la

base de l'usure des outils sont étroitement liés à la température (frottement, abrasion, corrosion, diffusion).

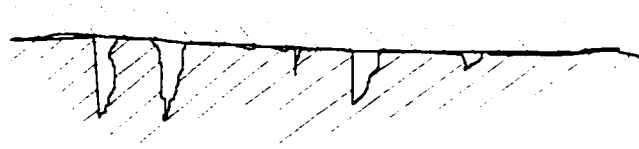


Figure 2.6 Illustration de l'usure par fatigue.

2-2 DESCRIPTION DE L'USURE DES OUTILS

Les outils de coupe sont principalement sujets à trois types d'usure: l'usure en dépouille, l'usure en cratère et l'usure du bec de l'outil. Il est à noter que tous les types d'usure n'apparaissent pas toujours en même temps et que généralement, un seul type va être prédominant [COO73]. Dans la pratique, l'usure en dépouille et l'usure en cratère sont les plus importants.

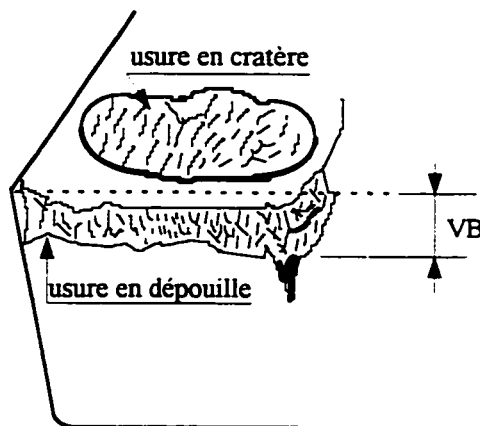


Figure 2.7 Principales formes d'usure des outils.

2-2-1 L'usure en dépouille

Comme son nom l'indique, elle a lieu sur la face de dépouille de l'outil et elle est attribuée au frottement de l'outil le long de la surface usinée. L'usure en dépouille apparaît surtout lors de l'usinage à basses vitesses c'est-à-dire lors de l'usinage à faible température [COO73] et lors de l'usinage de matériaux ductiles ou ceux renfermant des carbures. A des vitesses de coupe élevées, l'usure en dépouille est à peu près uniforme après le taux d'usure initial. Lorsque l'usure en dépouille est uniforme, elle est facilement mesurable de façon optique en terme de sa longueur.

2-2-2 L'usure en cratère

Elle est encore appelée usure de la face de coupe. Elle survient suite au frottement intense du copeau sur la face de coupe. Des particules de matière s'enlèvent continuellement sur la face de coupe formant ainsi une cuvette plus ou moins profonde appelée cratère.

Les facteurs qui influencent le plus ce type d'usure sont la température à l'interface outil-copeau, les contraintes de contact et l'affinité chimique entre le matériau d'outil et le matériau usiné.

Lors de l'usinage à faibles vitesses de coupe, l'usure en cratère est insignifiante devant l'usure en dépouille. Par contre à grandes vitesses de coupe, étant donné que l'usure en cratère croît avec la température, elle est fortement prédominante.

Le point le plus profond du cratère apparaît approximativement au milieu de l'interface de contact outil-copeau qui correspond au point où la température est la plus élevée sur la face de coupe et le rayon de courbure du cratère correspond au rayon du copeau [COO73]

L'usure en cratère est plus importante pour les outils en métal dur que pour les outils en acier rapide ou en céramique.

2-2-3 L'usure du bec de l'outil

Elle survient sur le bec de l'outil ou à la pointe de l'outil de coupe par suite du frottement du bec sur le métal en voie d'usinage. On la définit souvent comme étant une continuation de l'usure en dépouille. Elle se traduit par une mauvaise qualité du fini de surface de la pièce. L'usure du bec de l'outil est généralement faible, c'est pourquoi elle est souvent négligée dans la plupart des études [BLA55].

2-3 ÉVOLUTION DE L'USURE

L'usure en dépouille et en cratère des outils présentent une évolution caractéristique en fonction du temps de coupe. Ces usures se développent en trois phases :

- phase 1 : usure rapide, c'est la phase d'adaptation de la plaquette ;
- phase 2 : évolution lente et régulière, c'est la phase de stabilisation, cette zone est plus ou moins grande dépendamment des conditions de coupe utilisées, et plus particulièrement de la valeur de l'avance ;
- phase 3 : usure accélérée conduisant à l'effondrement de l'outil.

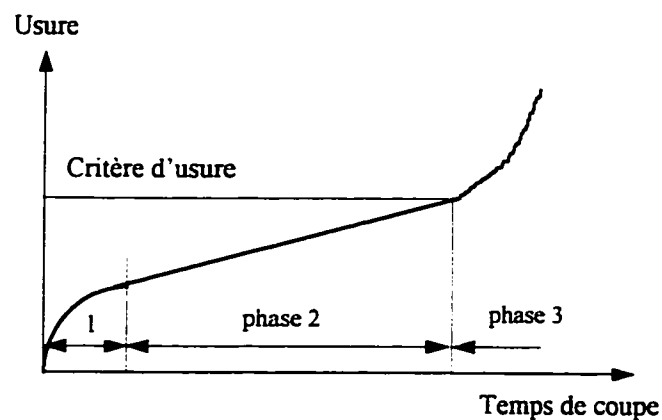


Figure 2.8 Évolution de l'usure dans le temps.

2-4 MESURE DE L'USURE DES OUTILS

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour observer et mesurer l'usure des outils. Le choix d'une méthode donnée dépend du degré de précision désiré et des contraintes physiques sur le système.

La méthode la plus utilisée est visuelle ou tactile. La mesure des changements dimensionnels, le profilomètre ou la pesée sont des méthodes plus précises.

Trois grandeurs sont nécessaires pour déterminer complètement l'usure : la largeur de l'usure en dépouille (VB), la profondeur du cratère (KT) et la distance du centre du cratère à l'arête de l'outil (KM). (figure 2.5)

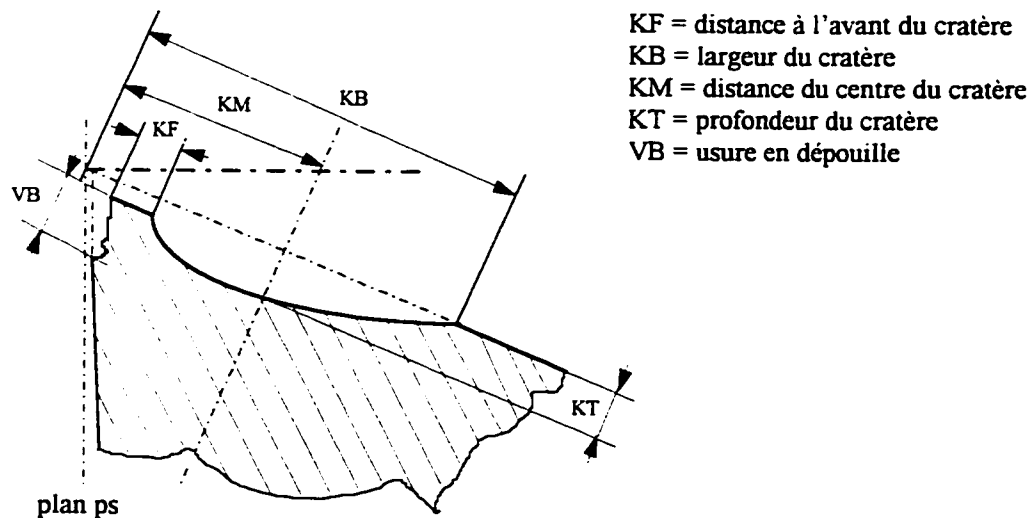


Figure 2.9 Critères d'usure des outils.

Les dimensions du cratère ont une importance particulière, puisqu'elles ont pour conséquence l'affaiblissement continu de l'arête coupante par suite de l'affaiblissement de la section située sous l'arête de coupe.

2-5 CRITÈRES DE DURÉE DE VIE DES OUTILS

Dans la section précédente, nous avons passé en revue les différents types d'usure qui peuvent se développer lors de l'usinage. Nous nous demandons donc maintenant quelles peuvent en être les conséquences.

L'usure des outils affecte considérablement la qualité des surfaces usinées, la précision dimensionnelle et elle a une influence sur les coûts des opérations d'usinage.

Dans Machining Data Handbook [MDH] la durée de vie de l'outil est définie comme étant le temps, en minutes, pendant lequel on atteint une valeur donnée de l'usure dans des conditions de coupe bien définies.

D'un point de vue purement fonctionnel, un outil peut être maintenu en service aussi longtemps qu'il continue à produire des pièces de façon satisfaisante. Toutefois, un outil peut être retiré prématurément en tenant compte de

certaines considérations économiques. Suivant les contextes, la durée de vie des outils aura une signification différente et le taux d'usure également aura une signification différente selon les personnes.

En 1907, TAYLOR montra que la relation entre la vitesse de coupe et la durée de vie de l'outil peut être exprimée de la façon suivante :

$$V_c T^n = C \quad (\text{Éqn 2.1})$$

V_c étant la vitesse de coupe et T la durée de vie de l'outil, C et n sont des constantes qui dépendent de la nature des matériaux de la pièce et de l'outil.

La loi de TAYLOR ainsi énoncée permet de modifier la valeur de la vitesse de coupe en fonction de la vie souhaitée ou de calculer l'influence d'un changement de vitesse sur la durée d'une arête coupante.

On utilise alors la relation :

$$V_1 T_1^n = V_2 T_2^n = C \quad (\text{Éqn 2.2})$$

d'où l'on peut tirer :

$$\text{soit :} \quad V_2 = V_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^n \quad (\text{Éqn 2.3})$$

ou :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Éqn 2.4})$$

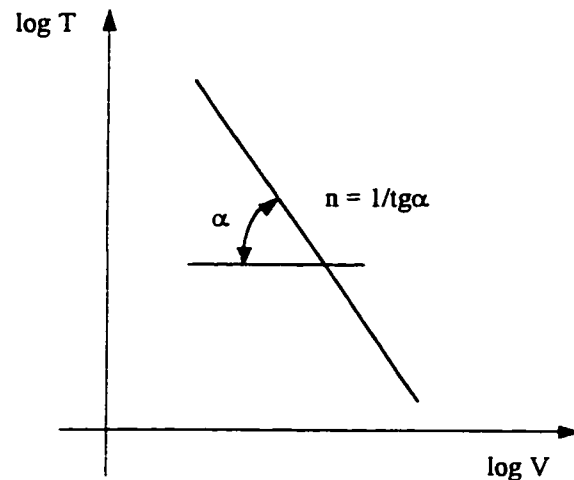


Figure 2.10 Courbe de TAYLOR - durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse.

Le mode d'usure prédominant devra servir de critère pour déterminer la durée de vie de l'outil :

- Lorsque c'est l'usure en cratère qui est prédominante, on emploie la profondeur du cratère K_T comme critère. On peut aussi utiliser le rapport $K = K_T/K_M$, appelé rapport de cratère,
- Par contre lorsque c'est l'usure en dépouille qui prédomine, on emploie VB_B ou $VB_{B\max}$ qui sont pris pour critères.
- On pourrait aussi utiliser le critère de rugosité R_a comme critère dans les travaux de finition.

La figure 2.5 montre les différents critères d'usure des outils. Si aucun mode d'usure n'est prédominant, il est possible d'utiliser soit deux critères, soit un critère mixte donnant une courbe vitesse de coupe - durée de vie (V-T).

Quelques valeurs recommandées de critères de durée de vie :

- $K = 0.1 \text{ mm}$,
- $KT = 0.06 + 0,3 \times f$ avec f = avance en mm/tr,
- $VB_B = 0.3 \text{ mm}$ (usure régulière),
- $VB_{B\max} = 0.6 \text{ mm}$ (usure irrégulière),

CHAPITRE 3

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Ce chapitre traite des conditions d'expérimentation qui seront utilisées tout au long de ce travail pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés à savoir l'enrichissement de la connaissance liée à l'usinage avec avance variable et la simplification des cycles de variation. On y retrouvera entre autres, la composition et les caractéristiques du matériau usiné, le choix des conditions de coupe et des outils, les caractéristiques de la machine utilisée et la liste du matériel utilisé.

3-1 MATÉRIAU USINÉ

Le matériau que nous avons utilisé pour mener cette étude est l'acier au chrome 4140 (42 CD 4 selon la norme française) pour ses multiples utilisations en fabrication mécanique. La matière d'œuvre utilisée pour les essais préliminaires nous a été gracieusement offerte par la compagnie M. BOULAY. La nature de ce matériau pouvant prêter à confusion, nous avons estimé utile d'en faire une analyse chimique afin de déterminer sa composition exacte.

La méthode utilisée consistait à usiner le matériau à sec, à récupérer des copeaux et à les analyser. L'échantillon est attaqué à l'acide chlorhydrique avec dosage par spectroscopie d'absorption atomique selon le standard international NBS. Nous avons recherché les constituants suivants : le carbone, le chrome, le manganèse, le molybdène et le nickel, ceux-ci étant les principaux éléments d'addition des aciers. Nous n'avons pas trouvé nécessaire de rechercher le phosphore et le soufre qui sont présents dans la quasi totalité des aciers en très faible proportion.

L'analyse a donné les résultats ci-après :

Tableau 3.1 Composition chimique du matériau d'essai

% Carbone	% Chrome	% Manganèse	% Molybdène	% Nickel
0.41	0.970	0.90	0.184	0.065

Machinery's Handbook [OBE92] et Machining Data Handbook [MDH] donnent les compositions du tableau 3.2 pour l'acier au chrome - Molybdène 4140 :

Tableau 3.2 Compositions chimiques du 4140 selon certains catalogues.

	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Cr	% Mo
Machinery's Handbook	0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.04	0.15-0.35	0.80-1.10	0.15-0.25
Machining Data Handbook	0.40	1.00	0.03	0.04	0.25	1.00	0.20

Ces deux désignations se rapprochent bien des résultats de notre analyse. Nous pouvons donc conclure qu'il s'agit bien du 4140, acier au Chrome - Molybdène. Nous avons ensuite mesuré la dureté du matériau afin d'avoir une idée des traitements qu'il avait subi. Généralement, la dureté pour un acier 4140 ayant simplement reçu une opération de recuit se situe autour de 12 HRc, tandis que s'il a subi des traitements thermiques, elle est au voisinage des 30 HRc.

La mesure de la dureté a été effectuée à l'aide de la machine à mesurer la dureté de marque Wilson M.I.C.I, le pénétrateur utilisé étant un cône en diamant, sous une charge de 150 Kgs.

Les résultats des essais ont donné une dureté $H = 22^{\pm 1}$ HRc.

Caractéristiques du 4140 :

L'acier au chrome - molybdène 4140 présente une forte trempabilité et est généralement utilisé pour l'usinage des engrenages, des arbres et des axes de transmissions, des leviers et pour la boulonnerie de haute résistance.

Il possède les caractéristiques mécaniques ci-après :

- * Résistance à la rupture comprise entre 55 et 90 daN/mm².
- * Allongement pour cent = 10 - 14
- * Résilience : K = 5 daN/mm².

Par la suite, pour les essais de confirmation et dans le souci d'uniformiser les résultats, nous avons utilisé le même acier, qui cette fois n'avait subi aucune contrainte d'utilisation.

3-2 CHOIX DES CONDITIONS DE COUPE

Le choix de la vitesse de coupe et de l'avance d'usinage sont fonction de la nature du matériau usiné, du type d'opération (tournage, fraisage, filetage, etc.) et de la qualité du fini de surface désiré.

Comme conditions de départ, nous nous sommes basés sur les recommandations des constructeurs (Valenite, Sandvik, Machinery's Handbook). Ces valeurs seront par la suite raffinées pour tendre vers des valeurs optimales dans la suite de nos travaux et selon les objectifs recherchés.

Tableau 3.3 Conditions de coupe préconisées pour l'usinage du 4140.

Constructeurs	Vitesse de Coupe	Avance
Valenite	90 - 150 m/mn (300 - 500 SFM)	0.37 - 0.75 mm/tr (0.015 - 0.030 IPR)
Sandvik	90 - 110 m/mn (285 - 360 SFM)	0.40 - 0.61 mm/tr (0.016 - 0.024 IPR)
Machinery's Handbook	105 - 180 m/mn (350 - 600 SFM)	0.30 mm/tr (0.012 IPR)

Nous considérons les valeurs moyennes suivantes comme valeurs de départ :
avance = 0.381 mm/tr, Vitesse de coupe = 122 m/mn et Profondeur de coupe = 1 mm.

3-3 CHOIX DES OUTILS

Le choix des pastilles est fonction du matériau usiné (copeaux longs, copeaux courts, métaux mous, alliages durs, etc.) pour le choix du grade de la pastille, du type d'opération et de la profondeur de coupe pour le choix de la géométrie, du type d'opération : ébauche ou finition pour le choix du rayon du bec et de la direction d'avance, enfin de la qualité de la machine utilisée pour le choix des dimensions de la pastille qui sont elles fonction de la profondeur de coupe.

Les divers angles de l'outil ont une grande importance lors des opérations de coupe. Les angles de coupe contrôlent la direction d'écoulement des copeaux et la robustesse de l'outil. Des angles positifs permettent de réduire les efforts de coupe et la température. Toutefois les angles positifs conduisent à un angle de taillant plus faible, donc à un outil moins robuste.

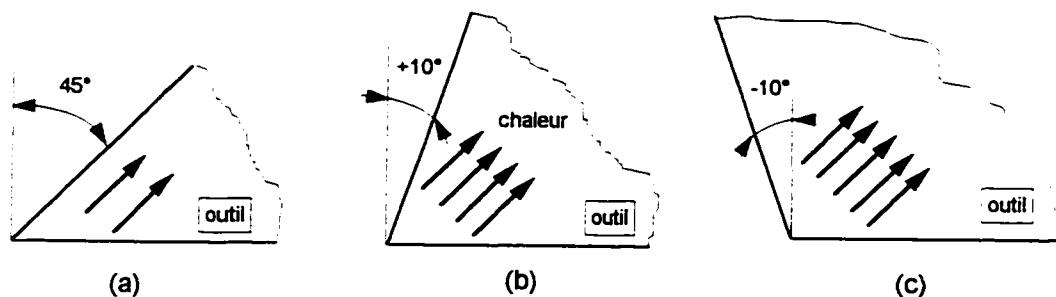


Figure 3.1 Influence de l'angle de coupe.

Diminuer l'angle de coupe signifie un outil robuste et une meilleure conduction de la chaleur.

(a) - outil fragile et de faible conductivité, (b) - robustesse et conduction moyennes, (c) - outil robuste et de bonne conductivité thermique.

Généralement pour l'usinage des aciers alliés avec des plaquettes en carbure, il est recommandé d'utiliser un angle de coupe négatif (-5°) et un angle de relief de (-5°), d'après [KAL95] et [MDH].

Généralement, il est conseillé de choisir d'abord la pastille et par la suite le porte-outil qui lui est adapté.

3-3-1 Choix des pastilles

Nos travaux étant liés à l'étude de l'usure, et étant donné que le matériau usiné est un acier à copeaux longs, la classe ISO retenue est le P20-30 ou VALENITE VC5. Ce sont des pastilles sans revêtement qui ne présentent pas une très grande résistance à la formation de l'usure.

Tout dépendant de la profondeur de passe (p) choisie et de l'angle de direction d'arête (κ_r), la longueur effective du tranchant se calcule selon la relation ci-dessous :

$$L = a / \sin(\kappa_r) \quad (\text{Éqn 3.1})$$

La plaquette est ensuite choisie avec une longueur (L) supérieure à la valeur calculée.

Le rayon du bec de l'outil (r) est quant à lui choisi en fonction de l'avance et de l'état de surface recherché.

En général, pour les travaux d'ébauche comme c'est le cas dans ce travail, choisir le rayon le plus large possible pour obtenir une arête de coupe forte. Toutefois, il est conseillé de diminuer le rayon du bec si l'outil a tendance à vibrer pendant l'usinage.

En règle général, choisir une avance ébauche = $\frac{1}{2}$ rayon du bec.

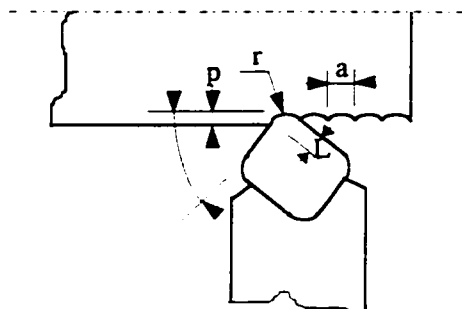


Figure 3.2 Éléments de calcul de la longueur de pastille.

Notre choix s'est porté sur les caractéristiques suivantes :

SNMA 12 - 04 - 08 - E - R - (ISO)

SNMA 4 - 3 - 2 - VC5 (ANSI - VALENITE)

Ce sont des plaquettes de type carré, pour conférer une bonne robustesse, sans brise-copeaux, ayant 12 mm de côté, 4.7625 mm d'épaisseur et 0.8 mm de rayon de bec. L'absence de brise-copeaux permet d'observer plus facilement l'usure au microscope et le suivi des profils de cratère sur le profilomètre.

3-3-2 Choix d'un porte-plaquette :

Le porte-plaquette est un outil sur lequel une plaquette amovible est fixée mécaniquement. Le choix d'un porte-outil dépend du type de pastille choisi (géométrie), du type de fixation envisagé (par vis, bridage, etc), du type d'opération (tournage, fraisage, travail d'extérieur ou d'intérieur) et des angles de coupe désirés.

En tenant compte des considérations antérieures sur les conditions de coupe et du choix des pastilles, notre choix s'est porté sur un porte-outil de type T - MAX M muni d'un système de bridage supérieur et ayant la référence suivante : **MSSNR 12 - 4 B**, sa longueur est de 114,3 mm (4.50 in) et la section de 19,05

* 19.05 mm^2 ($0.75 * 0.75 \text{ in}^2$). La longueur et la section du porte plaquette tiennent compte des dimensions de la tourelle existante.

Cet outil présente les caractéristiques ci-après :

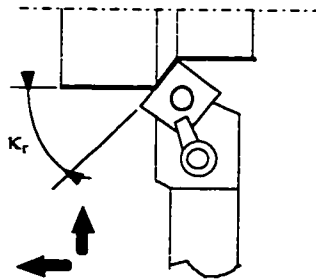


Figure 3.3 Mode d'action de l'outil choisi.

Caractéristiques :

- Angle de coupe (γ) : -5°
- Angle d'avance : 45°
- Angle de direction d'arête (κ_r) : 45°
- Angle de dépouille latérale : 5°

3-4 CARACTÉRISTIQUES DE LA MACHINE-OUTIL UTILISÉE

La machine utilisée est un tour de marque Bridgeport à commande numérique à deux axes, l'axe longitudinal z et l'axe transversal x.

La broche comprend deux rangées de vitesses de rotation sélectionnées manuellement. La gamme des avances quant à elle peut être contrôlée par programme.

Tableau 3.4 Gamme des vitesses de rotation et d'avances du tour BRIDGEPORT

Vitesses de rotation (tr/mn)												
Petites	37.5	45	67	95	132	190	265	375	530	750	1060	1500
Grandes	67	95	132	190	265	375	530	750	1060	1500	2120	3000
Avances												
0.01 in/min. → 200 in/min.												
Avances rapides												
250 in/min. Suivant les deux axes												

Le langage de programmation utilisé est le EZ-PATH, le programme pouvant être chargé directement à partir de la console de la machine ou à l'aide d'une disquette 3"½. La distance entre pointes est de 1000 mm (40 po), la hauteur de pointes de 206 mm (8 po).

3-5 MATÉRIEL UTILISÉ

La liste ci-après représente l'ensemble du matériel qui a été utilisé tout au long de nos travaux.

Ce sont :

- Un tour à commande numérique Bridgeport. Langage de programmation, EZ-PATH.
- Un appareil à mesurer les états de surface, de marque TALYSURF, modèle 4 - RANK PRECISION INDUSTRIES LTD.
- Une machine à mesurer la dureté, de marque Wilson M.I.C.I.
- Un microscope électronique, TM - 100, MITUTOYO.
- Matériau usiné : acier au chrome - Molybdène 4140 (42CD4 d'après AFNOR).
- Un porte-outil Valenite, T-MAX M, MSSNR 12-4 B.
- Des pastilles non revêtues, SNMA 12-04-08-E-R, Valenite.
- Un appareil à mesurer les contraintes : X' Pert - MPD Diffractometer System de PHILIPS.
- Un microscope, NIKON Measurescope UM-2, NIKON Japan muni d'un cadran NIKON Dimicro ME-50H à affichage numérique.

CHAPITRE 4

DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS OBTENUS

Ce chapitre traite de la méthodologie utilisée pour la mise en place progressive des essais. Les résultats de base doivent servir à la mise en place du modèle définitif de variation de l'avance et du choix des paramètres les plus appropriés.

Suite à l'analyse des différents travaux réalisés dans le domaine de l'influence de l'avance sur la longueur de contact outil-copeau et l'usure des outils, tant en avance constante qu'en avance variable pendant l'usinage, nous avons été amenés à nous poser un certain nombre de questions :

- qu'est-ce qui se passe concrètement dans la zone de coupe ?
- A quel moment l'usure commence-t-elle à se manifester?
- Sur quelle base a-t-on choisi les modèles de variation (linéaire et sinusoïdal) jusque là utilisés? sont-ils optimaux?
- En avance variable est-il important de garder les incréments de temps de variation égaux? Est-il judicieux de les maintenir très courts comme le recommande Victor SONGMÉNÉ [SON93]? Ou alors ne faut-il pas les garder un peu plus long afin de laisser à l'outil le temps de se refroidir?

- combien d'avances sont-elles nécessaires?

Dans cette optique, les premières expériences que nous entreprendrons chercheront à clarifier ces différents points d'ombre et nous permettront de mieux expliquer la théorie sur la variation de l'avance en cours d'usinage et à bâtir un modèle de variation plus réaliste.

Dans chaque cas, les expériences seront faites trois ou quatre fois afin de confirmer les résultats et les valeurs dans les tableaux représentent les valeurs moyennes.

La méthodologie d'expérimentation consiste à effectuer des essais de base en avance constante, ensuite les conclusions et les observations faites au cours de ces essais serviront à bâtir le modèle de variation.

La profondeur de coupe de 1 mm a été adoptée pour l'ensemble de nos travaux.

L'observation au microscope des premières pastilles utilisées a montré que seule l'usure en cratère se manifeste quel que soit le temps de coupe, c'est pourquoi dans la suite de nos travaux et tout au long de ce mémoire, il sera uniquement fait mention de l'usure en cratère.

4-1 ESSAIS D'USINAGE EN AVANCE CONSTANTE

4-1-1 Mesure de la longueur de contact outil-copeau en fonction de l'avance

La surface de l'outil est préalablement recouverte d'une mince couche d'encre (bleu à tracer) afin d'observer plus facilement la longueur de contact outil-copeau qui est déterminée par la mesure de la longueur de l'empreinte laissée par le frottement du copeau sur la face de coupe. Les différents essais sont effectués avec une avance constante, pendant 5 secondes afin de ne pas fondre complètement l'encre enrobée sur la pastille.

Les résultats sont consignés dans le tableau et les graphiques ci-dessous :

Tableau 4.1 Tableau de mesures : longueur de contact en fonction de l'avance.

Avance (mm/tr)	0.19	0.229	0.267	0.305	0.343	0.38	0.419	0.457	0.495	0.533	0.57
Lc (mm)	0.69	0.99	1.14	1.265	1.3	1.47	1.64	1.64	1.74	1.715	1.73

La courbe se présente ainsi qu'il suit :

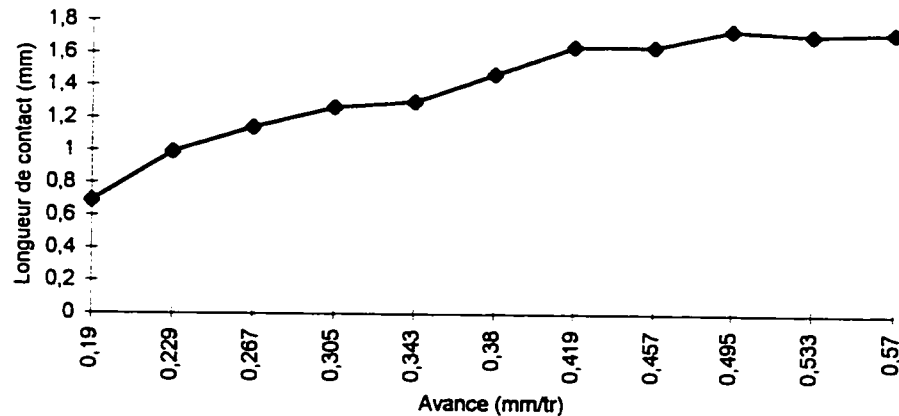


Figure 4.1 Longueur de contact en fonction de l'avance.

La figure 4.1 montre que la longueur de contact outil-copeau augmente lorsque l'avance augmente. Il convient toutefois de souligner que la variation de L_c n'est que de quelques dixièmes de millimètres (0,5 mm) entre les avances 0,3048 mm/tr et 0,5715 mm/tr. **Ceci confirme bien les conclusions d'Ibrahim SADIK et al. [SAD93] et [SAD95].**

En effet dans l'étude de l'usure, la notion de longueur ou de surface de contact est très importante, c'est la surface de contact qui reçoit la pression de coupe et sur laquelle le frottement du copeau est transformé en chaleur.

4-1-2 Mesure du temps de début de formation de l'usure.

Ces expériences ont pour but de mesurer le temps de début de formation de l'usure et la largeur du cratère dans chacun des cas. Elles nous permettent d'observer le comportement de la pastille vis-à-vis de plusieurs avances.

Le tableau ci-dessous résume les résultats de l'expérience.

Tableau 4.2 Tableau de mesures : temps de début de formation de l'usure.

Temps (s)	Avance = 0,254 mm/tr			Avance = 0,508 mm/tr		
	KT (μm)	KB (mm)	KM (mm)	KT (μm)	KB (mm)	KM (mm)
5	0,4	-	-	1,2	0,5	0,3
10	0,6	0,5	0,3	1,6	0,5	0,3
15	0,6	0,5	0,3	2	0,5	0,3
20	0,8	0,5	0,3	2,8	0,75	0,4
25	1	0,75	0,4	1,6	0,75	0,4
30	1	0,75	0,4	4,4	0,75	0,4
40	1,2	0,75	0,4	4,4	0,75	0,4
45	2	0,8	0,4	-	-	-
55	2,4	0,8	0,4	-	-	-
60	-	-	-	6	0,8	0,45

Les graphiques obtenus sont les suivants :

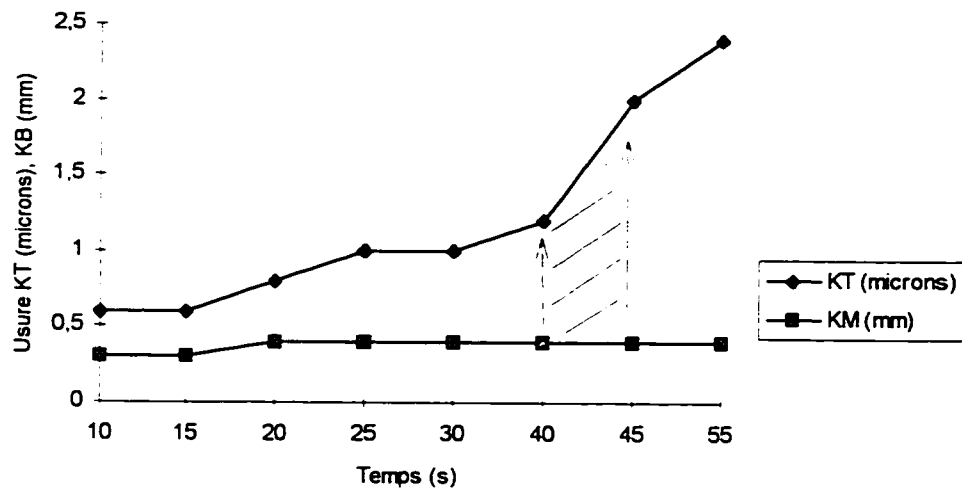


Figure 4.2 Usure en fonction du temps - avance 0,254 mm/tr.

KT : Profondeur du cratère

KM : position du centre du cratère

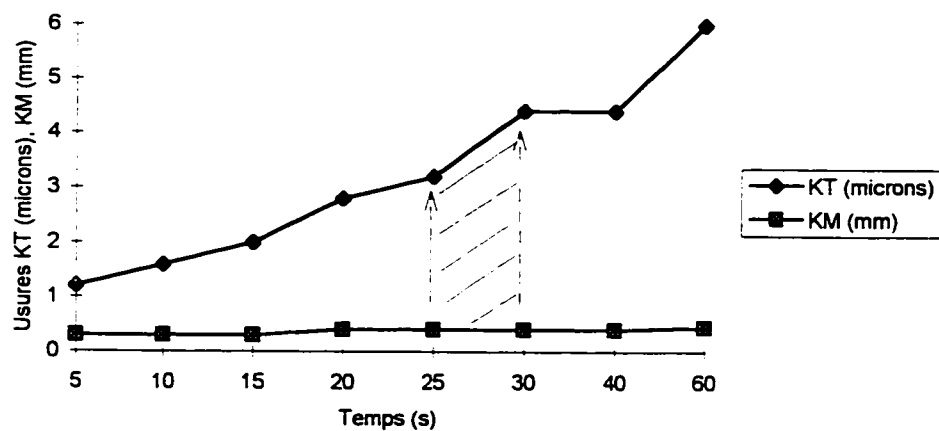


Figure 4.3 Usure en fonction du temps - avance 0,508 mm/tr.

KT : Profondeur du cratère

KM : position du centre du cratère

Nous constatons que l'usure ne commence pas au même moment pour les différents cas d'avances. Elle commence véritablement après 40 à 45 secondes pour l'avance 0,254 mm/tr et après 25 à 30 secondes pour l'avance 0,508 mm/tr. A partir de ces instants, l'usure augmente progressivement dans le temps suivant un axe qui reste constant, ainsi que l'attestent les courbes $KT = f(t)$ (figures 4.2 et 4.3).

Ceci nous amène à nous demander s'il est judicieux de garder constants les temps de maintien aux différentes avances lors des essais à avance variable.

Nous essaierons d'exploiter cette notion et ces temps plus tard lors des essais à avance variable.

4-1-3 Usure en fonction de l'avance et détermination du centre du cratère.

Ces expériences sont effectuées pour un temps d'usinage réel de 10 minutes, les temps d'approche et de dégagement d'outil n'étant pas pris en considération. Elles nous permettent de voir l'influence de l'avance sur l'usure et sur la position du centre du cratère. Ceci devant nous aider par la suite à mieux choisir les valeurs et les séquences d'avances lors de la variation de l'avance en cours d'usinage.

Tableau 4.3 Tableau de mesures : usure en fonction de l'avance - T = 10 minutes.

Avance (mm/tr)	KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)	KE (mm)
0,254	28	0,85	0,4	0,1
0,381	47	0,9	0,45	0,1
0,508	60	1	0,5	0,1
0,762	70	1,1	0,55	0,1

Nous pouvons en déduire les graphiques ci-dessous :

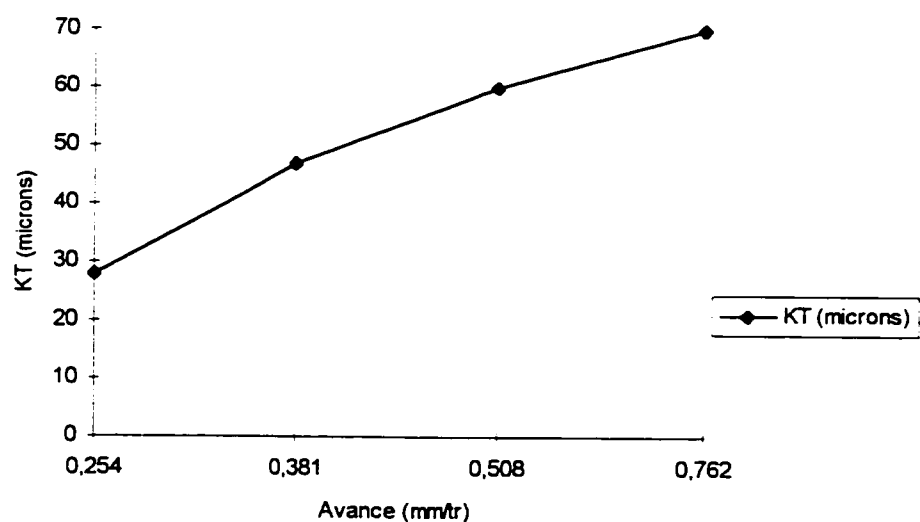


Figure 4.4 Profondeur du cratère KT en fonction de l'avance - T = 10 minutes.

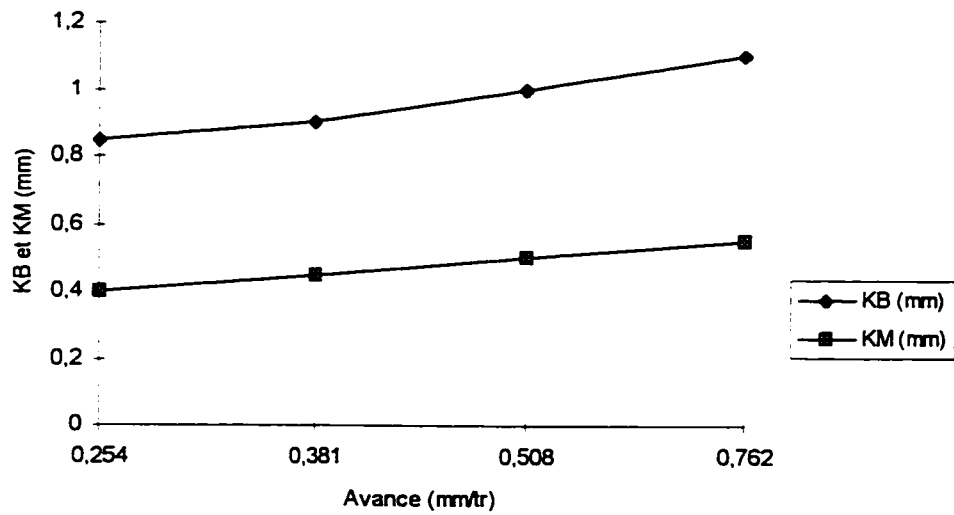


Figure 4.5 Largeur (KB) et centre du cratère (KM) en fonction de l'avance - T = 10 minutes.

La largeur du cratère et la profondeur du cratère augmentent avec l'avance. Le point le plus profond du cratère est situé à peu près au centre du cratère.

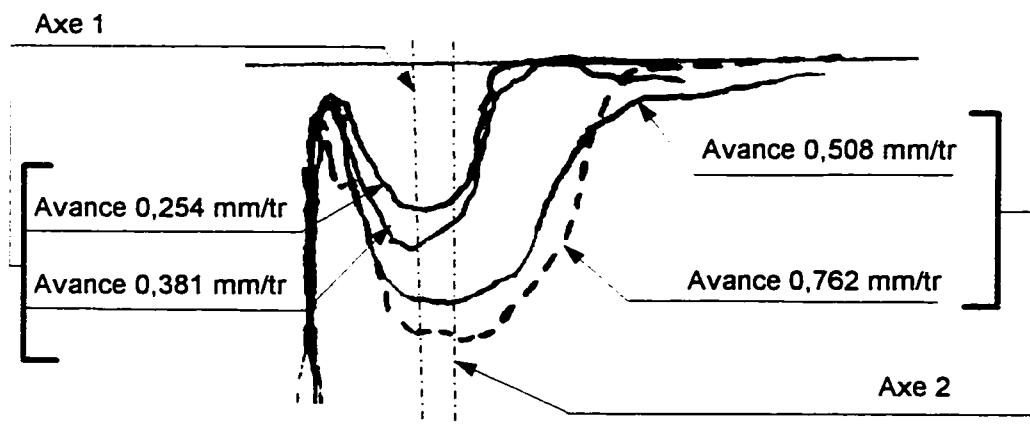


Figure 4.6 Profilogrammes obtenus pour différents cas d'avances. T = 10 mn

Remarques :

1) Les centres des cratères pour les avances 0,254 mm/tr et 0,381 mm/tr dans un cas (axe 1) et 0,508 mm/tr, 0,762 mm/tr dans un autre (axe 2) sont pratiquement confondus.

2) La distance entre les deux axes varie très peu. Elle est de quelques dixièmes de millimètres.

Ces deux constats nous permettent de nous interroger s'il n'est pas avantageux d'utiliser deux avances seulement au lieu de les faire varier de proche en proche, les unes après les autres.

Avant de continuer les expériences, il convient toutefois de relever que la comparaison de l'usure provoquée par les différentes avances est faussée en prenant le temps comme paramètre constant. En effet, le travail produit dans chacun des cas en gardant le temps d'usinage constant n'est pas identique. Lorsque l'avance augmente, le volume de matière enlevée pour un même temps de coupe augmente.

Dans la suite de nos expériences, nous garderons le volume de copeau constant afin de comparer les effets produits pour un travail identique.

4-1-4 Calcul du volume de métal enlevé par unité de temps

Pour une pièce de révolution, nous enlevons un anneau de métal dont la section transversale est le produit de la distance parcourue par l'outil (L) et de la profondeur de coupe d .

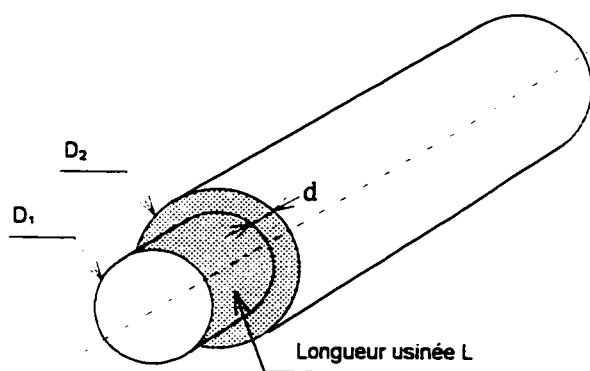


Figure 4.7 Illustration d'une pièce de tournage.

Le volume de cet anneau est égal à :

$$Q = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - D_1^2) \times L = \pi \frac{(D_2 - D_1)}{2} \times \frac{(D_2 + D_1)}{2} \times L \quad (\text{Éqn 4.1})$$

nous avons :

Le diamètre moyen $D_m = (D_1 + D_2)/2$ et la profondeur de passe $d = (D_1 - D_2)/2$.

D'où :

$$Q = \pi \times D_m \times d \times L \quad (\text{Éqn 4.2})$$

Sachant que $L = T \times f \times N$ avec $\begin{cases} T : \text{temps d'usinage} \\ f : \text{avance de coupe} \\ N : \text{Vitesse de rotation} \end{cases}$

et $V_c = \pi \times D_m \times N$

Il vient :

$$Q = V_c \times d \times T \times f$$

(Éqn 4.3)

Unités : $\text{mm/mn} \times \text{mm} \times \text{mn} \times \text{mm/tr} = \text{mm}^3/\text{tr}$.

4-1-5 Mesure de l'usure en fonction du temps

Cette expérience a pour but d'observer l'évolution du cratère dans le temps.

Tableau 4.4 Tableau de mesures : évolution de l'usure pour l'avance 0,381 mm/tr.

Temps (mn)	KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)	KF (mm)
5	15	0,9	0,4	0,2
7	19	0,9	0,45	0,15
10	47	0,9	0,45	0,1
12	60	0,9	0,45	0,1
15	76	0,9	0,45	0,125
18	102	0,95	0,45	0,05

On en déduit les courbes ci-après :

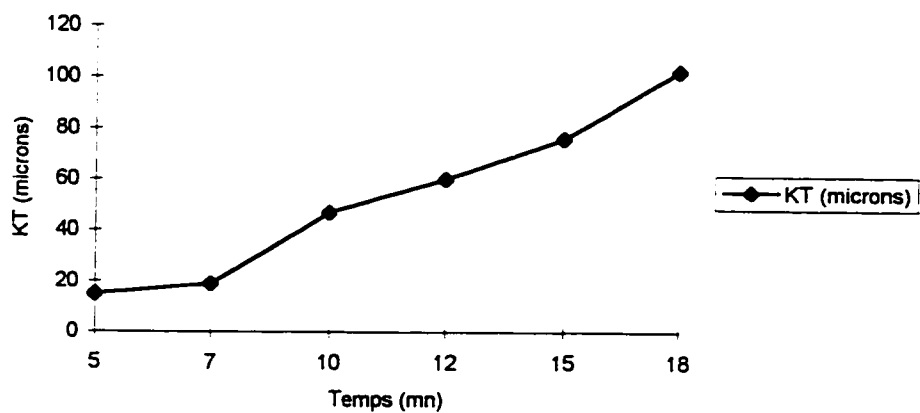


Figure 4.8 Profondeur du cratère en fonction du temps - avance 0,381 mm/tr.

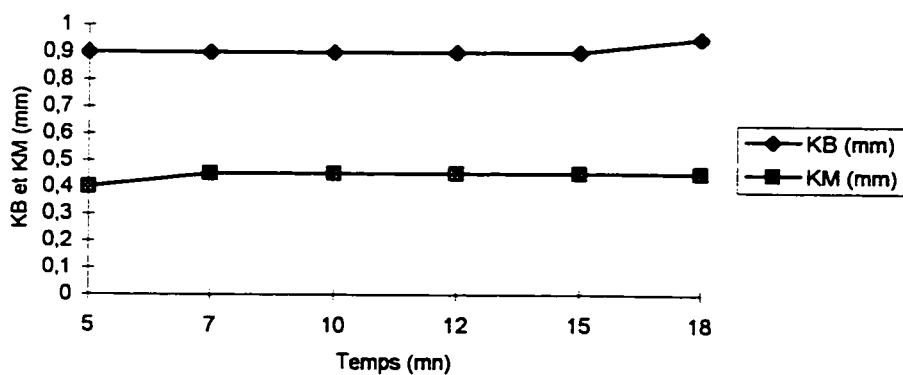


Figure 4.9 Largeur (KB) et centre du cratère (KM) en fonction du temps - avance 0,381 mm/tr

A la vue des résultats de ces expériences, nous pouvons dire que le cratère augmente progressivement dans le temps. Par contre, la largeur du cratère et la position du centre du cratère sont pratiquement invariants dans le temps pour une même avance. Ceci rejoint bien les conclusions de OPITZ et WEBER [BLA55] puis, confirmé par la figure 4.10 qui est la superposition des relevés profilographiques.

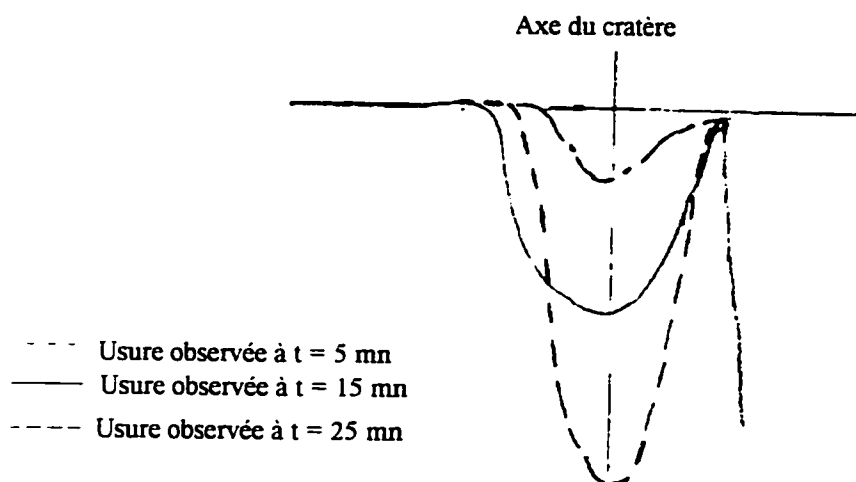


Figure 4.10 Superposition des profilogrammes obtenus (avance 0,381 mm/tr) (grossis).

4-1-6 Mesure de l'usure en fonction de l'avance à volume constant

Cette expérience est effectuée avec une série d'avances constantes et a pour finalité d'observer le comportement de l'usure dans les cas de plusieurs avances. Ceci nous permettra de choisir les avances les plus appropriées lors

de l'usinage avec variation de l'avance. Les usinages dans ce cas sont effectués pour une longueur d'usinage de 1428,75 mm.

Tableau 4.5 Tableau de mesures : usure en fonction de l'avance - volume constant.

Avance (mm/tr)	KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)	KF (mm)
0,254	32	0,65	0,3	0,1
0,381	47	0,85	0,4	0,1
0,508	54	0,9	0,45	0,1
0,762	37	1,1	0,7	0,1

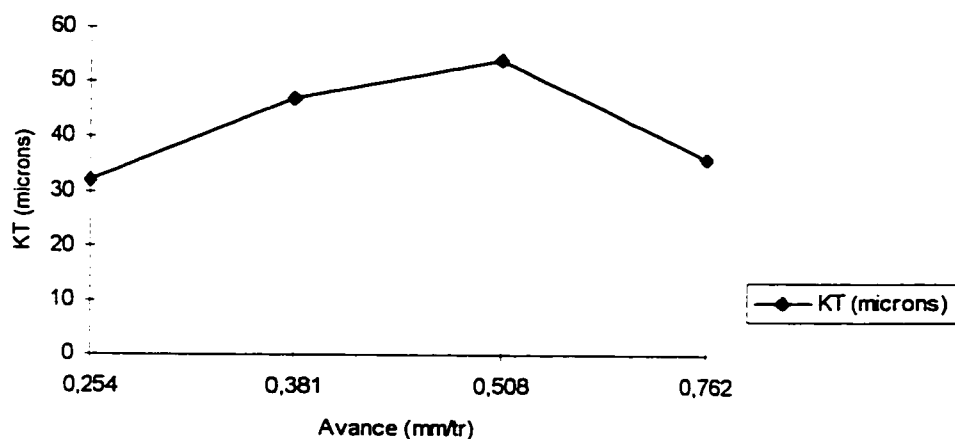


Figure 4.11 Profondeur du cratère en fonction de l'avance - volume constant.

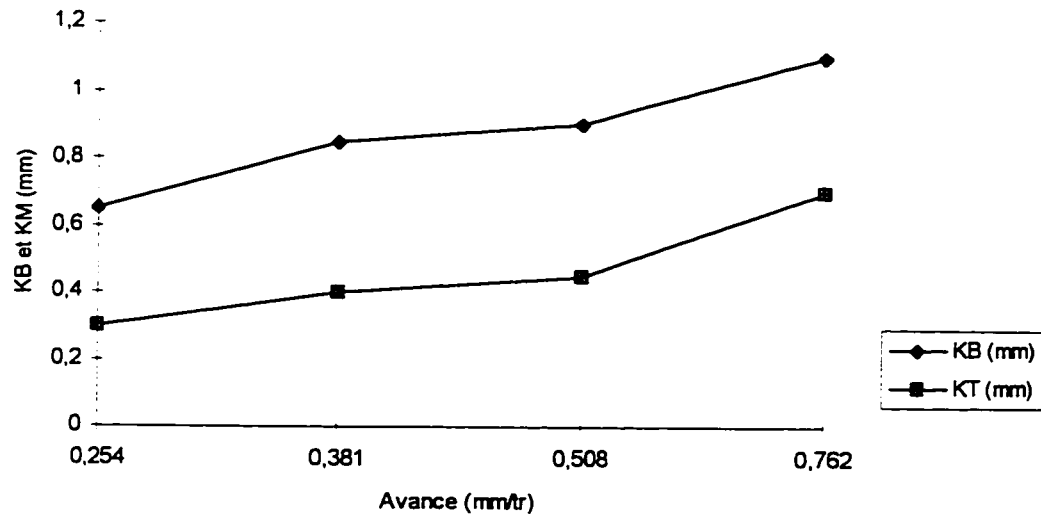


Figure 4.12 Largeur (KB) et centre du cratère (KM) en fonction de l'avance - Volume constant.

La largeur du cratère et la position du centre du cratère augmentent lorsque l'avance augmente. Suivant la valeur de l'avance, pour un même travail, le cratère est soit très étroit et profond, soit excessivement large et peu profond (voir figure 4.13 ci-contre).

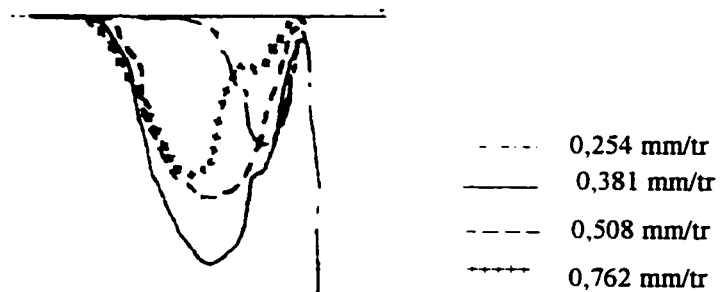


Figure 4.13 Superposition des profils d'usure pour plusieurs avances à volume constant.

Les résultats de la figure 4.11 peuvent quelque peu prêter à confusion. On pourrait se demander s'il suffirait d'augmenter l'avance pour diminuer l'usure. Ceci est tout simplement dû au fait que le temps mis pour effectuer le même travail n'est pas le même, dans le cas de l'avance 0,762 mm/tr, ce temps est plus petit.

Toutefois, la courbe d'évolution de l'usure dans le temps n'est pas la même pour toutes les avances. Le taux d'usure dans le temps est plus élevé dans le cas des grandes avances comme le montre la figure 4.14.

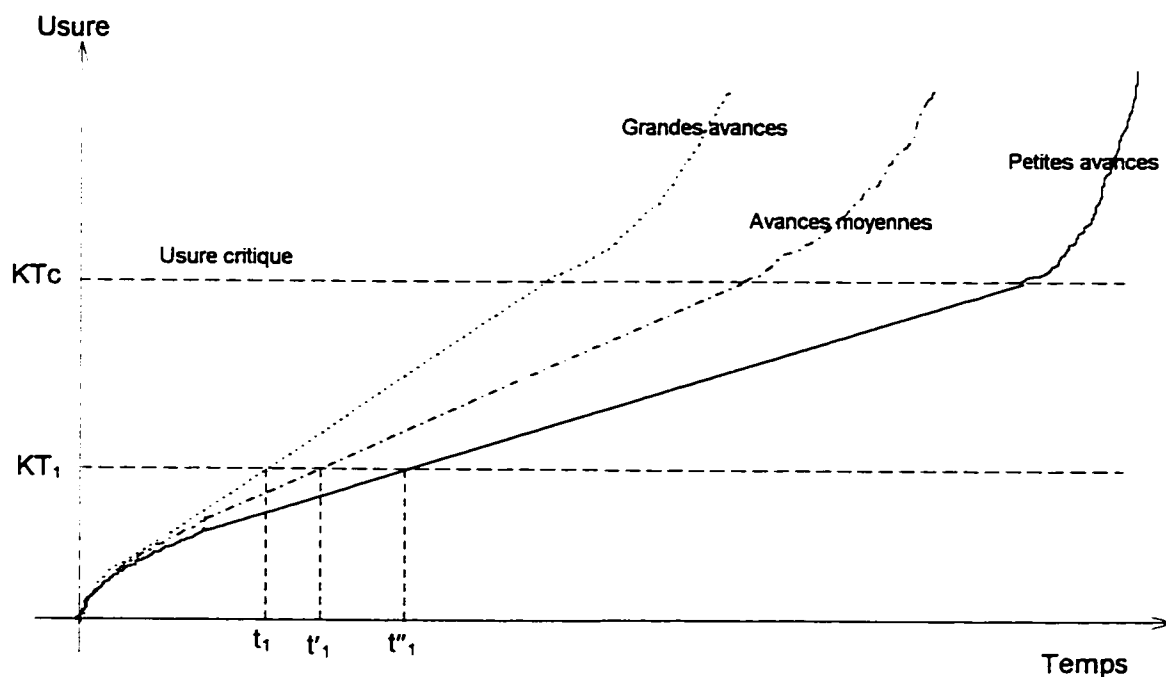


Figure 4.14 Évolution de l'usure dans le temps.

Tout dépendant de la valeur de l'avance, la phase de stabilisation est plus ou moins grande. Pendant les essais en atelier, nous avons observé que l'outil brûle pratiquement. Le bec de l'outil vire au rouge, lorsqu'on usine avec de fortes avances comme 0,762 mm/tr dans notre cas. Dans le cas des grandes avances, l'usure est faible au début, compensée par une plus grande largeur du cratère, mais elle augmente très vite par la suite, comme en témoignent les figures 4.4 et 4.6. Ce phénomène peut-être schématisé à l'aide de la courbe d'évolution d'usure tel qu'illustré à la figure 4.14.

4-2 ESSAIS D'USINAGE EN AVANCE VARIABLE

Les valeurs des avances, les temps de maintien à ces avances et les séquences de variation ont été choisies en fonction des résultats obtenus en avance constante.

La première idée exploitée a été d'utiliser des séquences de deux ou trois avances maximum.

Les stratégies suivantes ont donc été testées :

a) Nous utilisons deux avances 0,254 et 0,508 mm/tr avec des temps de maintien respectifs de 45 secondes et 30 secondes. Ces temps sont ceux de

début de formation d'usure pour les deux avances (voir Figures 4.2 et 4.3).

L'avance moyenne est de 0,381 mm/tr

Le cycle de variation d'avance est le suivant :

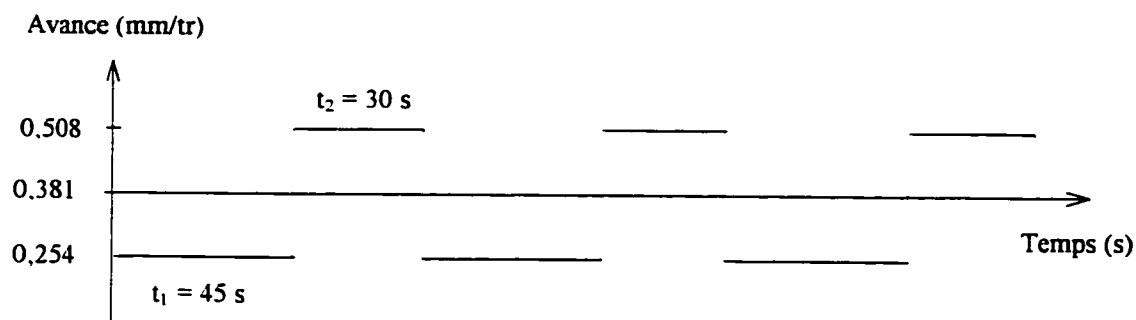


Figure 4.15 Cycle de variation de l'avance - cycle 45/30.

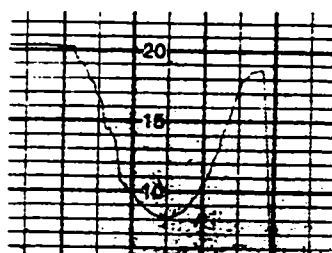
Les résultats des différentes valeurs des caractéristiques du cratère sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.6 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 45/30.

KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)
13	0,75	0,4

Les profils de cratère observés sont les suivants :

Avance constante



Avance variable

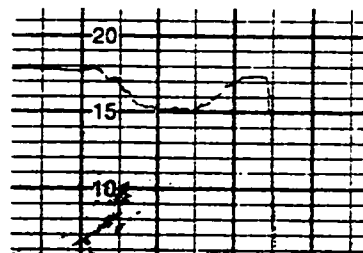


Figure 4.16 Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycle 45/30

Légende : amplification : axe des x [$\times 20$], axe des y [$\times 500$]

Gain obtenu par rapport à l'avance constante moyenne correspondante de 0,381 mm/tr :

$$G_1 = \frac{KT_{cons} - KT_1}{KT_{cons}} \times 100 = \frac{47 - 13}{47} \times 100 = 72,34\%$$

b) Nous utilisons toujours deux avances 0,254 et 0,508 mm/tr, mais cette fois avec des temps de maintien plus courts, respectivement 20 secondes et 10 secondes, pour essayer de vérifier certaines conclusions de Victor SONGMÉNÉ [SON93] selon lesquelles les temps de variation doivent être très courts. L'avance moyenne est de 0,3302 mm/tr

Le cycle de variation d'avance est le suivant :

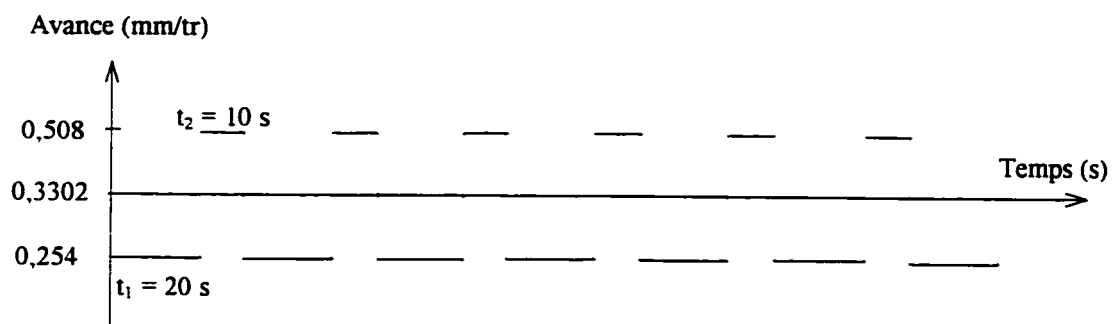


Figure 4.17 Cycle de variation de l'avance - cycle 20/10.

Tableau 4.7 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 20/10.

KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)
28	0,90	0,45

Les profils de cratère obtenus sont les suivants :

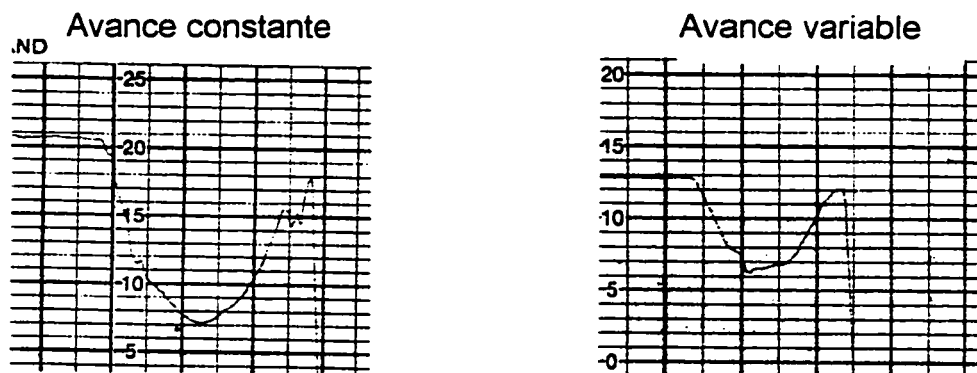


Figure 4.18 Profilogrammes de la face de coupe -avance constante vs cycle 20/10

Légende : amplification : axe des x [$\times 20$], axe des y [$\times 500$]

Gain obtenu par rapport à l'avance moyenne correspondante de 0,3302 tr/mn :

$$G_2 = \frac{KT_{cons} - KT_2}{KT_{cons}} \times 100 = \frac{52 - 28}{52} \times 100 = 53,84\%$$

Le gain dans ce cas est un peu plus faible, ceci peut s'expliquer par le fait qu'entre deux variations les points de contact n'ont pas le temps nécessaire pour refroidir. Toutefois, le gain observé ici est sensiblement égal à celui observé dans les travaux de SONGMÉNÉ et al. [SON92].

c) La stratégie est encore de deux avances 0,254 et 0,508 mm/tr, mais cette fois avec des temps plus longs. Ceci est fait de façon croissante et décroissante. L'avance moyenne est de 0,312 mm/tr

Les cycles de variation sont les suivants :

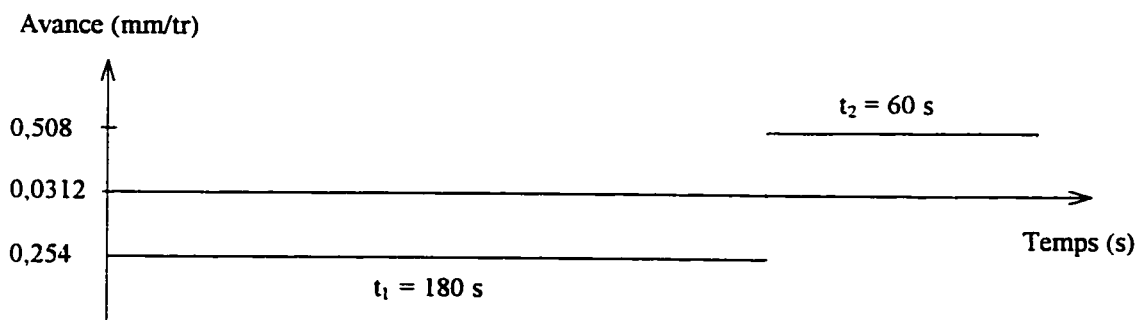


Figure 4.19 Cycle de variation de l'avance - cycle 180/60 (séquence croissante).

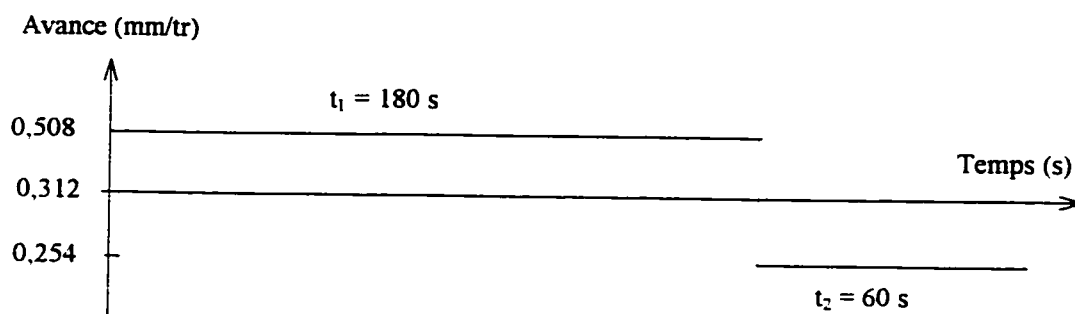


Figure 4.20 Cycle de variation de l'avance - cycle 180/60 (séquence décroissante).

Dans les deux cas, nous avons sensiblement les mêmes résultats :

Tableau 4.8 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 180/60.

KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)
12	0,95	0,5

Les profils de cratères obtenus sont les suivants :

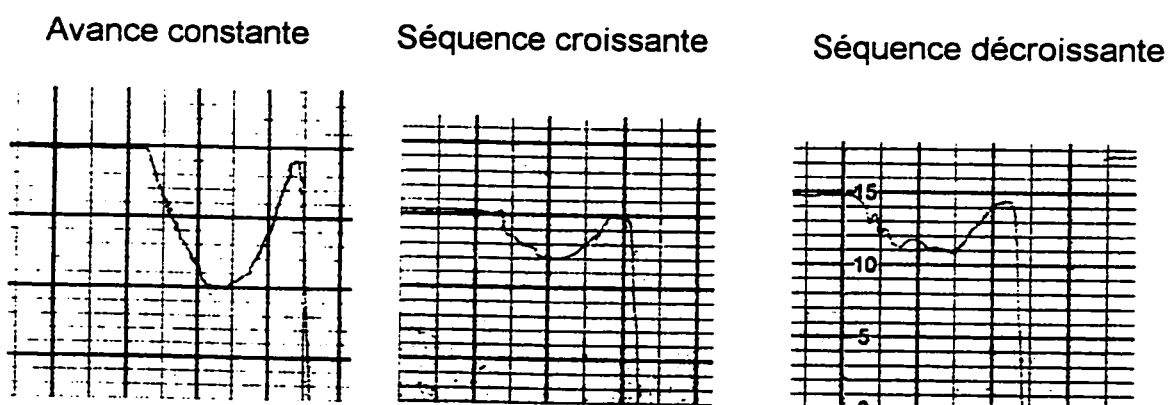


Figure 4.21 Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycles 180/60.

Légende : amplification : axe des x [$\times 20$], axe des y [$\times 500$]

Gain obtenu par rapport à l'avance moyenne correspondante de 0,312 mm/tr :

$$G_3 = \frac{KT_{cons} - KT_3}{KT_{cons}} \times 100 = \frac{38 - 12}{38} \times 100 = 68,42\%$$

d) Séquence à trois avances (0,254, 0,508 et 0,762 mm/tr) avec des temps identiques de maintien (150 s), l'avance moyenne correspondante est de 0,381 mm/tr

Cycle de variation :

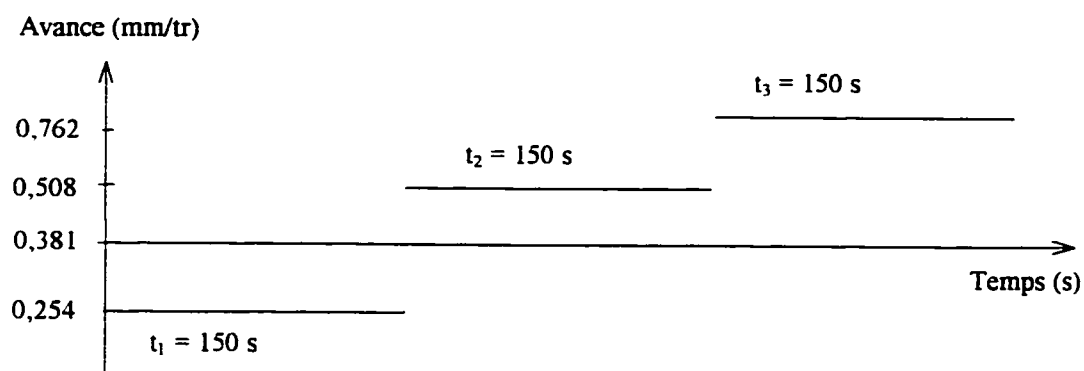


Figure 4.22 Cycle de variation de l'avance - cycle 150/150/150.

Tableau 4.9 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 150/150/150.

KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)
34	0,9	0,4

Les profils de cratère obtenus sont les suivants :

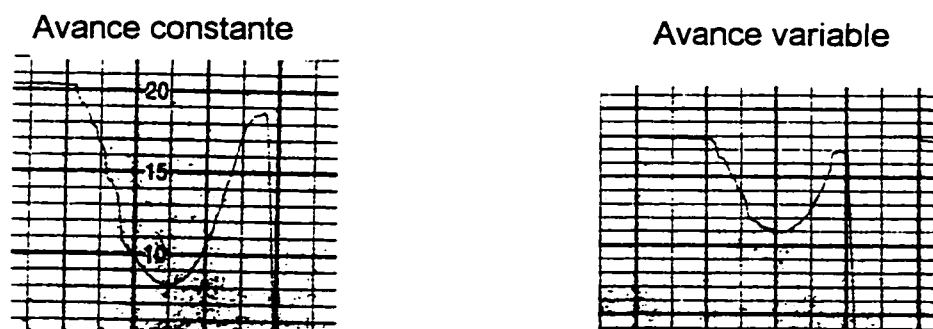


Figure 4.23 Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycle 150/150/150.

Légende : amplification : axe des x [$\times 20$], axe des y [$\times 500$]

Gain obtenu par rapport à l'avance moyenne correspondante de 0,381 tr/mn :

$$G_4 = \frac{KT_{cons} - KT_4}{KT_{cons}} \times 100 = \frac{47 - 34}{47} \times 100 = 27,66\%$$

e) séquence à trois avances avec des temps de maintien différents et courts, l'avance moyenne est de 0,3556 mm/tr

Cycle de variation :

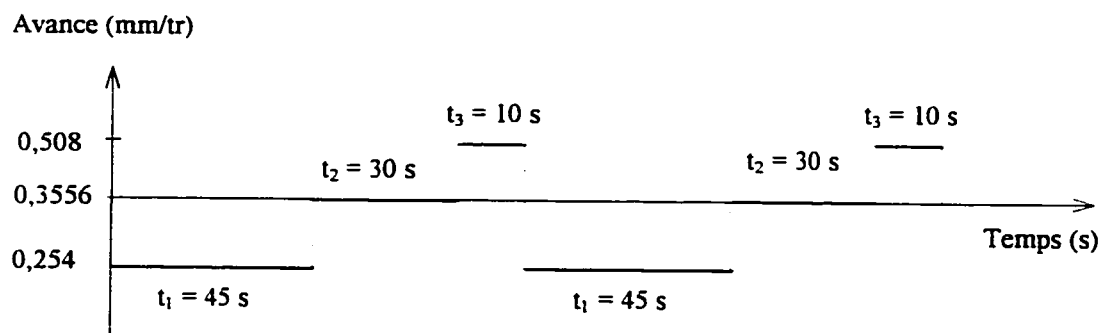


Figure 4.24 Cycle de variation de l'avance - cycle 45/30/10.

Tableau 4.10 Tableau de mesures : usure en avance variable - cycle 45/30/10.

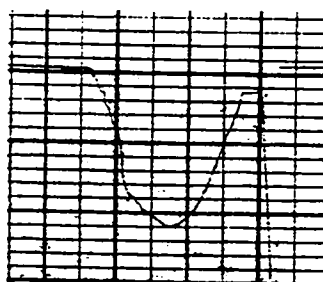
KT (microns)	KB (mm)	KM (mm)
34	1	0,5

Gain obtenu par rapport à l'avance moyenne correspondante de 0,3556 tr/mn :

$$G_5 = \frac{KT_{cons} - KT_5}{KT_{cons}} \times 100 = \frac{43 - 34}{43} \times 100 = 20,93\%$$

Les profils de cratère obtenus sont les suivants :

Avance constante



Avance variable

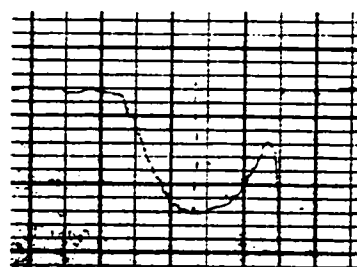


Figure 4.25 Profilogrammes de la face de coupe - avance constante vs cycle 45/30/10.

Légende : amplification : axe des x [$\times 20$], axe des y [$\times 500$]

4-3 MESURE DE L'USURE EN FONCTION DU VOLUME DE MÉTAL ENLEVÉ

Cette partie nous permet d'observer l'usure de l'outil en fonction de la quantité de volume enlevé, donc en fait l'évolution de l'usure dans le temps. Ceci sera fait aussi bien en avance variable qu'en avance constante. La comparaison est faite pour un volume de matière enlevée et un débit constant.

Les essais sont effectués pour les longueurs d'usinages mentionnées dans le tableau ci-dessous. La profondeur de coupe demeure de 1 mm.

Tableau 4.11 Longueurs usinées.

Longueur d'usinage (mm)	Temps moyen d'usinage à 375 tr/m (minutes)
1428,75 (56.250 in)	10
2143,25 (84.375 in)	15
2852,42 (112,300 in)	20

Les résultats expérimentaux sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.12 Mesure de l'usure en fonction du volume de copeau.

Séquence de variation →	Constante 0,381 tr/mn	Variable 1		Variable 2		Variable 3	
Longueur usinée (mm)↓	KT (μm)	KT(μm)	Gain	KT(μm)	Gain	KT(μm)	Gain
1428,75	47	28	40,25 %	13	72,34 %	12	74,47 %
2143,25	74	64	13,51 %	42	43,24 %	28	62,16 %
2852,42	150,5	143	5 %	103	31,56 %	90	40,2 %

Note :

La capacité du profilomètre étant dépassée à 100 μm, nous avons mesuré la profondeur du cratère pour la longueur usinée de 2852,42 mm à l'aide d'un microscope de grande précision ayant un contrôle sur la hauteur. La lecture de la profondeur du cratère est faite sur un cadran à affichage numérique.

Les différents gains sont calculés par rapport à l'avance constante considérée comme avance de référence. Dans les cas de l'usinage avec avance variable, l'avance moyenne est sensiblement égale à l'avance constante.

- Variable 1 $\begin{cases} 0,305 \rightarrow (20s) \\ 0,457 \rightarrow (10s) \end{cases}$, usinage avec deux avances, la première

0,305 mm/tr, maintenue pendant 20 secondes et la deuxième, 0,457 mm/tr, maintenue pendant 10 secondes. On fait un cycle en boucle fermée pour parcourir la longueur totale d'usinage.

- Variable 2 $\begin{cases} 0,305 \rightarrow (45s) \\ 0,508 \rightarrow (30s) \end{cases}$, usinage avec deux avances, la première

0,254 mm/tr, maintenue pendant 45 secondes et la deuxième, 0,574 mm/tr, maintenue pendant 30 secondes. On fait un cycle en boucle fermée pour parcourir la longueur totale d'usinage.

- Variable 3 $\begin{cases} 0,254 \rightarrow (180s) \\ 0,508 \rightarrow (120s) \end{cases}$, usinage avec deux avances, la première

0,254 mm/tr, maintenue pendant 180 secondes et la deuxième, 0,508 mm/tr, maintenue pendant 120 secondes. On fait un cycle en boucle fermée pour parcourir la longueur totale d'usinage.

Nous obtenons alors les courbes ci-après :

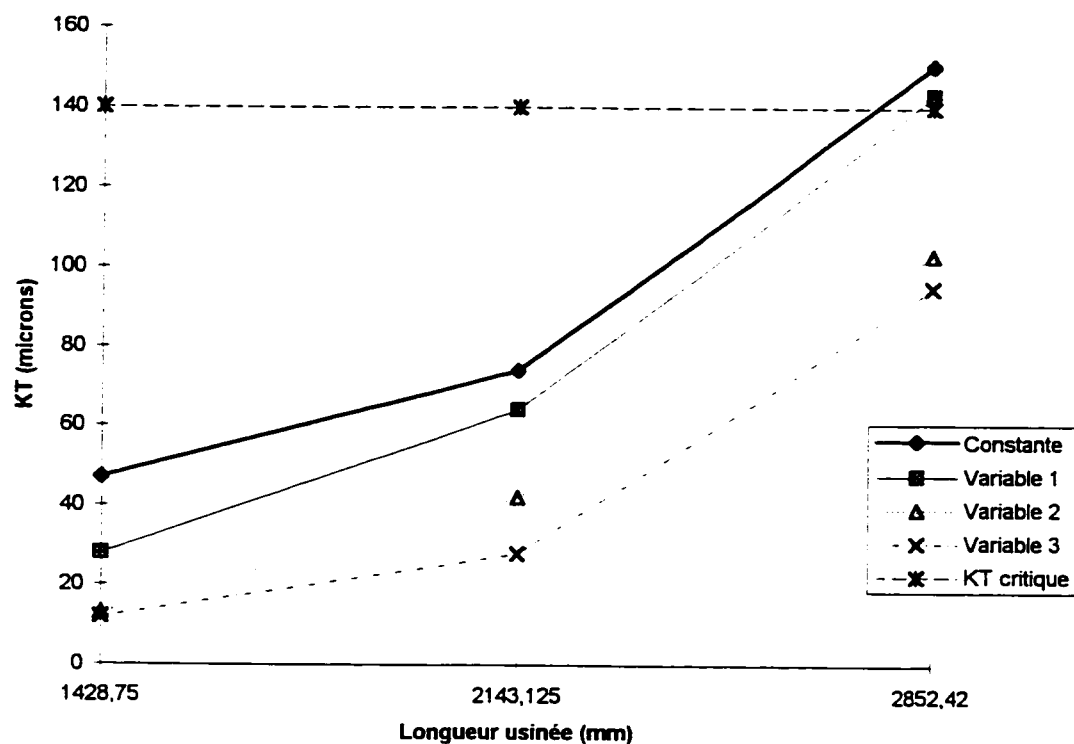


Figure 4.26 Évolution de la profondeur du cratère en fonction de la quantité de métal enlevé.

Pour une vitesse de rotation de 375 tr/mn, les temps moyens d'usinage sont ceux consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4.13 Temps moyens d'usinage (N = 375 tr/mn).

Longueur usinée	1428,75 mm	2143,125 mm	2852,42 mm
Temps moyen	10 minutes	15 minutes	20 minutes

Au bout d'une vingtaine de minutes, l'outil atteint sa durée de vie maximale pour les séquences d'avance constante et celle intitulée «variable 1»

La séquence «variable 3» permet d'obtenir le meilleur gain.

Nous remarquons que les temps de maintien aux différents paliers d'avances doivent être suffisamment longs. Des temps très courts ne sont pas avantageux.

CHAPITRE 5

CONSÉQUENCES DE LA VARIATION DE L'AVANCE SUR LA QUALITÉ DE LA PIÈCE

5-1 CONTRAINTES INDUITES DANS LA PIÈCE

La présence de contraintes dans une pièce est le résultat de l'application d'efforts sur celle-ci. Ces efforts sont généralement générés par des traitements d'ordre mécanique (usinage, assemblage, formage, etc.), d'ordre thermique (soudage, traitements thermiques, moulage, etc.) ou d'ordre chimique (corrosion, etc.).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer les contraintes dans la pièce.

Nous pouvons citer :

- **Les jauges de déformation** : ce sont de petits éléments résistifs collés sur la pièce. Lorsque la pièce est soumise à un chargement, sa déformation est transmise à travers la colle à la jauge de déformation.

On utilise la relation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R} = F \frac{\Delta L}{L} = F \times \varepsilon$$

F étant le facteur de jauge et ε la déformation dans la pièce,

R la résistance de l'élément résistif et ΔR la variation de la résistance,

L longueur de l'élément résistif et ΔL , la variation de la longueur.

- **La méthode des vernis craquelants** : elle consiste à recouvrir les surfaces de pièces à analyser d'une mince couche de vernis fragile de faible résistance. Lorsque la pièce est chargée, le vernis se déforme et craque. La relation ci-après permet de calculer le niveau de contrainte principale :

$\sigma_1 = E \times \varepsilon$ avec E le module de YOUNG de la pièce, σ_1 la contrainte et ε la déformation dans la pièce.

- **La diffraction par rayons X** : c'est une technique non destructive utilisée pour identifier et quantifier les diverses phases cristallines de pièces mécaniques. Elle est plus précise que les deux méthodes précédentes.

Les efforts appliqués à une pièce changent les distances interatomiques dans le réseau cristallin de la pièce, ces différences sont mesurées par rayons X.

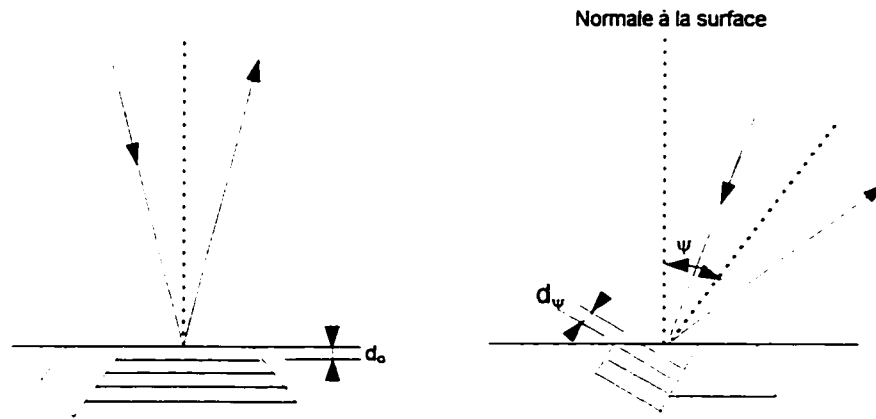


Figure 5.1 Mesure des contraintes induites : différents angles d'inclinaison du faisceau.

La relation suivante est utilisée pour évaluer les déformations :

$$\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1 + \nu}{E} \times \sigma \times \sin^2 \psi$$

avec : ψ = angle,

ν = coefficient de Poisson,

E = module de YOUNG,

σ = contrainte,

En réalité, aucune de ces méthodes ne mesure directement la contrainte, c'est la déformation qui est mesurée, la contrainte est ensuite déterminée par calcul ou par calibrage.

La méthode utilisée pour mesurer les contraintes dans le cadre du présent travail est la méthode par diffraction des rayons X.

Par souci de comparaison, les différents échantillons sont usinés dans les mêmes conditions de coupe (géométrie de l'outil, diamètre de la pièce, vitesse de rotation), seule l'avance change. Nous allons donc vérifier quel est l'effet de l'avance et du changement de l'avance sur les contraintes induites dans la pièce.

Les résultats expérimentaux nous donnent les valeurs suivantes des contraintes :

Tableau 5.1 Tableau de mesures : contraintes provoquées par l'avance.

Avance (mm/tr)	0,254	0,305	0,381	0,457	0,508
Contrainte (Mpa)	708±166	457±298	540±189	694±230	1040±98,8

Tableau 5.2 Contraintes induites dans la zone de variation de l'avance.

Avance (mm/tr)	0,305 → 0,457	0,305 → 0,508	0,254 → 0,508
Contrainte (Mpa)	500±206	610±116,9	1012±59,6

Nous remarquons que les contraintes dans la pièce sont d'abord assez élevées, ensuite elles diminuent jusqu'à une certaine valeur, pour enfin augmenter avec l'avance tel qu'illustré par la figure 5.2. Étant donné qu'il est difficile de mesurer les contraintes exactement au lieu de changement de l'avance, nous les avons mesurées dans une zone d'environ 2 mm de part et d'autre de ce lieu de changement. Les contraintes observées représentent la moyenne de contraintes induites par les deux avances représentant les deux paliers de variation, de part et d'autre de la zone de variation. Ce n'est pas en tant que tel le fait de varier l'avance qui génère des contraintes dans la pièce, mais en temps normal, l'avance elle-même en génère. Toutefois, les différences ne sont pas très grandes, en dehors du cas où la différence entre les deux paliers d'avance est relativement grande.

On obtient la courbe ci-après :

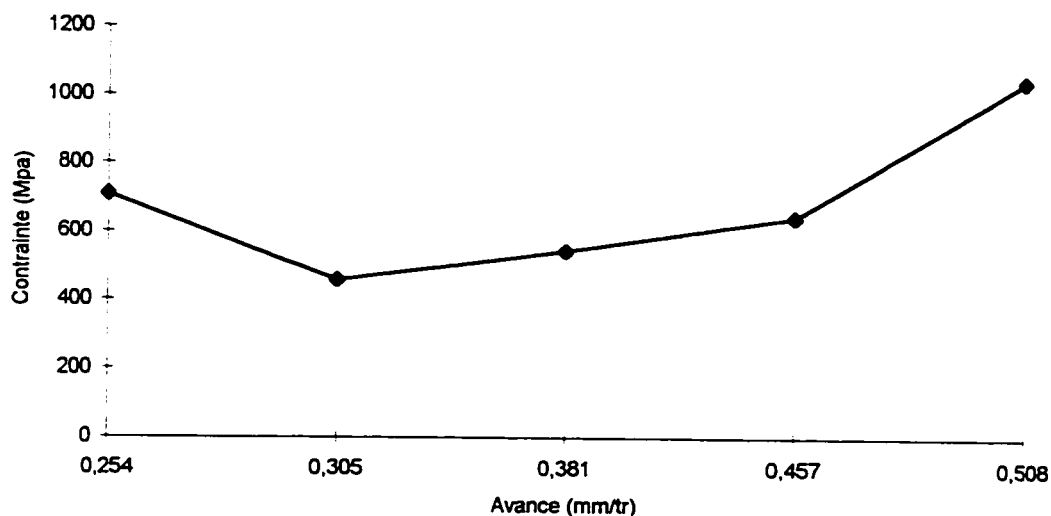


Figure 5.2 Contraintes en fonction de l'avance.

Un exemple de résultats d'analyse de contraintes est donné en ANNEXE III.

5-2 INFLUENCE DE LA VARIATION DE L'AVANCE SUR L'ÉTAT DE SURFACE DE LA PIÈCE

Parmi les nombreux facteurs dont dépend l'aptitude d'une pièce mécanique à satisfaire une ou plusieurs fonctions données figurent les caractéristiques de ses états de surface. Pour cela, nous observerons quel est l'impact de la variation de l'avance sur l'état de surface des pièces usinées. Il convient toutefois de relever que notre travail étant fait en phase d'ébauche, l'état de surface ne constitue pas un facteur déterminant pour nous, mais il le serait en phase de finition.

La mesure de l'état de surface est faite à l'aide d'un profilomètre. Comme nous l'avons dit un peu plus haut, ce n'est pas la valeur de l'indice de rugosité qui nous intéresse, mais plutôt les effets de la variation de l'avance sur le fini de la pièce, et plus particulièrement d'observer ce qui se passe dans la zone de changement d'avances.

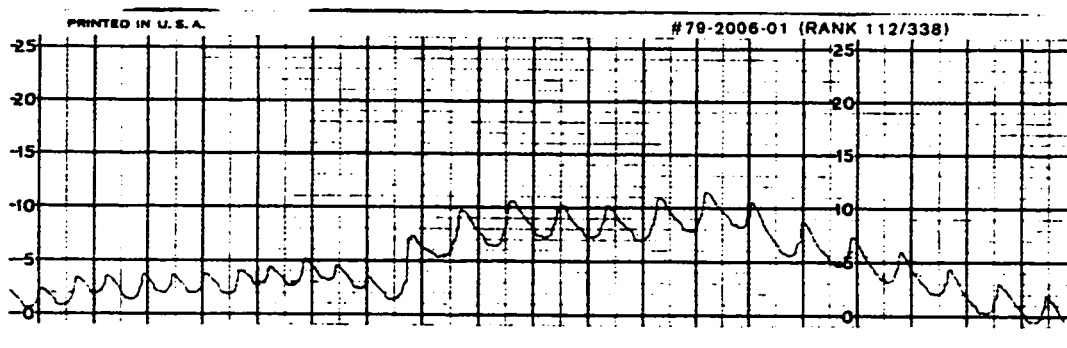
Nous avons testé plusieurs séquences de variation d'avances :

- séquences de variation croissante et décroissante,
- séquence d'une grande avance avec une petite avance,
- séquence de deux petites avances : usinage de finition.

Les profils de surface ci-dessous ont été obtenus :

a) Séquence croissante :

a-1) 0,305 mm/tr $\rightarrow$ 0,457 mm/tr

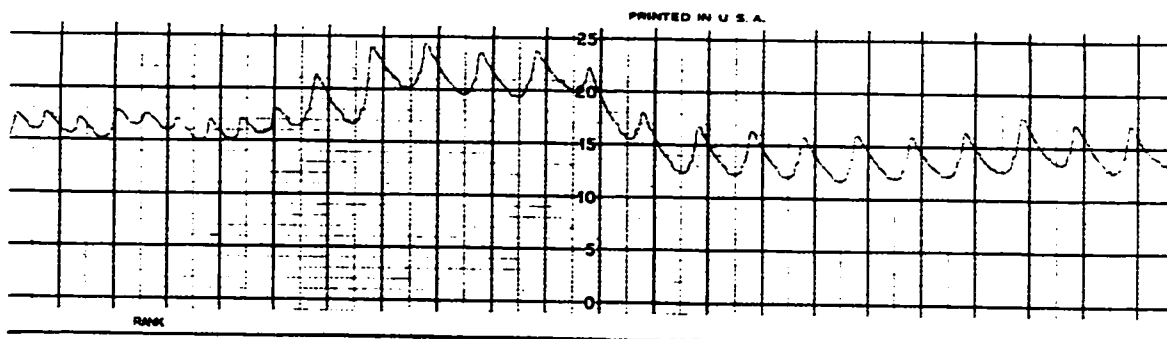


Échelle : 0,7

amplification 20 (axe des x) x 500 (axe des y)

Axes des x et y : une graduation = 2 mm (échelle 1)

a-2) 0,305 mm/tr $\rightarrow$ 0,508 mm/tr

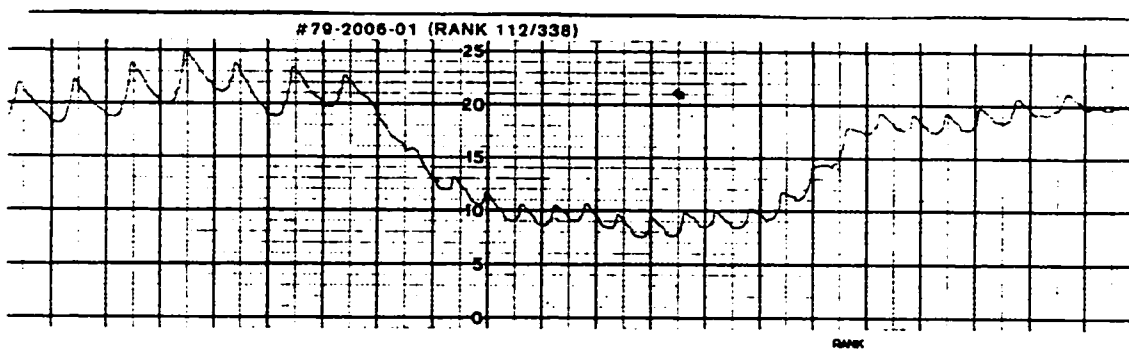


Échelle : 0,7

amplification 20 (axe des x) x 500 (axe des y)

Axes des x et y : une graduation = 2 mm (échelle 1)

b) séquence décroissante : 0,508 mm/tr $\rightarrow$ 0,305 mm/tr

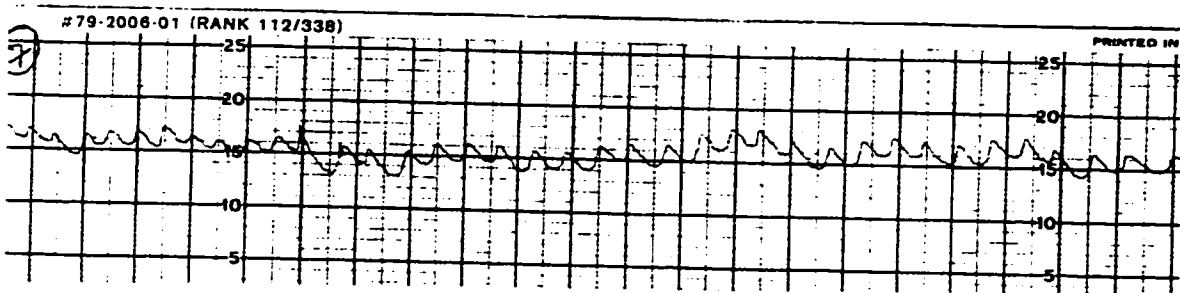


Échelle : 0,7

amplification 20 (axe des x) x 500 (axe des y)

Axes des x et y : une graduation = 2 mm (échelle 1)

c) séquence de deux petites avances : 0,254 mm/tr $\rightarrow$ 0,305 mm/tr



Échelle : 0,7

amplification 20 (axe des x) x 500 (axe des y)

Axes des x et y : une graduation = 2 mm (échelle 1)

Nous pouvons en tirer les conclusions ci-après :

- on observe comme un recul de l'outil lorsqu'on passe d'une grande avance à une petite avance (séquence croissante) et le mouvement contraire lors d'une séquence décroissante. Cela pourrait s'expliquer comme étant une diminution de l'effort de coupe dans le cas décroissant et une augmentation de l'effort de coupe lors d'une séquence croissante. Toutefois d'autres phénomènes tels la rigidité des éléments en présence, les jeux dans les organes de transmission pourraient être pris en considération. Nous notons que la valeur de la dénivellation observée dépend des valeurs des deux paliers d'avances. Plus la différence entre les deux avances est grande, plus

la dénivellation est importante. La longueur de cette dénivellation dans presque tous les cas est de 3,5 mm. Ceci pourrait correspondre au temps de réponse de la machine. Étant donné que la vitesse de rotation était la même dans les différents cas de figures, après calcul, ce temps est de l'ordre de 3/4 de seconde.

- Lors de l'utilisation de deux petites avances, la valeur de la dénivellation est presque nulle. Ce cas d'usinage pourrait correspondre à l'usinage en finition, ce qui voudrait donc dire que le fait de varier l'avance en cours d'usinage pourrait être sans grande conséquence pour l'état de surface en usinage de finition.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le présent travail nous a permis d'observer le développement de l'usure aussi bien en avance constante qu'en avance variable lors du tournage ébauche de l'acier au chrome - molybdène 4140 et d'analyser les conséquences de la variation de l'avance sur la qualité de la pièce.

6-1 CONFIRMATION DES NOTIONS DE BASE

Nous avons ainsi pu vérifier et confirmer les affirmations suivantes :

- La longueur de contact entre le copeau et la face de coupe augmente lorsque l'avance augmente. **[LEN76, BRO83, SADEK et al.]**
- La position du centre du cratère et la largeur du cratère restent pratiquement invariants dans le temps pour une même avance. **[OPITZ et WEBER]**
- La profondeur du cratère augmente dans le temps.

6-2 TRAVAUX EFFECTUÉS

6-2-1 Avance constante

En avance constante, on observe une rapide progression de l'usure due au développement du cratère, tandis qu'en avance variable, le profil d'usure est moins profond et plus plat.

6-2-2 Avance variable

- Nous avons développé une nouvelle approche de variation de l'avance en cours d'usinage basée sur l'utilisation de deux avances seulement, contrairement aux méthodes jusque-là utilisées qui demandaient l'utilisation d'un nombre élevé d'avances. Il ressort des essais effectués que les paramètres de variation les plus importants sont les valeurs des avances retenues et les temps de maintien à ces avances. Il n'est pas nécessaire non plus de garder ces temps de maintien identiques car les taux d'usure ne sont pas identiques pour toutes les avances.

- Les résultats expérimentaux nous ont permis d'observer des gains sur l'usure en cratère pouvant atteindre 60 à 70 % suivant les séquences de variation comme le montre la figure 4.26.
- Grâce à cette nouvelle méthode, les cycles de variation de l'avance sont simplifiés, les programmes de commande numérique sont plus courts et plus faciles à élaborer.
- On observe un recul ou une remontée de l'outil pendant un temps relativement court qui correspondrait au temps de réponse de la machine entre deux variations de l'avance. Ce temps est de l'ordre de 3/4 de seconde pour le tour BRIDGEPORT et dépend à la fois de la vitesse de rotation et de l'avance utilisée.
- Il convient de signaler que les valeurs des avances utilisées dans le cadre du présent travail ne sont pas transposables à un autre cas. Par conséquent tout dépendant du matériau usiné, de la machine utilisée, des outils choisis et du type d'opérations effectuées, un certain nombre d'essais préliminaires sont nécessaires afin de trouver les paramètres optimaux de variation.

6-3 RECOMMANDATIONS :

- Étendre le présent travail pour d'autres matériaux de pièce,
- Étudier les conséquences de la variation de l'avance en usinage de finition,
- Observer les répartitions des températures sur la face de coupe en avance constante et en avance variable.
- Étudier pour d'autres machines le profil des surfaces de pièces et évaluer les temps de réponse de ces machines lors des changements d'avances.

BIBLIOGRAPHIE

- [AYH94] AY, Herchang, YANG, Wen-Jei et YANG, Juhchin A. (1994). Dynamics of Cutting Tool Temperatures during Cutting Process. Experimental Heat Transfer, 203-216.
- [BAL94] BALAZINSKI, M. et ENNAJIMI, E. (1994 November). Influence of Feed Variation on Tool Wear When Milling Stainless Steel 17-4PH. Journal of Engineering for Industry, 116, 516-520.
- [BAL93] BALAZINSKI, M., LITWIN, J. et FORTIN, C. (1993). Influence of the Feed Variations on Tool Wear When Machining Inconel 600. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Special issue n. 93-CSME-39, 17, N° 4A, 273-280.
- [BAL96] BALAZINSKI, M. et PLAZA, M. (1996 May). The Impact of Feed Variation on Chip Flow and Tool Wear. Proceedings of the 13th Symposium on Engineering Applications of Mechanics, 630-636.
- [BAL95] BALAZINSKI, M. et SONGMENE, V. (1995 January). Improvement of Tool Life through Variable Feed Milling of Inconel 600. Annals of the CIRP, 55-58.
- [BAZ92] BAZERUKE, R. (1992 Décembre). Influence de la variation des paramètres de coupe sur l'usure de l'outil de coupe pendant l'usinage des

matériaux durs. Mémoire de Maîtrise en Sciences Appliquées, École Polytechnique de Montréal, Canada.

[BER] SCHOLTES, Berthold. Residual Stresses Introduced by Machining. Institut für workstoffkunde 1, Universität karlsruhe.

[BHA68] BHATTACHARYYA, A. et GHOSH, A. (1968 September). Diffusion Wear in Cutting Tools. Annals of CIRP, 16, N° 4. 369-375.

[BIT93] BITTES, G. (1993 Novembre). Contribution à la connaissance des mécanismes fondamentaux liés à l'usinabilité des aciers de construction mécanique. Thèse de Doctorat d'état, Université de Toulon, France.

[BLA61] BLACK, P. H. (1961). Theory of Metal Cutting. McGraw-Hill Book Company, Inc.

[BLA55] BLANPAIN, E. (1955). Théorie et Pratique des outils de coupe. Éditions Eyrolles, Paris.

[BOO63] BOOTHROYD, G. (1963). Temperatures in Orthogonal Metal Cutting. Proc. Inst. Mech. Engrs, 177, N° 29, 789-802.

[BOU64] BOUILLET, J. P. (1964). La coupe des métaux: l'outil, la formation du copeau, Tome 1, Dunod, Paris.

[BOU95] BOUZID, W. (1995 Septembre). Etude bibliographique du tournage orthogonal, Mécanique Industrielle et Matériaux, Vol. 48, N° 3, 131-135.

[BRO83] BROWN, C. A. (1983). A Practical Method for Estimating Machining Forces from Tool-Chip Contact Area. Annals of CIRP, 32, N° 1, 91-95.

- [CHA91] CHAN, Cho Lik et CHANDRA, Abhijit. (1991 August). A Boundary Element Method Analysis of the Thermal Aspects of Metal Cutting Processes. Journal of Engineering for Industry, 113, 311-319.
- [CHA95] CHANG, Chung-Shin et FUH, Kuang-Hua. (1995). A study of Cutting Performance in Turning Plain Carbon Steel using TiN-coated, TiCN-coate, and Uncoated Cemented Carbide Tools with Chamfered Main Cutting Edge. Materials and Manufacturing Processes, 10, N° 3, 453-472.
- [CHA61] CHAO, B. T., LI, H. L. et KRIGGER, K. J. (1961 November). An Experimental Investigation of Temperature Distribution at Tool-flank Surface. Transactions of the ASME, 496-504.
- [CHE94] CHEN, Zhaohui G. et BLACK, J. T. (1994 June). FEM Modelling in Metal Cutting. Manufacturing Review, 7, N° 2, 120-133.
- [CHO88] CHOW, J. G. et WRIGHT, P. K. (1988 February). On-line Estimation of Tool/Chip Interface Temperatures for a Turning Operation. Transactions of the ASME, 110, 56-64.
- [COO73] COOK, N. H. (1973 November) Tool Wear and Tool Life. Journal of Engineering for industry, 931-938.
- [COO63] COOK, N. H., JHAVERI, P. et NAYAK, P. (1963 November), The Mechanism of Chip Curl and its Importance in Metal Cutting. Journal of Engineering for industry, 374-380.

- [DEV77] DEVOR, R. E., ANDERSON, D. L. et ZDEBLICK, W. J. (1977 August). Tool Life Variation and its Influence on the Development of Tool Life Models, Journal of Engineering for industry, 578-584.
- [DOU95] DOU, S., DU, Y. et SHI, W., (1995), The Detection and Compensation of Tool Wear in Process. Journal of Materials Processing Technology, 48, 283-290.
- [DOU90] DOUG, Y. Jang et SEIREG, Ali. (1990). A Model for Predicting Residual Stresses in Metal Cutting. Proceedings of the Japan International Tribology Conference, Nagoya.
- [DOY] DOYLE, L. E. Manufacturing Processes and Materials for Engineers, Second Edition, Prentice-Hall, Inc.
- [ENN92] ENNAJIMI, E. (1992 Décembre). Influence de la variation de l'avance sur l'usure lors du fraisage de l'acier inoxydable 17-4PH. Mémoire de Maîtrise en Sciences Appliquées, École Polytechnique de Montréal, Canada.
- [FIS35] FISHER, R. A. (1966). The Design of Experiments. Oliver & Boyd, Edinburg. 1935- 51.
- [FOR90] FORTIN, C., BALAZINSKI, M., MONDALSKI, K. et SLOMSKI, J. (1990). Study of the Influence of Feed Variation on Tool Wear. the American Society of Mechanical Engineers, 43, 115-122.

- [FUH95] FUH, Kuang-Hua et CHANG, Chung-Shin. (1995). Turning of Stainless Steel with Main Cutting Edge Tools. Materials and Manufacturing Processes, 10, N° 3, 473-492.
- [GAD92] GAD, G. S., ARMAREGO E. J. A. et SMITH A. J. R. (1992). Tool Contact Length in Orthogonal Machining and its Importance in Tool Temperature Predictions. International Journal of Production Research, 30, n°3, 485-501.
- [GOU88] GOUPY, J., (1988). La méthode des plans d'expériences: optimisation du choix des essais & de l'interprétation des résultats, Dunod, Bordas, Paris.
- [HSU69] HSU, T. C., (1969 August). A study of Wear on Cemented Carbide Cutting Tools. Transactions of the ASME, 652-658.
- [KAL95] KALPAKJIAN, S. (1995). Manufacturing Engineering and Technology. Third Edition, Addison-Wesley Publishing Company.
- [KAR78] KARAPANTEV, P. (1978 January). Investigation on Some Wear Parameters of CVD Layers on Carbides by a Scanning Electron Microscope. Annals of the CIRP. Vol. 27, 79-85.
- [KLI96] KLIM, Z., ENNAJIMI, E., BALAZINSKI, M. et FORTIN, C. (1996). Cutting Tool Reliability Analysis for Variable Feed Milling of 17-4PH Stainless Steel. Wear, 195, 206-213.
- [KOB60] KOBAYASHI, S. et THOMSEN, E. G. (1960 November). The Role of Friction in Metal Cutting. Transactions of the ASME, 324-332.

- [KOE95] KOELSCH, J. R., (1995 July). A Deeper Understanding of Machining. Manufacturing Engineering, 57-61.
- [KOM91] KOMVOPOULOS, K. et ERPENBECK, S. A. (1991 August). Finite Element Modelling of Orthogonal Metal Cutting. Journal of Engineering for Industry. 113, 253-267.
- [LOE54] LOEWEN, E. G. et SHAW, M. C. (1954 February) On the Analysis of Cutting-Tool Temperatures. Transactions of the ASME, 217-231.
- [MDH] Machining Data Handbook, 1 & 2.
- [MER45] MERCHANT, M. E. (1945 May). Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and Type 2 Chip. Journal of Applied Physics 16, N° 5, 267-275.
- [MIL83] MILLS, B. et REDFORD, A. H. (1983). Machinability of Engineering Materials. Applied Science Publishers.
- [NAR79] NARUTAKI, N. et YAMANE, Y. (1979 January). Tool Wear and Cutting Temperature of CBN Tools in Machining of Hardened Steels. Annals of the CIRP, 28, 23-28.
- [OHT88] OHTANI, Toshiaki et YOKOGAWA, Hiroshi. (1988 September). The Effects of Work piece Hardness on Tool Wear Characteristics. Bull. Japan Soc. of Prec. Engg. Vol. 22, N° 3, 229-231.
- [OBE92] OBERG, E., FRANKLIN, D. J. et HOLBROOK, L. H, RYPPEL, H. H. (1992). Machinery's Handbook, 24th Edition, Industrial Press Inc., New York.

- [OXL62] OXLEY, P. L. B. (1962). An Analysis for Orthogonal Cutting with Restricted Tool-Chip Contact. Int. J. Mech. Sci., 4, 129-135.
- [POM] POMEY, J. Phénomènes de Mécanique Physiques qui régissent la coupe des Métaux. Mécanique - Matériaux - Electricité. 8-36.
- [RAD94] RADULESCU, R. et KAPPOOR S. G. (1994 May). An Analytical Model for Prediction of Tool Temperature Fields during Continuous and Interrupted Cutting. Journal of Engineering for Industry, 116, 135-143.
- [REI58] REICHENBACH, G. S. (1958 April). Experimental Measurement of Metal Cutting Temperature Distributions. Transactions of the ASME, 525-540.
- [SHA84] SHAW, M. C. (1984). Metal Cutting Principles, Oxford Science Publications.
- [SAD93] SADIK, M. I. et LIDSTROM, Bo. (1993). The Role of Tool-Chip Contact Length in Metal cutting. Journal of Materials Processing Technology, 37, 613-627.
- [SAD95] SADIK, M. I. et LIDSTROM, Bo. (1995) The Effect of Restricted Contact Length on Tool Performance. Journal of Materials Processing Technology, 48, 275-282.
- [SAI87] SAINT-CHELY, J., FANTIN, J. P. et LETELLIER, J. (1987). Choix des outils et des conditions de coupe en tournage, CETIM.
- [SNE80] SNEDECOR, G. W. et COCHRAN, W. G. (1980). Statistical Methods, Seventh Edition, The Iowa State University Press.

- [SON93] SONGMÉNÉ, V. (1993 Décembre). Influence de la variation des paramètres de coupe sur l'usure de l'outil de coupe pendant l'usinage de l'INCONEL 600, Mémoire de Maîtrise en Sciences Appliquées, École Polytechnique de Montréal.
- [STE92] STEPHENSON, D. A., ALI A. (1992 May). Tool Temperatures in Interrupted Metal Cutting. Journal of engineering for industry, 127-136.
- [STR85] STREKOWSKI, J. S. et CAROLL III J. T. (1985 November). A Finite Element Model of Orthogonal Cutting. Journal of Engineering for Industry, 107, 349-354.
- [TAK56] TAKEYAMA, H. (1956). The Effect of Cutting Speed in Metal Machining. Journal of the Society for Precision Mechanics of Japan, 22, N° 8, 354-358.
- [TAK57] TAKEYAMA, H. (1957). Effect of Tool-Chip Contact Area on Tool Life. Journal of the Society for Precision Mechanics of Japan, 23, N° 2, 26-29.
- [TAK58] TAKEYAMA, H. et USUI E. (1958 July). The Effect of Tool-Chip Contact Area in Metal Machining. Transactions of the ASME, 1089-1096.
- [TAK63] TAKEYAMA, H., MURATA, R. (1963 February). Basic Investigation of Tool Wear. Journal of Engineering for Industry, 33-38.
- [TEO93] TEO, S. C., LEE, K. S. et LEE, L. C. (1993). A Study of the consistency of Tool Failure. Journal of Materials Processing Technology, 37, 629-637.

- [TRE84] TRENT, E. M. (1984). Metal Cutting, Second Edition, Butterworths.
- [TRE81] TRENT, E. M. et SMART E. F. (1981 Août - Septembre). Distribution de la température dans les outils de coupe des aciers. Matériaux et Techniques, 291-293.
- [VIG88] VIGIER, M. G. (1988) Pratique des plans d'expériences: méthodologie Taguchi, Les éditions d'organisation, Paris.
- [WOO77] WOODWARD, R.L. (1977 August). Determination of Plastic Contact Length Between Chip and Tool in Machining. Journal of Engineering for industry, 802-804.
- [WRI73] WRIGHT, P. K. et TRENT, E. M. (1973 May). Metallographic Methods of Determining Temperature Gradients in Cutting Tools. Journal of the Iron and Steel Institute, 364-368.
- [XIE95] XIE, J. Q., BAYOUMI, A. E. et ZBIB, H. M. (1995 February). Analytical and Experimental Study of Shear Localisation in Chip Formation in Orthogonal Machining. Journal of Materials Engineering and Performance, 4(1), 32-39.
- [YOU94] YOUNG, H. T. et CHOU, T. L. (1994). Modelling of Tool/Chip Interface Temperature Distribution in Metal Cutting. Int. J. Mech. Sci., 36, N° 10, 931-943.

ANNEXES

ANNEXE I

EXEMPLE DE PROGRAMME UTILISE EN AVANCE CONSTANTE.

```
0000 EZPATH|SX 1 MODE|INCH WED MAY 07 10:19:33 1997
0010 TLCHG I8 T04 04
0020 SETRPM S530
0030 RAPID ABS X3.1000 Z0.0500
0040 LINE ABS X2.8400 Z0.0500 F0.015
0050 LINE ABS X2.8400 Z-14.2000 F0.015
0060 LINE ABS X3.0000 Z-14.2000 F0.015
0070 RAPID ABS X3.0000 Z0.0500
0080 LINE ABS X2.8000 Z0.0500 F0.015
0090 LINE ABS X2.8000 Z-14.1500 F0.015
0100 LINE ABS X3.0000 Z-14.1500 F0.015
0110 RAPID ABS X3.0000 Z0.0500
0120 LINE ABS X2.7600 Z0.0500 F0.015
0130 LINE ABS X2.7600 Z-14.1000 F0.015
0140 LINE ABS X2.9000 Z-14.1000 F0.015
0150 RAPID ABS X2.9000 Z0.0500
0160 LINE ABS X2.7200 Z0.0500 F0.015
0170 LINE ABS X2.7200 Z-13.8000 F0.015
0180 LINE ABS X3.1000 Z-13.8000 F0.015
0190 RAPID ABS X3.1000 Z0.0500
0200 AUXFUN M0
```

ANNEXE II

EXEMPLE DE PROGRAMME UTILISE EN AVANCE VARIABLE.

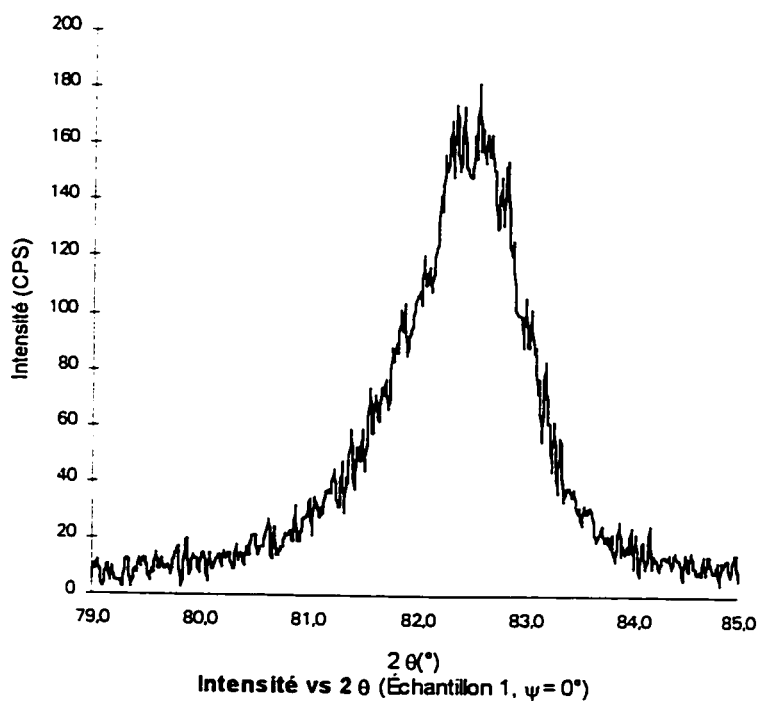
```
0000 EZPATH|SX 1 MODE|INCH WED MAY 07 10:52:11 1997
0010 TLCHG I8 T04 04
0020 SETRPM S530
0030 RAPID ABS X2.5000 Z0.0500
0040 LINE ABS X2.2000 Z0.0500 F0.040
0050 LINE ABS X2.2000 Z-14.2000 F0.01
0060 LINE ABS X2.4000 Z-14.2000 F0.04
0070 RAPID ABS X2.4000 Z0.0500
0080 LINE ABS X2.1600 Z0.0500 F0.040
0090 LINE ABS X2.1600 Z-1.7000 F0.01
0100 LINE ABS X2.1600 Z-12.3000 F0.02
0110 LINE ABS X2.1600 Z-14.1500 F0.01
0120 LINE ABS X2.4000 Z-14.1500 F0.04
0130 RAPID ABS X2.4000 Z0.0500
0140 LINE ABS X2.1200 Z0.0500 F0.040
0150 LINE ABS X2.1200 Z-14.0500 F0.01
0160 LINE ABS X2.1200 Z-14.1000 F0.02
0170 LINE ABS X2.3000 Z-14.1000 F0.04
0180 RAPID ABS X2.3000 Z0.0500
0190 LINE ABS X2.0800 Z0.0500 F0.040
0200 LINE ABS X2.0800 Z-10.5500 F0.02
0210 LINE ABS X2.0800 Z-14.0500 F0.01
0220 LINE ABS X2.3000 Z-14.0500 F0.04
0230 RAPID ABS X2.3000 Z0.0500
0240 LINE ABS X2.0400 Z0.0500 F0.040
0250 LINE ABS X2.0400 Z-12.4000 F0.01
0260 LINE ABS X2.0400 Z-14.0000 F0.02
0270 LINE ABS X2.2000 Z-14.0000 F0.04
0280 RAPID ABS X2.2000 Z0.0500
0290 LINE ABS X2.0000 Z0.0500 F0.040
0300 LINE ABS X2.0000 Z-9.0000 F0.02
0310 LINE ABS X2.0000 Z-13.8750 F0.01
0320 LINE ABS X2.3000 Z-13.8750 F0.04
0330 RAPID ABS X2.3000 Z0.0500
0340 AUXFUN M0
```

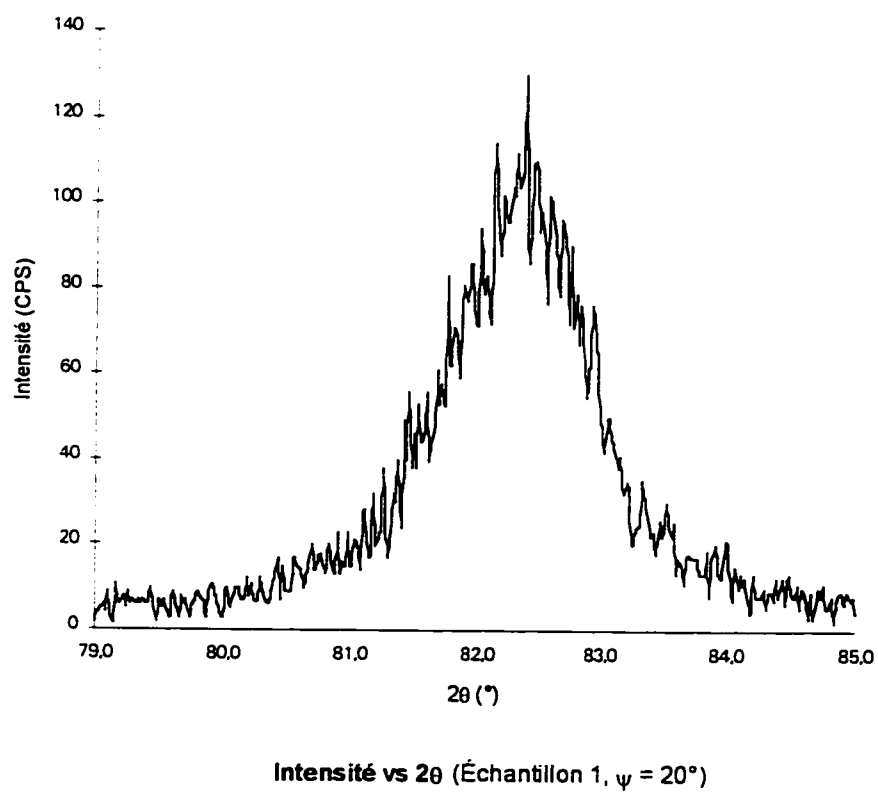
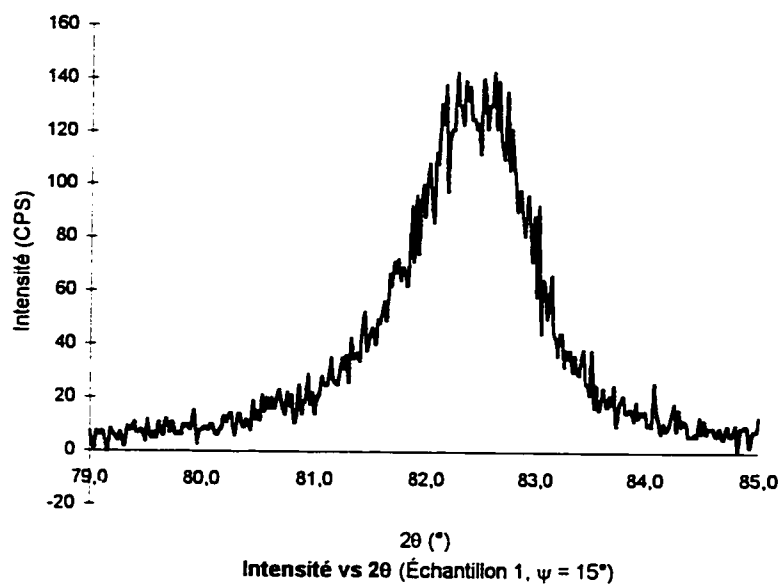
ANNEXE III

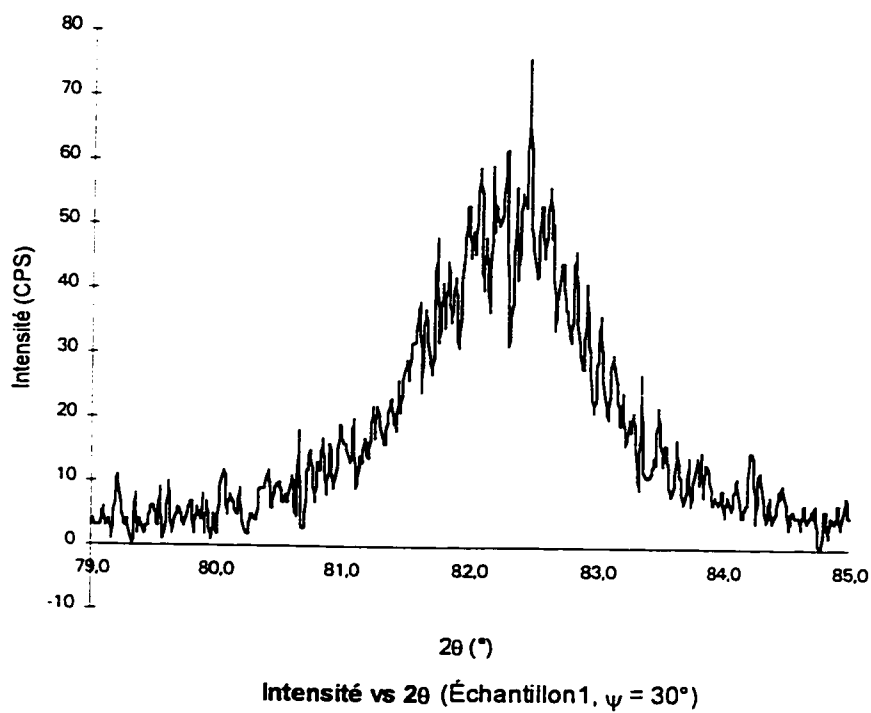
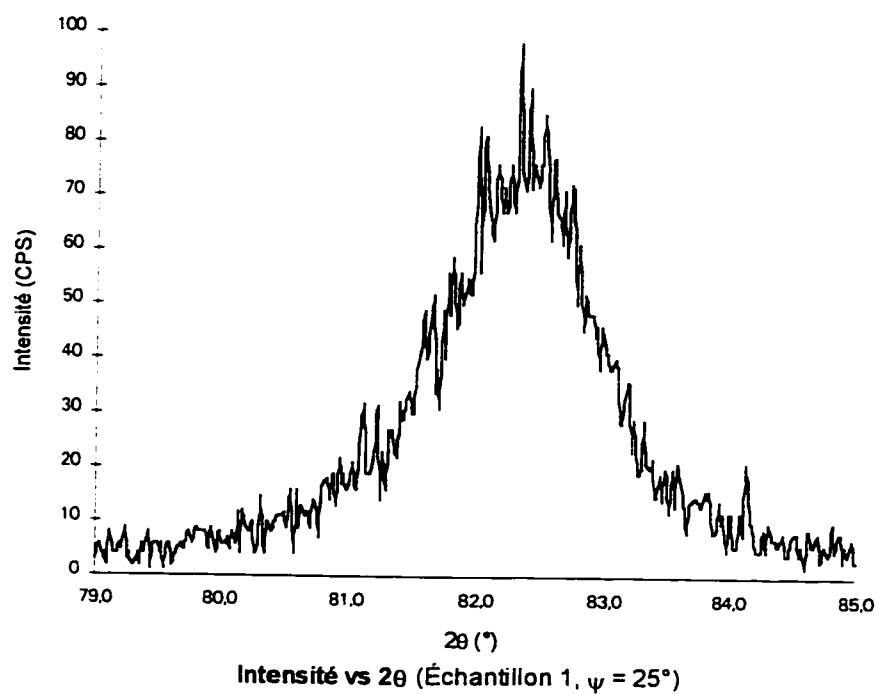
EXEMPLE DE RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES CONTRAINTES

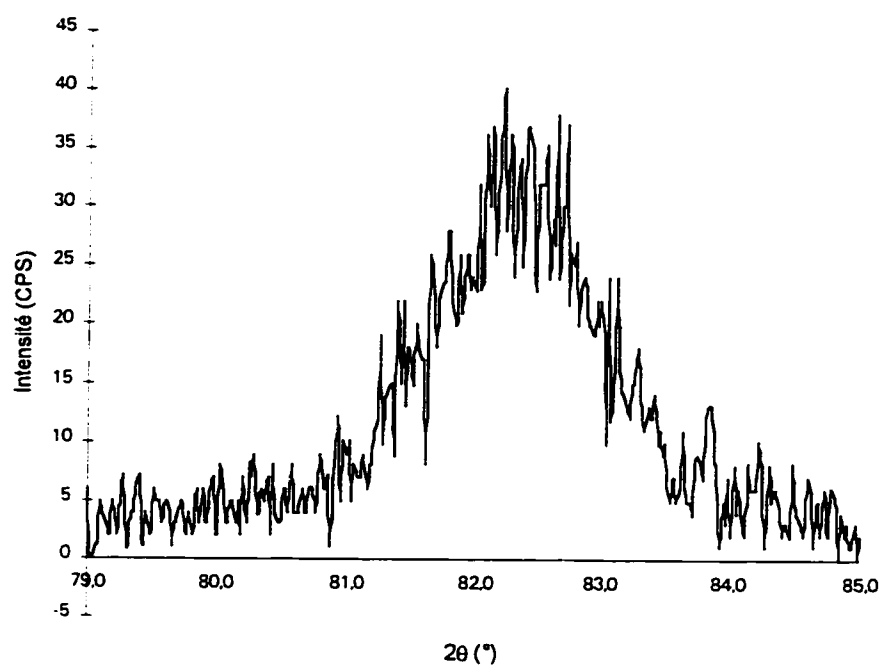
Le principe de la méthode utilisée consiste à trouver les sommets 2θ des courbes lissées $\text{INTENSITE (CPS)} = f(\psi)$ pour différents angles (voir figure 5.1), avec $\psi = (0, 15, 20, 25, 30, 35^\circ)$. Ensuite on trace la droite 2θ en fonction de $\sin^2\psi$. La pente de cette droite, le coefficient de poisson et le module de YOUNG permettent de calculer la contrainte.

Les graphiques et tableau ci-dessous montrent les résultats obtenus dans le cas d'un échantillon analysé dans la zone de changement d'avance, 0,305 tr/mn $\rightarrow$ 0,457 tr/mn, avec une vitesse de coupe $V_c=122$ m/mn).









Intensité vs 2θ (Échantillon 1, $\psi = 35^\circ$)

Pour l'échantillon ci-dessus analysé, nous avons obtenu les valeurs ci-après :

Tableau III.1

ψ (°)	$\text{Sin}^2(\psi)$	Position du sommet (2θ)
0	0	82,342
15	0,067	82,286
20	0,117	82,235
25	0,179	82,242
30	0,250	82,207
35	0,329	82,244

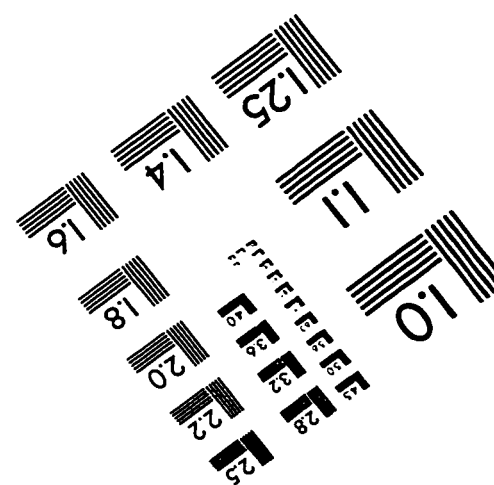
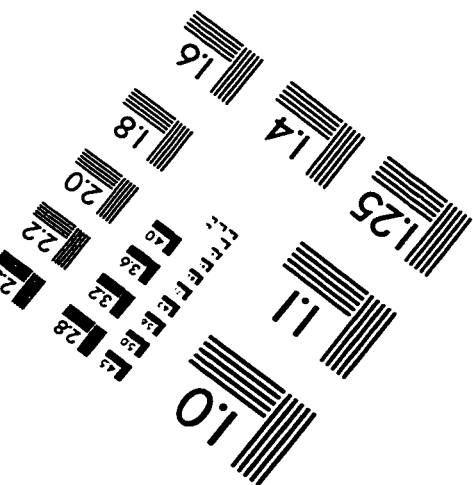
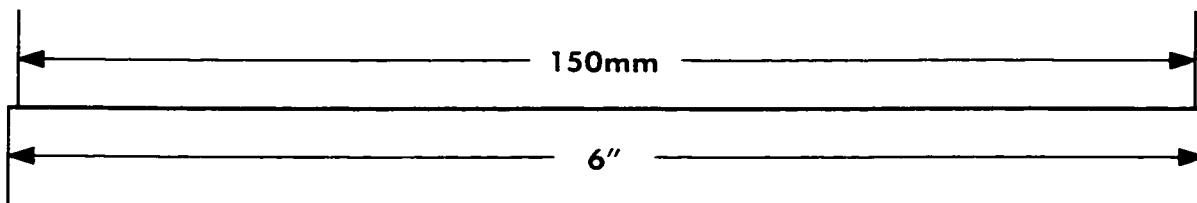
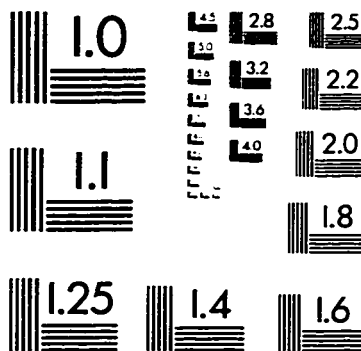
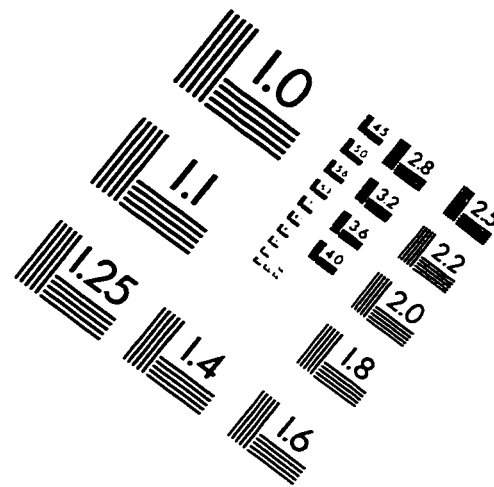
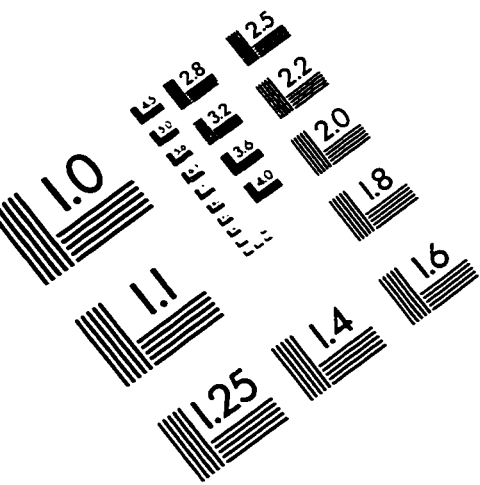
En utilisant les constantes suivantes,

- Module de YOUNG : 210 Gpa,
- Coefficient de poisson : 0,2800
- Longueur d'onde du câble de l'appareil : 1,54060 Å

On obtient :

Contrainte = 500,2 Mpa.

IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved