

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université 08 Mai 1945- Guelma



Mémoire De Magister

Département De : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique & Productique.

Présenté Par :

Hamza Faouzi

Thème

Étude De L'effet Mutuel Du Couple

« Outil- Matière »

En Fonction Des Conditions De Travail En Tournage Dur

Sous La Direction Du : Prof. L: Boulanouar

Devant Le Jury

N.E. Ouelaa
L. Boulanouar
M.A. Yallessé
M.C. Djamaa
A. Amirat

Prof. Président
Prof. Rapporteur
MC. Examineur
MC. Examineur
MC. Examineur

Université de Guelma
Université de Annaba
Université de Guelma
Université de Guelma
Université de Annaba

Guelma 2008

Remerciement

Je tiens à remercier cordialement mon encadreur Monsieur le Professeur *Boulanouar Lakhdar* d'avoir guidé mes pas tout au long du chemin de la réalisation de ce mémoire de magister. J'ai apprécié son expérience dans le domaine technique et pédagogique.

Je tiens à remercier *Mr. Ouelaa Noureddine* d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je remercie *Mr : Yallese Mohamed Athmane* pour le soutien dont il m'a fait part et d'avoir accepté d'être parmi les membres du jury, ainsi que *Mr. M. C. Djamaa et Mr.A. Amirat*.

Mes remerciements s'adressent aussi au personnel technique et administratif du département de mécanique, ainsi que toute personne qui a contribué de près ou de loin en m'apportant son aide et sa compétence et leur exprime ma profonde gratitude pour leur disponibilité illimitée.

DÉDICACE

A mon père

A ma chère mère

A mon frère Dr. M. Hamza

A mes frères, mes sœurs

A toute ma famille, mes amis

Table des matières

ملخص	1
Abstract	2
Résumé	3
Nomenclature	4
<i>INTRODUCTION ;</i>	5
<i>Problématique ;</i>	7
<i>Chapitre I ;</i>	8
<i>Étude Bibliographique</i>	8
I-1)- <i>L'USINAGE : définition</i>	9
I-1-2)- La Coupe orthogonale	10
I-2)- Le tournage	10
I-2-1)- Paramètres De Coupe En Tournage	11
I-3) LE TOURNAGE DUR	12
I-3-1)- Généralité	12
I-3-2)- Statistique sur le tournage dur	14
I-3-3)- Les recherches sur le tournage dur	15
I-4)- EVOLUTION DES MACHINES OUTIL	17
I-5)- EVOLUTION DES OUTILS DE COUPE	17
I-5-1)- Rôle de L'outil	18
I-5-2)- Evolution des matériaux des outils de coupe	19
I-6)- EVOLUTION DES MATERIAUX	25
I-7)- LUBRIFICATION	25
I-8)- FORMATION DU COPEAU	26
I-9)- ENDOMMAGEMENT DES OUTILS DE COUPE : généralités	28
I-9-1)- Influence Des Paramètres De Coupe Sur L'usure	29
I-9-2)-Formes D'usure	30
I-9-3)- Les Mécanismes d'usure des outils	31
I-9-4)- Usure visible sur l'outil	34
I-9-5)- Critères d'usure	39
I-9-6)- Modèles de lois d'usure	39
I-9-7)- Conclusion partielle	41
I-10)- ETATS DE SURFACE: généralité	42
I-10-1)- Analyse d'une surface	43
I-10-2)- Paramètres liés à la ligne moyenne	44
I-10-3)- Conclusion partielle	44
I-11)- CONCLUSION	45
<i>Chapitre II ; EQUIPEMENTS UTILISES ET PLANIFICATION DES EXPERIENCES</i>	46
II-1)- EQUIPEMENT UTILISES	47
II -1-1)- Machine outil	47
II -1-2)- Matière à usiner	47
II -1-3)-Géométrie des éprouvettes	48
II -1-4)- Outils de coupe utiliser	49
II -1-5)- Appareillage de mesure utiliser	50
II -2)- PLANIFICATION DES EXPERIENCES	55
II -2-1)- Introduction	55
II -2-2)- Méthode unifactorielle	56
II -2-3)- Méthode multifactorielle	56

II -3)- <i>CONDITION DE TRAITEMENT THERMIQUE</i>	62
II -4)- <i>CONDITION DE COUPE</i>	63
<i>Chapitre III ; RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATION</i>	64
III-1)- <i>RESULTATS ET INTERPRETATION DES EFFORTS DE COUPE ET DE LA RUGOSITE</i>	65
III -1-1)- Étude de l'évolution des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe	65
III-1-2) Etude de l'évolution de la rugosité en fonction des conditions de coupe	80
III-1-3)- Détermination des modèles mathématiques	83
III-2)- <i>RÉSULTATS ET INTÈTPRETATION DE L'USURE ET INTÉRACTION AVEC LES AUTRES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES</i>	88
III-2-1)- Étude de l'évolution de l'usure en fonction des conditions de coupe	88
III-2-2)- Étude de l'évolution des paramètres technologiques d'usinage en fonction de l'usure en dépouille VB et des conditions de coupe	100
III-2-3)- Détermination des modèles mathématiques	104
III-3)- <i>CONCLUSION PARTIELLE</i>	109
<u>Conclusion générale</u>	111
<u>Perespectives</u>	112
<u>Référence Bibliographique</u>	113
	117
	<i>Annexe</i>
<i>Programme de calcul des modèles mathématiques (Matlab)</i>	



يتعلق هذا البحث العلمي بدراسة تشغيل المواد الحديدية شديدة الصلابة (HRC 60-45) المستعملة في الميادين الخاصة بصناعة السيارات، الطائرات و كذلك الصناعات النووية. باستعمال الطريقة سريعة التجارب ألا وهي الخراطة، المعروفة بإسم الخراطة الصلبة التي تحتاج بدورها إلى استخدام مواد القطع القادرة على ذلك والتي بإمكانها إظهار خصائص القطع الجيدة التي توفر لنا حالة السطح المرجوة من كل منتج نهائي. على هذا الأساس قمنا بتوفير الشروط المؤدية إلى العمل في الخراطة الصلبة أي المادة المشغلة وهي الصلب المستعمل في صناعة المدحرجات و مكملاتها (100Cr6) الذي قد تصل صلابته بعد المعالجة الحرارية إلى HRC 60 و أداة القطع ذات الخصائص العالية التشغيل وهي السيراميك (CC650).

الأساس في هذه الدراسة هو متابعة و تحليل التأثير المتبادل بين الأداة و المادة بدلالة شروط القطع لهذا الصدد قسمت هذه الدراسة إلى جزأين أساسيين:

الجزء الأول، خاص بدراسة تغيرات قوى القطع و كذا حالة السطح بدلالة شروط القطع باستعمال طريقتي التجارب " أحادية العامل و متعددة العوامل" أثناء تشغيل الصلب (100Cr6) قبل و بعد المعالجة الحرارية.

الجزء الثاني، تتم فيه دراسات حول تأثير شروط القطع على تآكل الأداة و منه العوامل التكنولوجية للتشغيل "قوى القطع، الخشونة و كذا حرارة القطع" باستعمال طريقة التجارب " متعددة العوامل". كما تم إنهاء كلا من الجزأين المدروسين بإنجاز النماذج الرياضية التي تمكننا من حساب العوامل التكنولوجية اعتمادا على نتائج التجارب المحصل عليها من خلال الطريقتين " أحادية العامل و متعددة العوامل" و التعليق عليها.

استنتاجا لما سبق، نستخلص أن الاتصال المثالي بين الأداة و القطعة في الخراطة الصلبة ينضم من خلال الاختيار الأمثل لشروط القطع الخاصة بعملية الإنهاء. دون أن ننسى الاستعانة بأدوات القطع العالية الكفاءة، الجديرة بتشغيل المواد شديدة الصلابة بأطول مدة حياة ممكنة.

كلمات المفاتيح: الخراطة الصلبة، سيراميك (CC650)، صلب (100Cr6)، قوى القطع، الخشونة، التآكل.

Abstract

This study, concerns with the machining of very hard materials (45- 62HRC), While using the process most widespread with is turning, called hard turning. For this operation us fronts selected a cutting tool known for their high performance and which can widespread with these requirements of turning and can leads us to desirable surface quality with longest behaviour of tool who is it ceramic CC650, and a material machined who can us gone with its hardness with that acceptable with hard turning, most known with their great hardness the bearing steel 100Cr6 (AISI 52100).

Our study is defined in two parts;

The first part relates to the evolution of the cutting force and the surface roughness before end after heat treatment of (100C6) steel according to the cutting conditions with two testing methods (Unifactorielle, Multifactorielle).

The second part is devoted to study of the tool wear with according to the cutting conditions as well as the other technological parameters of machining (surface Roughness, cutting force and the temperature of cut) resulting from the interaction of the tool with the matter during this wear, by using the multifactorielle method.

Each one of these two east parts complete by the determination of the mathematical models which help us to calculate the technological parameters on the basis of experiments result obtained.

Finally it is concluded that the perfect contact Outil- Matter in hard turning is organized by the optimization of the cutting conditions to the work of completion, without forgetting to call upon to high performance tools able to machine of hardness materials with the longest possible behaviour.

Key words: Hard turning, ceramics (CC650), steel (100Cr6), effort de coupe, surface roughness, wear.

Résumé

Cette étude concerne l'usinage des matériaux durs (45- 62HRC), surnommé le tournage dur. Pour satisfaire l'opération nous avons choisi un outil de coupe « céramique CC650 », connu pour sa haute performance ainsi que sa résistance à l'usure. Pour l'usinage de l'acier de roulement « 100Cr6 », connu par sa haute dureté après traitement thermique (60 HRC).

Notre étude est définie en deux parties.

La première partie concerne l'évolution de l'effort de coupe et la rugosité de surface avant et après traitement thermique de l'acier (100C6) en fonction des conditions de coupe, en utilisant les deux méthodes d'essai (Unifactorielle, Multifactorielle).

La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'usure de l'outil en fonction des conditions de coupe ainsi que les autres paramètres technologiques d'usinage (Rugosité de surface, effort de coupe et température de coupe) résultant de l'interaction entre l'outil et la pièce.

Chacune de ces deux parties est achevée par la détermination des modèles mathématiques qui nous aident à calculer les paramètres technologiques d'usinage sur la base des résultats obtenus expérimentalement.

Finalement on conclut que le contact parfait Outil- Matière en tournage dur est organisé par l'optimisation des conditions de coupe au travail de finition, sans oublier de faire appel à des outils de haute performance capables d'usiner des matériaux de dureté élevée avec la plus longue tenue possible.

Mots clés : Tournage dur, céramique (CC650), acier (100Cr6), effort de coupe, rugosité de surface, usure.

Nomenclature

α	Angle de dépouille principale [°]
χ_r	Angle de direction principale [°]
χ_{r1}	Angle de direction auxiliaire [°]
γ	Angle d'attaque [°]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête [°]
V_c	Vitesse de coupe [m/min]
ω	Vitesse angulaire
f	Avance [mm/tr]
a_p	Profondeur de passe [mm]
HB	Dureté Brinell
HRC	Dureté Rockwell
F_a	Effort axial [N]
F_r	Effort radial [N]
F_v	Effort tangentiel [N]
R_a	Rugosité moyenne théorique [μm]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
R_t	Rugosité totale [μm]
K_c	Pression spécifique de coupe [N/mm^2]
K_{ca}	Pression spécifique de coupe axiale [N/mm^2]
K_{cr}	Pression spécifique de coupe radiale [N/mm^2]
K_{cv}	Pression spécifique de coupe tangentielle [N/mm^2]
T-D	Tournage dur
T-C	Tournage conventionnel
VB	Usure en dépouille (frontale) [mm]
KT	Usure en cratère [mm]
VC	Usure entre l'arête initiale et la zone usinée [mm]
VN	Usure en entaille [mm]
T	Tenue [min]
t	Temps [min]
θ°	Température de coupe [°C]
M_c	Mouvement de coupe
M_a	Mouvement d'avance

➤ INTRODUCTION:

Depuis leur apparition, les techniques d'usinage ont subi de multiples améliorations. Les procédés de mise en forme des matériaux par enlèvement de matière n'ont cessé d'être remis en question afin de rester en phase avec les exigences industrielles, quelles soient économiques ou écologiques. Aujourd'hui, l'ingénieur de fabrication se doit donc de pouvoir répondre à une multitude de questions afin de réaliser rapidement des pièces avec la qualité demandée et à moindre coût. Par exemple, dans le cas de l'usinage :

- Quel type de machine faut-il utiliser et suffira-t-il en terme de puissance et de précision ?
- Quelles sont les conditions de coupe à respecter pour minimiser l'endommagement des outils ou du matériau usiné ?
- Quelles sont les solutions à adopter lors de la conception des outils et de quels matériaux doivent-ils être fabriqués pour améliorer leur durée de vie et/ou la qualité des états de surface des pièces usinées ?
- Quelles sont les propriétés mécaniques de la pièce après usinage ? Est-il possible d'usiner sans apport de lubrifiant ? ...

Depuis la révolution industrielle au début du siècle dernier, les machines-outils ont donc considérablement évolué afin de répondre à des exigences telles qu'un meilleur rendement, une plus grande sécurité, une meilleure rigidité, de plus grandes vitesses de déplacement, une puissance accrue, une amélioration de la productivité, une diminution de l'usure des outils de coupe ainsi qu'une amélioration de l'état de surface usinée, etc.... Cette révolution industrielle avec les matériaux de coupe de haute performance nous a conduit durant les vingt dernières années à l'apparition de l'usinage des matériaux très durs, mais cette nouvelle technologie est malheureusement encore mal connue.

Notre étude consiste à étudier l'influence réciproque du couple «outil- matière» en fonction des conditions de travail lors du processus de coupe le plus répandu qui est le tournage.

Cette étude est divisée en deux grandes parties importantes. La première partie consiste à étudier l'évolution de l'effort de coupe et de la rugosité de surface usinée, en tournage dur (T-D) et conventionnel (T-C) ainsi que la formation des copeaux en fonction des conditions de coupe. Cependant, la deuxième partie permet de mettre en exergue l'influence, notamment des éléments du régime sur les paramètres technologiques, qui sont en l'occurrence ; l'usure, la rugosité de surface usinée, la température de coupe et les efforts de coupe, au contact Outil -Matière lors de l'usinage de l'acier de roulement 100Cr6 par un outil de coupe en céramique CC650.

On peut envisager également l'effet mutuel des paramètres technologiques mesurés sur l'outil et sur la pièce.

Dans le but de se constituer une idée claire, nous nous sommes intéressés à une étude bibliographique dans laquelle sont définis, l'évolution des matériaux à outils et la description des phénomènes régissant le processus de coupe (l'usure des outils de coupe, l'effort de coupe, la température de coupe, l'intégrité de la surface usinée et la formation du copeau), en tournage dur.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés pour la réalisation des essais et la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe choisies et les conditions du traitement thermique.

Le troisième chapitre est subdivisé en deux grandes parties, la première est consacrée au traitement des résultats obtenus lors des essais des efforts de coupe et de la rugosité de surface lors de l'usinage avant et après trempe de l'acier de roulement 100Cr6 par un outil en céramique CC650.

La deuxième partie, est réservée aux résultats obtenus par la méthode multifactorielle. Elle concerne l'influence des conditions de coupe sur l'usure de l'outil de coupe, identifiée par ses critères (VB , VB_{max} , KT , VN , VC).

Chacune de ces deux parties aboutit à la détermination des modèles mathématiques qui expriment les relations liant les conditions du travail et les paramètres technologiques d'usinage « paramètres d'entrée - paramètres de sortie ». Nous nous sommes basés sur les résultats expérimentaux concernant les deux méthodes d'essais (unifactorielle, multifactorielle), pour généraliser la relation (théorique/pratique).

Finalement, nous avons présenté une conclusion générale articulée sur notre étude. Une perspective proposée a été suivie par la liste des références bibliographiques ainsi que d'une annexe comprenant un programme de calcul Matlab utilisé pour la détermination des différents modèles mathématiques, et des coefficients de détermination R^2 .

PROBLÉMATIQUE

Le tournage dur est une nouvelle technologie du tournage qui apparaît avec l'évolution actuelle des matériaux à outil de haute performance, comme le CBN et la céramique. Ce type d'outil de coupe est capable d'usiner des pièces en acier traité de dureté (45÷ 62 HRC). Ceci peut nous conduire à obtenir des états de surface comparables à ceux réalisés par la rectification, et nous permet aussi de réduire les phases de fabrication d'une pièce sur la même machine.

De la conjonction de toutes ces idées, s'émanent plusieurs questions :

Quelle est la grandeur de l'effort de coupe que peut générer une opération d'usinage dans ces conditions sévères? La température de coupe qui se produit lors de cette opération et leur influence sur l'outil et sur la matière à usiner. Les conséquences qui peuvent se répercuter sur l'usure de l'outil de coupe et sur la qualité de la surface usinée de la pièce? Quel est le temps de coupe que peut supporter l'outil sous ces conditions de tournage dur, ainsi que l'influence des conditions de coupe sur les paramètres technologiques d'usinage et l'effet de l'usure sur ces paramètres?

Ce sont des questions auxquelles nous nous sommes attachés à répondre au cours de ce travail de recherche.

Chapitre I :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.

I-1)- L'USINAGE : définition,

L'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir une surface par enlèvement de matière à l'aide d'un outil tranchant. Cette technique ancienne est souvent appelée coupe onéreuse dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux). Cependant, elle reste une technique de fabrication importante et répandue. Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, objet de notre étude, représente à lui seul 33% du domaine de l'usinage par enlèvement de copeaux [1].

Le but de tout usinage d'un matériau est d'en générer une forme utilitaire répondant à une demande. Cette forme a donc une surface fonctionnelle et l'action de l'usinage est de créer cette surface avec les dimensions et les qualités exigées par son usage futur. On conçoit l'importance de l'état de surface de la pièce usinée.

L'opération d'usinage est considérée comme un système plus ou moins complexe suivant le cadre d'étude dans lequel on se situe :

- celui de la production industrielle, le système intègre le couple outil-matière
- celui de la production de la machine-outil, le système intègre l'ensemble de la géométrie de la machine, ainsi que des caractéristiques mécaniques comme la rigidité, les résonances vibrationnelles, etc...
- dans le cadre d'une étude scientifique le système doit intégrer toutes les composantes ayant une incidence directe ou indirecte sur l'usinage, c'est à dire :
 - le couple outil-matière
 - l'influence du système de lubrification : nature du fluide, technique d'arrosage, réactivité chimique vis à vis de la matière usinée et de l'outil de coupe, etc...
 - la technologie de la machine-outil, ses conditions d'utilisation, le comportement mécanique (rigidité, vibrations) de ses différentes parties (bâti, composants mobiles, etc...).
 - les phénomènes physiques et mécaniques dépendant du matériau usiné :

Formation du copeau, comportement de la matière face à l'outil, etc... [2]

I-1-2)- La Coupe Orthogonale :

La coupe orthogonale est la configuration la plus simple pour usiner une pièce. Cette configuration est rarement employée à l'heure actuelle dans le monde industriel. La situation de coupe orthogonale (figure I-1) se rencontre lorsque l'outil coupe la matière avec une seule arête de coupe et lorsque celle-ci est perpendiculaire à la vitesse d'avance. Cette configuration est scientifiquement intéressante car elle permet d'isoler la formation du copeau sans introduire de phénomènes parasites tels qu'une variation de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance ou de la section du copeau, par exemple [3].

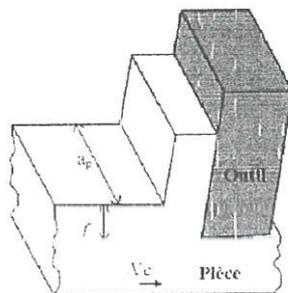


Figure I-1: Coupe orthogonale.

I-2)- LE TOURNAGE :

Est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé (figure I- 2).

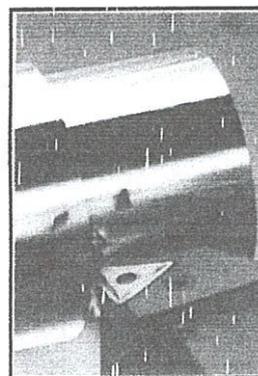
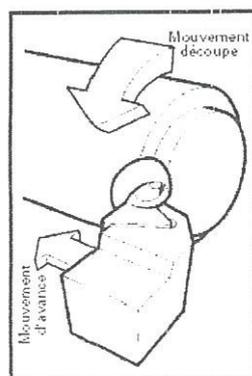


Figure I-2 : Tournage avec outil à arête unique

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permet d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes) [4].

I-2-1)- Paramètres De Coupe En Tournage :

I-2-1-a)- Vitesse de coupe ;

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse ω rad/s (soit N tr/min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via la porte pièce (figure I- 3).

Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre D, la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut :

$$V_c(m/s) = \frac{D}{2}(m).\omega(rad/s) \quad (I-1)$$

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe ; soit, avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique :

$$N(tr/min) = \frac{1000.V_c(m/min)}{\pi.D(mm)} \quad (I-2)$$

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante.

Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante.

Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment :

- des matériaux de la pièce et de l'outil ;
- de la lubrification ;
- de la durée de vie souhaitée pour l'outil ; des valeurs des autres paramètres de coupe (avance, profondeur de passe...).

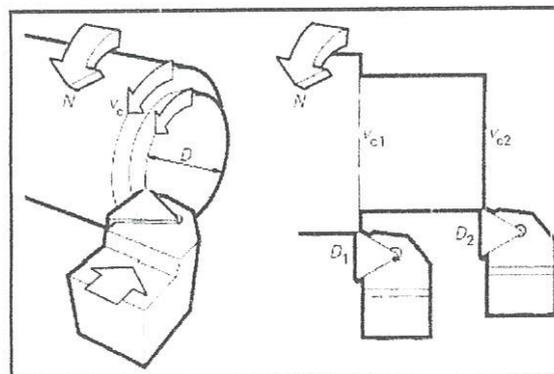


Figure I-3 : Définition des trois variables : vitesse de coupe V_c , Diamètre D, vitesse de rotation N.

I-2-1-b)- Vitesse d'avance V_f . Avance par tour f ;

La vitesse d'avance V_f (mm/min) (figure I-4) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d'avance V_f (mm/min) est égale à f (mm/tr) \times N (tr/min).

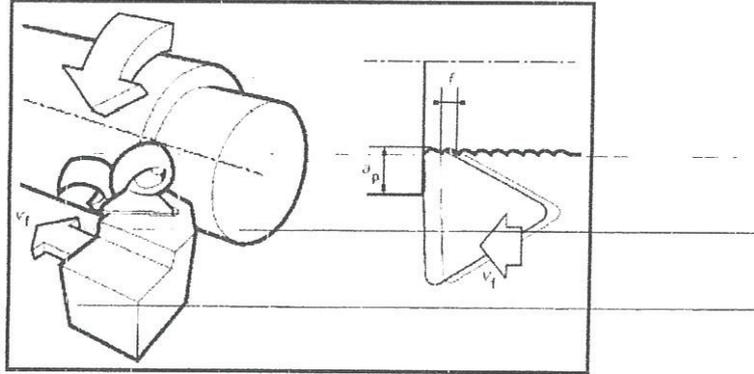


Figure I-4 :- Vitesse d'avance V_f . Avance par tour f , ainsi que a_p

I-2-1-c)- Profondeur de coupe (passe) a_p ;

En chariotage, la profondeur de coupe a_p (mm) (figure I-4) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [4].

I-3)- LE TOURNAGE DUR :

I-3-1)- Généralité :

Le tournage dur, c'est-à-dire le tournage des métaux durs, se définit comme une opération de tournage sur des aciers traités et durcis thermiquement, d'une dureté de 45 HRC à 68 HRC.

Les matériaux durs, sont caractérisés par un pouvoir abrasif élevé, une grande dureté, une faible ductilité et un rapport entre la dureté et le module d'élasticité élevée. Lors de l'usinage de ces matériaux, il faut s'assurer que les valeurs pratiques des profondeurs de passes et des avances sont faibles de façon à limiter les efforts de coupe et les déformations.

Pour usiner ces matériaux, on fait appel à des outils coupants de qualité. Les plaquettes utilisées en tournage dur sont des plaquettes carbures, des céramiques et des diamants synthétiques. Les plus utilisées sont celles à base de Nitrure de Bore Cubique (CBN) pour leurs bonnes compatibilités avec les aciers. C'est le matériau le plus dur après le diamant. C'est un matériau de synthèse produit sous haute pression et température. Pour prévenir l'écaillage de l'arête de coupe un chanfrein de protection est utilisé, ce qui conduit à un angle de coupe très négatif. Comme l'épaisseur du copeau est très faible.

L'objectif du tournage dur, est que les pièces en acier de dureté élevée soient finies en tournage et sans rectification (Tableau I-1). Le tournage dur permet d'obtenir de bons états de surfaces. Les premières appréciations montrent que la rugosité peut descendre jusqu'à des Ra de 0.15µm, approchant les valeurs obtenues en rectification (inférieur à 0.15µm). Les tolérances dimensionnelles peuvent atteindre des qualités 6 avec des tolérances géométriques très précises. Des défauts de circularité inférieure à 1µm peuvent être observés. Les facteurs principaux pour l'obtention de ces caractéristiques sont la machine et l'outil, sur une machine à priori très rigide et une vitesse de coupe élevée [1].

	TOURNAGE DUR	RECTIFICATION
<u>Gamme d'usinage</u>	Plus courte : suppression de la phase rectification	Plus complexe car changement de prises des pièces
<u>Temps d'usinage</u>	Faible si L < 40mm	Important sauf si L est grand ou si la pièce peut passer en centerless
<u>États de surface (Ra)</u>	0.15 µm	0.15 µm
<u>Défaut de forme</u>	Facilite l'opération de polissage	Évite les problèmes dus aux stries en hélice pour les pièces avec des fonctions d'étanchéité
<u>Précision</u>	Jusqu'à IT-5	Jusqu'à IT-3
<u>Environnement</u>	Retraitement des copeaux : dépollution (huile de coupe)	Les boues de rectifications sont difficiles et chères à retraiter

Tableau I-1 : Comparaison entre tournage dur et rectification [2].

I-3-2)- Statistique sur le tournage dur:

I-3-2-1)- Application du tournage dur :

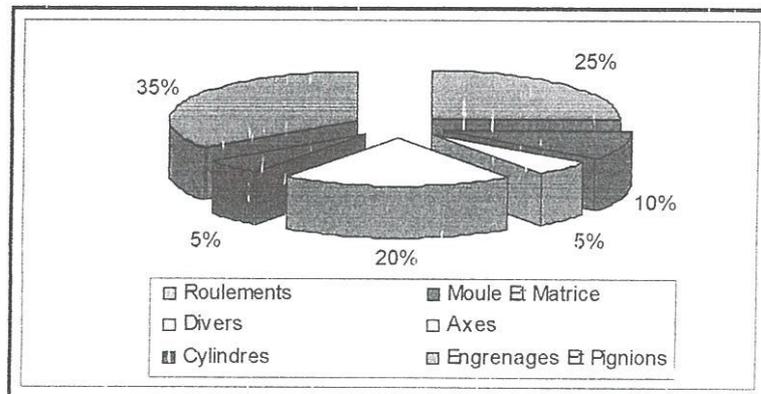


Figure I-5 : Présentation graphique des statistiques sur les différentes applications du tournage dur.

I-3-2-2)- Industrie utilisant le tournage dur :

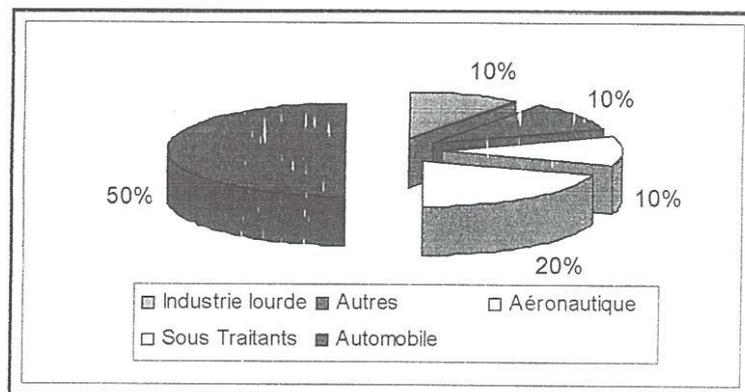


Figure I-6 : Présentation graphique des statistiques sur les différentes industries utilisant le tournage dur

I-3-2-3)- Marché du tournage dur en europe :

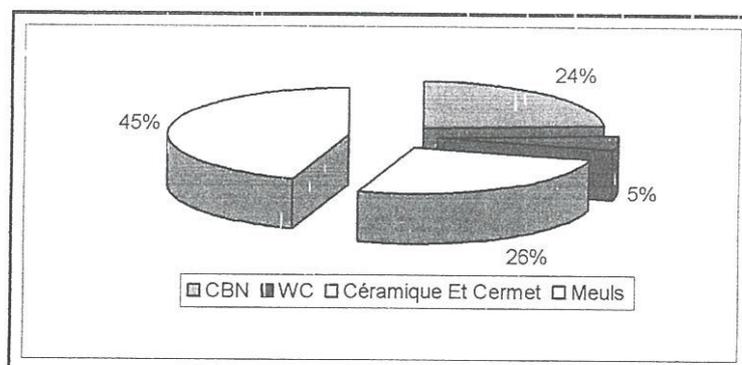


Figure I-7 : Présentation graphique des statistiques sur les différents matériaux de coupe en tournage dur

I-3-3)- Les recherches sur le tournage dur:

Le tournage dur est un thème très intéressant pour plusieurs chercheurs dans le domaine d'usinage ce qui élargit l'éventail des études dans ce domaine avec des conditions bien déterminées, celles qui nous permettent de travailler dans l'intervalle du tournage dur, dureté de la matière à usiner (45 ÷ 62 HRC) ainsi que les matériaux de coupe de haute performance capables d'usiner ces matériaux durs, le nitrure de bord cubique CBN et la céramique qui sont dotés de propriétés de coupe très élevées. À partir de ce point de vue on peut citer plusieurs recherches qui ont été effectuées dans le but de servir cette technologie ainsi que ses domaines d'application.

Bossom [18] s'est intéressé à l'usure des outils à différents pourcentages de CBN contenus dans la plaquette. La proportion de CBN contenue dans la plaquette influe sur la conductivité thermique, plus ce pourcentage est important plus la conductivité thermique est grande. Takatsu et d'autres [19] ont réalisé des essais sur l'acier de roulements 100Cr6 durci à 62 HRC avec des outils identiques mais à un pourcentage différents de CBN. Ils ont constaté que l'usure en dépouille et l'usure en cratère ont été réduites au minimum avec un pourcentage de 55% de CBN. Boggi [20] a suggéré que cela soit dû à la réaction chimique de CBN pendant la coupe. Barry et Byrne [21] étaient d'accord avec Boggi [20], que cette usure de CBN est dominée par un mécanisme chimique. Zimmerman [22], Klimenko [23] et autres, proposent que l'agglomérat est réellement plus résistant que les grains de CBN. Hodgson, Trendler [24], Nikayama, Shintan [25] et autres ont principalement étudié l'importance cruciale de la géométrie de l'arête sur la tenue de l'outil en usure. Narutaki et Yamane [26] ont trouvé des températures d'interface outil-copeau plus faibles avec des outils CBN comparés aux carbures. Ils ont également observé que cette température diminue quand la dureté de l'acier dépassait une certaine valeur. Matsumoto [13] et d'autres ont réalisé des essais de coupe sur l'acier 35NCD6 (29 à 57 HRC) avec des plaquettes en céramique (Al_2O_3 -Tic). Ils ont remarqué que, lorsque la dureté est de 30 à 50 HRC, des copeaux continuaient d'être observés, et l'augmentation de la dureté à cause d'une diminution de l'effort de coupe. Ce phénomène a été observé par Cho et Trigger [27]. Quand la dureté a dépassé 50HRC, des copeaux fragmentés sont apparus et il y a eu une augmentation soudaine de l'effort de coupe. Chryssolouris [28] a effectué des essais expérimentaux de coupe avec quatre matériaux différents qui ont la même dureté (55 HRC), mais avec différentes structures, afin de déterminer l'influence de la structure des matériaux vis-à-vis de l'usure de l'arête de l'outil en CBN. Il a prouvé que les temps de coupe pour le même critère d'usure pour ces divers matériaux étaient différents. Une grande différence dans le comportement à l'usure a été accentuée au rapport de $\frac{1}{2}$ pour le critère d'usure en dépouille (300 μ m) et $\frac{1}{4}$ pour le critère d'usure en cratère (50 μ m). Davies et d'autres [29]

ont effectué des expériences semblables pour comparer les taux d'usure de l'outil pour trois aciers de la même composition chimique mais de différentes microstructures. Ils ont notamment prouvé que le taux d'usure de l'outil diminue avec la décroissance de la taille des grains. De nombreuses études analytiques ont été faites pour décrire la formation des copeaux comme celles menées par Komanduri [12], König [30], Nakayama [31], Schultz [32] et Winkler [33] pour ne citer que les plus connues. Elles se limitent toutes au cas de la coupe orthogonale. Peu d'études ont été faites sur la détermination des champs de températures dans le copeau et l'outil. Nous pouvons citer BOOTHROYD [34] et WRIGHT [35] qui, dans leurs travaux, proposent l'idée que l'élévation de la température soit la conséquence de la dissipation de la puissance mécanique au cours du cisaillement. OXLEY [36] met au point un modèle qui reprend les travaux de BOOTHROYD en tenant compte de la vitesse de déformation. Ce dernier modèle est souvent pris comme référence pour les modèles numériques. Gabriel C [37] qui a étudié l'évolution de l'usure de trois types de matériaux à outil lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 dans le but de comparer la durée de vie de ces derniers et trouve que l'outil CBN7020 présente la plus longue durée d'usinage suivie par l'outil céramique CC650 et la plus faible durée concernée par l'outil céramique CC670 mais le facteur le plus influent sur la durée de vie d'outil est la vitesse de coupe suivie par l'avance qui est le facteur le plus influent à son tour sur l'état de surface. Yaltese [38], a étudié l'usinage de l'acier 100Cr6 par un outil en CBN7020 dans le but d'évaluer l'effort de coupe et la rugosité de surface en fonction de l'usure en dépouille VB, il aboutit au terme de cette étude à la conclusion que le CBN7020 a une grande résistance à l'usure, où il obtient des états de surface acceptables ($R_a < 1 \mu m$) même en dehors de la limite de l'usure admissible, Sahbi B S [39] le but de leur étude est de déterminer la tenue à l'usure des trois nuances d'outils de coupe, plaquettes revêtues est celle de la nuance GC 4025 revêtue par TiN + AL2O3 + TiCN ainsi que l'outil en céramique (CC650) et la nuance GC 425 possède un double revêtement TiC + TiN d'une épaisseur totale d'environ 8 microns, ou le céramique mixte (CC650) procure une meilleure tenue à l'usure que les carbures revêtus dans les conditions de UGV de l'acier C45 traité.

I-4)- ÉVOLUTION DES MACHINES OUTIL :

L'évolution technique a été pour une grande part dans l'augmentation des vitesses de coupe et de la productivité de l'usinage ; tout en permettant aussi une amélioration de la qualité des usinages.

Dans les années 1980, les premières machines outils UGV font leur apparition sur le marché industriel et plusieurs propriétés de ces machines influent directement sur la qualité des pièces usinées :

- la rigidité des bâtis assure une plus grande régularité de l'usinage et des forces exercées sur l'outil de coupe,
- la vitesse de rotation des éléments tournants permet d'accroître la vitesse de coupe,
- la qualité des géométries de la machine (parties fixe ou tournante) se répercute sur la qualité des pièces obtenues,
- les systèmes de commande de la machine dont l'automatisation et l'informatisation, par leur rapidité et leur précision, permettent de réaliser de plus en plus rapidement des surfaces de géométries de plus en plus complexes,
- Les dispositifs de serrage des outils, à la fois plus précis et plus puissants, autorisent des vitesses de rotation plus grandes [2].

I-5)- ÉVOLUTION DES OUTILS DE COUPE :

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro-grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie.

Les conditions optimales d'usinage pour un couple outil-matière donné ne sont pas faciles à déterminer. Elles doivent être établies par une série de tests rigoureux. Dans la suite et dans un premier temps, les matériaux des outils sont présentés pour une exploitation pour le tournage des matériaux durs. En outre, les outils sont également caractérisés par leur géométrie [1].

Remarque : la partie active des outils est définie par ces angles, normalisés et projetés suivant des plans. L'indice de l'angle correspond au plan dans lequel il est projeté.

I-5-1)- Rôle de L'outil :

L'outil est au centre du système puisqu'il assure la création du copeau. Il influe sur l'usinage et la formation du copeau par ses caractéristiques (rigidité, résistance mécanique, comportement à l'élévation de température, coefficient de frottement, etc.).

Si on remonte aux premières études importantes faites sur la mécanique de formation du copeau, nous devons nous intéresser aux travaux de FIELD et MERCHANT [7] dans les années 60 qui ont présenté un modèle simple (figure I-8) :

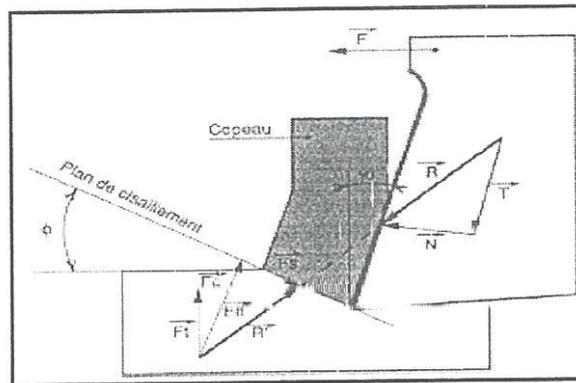


Figure I-8 : Modélisation de MERCHANT pour la formation du copeau en coupe orthogonale

- F_t et F_c = Effort de coupe exercée par l'outil
- F_n et F_s = composantes de l'action du copeau sur la pièce
- R = résultante de l'action de la pièce sur l'outil
- T et N = composante de l'action de la pièce sur l'outil
- γ_0 = géométrie de l'outil (angle d'attaque)
- Φ = déformation du matériau (plan de cisaillement)

Dans ce modèle, le copeau est représentatif des conditions d'usinage. Il dépend de l'intensité des contraintes qui se créent dans la zone du plan formé par l'arête de coupe et la position où la surface extérieure du métal usiné prend la direction de la face d'attaque de l'outil. En conséquence, la coupe dépend directement des actions mécaniques de l'outil mais aussi de sa géométrie et de l'évolution de cette géométrie par usure [2].

I-5-2)- Evolution Des Matériaux Des Outils De Coupe :

L'évolution des matériaux constituant les outils de coupe a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, un doublement de la productivité tous les dix ans [15], (figure I-9).

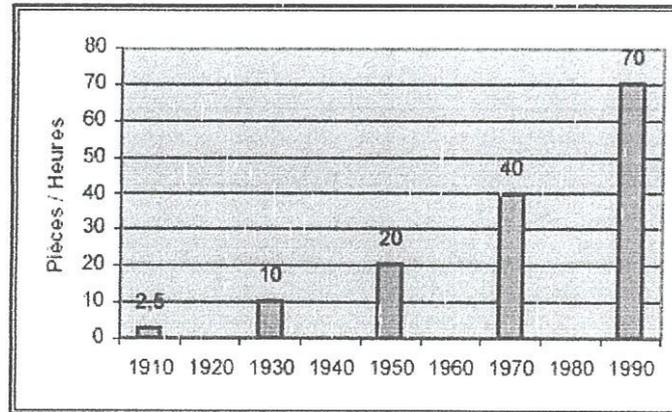


Figure I-9 : Augmentation de la productivité en usinage acier

Cette amélioration de la productivité résulte d'un accroissement important des vitesses de coupe permises, grâce à l'amélioration des performances des matériaux des outils. Elle résulte aussi des études et travaux à la fois techniques et fondamentaux portant sur les propriétés suivantes des matériaux [16]:

- la dureté : pour combattre l'usure,
- la résistance mécanique à chaud pour supporter les échauffements à grande vitesse,
- la ténacité pour encaisser les chocs dus aux interruptions d'usinages ou aux vibrations
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par diffusion d'impuretés en provenance de la pièce usinée [2].

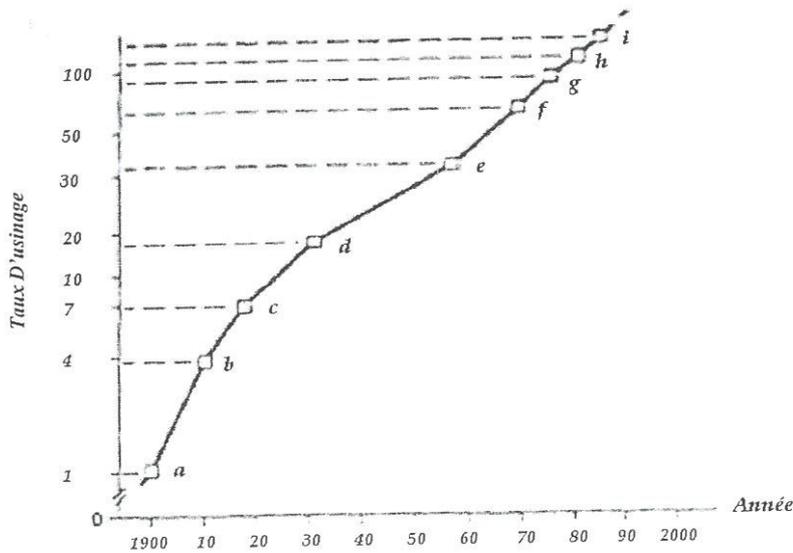


Figure I-10: Augmentation de la productivité due à l'évolution des matériaux des outils de coupe.

- a/ Acier au carbone
- b/ L'acier rapide
- c/ Stellite
- d/ Carbure cimenté
- e/ la meilleure Catégories de carbure
- f/ Premières catégories de revêtement (TiC)
- g/ 1^{ier} génération de Catégorie revêtue Al₂O₃
- h/ 2^{ième} génération de Catégorie revêtue Al₂O₃
- i/ 3^{ième} génération de Catégorie revêtue Al₂O₃

I-5-2-1)- Matières De La Plaquette :

Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont les suivantes [4] :

- carbures non revêtus (C) ;
- carbures revêtus (GC) ;
- céramiques (CC) ;
- cermets (CT) ;
- nitrures de bore cubiques (CBN) ;
- diamants polycristallins (CD).

I-5-2-1-a)- Les carbures non revêtus (C) sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène, de titane.....) et de substance liante (cobalt...) qui confère sa ténacité à la plaquette [4]. Ils sont constitués essentiellement de carbure de tungstène (phase α), et de carbure de titane, de tantale ou de niobium (phase β), et d'un liant généralement le cobalt (phase β). Le rôle de l'addition de carbure de titane, tantale ou niobium est d'augmenter les propriétés à haute température (vitesse de coupe élevée) en réduisant le frottement. C'est aussi de diminuer l'usure de la face de coupe en réduisant la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et le copeau [1].

I-5-2-1-b)- Les carbures revêtus sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium (figure I-11).

Ces revêtements, en réduisant les frottements copeau/outil et pièce/outil, améliorent très nettement les possibilités des outils. Ils sont les plus utilisés dans un très grand nombre d'opérations de tournage, pour tous types d'usinage et pour une grande diversité de matières de pièces. C'est donc le choix à envisager en priorité pour la plupart des opérations d'usinage [4].

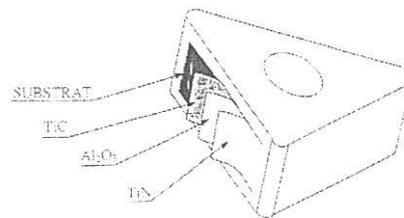


Figure I-11: Plaquette carbure revêtue, multicouches [8]

On peut retenir globalement que :

- le nitrure de titane (TiN) est réputé pour sa meilleure résistance à l'abrasion. Pour cette raison, il est souvent utilisé en couche externe. De plus, il tolère des dépôts plus épais sans nuire à sa tenue en service. Le TiN est inerte vis-à-vis des aciers et le coefficient de frottement du métal sur le revêtement TiN est plus faible, ce que minimise le risque de formation d'arête rapportée,
- le carbure de titane (TiC) adhère mieux aux substrats, constituant ainsi une excellente base d'application de couches de revêtement supplémentaires. Par contre, il est fragile et pour cela est déposé en couche n'excédant pas $51\mu\text{m}$,
- l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) est déposé en couche intermédiaire comme barrière de diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant une excellente résistance à l'usure, ainsi qu'une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et des températures de coupe très élevées. Un inconvénient majeur dans le cas des revêtements multicouches des plaquettes de finition est la perte de l'acuité d'arête.

Pour cette raison, les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couches minces de 1 à

2 μ m. Les gains obtenus dans la coupe des métaux à l'aide de ces revêtements sont importants. Ces gains dépendent essentiellement du couple outil/matière. Cependant, pour caractériser l'influence du revêtement, nous précisons dès maintenant que trois modes de détérioration peuvent intervenir:

- abrasion : Plus le revêtement est dur ce mode d'endommagement peut intervenir. Les revêtements TiC et Al₂O₃ sont performants du point de vue abrasion,
- diffusion (outil/copeau) : Ce mode d'endommagement est dans ce cas nettement plus important pour TiC, soluble dans l'austénite à partir de 1100 - 1150°C que pour TiN et Al₂O₃ tous deux insolubles dans les aciers même liquides,
- fissuration et écaillage : La détérioration s'effectue par fissuration du revêtement soumis à de fortes contraintes d'origine thermique entraînant des micro-écaillages (sur l'arête ou sur les flancs) puis une usure contrôlée par diffusion et abrasion. Ainsi, une couche extérieure de TiN semble aujourd'hui conduire aux meilleurs résultats lors du tournage des aciers inoxydables. L'usure par effets physicochimiques est très réduite.

I-5-2-1-c)- Les céramiques (CC) constituent un éventail de nuances adaptées à une gamme étendue d'opérations. Cela va de la fonte et de l'acier à l'usinage hautement spécialisé de matières réfractaires et d'acier trempé. Le besoin de rectification, par exemple, peut être éliminé lorsqu'on recourt aux plaquettes céramiques pour le tournage. Extrêmement productives quand elles sont utilisées à bon escient, elles exigent toutefois un contexte d'usinage précis en matière de stabilité, de conditions de coupe, d'arête de coupe et de type de coupe. Les plaquettes céramiques sont conçues pour un taux élevé d'enlèvement de matière dans les situations où la précision de cotes et la qualité du fini de surface doivent demeurer inchangées tout au long de la durée de vie de l'outil. Cependant, elles ne conviennent pas pour certaines matières.

Les outils de coupe en céramiques sont divisés en deux familles :

- Les céramiques à base d'oxyde d'aluminium,
- Les céramiques à base de nitrure de silicium.

La fragilité relative de la céramique exige des machines très stables. Il est normal d'utiliser ces matériaux avec des vitesses de coupe à 900 m/min en tournage des aciers, la céramique composée du carbure d'alumine et de titane (cermets), est moins sujette à la fragilité, avec des efforts de rupture supérieurs à 690 MPa [1].

I-5-2-1-d)- Les cermets, Les CERMETS (CERAmique METal), constitués principalement de TiC ou de TiC/N, possèdent par rapport aux métaux durs conventionnels une densité beaucoup plus faible mais une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. Les forts coefficients de dilatation thermique des cermets ($7 \text{ à } 9 \times 10^{-6}/\text{K}$) dus au TiC et TiN par rapport aux outils carbures (WC) sont responsables de la faible résistance des cermets aux chocs thermiques. C'est également ce qui explique leurs faiblesses lors de l'usinage à coupe interrompue. Le remplacement du TiC par le TiN qui possède la plus grande conductivité thermique, a permis d'améliorer la résistance des cermets aux chocs thermiques.

Ils conviennent pour l'ébauche légère et la finition dans des conditions favorables, en ce qui concerne la pièce et la machine-outil. La finition est leur spécialité, avec pour caractéristique un état de surface de haute qualité.

On peut retenir les avantages d'utiliser les cermets :

- résistance à la cratérisation et à la formation de l'arête rapportée supérieure à celle de carbures de tungstène et des céramiques,
- résistance à l'usure trois à quatre fois plus grande que celle des carbures non revêtus,
- admettent de faibles avances,
- vitesse de coupe proche de celles des céramiques mais également utilisables aux vitesses supérieures des carbures de tungstène non revêtus [1].

I-5-2-1-e)- Le nitrure de bore cubique (CBN) est une matière très dure, adaptée au tournage d'acier trempé, de fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou de cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions de coupe et de l'arête de coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure, lorsqu'elles sont utilisées correctement, les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition [4].

L'originalité de la gamme de plaquettes en Nitrure de Bore Cubique (CBN) provient de la méthode de liaison du CBN sur un substrat en carbure cimenté qui donne naissance à un outil plus résistant et mieux apte à résister à des températures d'arête élevées. Le procédé de fabrication spécial utilisé engendre de plus grandes surfaces de contact entre les deux matériaux.

Le nitrure de bore cubique convient pour un enlèvement de copeaux durs et à grande vitesse. Ainsi, par exemple pour l'usinage de l'acier de roulement 100Cr6, qui est considéré comme un matériau difficilement usinable en raison de lamelles de cémentite très dures dans sa structure, il est possible d'obtenir des durées de vie 100 fois plus importantes avec le CBN qu'avec le carbure.

Les plaquettes sont fait à partir des particules cubiques de nitrure de bore qui sont soigneusement choisies, puis sont agglomérées. Le nitrure de bore cubique est une liaison chimique de bore (B) avec de l'azote (N), d'une structure spécifique. Le CBN, n'existe pas dans la nature et doit être fabriqué à partir du nitrure de bore hexagonal (figure I-12).

○ : Bore ● : Azote



Figure I-12: Forme de la liaison chimique du CBN

Cette matière est produite en soumettant de très fines particules de nitrure de bore à des températures et des pressions élevées (Jusqu'à 1700°C, 50 Kbar). La présence d'un métal permet de former une phase céramique dense et homogène [1].

I-5-2-1-f)- Les diamants polycristallins (CD) ont un domaine d'utilisation complètement différent, étant donné qu'ils sont totalement inappropriés pour les métaux contenant du carbone. Ils sont utilisés en finition et demi-finition pour les métaux non ferreux et les matières non métalliques [4].

- On peut aussi récapituler les domaines d'emploi des différents matériaux d'outils (en incluant l'acier rapide).

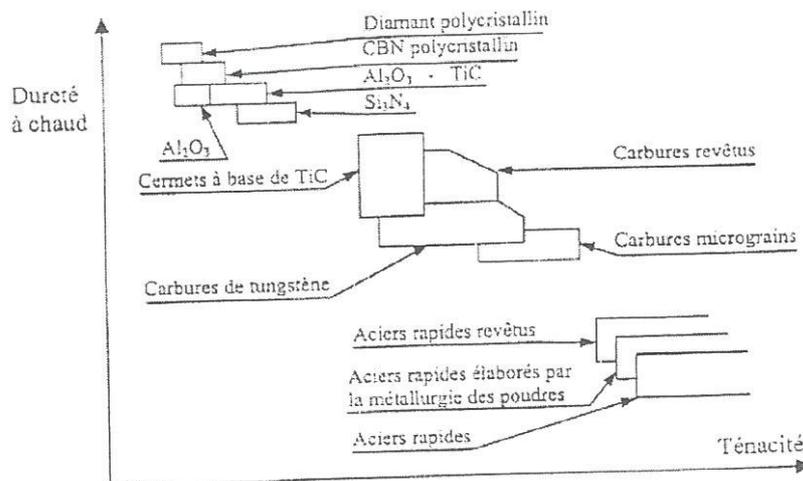


Figure I-13 : Classement des matériaux de coupe en fonction de ces duretés à chaud [1].

I-6)- ÉVOLUTION DES MATÉRIAUX :

L'industrie sidérurgique se veut une industrie très innovante qui travaille en collaboration avec ses clients afin d'améliorer ses produits. Un chiffre montre cette volonté : 50% de matériaux nouveaux tous les 5 ans. L'industrie a ainsi fait évoluer les matériaux d'usinage. Deux pistes ont été et sont toujours explorées :

- matériaux assurant une auto-lubrification des arêtes de coupe avec des éléments chimiques (Mn, Si, Cr) qui s'oxydent facilement et s'agglomèrent sur ces dernières
- matériaux, avec inclusions de métaux (plomb, bismuth, calcium) ou de sulfures, favorisant la fragmentation des copeaux

Plusieurs travaux mettent en évidence l'amélioration apportée par ces matériaux même si les phénomènes physiques ne sont pas encore totalement compris. On constate leur influence notable sur le cisaillement primaire et secondaire dans le cas de la formation de copeaux continus, ce qui permet ainsi une transition plus facile vers la segmentation des copeaux

Les sulfures sont très étudiés, car ils engendrent des amorces de rupture qui facilitent la fragmentation des copeaux. On peut noter que cette influence dépend aussi de la vitesse de coupe.

Les inclusions qui posent des problèmes dans la formation du copeau et dans la modification du champ de contraintes, au sein de la pièce usinée, ont été aussi largement étudiées, dans le but de comprendre les phénomènes physiques qu'elles génèrent et leurs influences dans les opérations d'usinage [2].

I-7)- LUBRIFICATION :

- La refroidissement de l'outil et de la pièce grâce à la capacité thermique massique élevée de l'eau ;
- La lubrification de la coupe, Grâce à la teneur en corps gras du savon. En outre, l'eau de savon était plus « mouillante » que l'eau pure, mais elle ne permettait pas d'éviter la corrosion et tachait les pièces et les machines. L'eau de savon fut remplacée par des huiles végétales ou animales, puis par des émulsions d'huiles minérales et, enfin, par des mélanges d'huiles minérales et de matières grasses dans lesquels on ajouta des additifs pour leur conférer des qualités supplémentaires. La technique de distribution des huiles de coupe se modifia. Un bac central dans chaque atelier permet de distribuer le liquide aux diverses machines.

Les liquides d'arrosage furent désignés sous le nom *d'huiles de coupe* car, solubles ou non, ces liquides comportaient toujours des huiles et, le plus souvent, un pourcentage important d'huiles minérales. Un nouveau pas fut franchi quand on trouva, sur le marché, des liquides de coupe qui ne contenaient plus d'huile d'aucune sorte.

C'est pourquoi nous utiliserons souvent le terme *liquides de coupe*, plus général que le terme huiles de coupe, dans la suite de cet exposé.

Les nouveaux liquides de coupe sont désignés sous les noms de liquides chimiques ou synthétiques et, bien qu'étant loin de détrôner les huiles de coupe, leur tonnage distribué croît régulièrement chaque année [5].

La lubrification est utilisée dans le milieu industriel car on lui reconnaît une double action bénéfique :

- elle favorise l'évacuation des calories,
- elle réduit les frottements de l'outil sur la pièce et du copeau sur l'outil

Les techniques nouvelles, qui ont été mises en place afin d'améliorer l'efficacité de la lubrification, sont influentes sur les conditions de coupe (projection sur les faces de coupe et de dépouille de l'outil, micro pulvérisation).

Des études scientifiques, telles que celles de l'Ecole Centrale de Nantes, corroborent l'expérience industrielle, en montrant que la lubrification modifie le comportement de formation du copeau, joue sur les efforts de coupe et donc sur la durée de vie de l'outil

Mais la lubrification a un coût non négligeable (16% du total des frais).

I-8)- FORMATION DU COPEAU :

Dans le modèle de MERCHANT (figure I-8), le mouvement relatif outil-matière provoque une compression entre la face de coupe de l'outil et la pièce usinée, au voisinage de l'arête de coupe. Pour encaisser cette compression, quelque part, en avant de l'outil, la matière s'étire jusqu'à sa rupture, d'où la naissance du copeau.

D'autres études et modèles ont permis de discuter et de faire évoluer le modèle de MERCHANT. Entre autres celles de COOK, FINNIE et SHAW [9] quelques années plus tard et, plus récemment de SHAW [10], LEMAIRE [11], KOMANDURI [12], pour ne citer que les plus connues :

- les caractéristiques métallurgiques des matériaux,
- les conditions de coupe,
- la composition chimique des matériaux,
- les structures particulières des phases en présence,
- le comportement thermique des phases des matériaux,
- les phénomènes thermodynamiques (apparitions des couches blanches),
- les phénomènes de cisaillement,
- les conditions de frottement.

Certaines de ces études ont été faites avec des aciers doux (KOMANDURI déjà cité), des alliages mi-durs (MATSUMOTO [13]) et des alliages durs (KONIG [14]).

Il ressort de ces études que les modes de formation du copeau sont très différents suivant les conditions d'usinage mais aussi les caractéristiques des matériaux usinés :

- dureté du matériau
- conditions de coupe : vitesse, avance et profondeur de coupe
- efforts résultants des conditions de coupe
- comportement dynamique du matériau à l'effort
- géométrie de l'outil

Le copeau créé à plusieurs formes possibles (figure I-14) qui sont classées en familles non normalisées à ce jour.

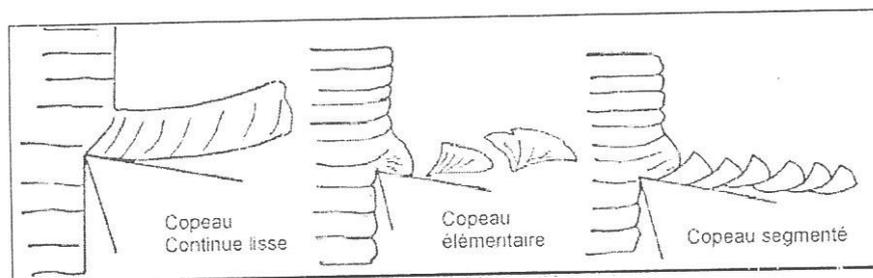


Figure I-14 : Exemple de 3 formes différentes de copeau.

On peut donc affirmer que la formation du copeau implique la compréhension de phénomènes se rattachant à plusieurs disciplines (thermodynamique, métallurgie, tribologie, physique de la matière condensée) ce qui complique leur analyse [2].

I-9)- ENDOMMAGEMENT DES OUTILS DE COUPE : généralités ;

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le coût de l'usinage, qui intéresse en définitive l'entreprise, est une conséquence de tenue des outils à l'usure. Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un Couple Outil-Matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant tout autre mesure de ces caractéristiques. La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur :

- la qualité et la précision dimensionnelle de la surface obtenue,
- la tenue de l'outil dans le temps,
- la puissance nécessaire à la coupe.

La définition de la durée de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685: « *C'est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique* ».

Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage. Dans la pratique, on pourra ramener cette durée de vie à des éléments plus concrets sur le poste de travail comme :

- un volume de copeau produit entre deux changements d'arêtes,
- un nombre de pièces usinées entre deux changements d'arêtes,
- une longueur d'usinage entre deux changements d'arêtes.

L'analyse du mécanisme de la coupe montre l'importance des phénomènes de déformation plastique et de fissuration au sein du matériau usiné, mais aussi celle des phénomènes interfaciaux qui déterminent les actions réciproques de l'outil et du copeau.

L'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil-copeau. Celles-ci sont d'abord de nature mécanique. Il s'agit de contraintes permanentes ou cycliques et d'actions de frottement en surface. Ceci exige pour l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables.

I-9-1)- Influence Des Paramètres De Coupe Sur L'usure :

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification) :

- ✓ Vitesse de coupe : La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure,
- ✓ Avance : Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil,
- ✓ Profondeur de passe : La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante, son influence reste modeste sur l'usure,
- ✓ Matériau usiné : Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de certains éléments d'addition),
- ✓ Lubrification : Son influence intervient faiblement sur le coefficient de frottement pièce/outil et copeau/outil, mais permet la baisse de la température de la partie active de l'outil [8].

◦ Influence de la température :

La température a une influence sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe (figure I-15), ce qui peut avoir une grande importance lors de l'usinage [5],

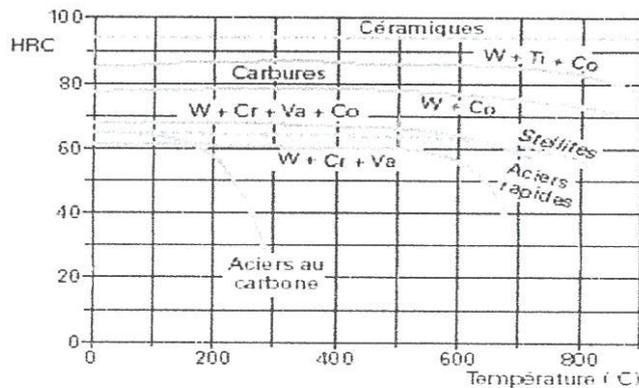


Figure I-15 : Influence de la température sur la dureté des outils.

I-9-2)- Formes d'usure :

L'étude détaillée du phénomène d'usure révèle différentes formes : l'usure par effets mécaniques et l'usure par effets physico-chimiques [8].

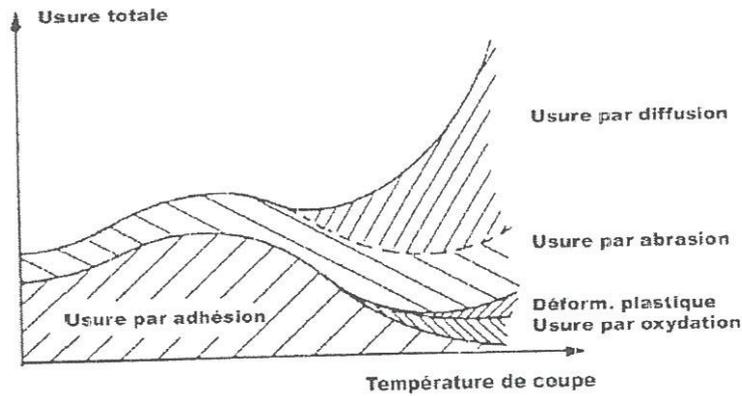


Figure I-16 : Diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température d'usinage [2].

- les processus d'abrasion et d'adhésion sont favorisés lors des usinages où les températures sont faibles et où les vitesses de défilement du copeau sont faibles. En effet dans ces cas là, il n'y a pas de formation de couche de glissement due à la température ou aux vitesses élevées. Il y a donc grippage ou arrachement.

- les processus de diffusion, de déformation plastique, d'oxydation sont favorisés par l'élévation de la température et des vitesses de coupe [2].

L'usure apparente schématisée par la (figure I-17):

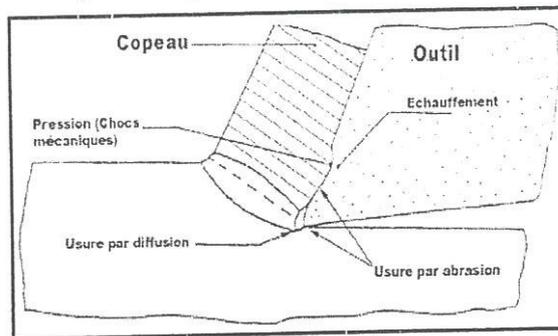


Figure I-17: Représentation des différentes zones d'usures de l'outil durant la phase de formation du copeau [2].

I-9-3)- Les Mécanismes d'usure des outils :

Prend en compte les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, qui se traduisent par certaines modifications d'aspect de celui-ci, visibles à l'oeil nu ou à l'aide d'une loupe de forte puissance. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de l'usure en fonction de divers paramètres géométriques mesurables.

L'évolution de l'usure peut se faire par la mesure de la perte de masse en fonction du temps. D'après la (figure I-18), on observe l'existence d'un régime transitoire suivi d'un régime stabilisé.

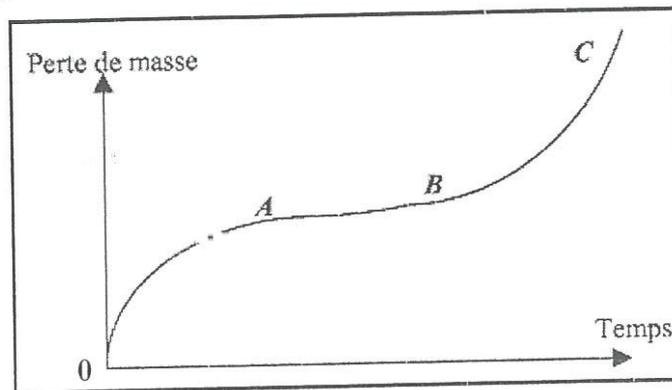


Figure I-18 : Perte de masse en fonction du temps.

OA est caractérisé par une croissance rapide de la perte de masse (appelé rodage) et le régime stationnaire AB par une croissance plus lente et plus régulière pratiquement linéaire. La période BC correspond à la destruction rapide de l'outil.

Lorsqu'un problème d'usinabilité est constaté, il est nécessaire de bien observer l'endommagement de l'outil. Ces différentes formes d'endommagement font intervenir, à des degrés plus ou moins importants, les mécanismes suivants [8].

I-9-3-1)- Processus d'abrasion (mécanique) ;

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frotte avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique (nombre, nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (figure I-19-1).

Si la matière comporte des constituants durs (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil.

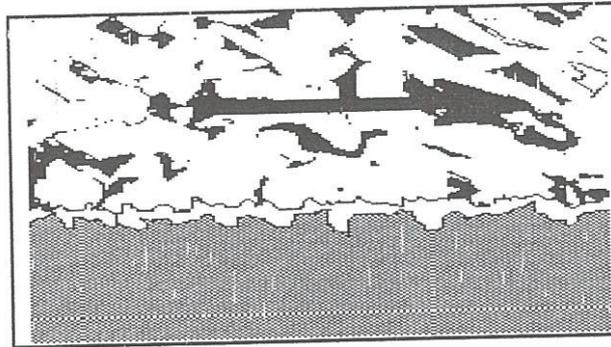


Figure I-19-1 : Processus d'usure par abrasion

□ Cette usure pourra être :

- homogène : dans le cas d'une matière où les constituants sont homogènement répartis.
- localisée : dans le cas de conditions de coupe particulières : écrouissage, apparition d'oxyde lors de l'usinage.

I-9-3-2)- Processus d'adhésion (mécanique) ;

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Or les rugosités et micro-rugosités de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des micro-soudures (figure I-19-2).

- *DE* : Déformation élastique
- *DP* : Déformation plastique

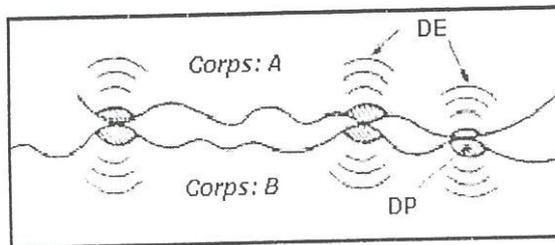


Figure I-19-2 : Processus d'usure par adhésion mécanique [8]

Ces micro-soudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère :

- l'apparition d'arêtes rapportées si les micro-soudures sur l'outil est plus résistante que celles du copeau
- l'usure de l'outil si la micro-soudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil.

Cette usure est très faible et généralement négligeable [2].

I-9-3-3)- Processus de fissuration (mécanique) ;

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase). Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique au début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil, écaillage [2].

Les chocs thermiques supportés par les outils sont très sévères soit pendant les arrêts de coupe soit par le refroidissement dû à un arrosage discontinu. La température décroît très vite en surface et plus lentement dans le coeur. La surface de l'outil est mise en traction et des fissures thermiques peuvent apparaître.

Les outils céramiques sont très sensibles à ces phénomènes d'endommagement.

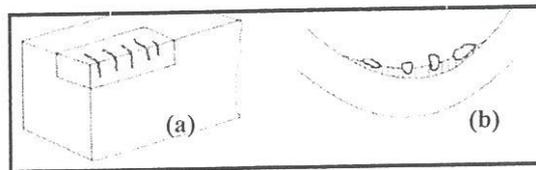


Figure I-19-3 : (a)- fissuration d'arête, (b)- écaillage d'arête [8].

I-9-3-4)- Processus de déformation plastique (mécanique) ;

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil/copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement. Les pressions sont très importantes (de l'ordre de 70 à 80 daN/mm² pour un matériaux mi-dur par exemple) et les températures à l'interface outil/copeau ou outil/pièce de l'ordre de 1000°C. Prenons le cas d'une plaquette en WC (grande majorité des plaquettes) : pour ces températures et pour ces pressions, on se trouve dans le domaine de déformation plastique du WC. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe).

I-9-3-5)- Processus de diffusion (physico-chimique) ;

La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène d'usure qui ne peut se produire qu'à des températures élevées. Ces zones de températures élevées se situent à l'endroit du frottement du copeau sur l'outil. De plus, ce sont aussi des zones de forte pression car le copeau applique des contraintes sur l'outil.

Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci

puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil (figure I-19-4).

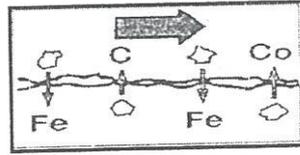


Figure I-19-4 : Processus d'usure par diffusion.

I-9-3-6)- Processus d'oxydation (physico-chimique) ;

Le milieu de l'usinage est constitué :

- de l'oxygène dans l'air.
- des hautes températures.
- de l'eau dans les huiles de coupe solubles.

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoque localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (figure I-19-5). De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

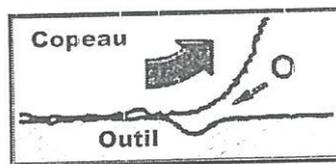


Figure I-19-5 : Processus d'usure par oxydation.

I-9-4)- Usure visible sur l'outil :

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils.

Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (figure I-20).

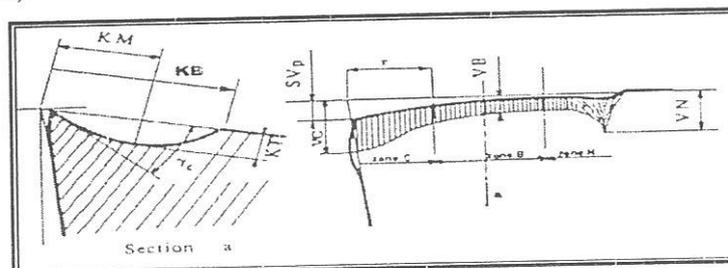


Figure I-20 : Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil d'après la norme NFE 66 505 [2].

- KM : Distance au centre du cratère / pointe initiale de l'outil
- KT : Profondeur du cratère
- KB : Largeur du cratère
- γ_c : Angle de cratérisation
- VB : Hauteur de l'usure en dépouille
- VN : profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
- VBC : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usinée
- SV : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée

I-9-4-1)- Usure en dépouille ;

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe. Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe.

C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible VB. Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil (durée de vie T=15 min).



VB critique = 0,6 mm en ébauche et 0,3 mm en finition

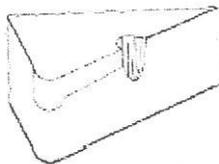
Cela est dû à une vitesse de coupe excessive ou à une mauvaise position angulaire de l'outil (face de coupe / pièce)

Mesures correctives :

- Choisir une nuance présentant une meilleure résistance à l'usure.
- Réduire la vitesse de coupe.

I-9-4-2)- Usure en entaille ou par oxydation ;

Elle apparaît ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire. Elle est due à l'écaillage ou l'oxydation de la pièce.



En général : VN critique = 1 mm

Ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées, oxydation des aciers, austénitiques par exemple) est caractérisé par l'indice VN. Suivant l'importance de cette usure, il y a des risques de rupture !

Remarque :

Cette usure en entaille est souvent accompagnée d'une usure en dépouille. Cependant il est à remarquer que les entailles doivent être exclues de la mesure de VB.

Mesures correctives :

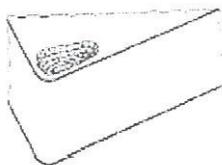
- Accroître la rigidité de l'arête de coupe
- Choisir un outil avec un angle de direction d'arête plus faible (45°)
- Réduire l'avance

I-9-4-3)- Usure en cratère ;

C'est une usure en creux sur la face de coupe, caractérisée par la profondeur de cratérisation (indice KT) et le rapport KT/KM ou son angle de cratérisation γ_c . Elle peut avoir à terme une incidence sur la tenue d'outil (durée de vie : effondrement ou recul de l'arête de coupe).

Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion.

Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par une flèche SVp et un renflement de la face de dépouille. L'usure est souvent constatée sur les outils carbures, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil.



Valeur limite : $KT_{critique} = 0,06 + 0,3 f$

Tell que ; $f =$ avance par tour

La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usage avec risque important de rupture de l'outil.

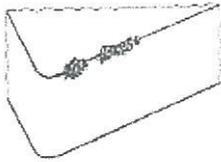
L'usure est généralement due à une vitesse de coupe excessive ou à une avance trop faible.

Mesures correctives :

- Utiliser des nuances de métal dur revêtu
- Choisir des plaquettes à géométrie positive
- Réduire la vitesse de coupe ou augmenter l'avance

I-9-4-4)- Ecaillage de l'arête de coupe ;

C'est une destruction de l'arête de coupe par arrachement de petits fragments d'outil, elle est généralement accompagnée d'une usure de la face de dépouille et de ce fait n'est pas toujours reconnaissable.



Elle est générée par les chocs thermiques et les vibrations. Elle peut générer des ruptures. Les écaillages en dehors de la partie active de l'arête proviennent de l'impact de copeaux par suite d'une mauvaise évacuation.

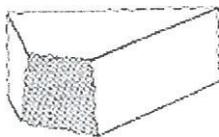
Cette usure est souvent le fait de chocs thermiques ou d'arête trop fragile.

Mesures correctives :

- Choisir une nuance plus tenace
- Utiliser une plaquette présentant une géométrie d'arête plus stable
- Réduire l'avance en début de coupe, en cas d'écaillage par impact de copeaux.
- Choisir une géométrie brise-copeaux différente
- Modifier l'angle de direction d'arête de l'outil
- Faire une préparation d'arête de coupe (rodage de l'arête de 0,04 mm par exemple).

I-9-4-5)- Rupture de la plaquette ;

Une rupture de la plaquette signifie en général détérioration de l'outil et de la pièce. Ses causes sont multiples et dépendent de la machine et de la pièce.



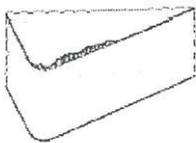
Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une cratérisation ou d'une usure trop importante.

Mesures correctives :

- Choisir une nuance plus tenace
- Utiliser une plaquette plus robuste et dotée d'un rayon de bec plus important
- Choisir une géométrie brise-copeaux pour section de copeaux plus importante
- Réduire l'avance et éventuellement aussi la profondeur de passe.

I-9-4-6)- Arêtes rapportées ;

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres.



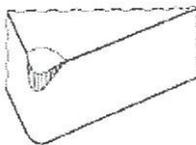
Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou des angles de coupe non appropriés.

Mesures correctives :

- Accroître la vitesse de coupe
 - Utiliser des métaux durs revêtus ou des cermets
 - Choisir une géométrie d'arête positive
- Travailler avec arrosage

I-9-4-7)- Déformation plastique ;

Elle est occasionnée par une sollicitation trop importante de l'arête de coupe (matériaux usinés trop durs) en combinaison avec des températures d'usinages élevées. La zone de déformation plastique du matériau dépassé, il y aura rupture !



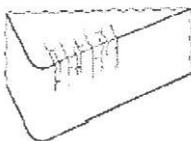
On peut trouver cette déformation plastique en parallèle d'une cratérisation. En effet le cratère affaiblit la section de l'outil.

Mesures correctives :

- Réduire la vitesse de coupe
- Réduire l'avance
- Utiliser une nuance de métaux durs plus résistante à l'usure.

I-9-4-8)- Fissurations de l'arête de coupe ou usure en peigne ;

Légères fissures sensiblement perpendiculaires à l'arête de coupe occasionnées par les chocs thermiques résultant des interruptions de coupe, en particulier dans le cas du fraisage. Risque de rupture !



Mesures correctives :

- Utiliser une nuance présentant une meilleure résistance aux chocs thermiques
- Contrôler l'arrosage [2].

I-9-5)- Critères D'usure :

Les critères usuellement utilisés pour des outils en carbures et, notamment, ceux recommandés par la norme en vigueur concernant l'usure des outils de coupe la norme, NF E 66 505, se rangent en deux catégories décrites ci-dessous.

I-9-5-1)- Les critères directs ;

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure (figure I-20):

_ Critère d'usure frontale, caractérisé par une largeur limite VB_{limite} de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil,

_ Critère de cratérisation, défini par la valeur limite de la profondeur du cratère KT_{limite} , ou par la valeur limite du rapport de cratérisation KT/KM , ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation γ_c ,

_ Critère de "mort d'outil", utilisé principalement pour les outils en acier rapide,

Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesurée par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs,

_ Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

I-9-5-2)- Les critères indirects ;

Ils sont basés sur la variation de certaines grandeurs physiques de la coupe en fonction de l'usure de l'outil.

Par exemple :

- Les efforts et le travail spécifique de coupe,
- La rugosité de la surface usinée,
- La température à la pointe de l'outil [8].

I-9-6)- Modèles de lois d'usure :

I-9-6-1)- Modèle de TAYLOR généralisé :

Taylor fut le premier à proposer en 1907, un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe T d'un outil aux paramètres de coupe.

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

V : Vitesse de coupe

T : Durée de Vie

n : Exposant de TAYLOR

C : Constante dépendant du couple outil/pièce.

Ce modèle est représenté par une droite dans un graphe à coordonnées logarithmiques :

$$\log T = n \cdot \log V + \log C$$

Gilbert (1950) a proposé la généralisation du modèle de Taylor. La constante C est remplacée par une expression qui tient compte de la géométrie de l'outil et du copeau.

$$T = K \cdot a_p^x \cdot f^y \cdot V_c^n$$

K : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné,

a : Profondeur de passe(mm),

f : Avance(mm/tr).

x, y : Exposants dépendant de la nuance de l'outil.

I-9-6-2)- Modèle de COLDING :

Ce modèle (1958-1960) tient compte de la courbure négative de la courbe (voir fig.I.30). Ce sont des polynômes de la forme:

$$K+a.X+C.Y-Z+K.X.Z=O$$

Où $K+aX+bX^2+cY+dY^2+eZ^2-Z+f.X.Y+g.Y.Z+h.X.Z=O$

avec $X = \log F, Y = \log V$ et $Z = \log T$.

La complexité de ce modèle et la difficulté d'obtenir toutes les constantes a, b, c, d, e, f, g, h, pour chaque cas le rendent très peu exploitable. Il rend pourtant compte des diverses particularités du phénomène de coupe, notamment de l'existence de valeur optimale de l'avance que les modèles plus simples ne laissent pas apparaître.

I-9-6-3)- Modèles de KONING-DEPIEREUX (1969) :

$$T = \exp(-\alpha \cdot V^\nu - \gamma \cdot a^\mu - \sigma \cdot f^\lambda)$$

Ce modèle conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel est en accord avec les courbes expérimentales qui déterminent l'usure des outils.

I-9-6-4)- Bilan des modèles d'usure : (figure I-21).

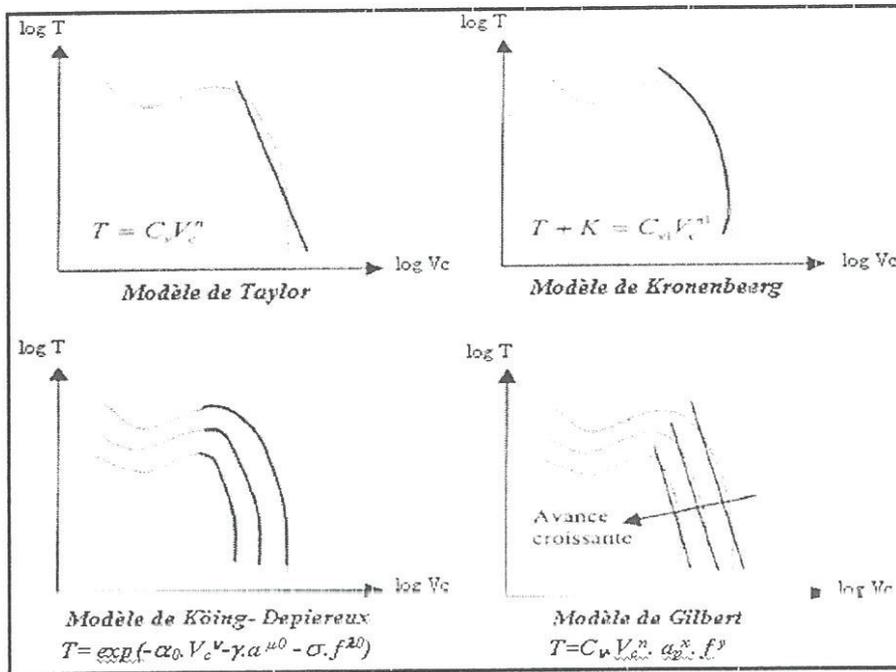


Figure I-21 : Représentation graphique des différents modèles

Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif, il est couramment utilisé aujourd'hui pour tous les matériaux d'outils [8].

I-9-7)- Conclusion Partielle :

Pour accroître la productivité des ateliers d'usinage, la contribution de tous est nécessaire : celle des spécialistes de la machine-outil, celle des mécaniciens de l'outillage, celle des chimistes dont dépend la performance des fluides de coupe, etc. Pendant longtemps les apports des spécialistes des matériaux qui coupent et des matériaux usinés ont été autonomes entre eux et a fortiori indépendants de ceux des autres disciplines. Une démarche globalisante est en train de naître, qui part de l'analyse des phénomènes de contact entre outil, pièce et copeau et prend en compte non seulement les propriétés intrinsèques respectives des trois antagonistes, mais aussi leurs interactions réciproques et celles avec le système mécanique dans lequel ils s'insèrent [40].

I-10)- ÉTATS DE SURFACE : généralité,

Surface d'un corps : c'est le lieu des points qui délimitent une portion de l'espace. La surface d'une pièce est composée d'une ou plusieurs surfaces élémentaires. Par exemple, pour la pièce (figure I-22), on distingue :

- Une surface cylindrique.
- Une surface planes.

Surface géométrique :

Surface parfaite ; Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales. Par exemple, pour la surface cylindrique ; $\varnothing 30$

Surface spécifiée :

Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin

Surface réelle :

Surface obtenue au cours de la fabrication. Longueur de base du profil moyen.

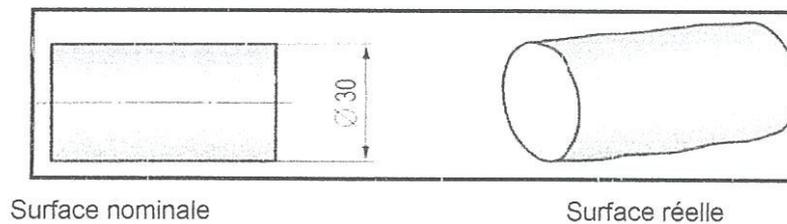


Figure I-22 : exemple représentatif de la surface nominale et la surface réelle.

Surface mesurée :

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

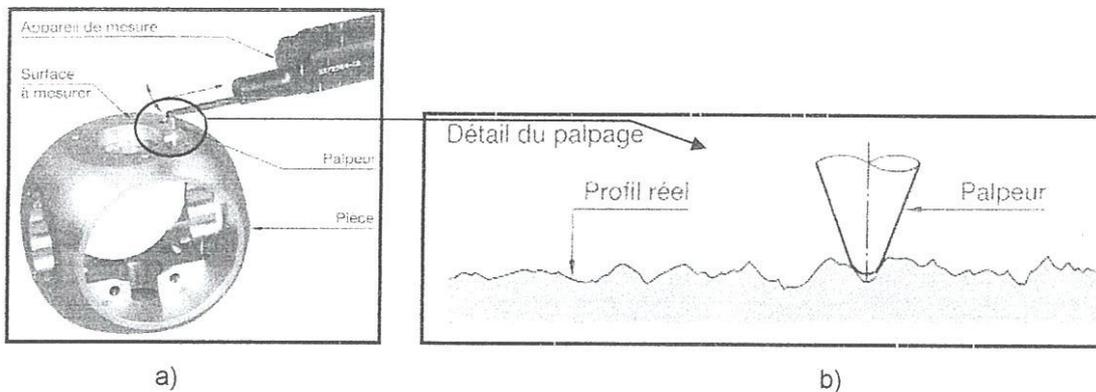


Figure I-23: a) Mesure du profil d'une surface, b) Détail du palpéage.

I-10-1)- Analyse d'une surface :

Si l'on coupe normalement une surface par un plan, on obtient une courbe appelée « profil de surface ». C'est à partir de ce profil que l'on analyse les différents défauts de la surface.

On classe les défauts géométriques en quatre ordres de grandeur (figure I-24) :

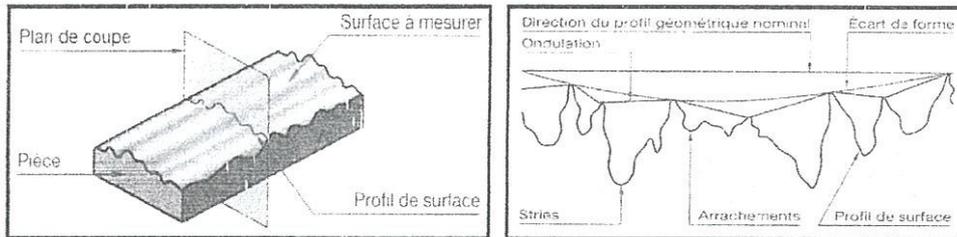


Figure I-24: Analyse d'une surface.

- Défaut de premier ordre :

Ce sont des défauts de forme. Par exemple : écarts de rectitude, écarts de circularité, etc...

- Défaut de deuxième ordre :

C'est une ligne ondulée. Elle est caractérisée par une ligne enveloppe supérieure. La distance d'irrégularité entre deux sommets est comprise entre 0,5 et 2,5mm environ.

- défauts du troisième et du quatrième ordre :

Ils caractérisent la rugosité de surface. Les défauts du troisième ordre sont constitués par des stries ou sillons. La distance entre deux sillons est comprise entre 0,02 et 0,5mm environ. Les défauts de quatrième ordre sont des défauts apériodiques constitués par des arrachements, fentes, etc. La distance entre deux pics de ces irrégularités est inférieure ou égale à 20 µm [41].

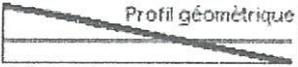
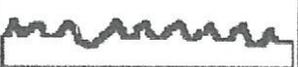
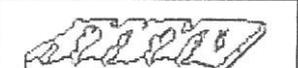
	Types de défauts	Désignation	Causes
macrographiques		Défauts de forme et de position (1 ^{er} ordre)	Pendant l'usinage et après l'usinage etc.
		Ondulation périodique (2 ^{eme} ordre)	Fraisage : pas de l'ondulation = <u>avance</u> par tour de fraise, vibrations, pièce et outil, etc.
Micrographiques		Strie - Sillon, rugosité périodique (3 ^{eme} ordre)	Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations.
		Arrachement, fentes, marques d'outil, piqûres, etc. (4 ^{eme} ordre)	Qualité de l'affûtage de l'outil. Hétérogénéité du matériau usiné.

Tableau I-2 : Résumé des quatre ordres de grandeur de défauts géométriques [42].

I-10-2)- Paramètres liés à la ligne moyenne: (figure I-25).

- Écart moyen "Ra":

C'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la "ligne centrale". On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| . dx ; \quad Ra \approx \frac{|z_1| + \dots + |z_n|}{n} \quad (I-3) [41].$$

- Écart total "Rt":

C'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux.

- Régularité "Rz":

C'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs

- Profondeur moyenne de rugosité "Rp":

Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base [41].

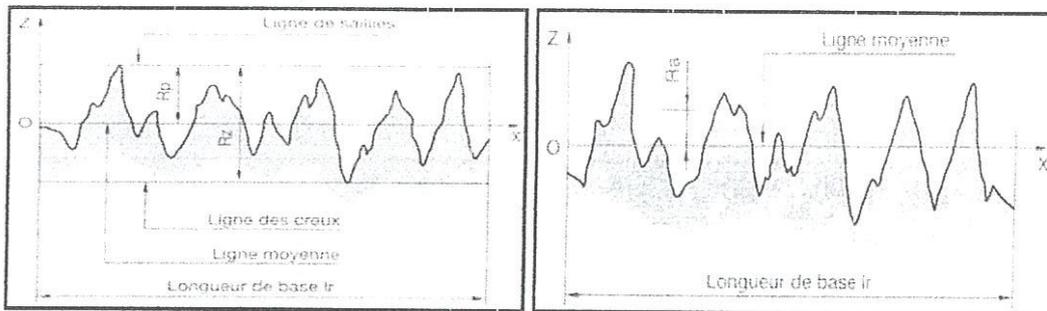


Figure I-25 : Paramètres de rugosité liés à la ligne moyenne [41].

I-10-3)- Conclusion Partielle:

L'état de surface apparaît souvent comme un domaine complexe et mal connu. En fait, il faut reconnaître qu'il n'est pas possible de caractériser la géométrie d'une surface par un seul paramètre sauf, à la rigueur, pour suivre la dérive d'une fabrication. Après une longue période où le seul paramètre utilisé dans beaucoup d'industries était le paramètre Ra, une approche beaucoup plus fonctionnelle est maintenant permise par les appareils à référence de captage externe et microprocesseur. Les paramètres liés aux motifs, maintenant reconnus par l'ISO, permettent de caractériser la forme des irrégularités de surface, et c'est cette forme, qui influe sur la fonction de la pièce, que les bureaux d'étude doivent spécifier avec précision.

Cependant, un profil ne peut caractériser qu'incomplètement une surface : aussi voyons-nous apparaître des appareils qui, en mesurant de nombreux profils parallèles, permettent de relever la topographie tridimensionnelle d'une surface. Certains de ces appareils ne donnant encore qu'une image de la surface, il devient maintenant nécessaire de définir et de normaliser des paramètres tridimensionnels d'état de surface [43].

I-11)- CONCLUSION:

D'après cette étude bibliographique, on peut dire que le tournage des métaux durs est prometteur. Il intéresse de nombreux industriels, ce qui le rend aussi intéressant pour plusieurs chercheurs. Du point de vue scientifique ; l'état de surface obtenu par le tournage dur est semblable à celui de la rectification. Où le tournage dur peut nous conduire à réduire les phases de fabrication d'une pièce sur la même machine et de gagner du temps et de prix de revient. La rectification est un procédé polluant par contre le tournage dur permet de protéger l'environnement.

On conclut aussi que le processus d'usinage est le résumé du contact Outil- Matière sous l'influence des paramètres de régime de coupe (V_c , f , a_p). Cependant, les phénomènes résultants de cette influence, sont à leur tour influant l'un sur l'autre par leur ordre de naissance, ce sont les paramètres technologiques d'usinage « L'effort de coupe, la rugosité de surface, température de coupe et l'usure ». Par conséquent le contact Outil- Matière dépend du matériau à outil et de la matière à usiner.

Le prochain chapitre concerne les équipements utilisés pour la réalisation des expériences ainsi que la planification de la démarche des essais.

Chapitre II :

EQUIPEMENTS UTILISES

ET

PLANIFICATION DES EXPERIENCES.

II-1)- Equipements utilisés :

II-1-1)- Machine outil :

Le tour qui a servi à effectuer nos essais est un tour à charioter et à fileter fabriqué par la société tchèque « TOS TRENCIN » modèle SN40 de puissance sur la broche égale à 6.6 KW (figure II-1). Les nombres de tours disponibles sur la machine sont :

22.5 ; 31.5 ; 45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 500 ; 710 ; 1000 ; 1400 ; 2000 (tr/min), les avances disponibles sont : 0.08 ; 0.11 ; 0.12 ; 0.14 ; 0.16 ; 0.2 ; 0.24 ; 0.28 ; 0.28 ; ... 6.4 (mm/tr).

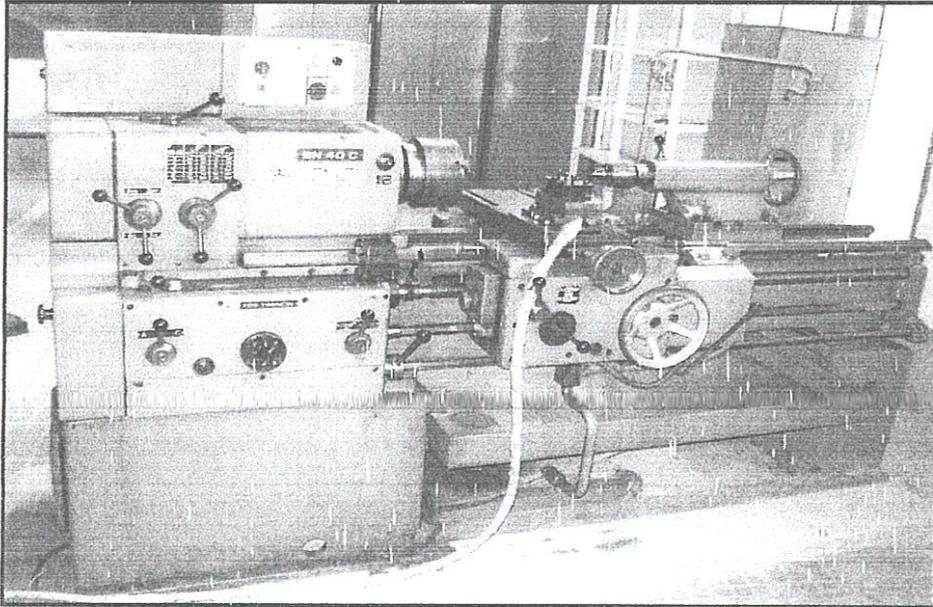


Figure II-1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

II-1-2)- Matière à usiner :

Les essais ont été effectués sur des éprouvettes rondes en acier de nuance 100Cr6, de 60 mm de diamètre et de 350mm de longueur, l'acier 100Cr6 connu aussi sous la dénomination d' AISI 521000 (tab II-1), préconisé surtout pour la fabrication de billes, de rouleaux, de bag et de cages de roulements, il est également employé dans la mise en forme à froid comme matrice de formage, cylindres de laminoirs et revêtement d'usure. Sa Composition chimique et ses propriétés mécaniques sont résumées dans le tableau (II-2). Avant traitement thermique, l'acier acquit une dureté de 285HB, mais après un traitement thermique équipé du trempé à 850°C suivi d'un revenu à 220°C nous conduit à la dureté souhaitée de 60HRC.

Tableau II-1 : Différentes désignations de la matière utilisée.

Norme Française AFNOR	Symbole DIN	Norme Allemandes WERKSTÖFF	Normes anglaises		Normes Américaines AISI	% Carbone
			Nouvelles	Anciennes		
100C6	100Cr6	1,3505	535A99	EN31	521000	1,20/1,60

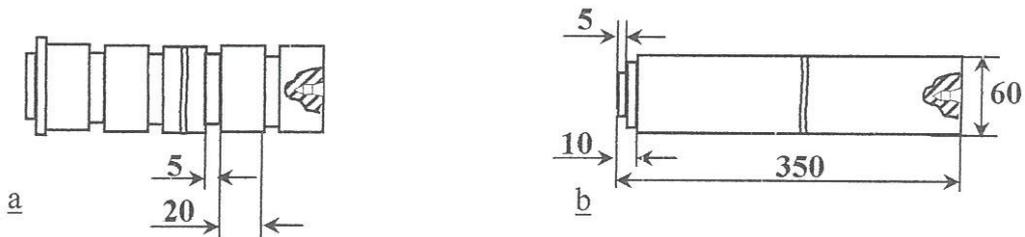
Tableau II-2 : Composition chimique et Propriétés mécaniques de la matière utilisée.

Composition chimique.						
100Cr6	% C	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni
	1.05	0.38	0.03	0.028	1.41	0.21
Propriétés mécaniques.						
100Cr6	E (GPa)	ν	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)	HRC	σ_d (Mpa)
	210	0.3	2200	2000	60 à 67	800

Les caractéristiques mécaniques en traction et en fatigue de l'acier sont difficiles à déterminer du fait de leur grande fragilité et de sa sensibilité aux entailles. De part son utilisation, il est souvent testé en compression et en fatigue de contact. En fatigue de contact (endurance de roulement) sa limite est supérieure à 2000 MPa, c'est à dire près de 10 fois celle des alliages d'aluminium.

II -1-3)-Géométrie des éprouvettes :

- Croquis :



a)- Effort+ Rugosité ; b)- Effort+ Rugosité+ Usure+ Température.

- Photographie :

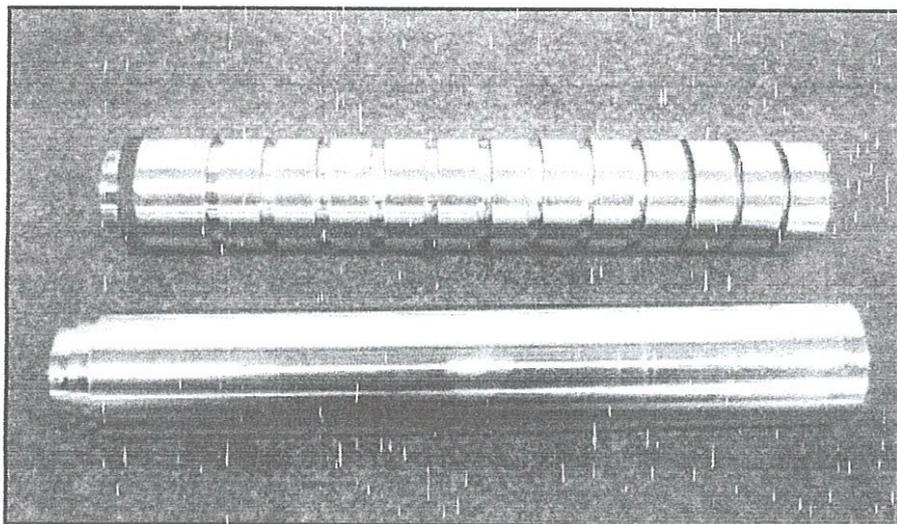


Figure II- 2 : Croquis et photographie des éprouvettes.

II -1-4)- Outils de coupe utilisés :

II -1-4-a)- Plaquettes :

Les plaquettes utilisées sont amovibles, d'une forme carrée à fixation par bride-coin à partir d'un trou central. Toutes les informations relatives à ces plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau (II- 3).

Tableaux II- 3 : info plaquette ;

Matériau de coupe	Désignation firme	Désignation ISO	Firme	Composition
Céramique mixte	CC650	SNGA12.04.08.T01020	Sandvik coramant	70%AL ₂ O ₃ + 30%TiC

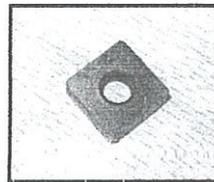


Figure II- 3 : Photographie de la plaquette.

- Céramique CC650 :

C'est une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane. Elle est recommandée principalement pour l'usinage de finition des aciers trempés, des fontes trempées et les superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.

II-1-4-b)- Porte- plaquette :

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé une porte – plaquette sur laquelle est fixée la plaquette mécaniquement par bride coin. La géométrie du porte- plaquette est définie dans le tableau (II-4). La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte- outil et garantit un contact parfait de la plaquette (figure II-4).

Tableau II- 4 : Caractéristiques géométriques des porte-outils.

Porte plaquette	χ_r°	α°	γ°	λ°	Section (mm)
PSBNR2525k12	75	6	-6	-6	25×25

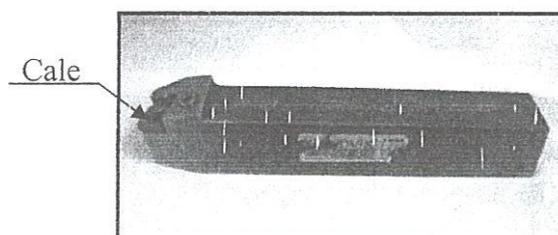


Figure II- 4 : Photographie du porte-plaquette.

- **Montage :**

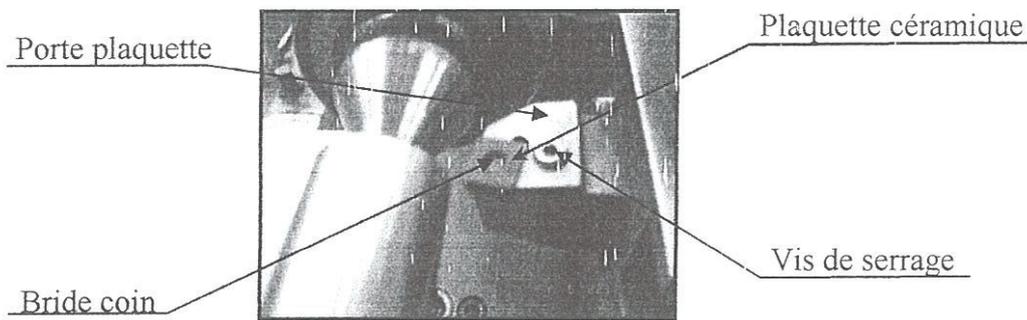


Figure II- 5 : Présentation de la plaquette et du porte-plaquette (Principe de fixation).

II -1-5)- Appareillage de mesure utilisé :

II -1-5-1)- Mesure de l'effort de coupe :

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne (dynamomètre KISTLER), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on cite : la plateforme (figure II- 6), l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et en fin une imprimante pour le tirage des courbes obtenues (figure II- 7). Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézoélectrique attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme représentée, appelée aussi table, qui elle même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz à trois éléments, qui sont assemblés sous haute précontrainte, entre une plaque de base et une plaque de recouvrement, formant un dynamomètre qui peut mesurer trois composantes en même temps. Les forces agissantes sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

Ces signaux amplifiés sont en suite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus de tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

F_x- Effort axial (F_a).

F_y- Effort radial (F_r).

F_z- Effort tangentiel (F_v).

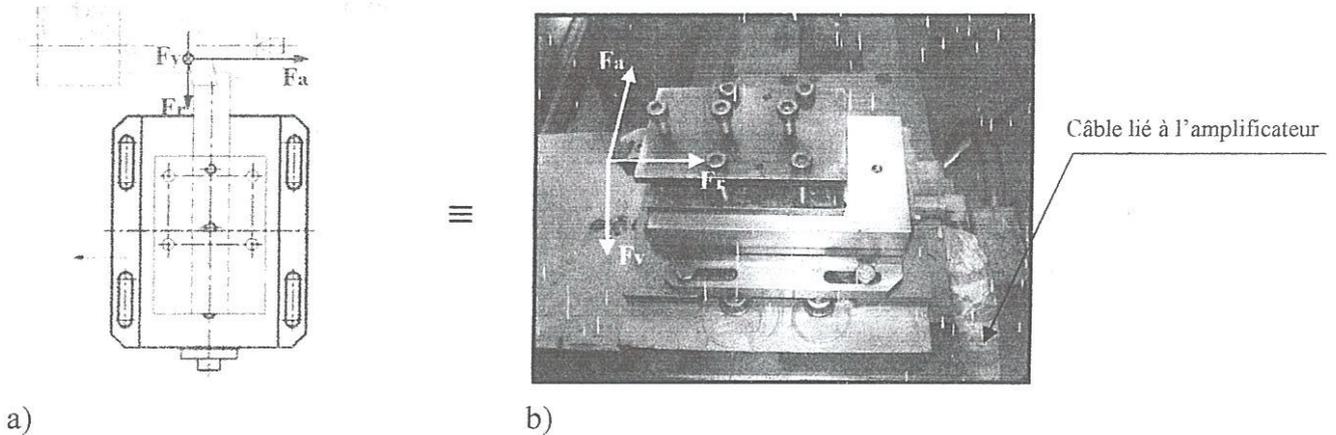


Figure II- 6 : a)- Principe de base, b)- Photographie de porte- outil dynamométrique type 9403.

II -1-5-1-a)- Optimisation des procédés :

C'est dans les domaines de la recherche, de la fabrication et de la conception que les dynamomètres sont le plus utiles car ils permettent de mesurer les différents composants d'un effort de coupe. Ils servent également à analyser, à comparer et à sélectionner les matériaux, l'outil et la machine. D'autres possibilités d'application résultent de la détermination des efforts de coupe optimisés de l'analyse du comportement de cassure d'outils ainsi que de l'examen de la formation de copeaux et de leur influence sur les efforts de coupe.

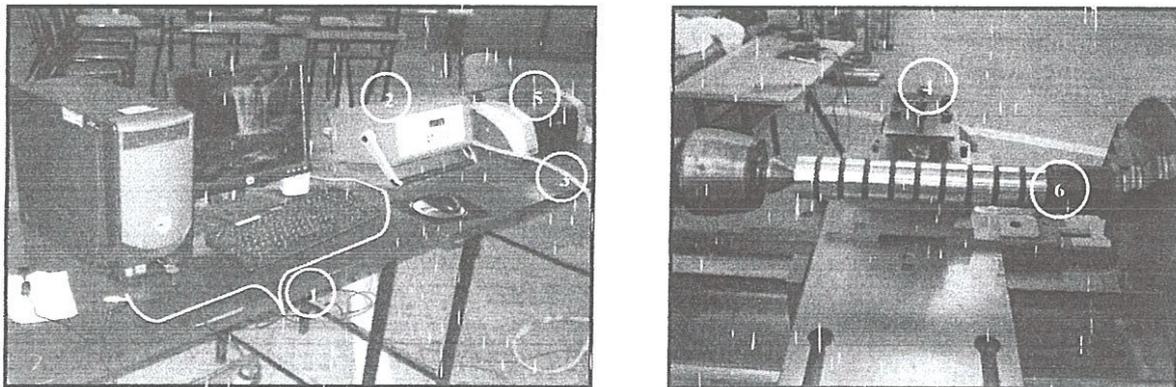


Figure II- 7 : Chaîne de mesure des efforts de coupe.

- 1/- Micro ordinateur sur lequel est installé le logiciel « Dynoware ».
- 2/- Amplificateur multicanaux.
- 3/- Câble liant l'amplificateur à la porte outil.
- 4/- Porte outil, (la plateforme).
- 5/- Imprimante pour le tirage des profils des efforts de coupe.
- 6/- Eprouvette.

II -1-5-1-b)- Caractéristiques de la chaîne de mesure :

Dynamomètre à trois composants (9257B) : le porte- outil type 9403 vissable et employé pour des outils de tournage avec une section maximale de 26×26 .

- grande rigidité, fréquence propre très élevée.
- Large gamme de mesure.
- Bonne linéarité, sans hystérésis.
- Faible interaction ($<1\%$).
- Utilisation simple (prêt à l'emploi).
- Construction compacte.
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP67.
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur ; 8 mm de diamètre).
- Amplificateur multicanaux ; destiné à la mesure des efforts de coupe.
- Ordinateur personnel (PC).
- Traceur.

II -1-5-2)- Mesure de la rugosité :

Pour la mesure des différents critères de la rugosité (R_a , R_z , R_t) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo) fig 8, équipé d'une imprimante de profil de rugosité (figure). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4mm avec une longueur de base de 0.8mm (0.8×5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à $40\mu\text{m}$) pour R_a et de (0.3 à $160\mu\text{m}$) pour R_t et R_z . Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (figure II-8).

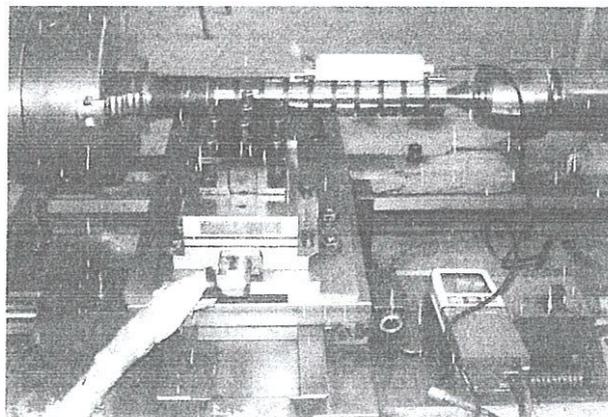


Figure II- 8- : Photographie du Rugosimètre.

II -1-5-3)- Mesure de la température :

Durant l'usinage, pour mesurer les températures de l'outil, la pièce et le copeau, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge, modèle Ranger 3I (figure II-9). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (minimale, maximale et moyenne) qui seront affichées sur l'écran numérique en degrés Celsius ou Fahrenheit. Une sortie analogique/numérique permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre à infrarouge Ranger 3I présente les caractéristiques suivantes :

- Étendue de mesure -30° à 1200°C .
- Étendue spectrale 8 à 14 μ .
- Résolution optique 75 :1.
- Emissivité 0.10 à 1.00 par pas de 0.01 (0.95 par défaut).
- Visée laser double.
- Temps de réponse 700 m sec.

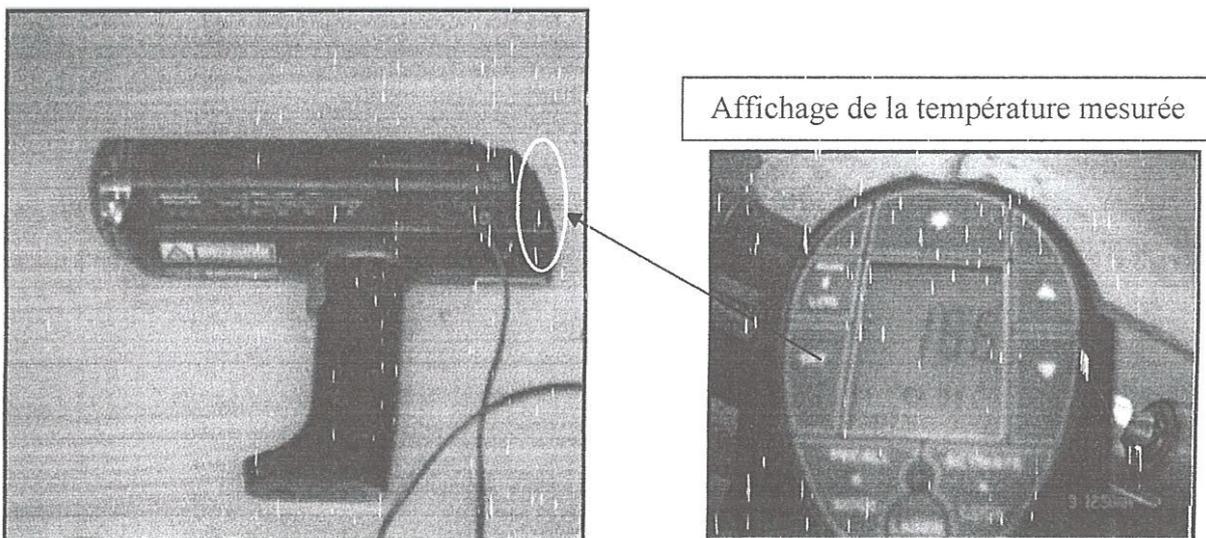


Figure II- 9 : Représentation de pyromètres à infrarouges.

II -1-5-4)- Mesure de l'usure :

II -1-5-4-a)- Mesure de l'usure frontale :

Nous avons effectué cette opération à l'aide d'un microscope optique HUND type W-AD (figure II-10), ce dernier sert à mesurer les grandeurs de l'usure sur la surface en dépouille principale et la surface en dépouille auxiliaire, ainsi que la majorité des paramètres du cratère. La plaquette est placée sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés par un dispositif (figure II-11), équipé de deux tambours ayant une précision de 1/1000 mm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope.

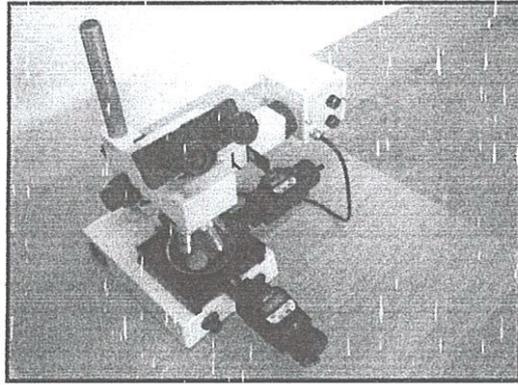


Figure II- 10 : Microscope optique pour la mesure de VB.

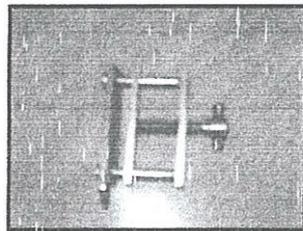


Figure II- 11 : Dispositif pour le positionnement de la plaquette sur la table du microscope.

II -1-5-4-h)- Mesure du cratère :

Le dispositif utilisé est un comparateur équipé d'une touche à pointe vive, cette dernière suit le profil du cratère et sa profondeur sera indiquée sur le cadran numérique du comparateur qui a une précision de 1/1000 mm (figure I-12).

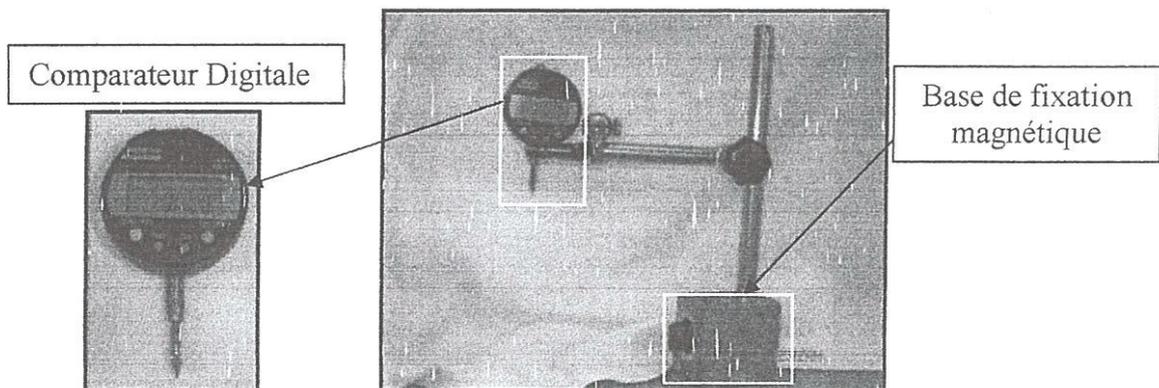


Figure II- 12 : Dispositif de mesure du cratère.

II -1-5-5)- Autres équipements :

- Un pied à coulisse pour vérifier le diamètre de l'éprouvette.
- Duromètre pour mesurer la dureté.
- Microscope à partir duquel seront prises les photos de l'usure (figure I-13).
- Un appareil photo numérique pour prendre le nécessaire de photos.
- Four électrique pour la réalisation du traitement thermique des éprouvettes.

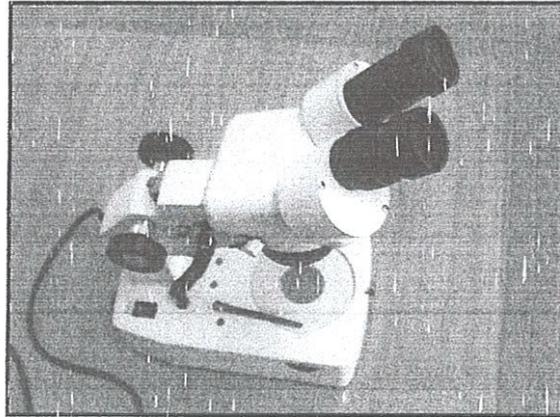


Figure II- 13 : Microscope pour la photographie d'usure.

II -2)-Planification des expériences :

II -2-1)- Introduction:

Il existe plusieurs éléments intervenant dans le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer : les paramètres de régime de coupe (V_c , f , ap), la géométrie de la partie active de l'outil (r, α, β, γ , etc...), ainsi que les conditions de coupe, (rigidité de la machine, lubrification). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe, l'usure (tenue de l'outil), la rugosité et la température de coupe, représentent eux les paramètres de sortie. Il est sûr qu'en, ce qui concerne notre étude, de nombreux points paraissent importants à traiter. Toutefois, notre suivi est limité à l'évolution des paramètres suivants :

- L'usure du matériau de l'outil de coupe en céramique CC650.
- Les efforts de coupe en fonction des paramètres de régime coupe (V_c , f , ap) et de l'usure en fonction de l'usure en dépouille VB.
- La rugosité de surface usinée en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , ap) et de l'usure en dépouille VB.
- La température de coupe en fonction de paramètre (V_c , f , ap).

Considérons $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètres de sortie.

L'influence d'un ou plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre de sortie Y , peut être obtenue en utilisant les deux méthodes suivantes :

- Méthode unifactorielle.
- Méthode multifactorielle.

II -2-2)- Méthode unifactorielle :

Cette méthode est indispensable lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y. Pour cela, on donne une série des valeurs discrètes au facteur examiné X [$X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$] tout en maintenant tous les autres facteurs constants.

Pour chaque $X = X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i = 1 \div N$). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$. Dans ce cas, on varie seulement le facteur X, tout en maintenant les autres facteurs constants (Tab II-5).

N°d'essais	Facteur variable	Paramètre de sortie						
	X	Y_1	Y_2	-	Y_g	-	Y_n	Y_{moy}
1	X_1	Y_{11}	Y_{21}	-	Y_{g1}	-	Y_{n1}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{12}	Y_{22}	-	Y_{g2}	-	Y_{n2}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{13}	Y_{22}	-	Y_{g3}	-	Y_{n3}	Y_{moy3}
I	X_i	Y_{1i}	Y_{2i}	-	Y_{gi}	-	Y_{ni}	Y_{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{1N}	Y_{2N}	-	Y_{gN}	-	Y_{nN}	Y_{moyN}

Tableau II-5 : Planification de la méthode unifactorielle.

II -2-3)- Méthode multifactorielle :

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale à fin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre des niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (f, ap, Vc) sur les diverses fonctions d'optimisation (Usure, rugosité, effort de coupe, température de coupe). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires, on respecte la formule suivante :

$$N = q^k \quad (II-1)$$

Ou, N : nombre d'essais.

q : nombre de niveaux de variations des facteurs de base.

k : nombre des facteurs de base.

Dans notre cas nous avons trois facteurs de base ($k = 3$) et chaque facteur a deux niveaux de variation (un niveau supérieur (+1) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors : $N = 2^3 = 8$.

Les essais ont été numérotés de 1 à 8. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau (II-6) :

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	f (mm/tr)	ap (mm)	Vc (m/min)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale	Valeur minimale
Nombre des essais	Valeurs codifiées des facteurs		
	Z ₁	Z ₂	Z ₃
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Tableau II-6 : Matrice de planification multifactorielle 2³.

Dans les coupes des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée (X₁, X₂, ..., X_n) sont en général de la forme :

$$Y = CX_1^{k_1} X_2^{k_2} \dots X_n^{k_n} \quad (II-2)$$

Où

C : est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (II-2).

k₁, k₂, k₃, ..., k_n. Sont des exposants qui reflètent respectivement les degrés d'influence de (X₁, X₂, ..., X_n) sur Y.

II -2-3-a)- Méthode des calculs des constantes des modèles mathématiques :

o **Méthode Unifactorielle :**

Les modèles mathématiques dans la coupe des métaux liant la sortie Y d'un système d'usinage au paramètre d'entrée X s'expriment conformément aux idées de Taylor sous la forme :

$$y = CX^n \quad (II-3)$$

$$\text{Pour la tenue : } T = CV^n \quad (\text{II-4})$$

$$\text{Pour la rugosité : } R = CV^n \quad (\text{II-5})$$

$$\text{Pour l'effort de coupe : } F = CV^n \quad (\text{II-6})$$

Graphiquement la détermination des coefficients (C et n) se fait rapidement et sans difficulté. Cependant cette méthode graphique est peu précise. Une meilleure précision est assurée par la méthode des moindres carrés de Gauss.

$$\text{Log } T = \text{Log } C + n \text{ Log } V \quad (\text{II-7})$$

$$\text{Log } R = \text{Log } C + n \text{ Log } V \quad (\text{II-8})$$

$$\text{Log } F = \text{Log } C + n \text{ Log } V \quad (\text{II-9})$$

Ces équations sont linéaires et du type:

$$Y = nX + C, \quad (y = ax + b \text{ l'équation d'une droite}). \quad (\text{II-10})$$

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{it})^2 \rightarrow \varepsilon \quad (\text{II-11})$$

Où ; S : la somme des carrés des écarts quadratiques.

N : Nombre des essais

Y_i : Les coordonnées d'un point expérimental.

Y_{it} : Les coordonnées d'un point situé sur la droite moyenne de régression.

ε : Valeur infiniment petite.

Cette méthode exige que la somme S soit minimale. En dérivant l'équation (II-11) par rapport aux coefficients (C et n) et en égalisant les résultats à zéro, on obtient :

$$\frac{\partial S}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0,$$

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - nX_i - C)^2 \quad (\text{II-12})$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial n} &= -2 \sum_{i=1}^N (Y_i - nX_i - C) X_i = 0. \\ \frac{\partial S}{\partial C} &= -2 \sum_{i=1}^N (Y_i - nX_i - C) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-13})$$

Le développement des expressions (II-13) nous donne :

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N Y_i &= NC + n \sum_{i=1}^N X_i \\ \sum_{i=1}^N Y_i X_i &= C \sum_{i=1}^N X_i + n \sum_{i=1}^N X_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (\text{II-14})$$

De (II-14) on peut déterminer les constantes C et n.

$$C = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N Y_i - n \sum_{i=1}^N X_i \right] \quad (II-15)$$

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N Y_i X_i - \sum_{i=1}^N Y_i \sum_{i=1}^N X_i}{N \sum_{i=1}^N X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N X_i \right)^2} \quad (II-16)$$

Une fois, C et n sont déterminées, le modèle mathématique cité dans l'équation est complètement défini. Cette méthode est très précise, seulement, elle nécessite des calculs sur micro-ordinateur.

Pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques, nous avons utilisé un programme en Matlab qui détermine directement les valeurs des constantes des modèles (tenue, rugosité et effort) ainsi que le coefficient de détermination R².

II -2-3-b)- Détermination de la loi de la coupe:

o méthode multifactorielle

Les modèles mathématiques les plus couramment utilisés s'expriment (conformément aux idées de TAYLOR) sous la forme de l'équation suivante :

$$Y = C X_1^{k_1} X_2^{k_2} \dots X_n^{k_n} \quad (II-17)$$

$$\text{Pour la Rugosité : } R = C \cdot f^{k_1} \cdot ap^{k_2} \cdot Vc^{k_3} \quad (II-18)$$

$$\text{Pour l'effort : } F = C \cdot f^{k_1} \cdot ap^{k_2} \cdot Vc^{k_3} \quad (II-19)$$

Où ; R : rugosité (Ra, Rt, Rz).

F : effort de coupe (Fa, Fv, Fr).

C : constante qui tient compte des facteurs non cités dans (II- 18 et 19).

k₁, k₂, k₃ : exposant qui expriment le degré d'influence des différents facteurs de base (V, f, ap) sur les paramètres de sortie (R, F).

La méthode des moindres carrés de « GAUSS- LEGENDRE » permet de déterminer les différents coefficients de la loi de coupe.

Prenons le logarithme de l'équation (II-18), on obtient alors pour l'équation suivante :

$$\ln R = \ln C + k_1 \ln V + k_2 \ln f + k_3 \ln ap$$

Un changement de variable permet d'écrire l'équation (II-20) sous la forme suivante :

$$Y = C + k_1 X_1 + k_2 X_2 + k_3 X_3 \quad (II-20)$$

Où : Y = ln R ; C = ln C ; X₁ = ln V ; X₂ = ln f ; X₃ = ln ap.

La méthode des moindres carrés exige que la somme des écarts quadratiques soit minimale, nous aurons alors :

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{ii})^2 \rightarrow \varepsilon \quad (\text{II-21})$$

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - C - k_1 \cdot X_{1i} - k_2 \cdot X_{2i} - k_3 \cdot X_{3i})^2 \rightarrow \varepsilon$$

En prenant les dérivées partielles de la somme (S) par rapport aux inconnues C, k₁, k₂ et k₃ et en égalisant à zéro on obtient.

$$\frac{\partial S}{\partial C} = -2 \sum_{i=1}^N (Y_i - C - k_1 \cdot X_{1i} - k_2 \cdot X_{2i} - k_3 \cdot X_{3i}) = 0.$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^N Y_i - \sum_{i=1}^N C - \sum_{i=1}^N k_1 \cdot X_{1i} - \sum_{i=1}^N k_2 \cdot X_{2i} - \sum_{i=1}^N k_3 \cdot X_{3i} = 0 \quad (\text{II-22})$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^N Y_i = NC + k_1 \sum_{i=1}^N X_{1i} - k_2 \sum_{i=1}^N X_{2i} - k_3 \sum_{i=1}^N X_{3i}$$

Pour les autres dérivées on aura :

$$\bullet \frac{\partial S}{\partial \alpha} = -2 \cdot X_{1i} \cdot \sum_{i=1}^N (Y_i - C - k_1 \cdot X_{1i} - k_2 \cdot X_{2i} - k_3 \cdot X_{3i}) = 0$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i = C \cdot \sum_{i=1}^N X_{1i} + k_1 \cdot \sum_{i=1}^N X_{1i}^2 + k_2 \cdot \sum_{i=1}^N X_{1i} \cdot X_{2i} + k_3 \cdot \sum_{i=1}^N X_{1i} \cdot X_{3i} \quad (\text{II-23})$$

$$\bullet \frac{\partial S}{\partial \beta} = -2 \cdot X_{2i} \cdot \sum_{i=1}^N (Y_i - C - k_1 \cdot X_{1i} - k_2 \cdot X_{2i} - k_3 \cdot X_{3i}) = 0$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i = C \cdot \sum_{i=1}^N X_{2i} + k_1 \cdot \sum_{i=1}^N X_{1i} \cdot X_{2i} + k_2 \cdot \sum_{i=1}^N X_{2i}^2 + k_3 \cdot \sum_{i=1}^N X_{1i} \cdot X_{3i} \quad (\text{II-24})$$

$$\bullet \frac{\partial S}{\partial \gamma} = -2 \cdot X_{3i} \cdot \sum_{i=1}^N (Y_i - C - k_1 \cdot X_{1i} - k_2 \cdot X_{2i} - k_3 \cdot X_{3i}) = 0$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i = C \cdot \sum_{i=1}^N X_{3i} + k_1 \cdot \sum_{i=1}^N X_{1i} \cdot X_{3i} + k_2 \cdot \sum_{i=1}^N X_{3i} \cdot X_{2i} + k_3 \cdot \sum_{i=1}^N X_{3i}^2 \quad (\text{II-25})$$

Les équations (II.22à II25) forment le système suivant:

$$\left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^N Y_i = N.C + k_1 \sum_{i=1}^N X_{1i} + k_2 \sum_{i=1}^N X_{2i} + k_3 \sum_{i=1}^N X_{3i} \\ \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i = C \sum_{i=1}^N X_{1i} + k_1 \sum_{i=1}^N X_{1i}^2 + k_2 \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{2i} + k_3 \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} \\ \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i = C \sum_{i=1}^N X_{2i} + k_1 \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{2i} + k_2 \sum_{i=1}^N X_{2i}^2 + k_3 \sum_{i=1}^N X_{2i} X_{3i} \\ \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i = C \sum_{i=1}^N X_{3i} + k_1 \sum_{i=1}^N X_{1i} X_{3i} + k_2 \sum_{i=1}^N X_{2i} X_{3i} + k_3 \sum_{i=1}^N X_{3i}^2 \end{array} \right] \quad (II-26)$$

Pour résoudre le système (II-26), on remplace les X_{ji} par leurs valeurs du tableau II-25, on obtient :

$$\left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^N Y_i = N.C \\ \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i = N.k_1 \\ \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i = N.k_2 \\ \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i = N.k_3 \end{array} \right] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \\ k_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{1i} Y_i \\ k_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{2i} Y_i \\ k_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{3i} Y_i \end{array} \right] \quad (II-27)$$

Les valeurs ($Y_i = \ln R_i, F_i, T$ et θ°) sont obtenues à partir des essais. Un coefficient dit « coefficient de correction global » (R) entre le modèle mathématique et les résultats expérimentaux est donné par la formule suivante :

$$R = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{it})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y_{moy})^2} \right]^{1/2}, \quad \text{Avec : } Y_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$$

Y_i : la valeur obtenue expérimentalement.

Y_{it} : Valeur calculée d'après le modèle.

Une meilleure adéquation est assurée lorsque la valeur de « R » tend vers l'unité. Pour déterminer les constantes du modèle de la rugosité et de l'effort de coupe (Multifactorielle), nous avons utilisé un programme en Matlab (Annexe) qui donne directement les valeurs des constantes des différents modèles ainsi que le coefficient de détermination R^2 .

II-3)- Condition de traitement thermique :

Pour le traitement thermique des éprouvettes, une trempe suivie d'un revenu nous conduit à augmenter la dureté de notre matériau jusqu'à 60HRC. Les propriétés générales connues sur le matériau (100Cr6) sont résumées dans le tableau II- 7.

Acier	Dureté Avant Traitement Thermique	Dureté Apres Traitement Thermique	Traitement Thermique
100Cr6	285HB \equiv 28,3 HRC	60 HRC	Trempe à $\theta^\circ = 850^\circ\text{C}$ + Revenu à $\theta^\circ = 220^\circ\text{C}$

Tableau II- 7 : Condition de traitement du matériau 100Cr6.

✓ Analyse du matériau :

Les résultats de l'analyse d'un échantillon d'éprouvettes préparées pour la réalisation des essais, d'après le laboratoire central de l'usine EL-Hadjar- Annaba sont indiqués dans le tableau suivant (tab II- 8) ;

Acier	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ti	Ni	Cr	Mo	V	Sn	Fc
100Cr6	0.96	0.34	0.23	0.017	0.014	0.171	0.021	0.003	0.076	1.45	0.021	0.004	0.013	96.46

Tableau II- 8 : Résultats de l'analyse de l'échantillon.

La dureté mesurée sur notre acier avant traitement thermique était de 35 HRC. Une trempe à 850°C , la dureté du matériau augmente jusqu'à 63-65 HRC, suivie d'un revenu à 220°C (figure II- 14) ce qui nous conduit finalement à une dureté souhaitée de 60 HRC.

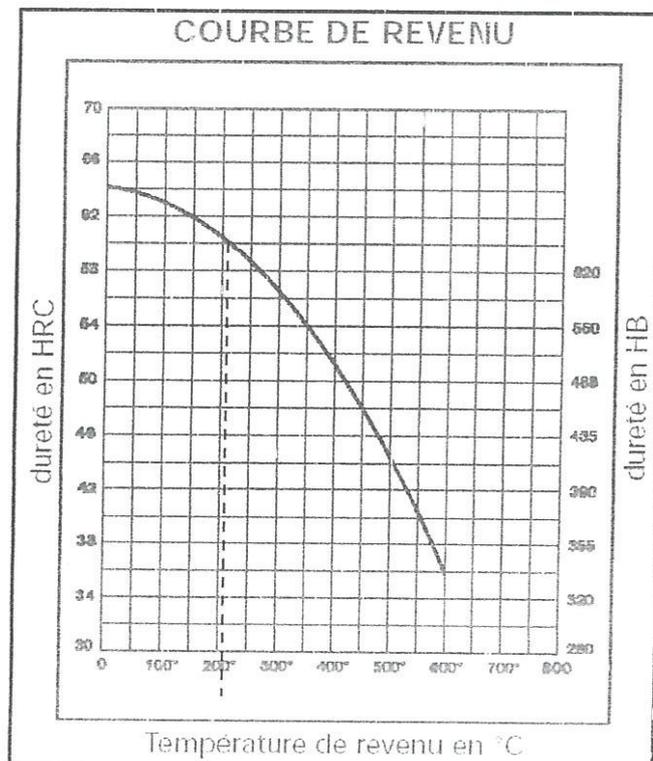


Figure II- 14 : Courbe de revenu pour l'acier 100Cr6.

II-4)- Conditions de coupe :

Les essais sont effectués en tournage bien sûr sous les conditions suivantes :

- o Opération chariotage.
 - L'éprouvette est maintenue en montage mixte.
 - Travail sans lubrification.

Pour la méthode unifactorielle ainsi que multifactorielle :

Condition de coupe	Essais
	Effort de coupe, Rugosité, Usure et température de coupe
Vc (m/min)	80, <i>120</i> , 160, 200, <i>260</i>
f (mm/tr)	<i>0.08</i> , 0.11, 0.14, <i>0.20</i>
ap (mm)	<i>0.2</i> , 0.4, 0.6, 0.8, <i>1</i>

Tableau II- 9 : Paramètres de coupe choisie pour la réalisation des essais.

Les valeurs soulignées en Italique, sont les différents niveaux des trois facteurs pour la méthode multifactorielle concernant les essais de l'usure de l'outil, l'effort de coupe, rugosité de la surface usinée et la température de coupe.

Le prochaine chapitre est consacrer pour l'étude des resultats obtenus des essais concernant, l'influence des conditions de coupe sur l' effort de coupe et sur rugosité de surface en T-D/T-C.

Chapitre III :

RESULTATS EXPERIMENTAUX

ET

INTERPRETATION

III-1)- RESULTATS ET INTERPRETATION DES EFFORTS DE COUPE ET DE LA RUGOSITE :

✓ *Introduction:*

Cette phase d'étude a pour but d'évaluer les efforts de coupe et la rugosité de la surface usinée en fonction des conditions de coupe (V_c , f , a_p).

Les essais concernent l'usinage de l'acier de roulement 100Cr6 traité (60 HRC), avec un outil de coupe en céramique CC650, sous différentes conditions de travail.

Des mesures périodiques de l'usure en d'épouille ont été effectuées lors de la réalisation des essais, dans le but d'écarter l'effet de l'usure et limiter l'étude à l'influence des conditions de coupe (la valeur maximum mesurée $VB = 0.096$ mm).

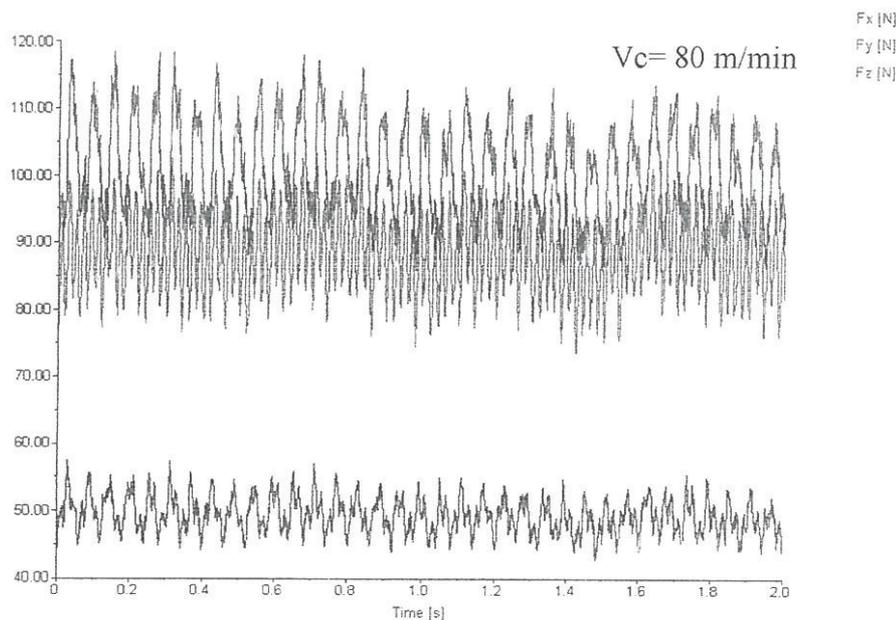
III-1-1)- Étude de l'évolution des efforts de coupe en fonction des conditions de coupe :

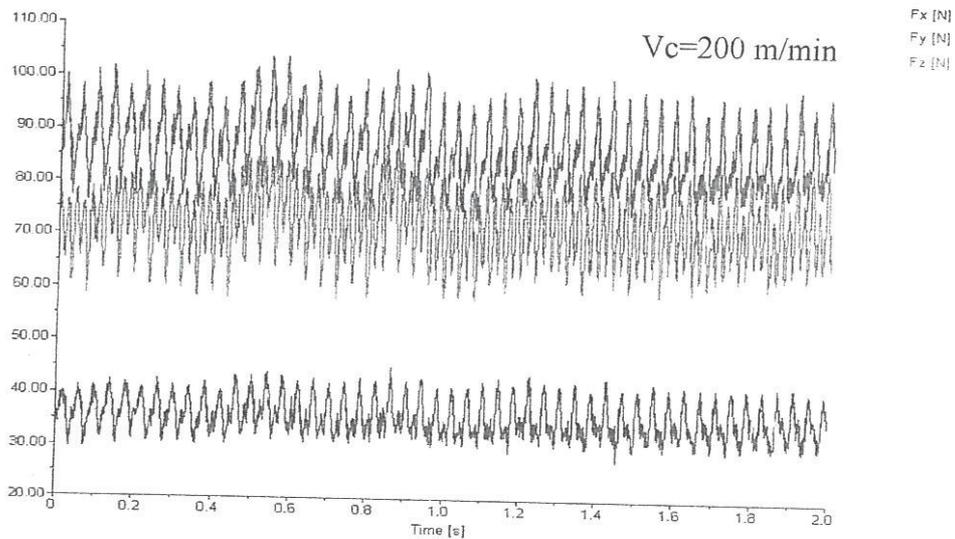
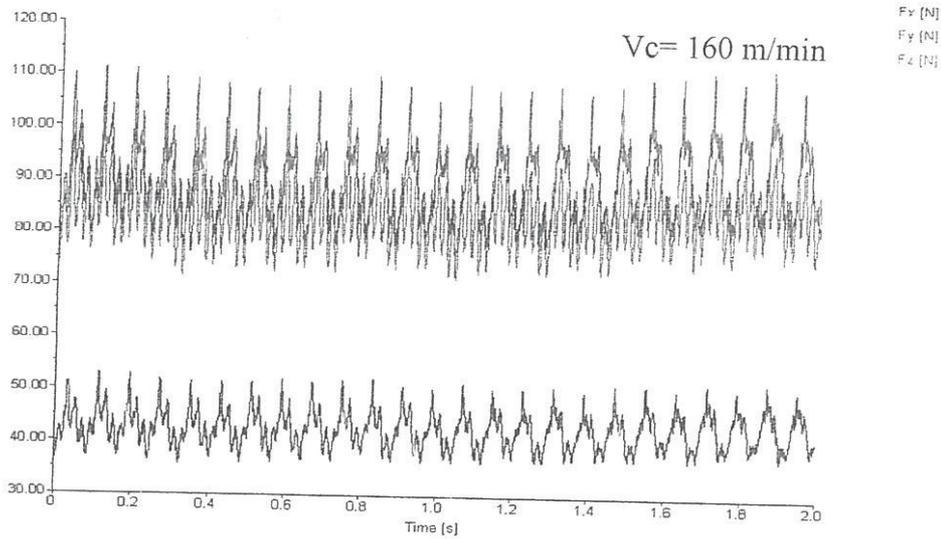
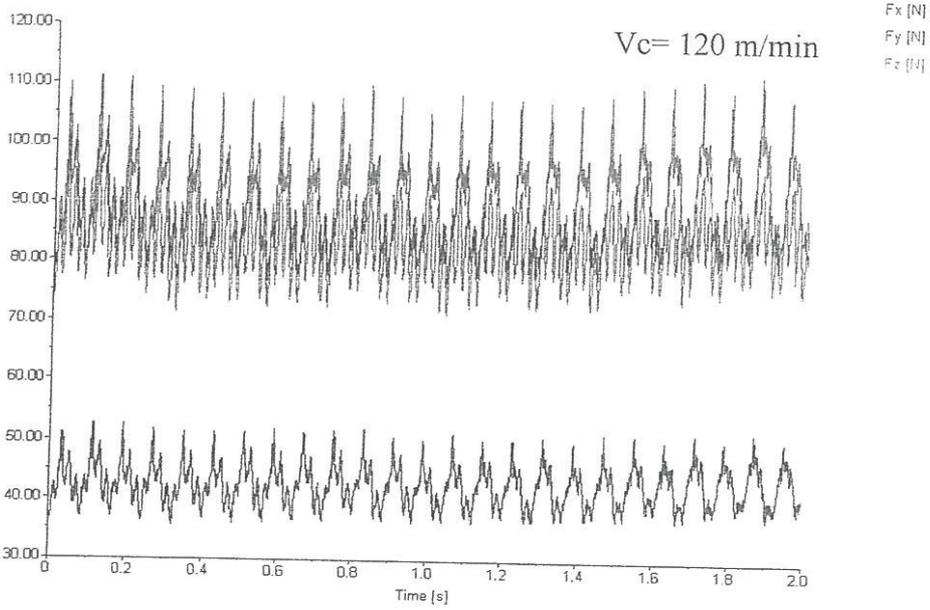
L'effort de coupe est le facteur le plus important pour la détermination de la puissance de coupe nécessaire à l'usinage ainsi que les dimensions des organes de la machine outil sans oublier l'impact de l'effort de coupe sur la stabilité du système usinant.

III -1-1-1)- Influence des conditions de coupe sur les composantes de l'effort de coupe:

III -1-1-1-a)- Influence de la vitesse de coupe (V_c):

- *Présentation des profils de l'effort de coupe mesuré ; (Figure III-1).*





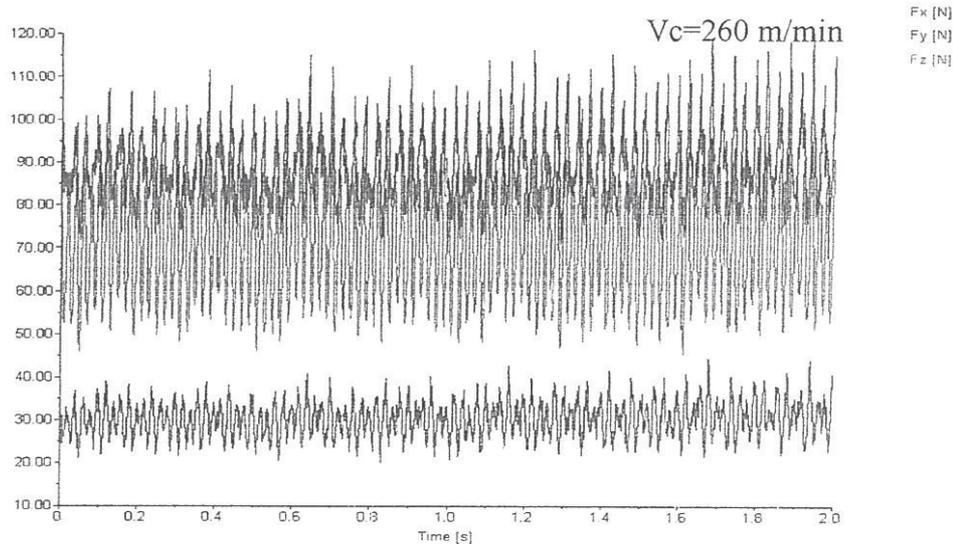


Figure III-1: Spectre des résultats des composantes de l'effort de coupe pour différents vitesses de coupe avec $f= 0,08$ mm/tr et $a_p=0,4$ mm.

La figure (III-2); illustre la variation des composantes de l'efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe, avec $f= 0.08$ mm/tr et $a_p= 04$ mm.

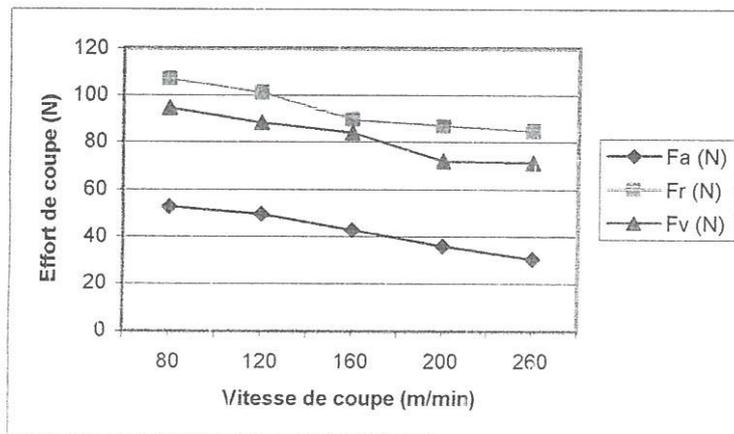


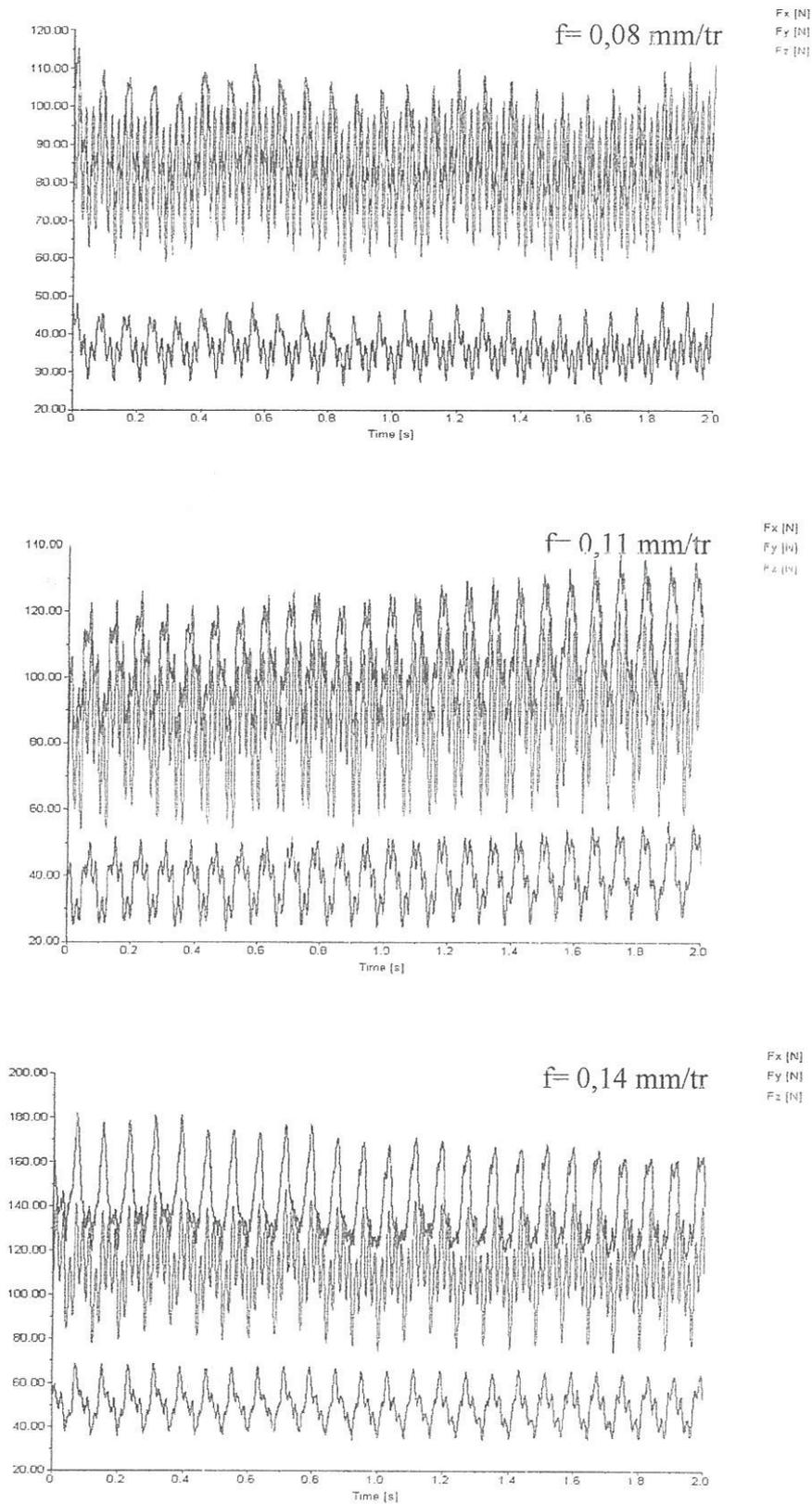
Figure III-2: Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe. ($f= 0.08$ mm/tr et $a_p=0,4$ mm)

L'augmentation de la vitesse de coupe contribue à l'élévation de la température dans la zone de coupe. Ceci conduit à l'adoucissement de la matière usinée ($t^{\circ}\approx 1200-1500^{\circ}\text{C}$) [46], et par conséquent son usinage devient plus facile. Autrement dit, le copeau arraché nécessite des efforts de coupe moindres.

Les résultats expérimentaux montrent que si la vitesse de coupe augmente de (80 à 260m/min), alors les composantes de l'effort de coupe F_a , F_r et F_v diminuent respectivement de 57.73 %, 79.25 % et 75.41 %.

III -1-1-1-b)- Influence de l'avance (f):

- Présentation des profils de l'effort de coupe mesuré; (Figure III-3)



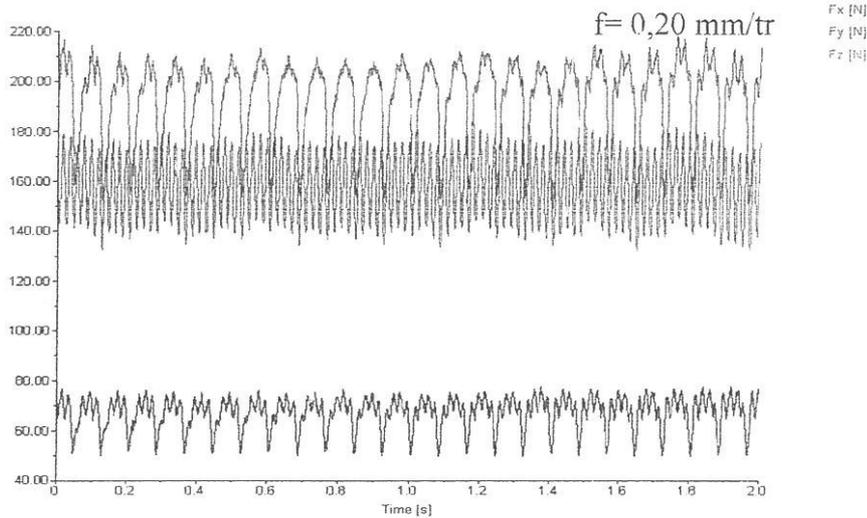


Figure III-3: Spectre des composantes de l'effort de coupe en fonction de l'avance avec $V_c=120$ m/min et $a_p= 0,4$ mm.

L'évolution de l'effort de coupe en fonction de l'avance est illustrée sur la figure (III-4).

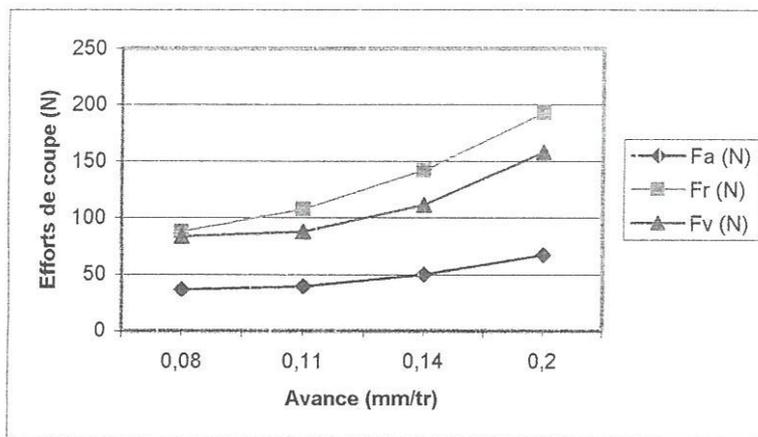


Figure III-4: Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de l'avance. ($V_c= 120$ m/min et $a_p= 0,4$ mm)

L'augmentation de l'avance augmente la section droite de la tranche à cisailer, ce qui nécessite des efforts de coupe plus intenses pour son arrachement.

Les résultats indiquent que l'augmentation de l'avance f de $0,08$ mm/tr à $0,20$ mm/tr, engendre l'élévation des composantes de l'effort de coupe (183%, 219.37%, 188.64%), respectivement pour (Fa, Fr, Fv).

L'explication physique de ce phénomène réside dans le fait que lorsque l'avance augmente, la surface de contact entre l'outil et la pièce augmente aussi. Ceci intensifie les frottements d'une part et influe sur l'orientation du copeau, qui se traduit par une élévation des composantes de l'effort de coupe (figure III-5) [44].

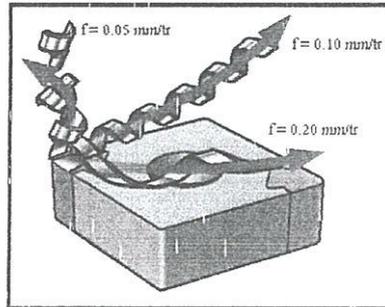
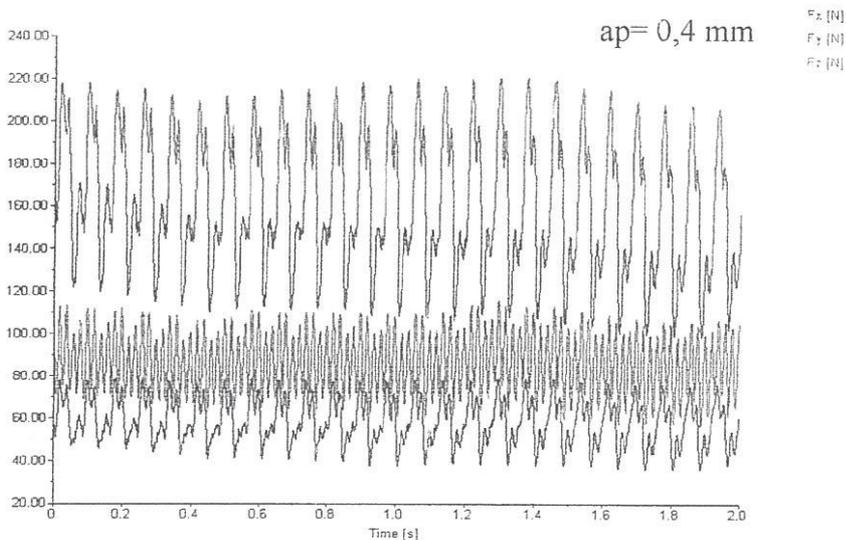
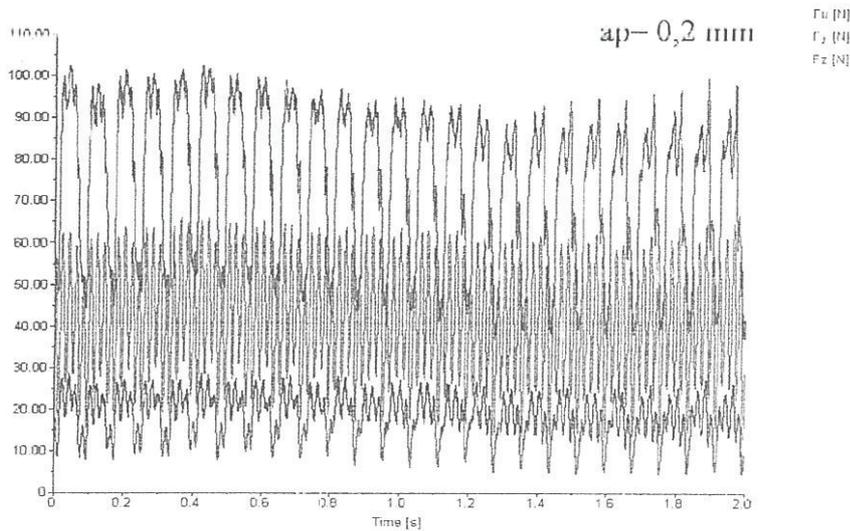


Figure III-5 : Influence de l'avance sur le chemin d'évacuation du copeau.

III -1-1-1-c)- Influence de la profondeur de passe (a_p):

- Profiles de l'effort de coupe mesurée ; (Figure III-6).



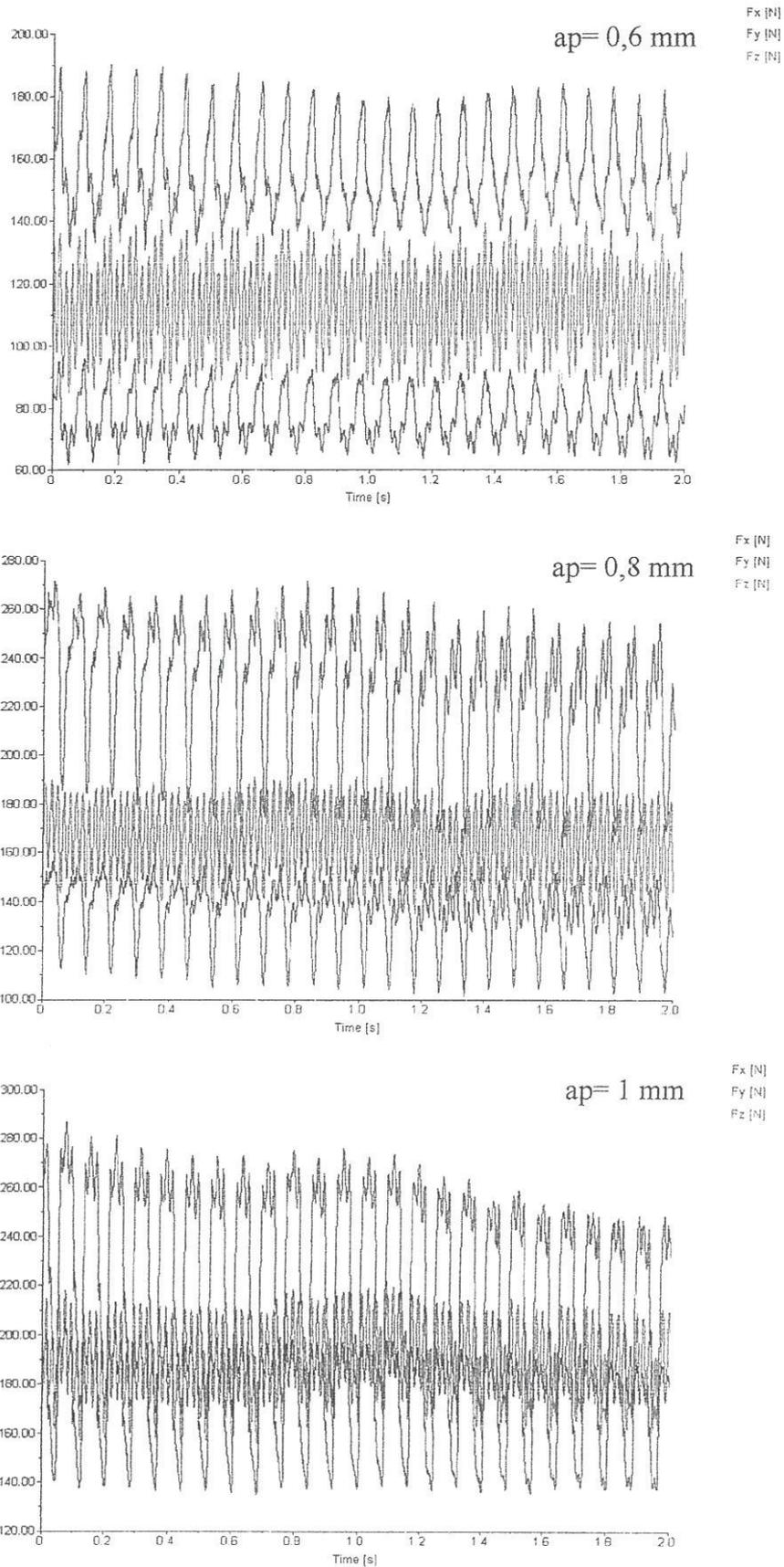


Figure III-6: Spectre des composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de passe avec $V_c=120$ m/min et $f=0,08$ mm/tr.

L'évolution des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_r , F_v) en fonction de la profondeur de passe est illustrée sur la figure (III-6).

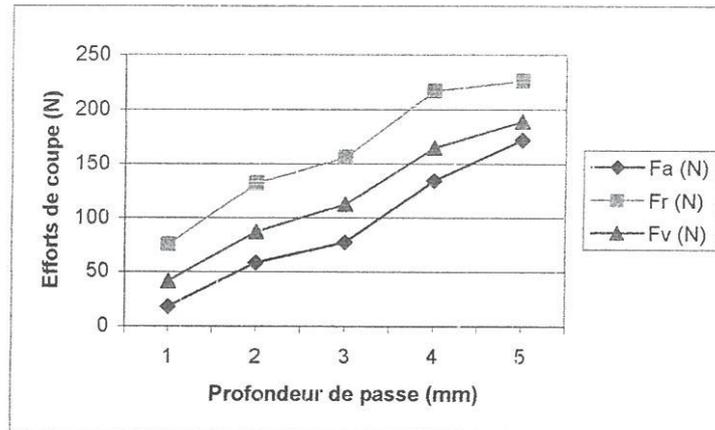


Figure III-7 : Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de la profondeur de passe.
($V_c = 120\text{m/min}$ et $f = 0,08\text{mm/tr}$)

Chaque augmentation de la profondeur de passe nous conduit à une augmentation de section transversale du copeau et par conséquent la surface de contact (copeau- face d'attaque- pièce), ce qui élève les composantes de l'effort de coupe.

Les résultats expérimentaux montrent que si la profondeur de passe augmente de 0,2 à 1 mm, les composantes de l'effort de coupe F_a , F_r et F_v s'accroissent de 452,27%, 200,88% et 269,01% .

III-1-1-2)- Évolution de la pression spécifique en fonction des conditions de coupe :

Après avoir déterminé les composantes de l'effort de coupe, on peut calculer la pression spécifique (K_c), c'est à dire l'effort appliqué à l'unité de surface de la section de tranche cisillée du copeau. Elle est fonction des éléments du régime de coupe et notamment de l'avance et de la profondeur de passe.

L'explication exprimant la relation entre la pression spécifique et la section du copeau ($S_c = f \cdot a_p$) est la suivante :

$$K_c = \frac{F}{f \cdot a_p} \quad ; \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{(III-1)}$$

La pression spécifique dans les différentes sections droites du copeau peut être déterminée en prenant en considération les composantes f_a , F_r et F_v correspondantes. A cet effet nous avons les pressions K_{ca} , K_{cr} et K_{cv} .

III-1-1-2-a)- Effet de la vitesse de coupe sur la pression spécifique :

La figure (III-8), illustre la variation de la pression spécifique en fonction de la vitesse de coupe.

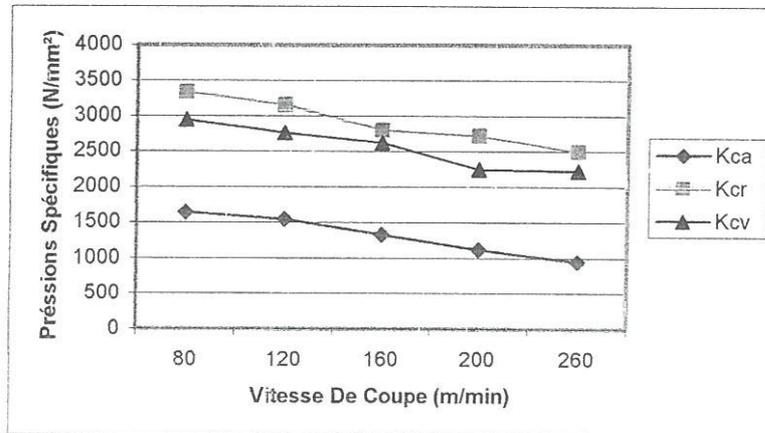


Figure III-8: Variation de la pression spécifique en fonction de la vitesse de coupe.

La décroissance de la pression spécifique en fonction de l'augmentation de la vitesse de coupe est causée principalement par la réduction des efforts de coupe suite à l'élévation de la vitesse et les hautes températures produites sous les intenses frottements. Car cette dernière en augmentant contribue à l'adoucissement de la tranche à cisailier.

A cet effet si le rapport des vitesses varie de 80 à 260 m/min, la pression spécifique diminue de 28.20%, 29.73% et 42.18%, respectivement pour Kca, Kcr et Kcv.

III--1-1-2-b)- Effet de l'avance sur la pression spécifique:

L'illustration de la variation de la pression spécifique en fonction de l'avance est présentée sur la figure (III-9).

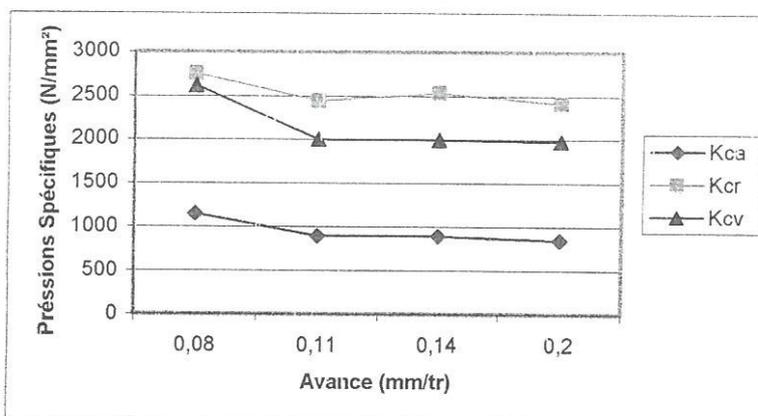


Figure III-9: Variation de la pression spécifique en fonction de l'avance.

La croissance de l'avance augmente la section droite de la tranche à cisailier par le tranchant de l'outil de coupe, ce qui réduit la pression spécifique.

Selon les résultats obtenus, une augmentation de l'avance de (0.08 à 0.20 mm/tr), réduit la pression de 40.43%, 57,1% et 67,48%, respectivement pour Kca, Kcr et Kcv.

III--1-1-2-c)- Effet de la profondeur de passe sur la pression spécifique :

La figure (III-10), illustre l'influence de la profondeur de passe sur la pression spécifique.

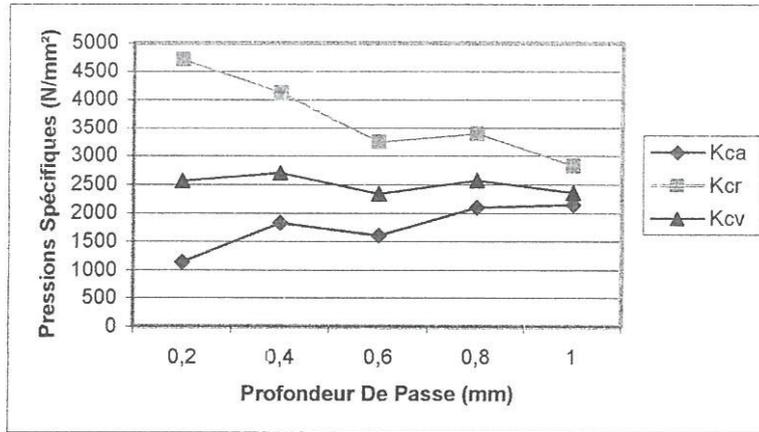


Figure III-10: Variation de la pression spécifique en fonction de la profondeur de passe.

L'analyse de ces résultats s'articule sur l'augmentation de la section droite du copeau. En effet, chaque augmentation de la profondeur de passe élargit l'épaisseur du copeau dans le sens radial, ce qui permet à l'effort de coupe de se répartir sur une surface plus large, autrement dit la pression exercée pendant la coupe diminue.

Kc est diminuée de (60.19%, 92,04%) respectivement (Kcr, Kcv) et Kca augmente de (189.33%), ce qui nous informe que la matière résiste à la pénétration axiale du tranchant de l'outil.

III-1-1-3)- Étude comparative des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 à l'état recuit et trempé:

Après l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur l'évolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 durci à 60HRC (T-D), nous avons jugé utile pour des raisons de comparaison de mener une série d'essais au même matériau mais à l'état recuit (35 HRC). L'usinage a été effectué avec des pastilles en céramique mixte de nuance CC650.

Les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions et à sec (sans lubrification).

III -1-1-3-a)- Influence de la vitesse sur les efforts de coupe lors de l'usinage de 100Cr6 avant et après trempe :

L'impact de l'état du matériau usiné avant et après trempe à différentes vitesses de coupe est illustré sur la figure (III-11-a).

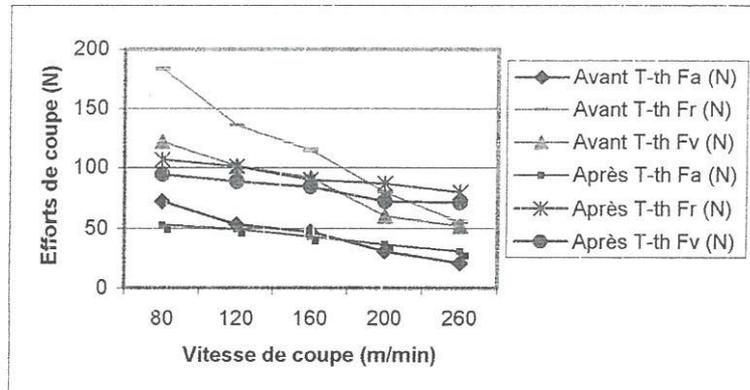


Figure III-11-a: Comparaison des composants de l'effort de coupe avant et après traitement thermique en fonction de la vitesse de coupe ($f= 0.08$ mm/tr et $a_p= 0,4$ mm).

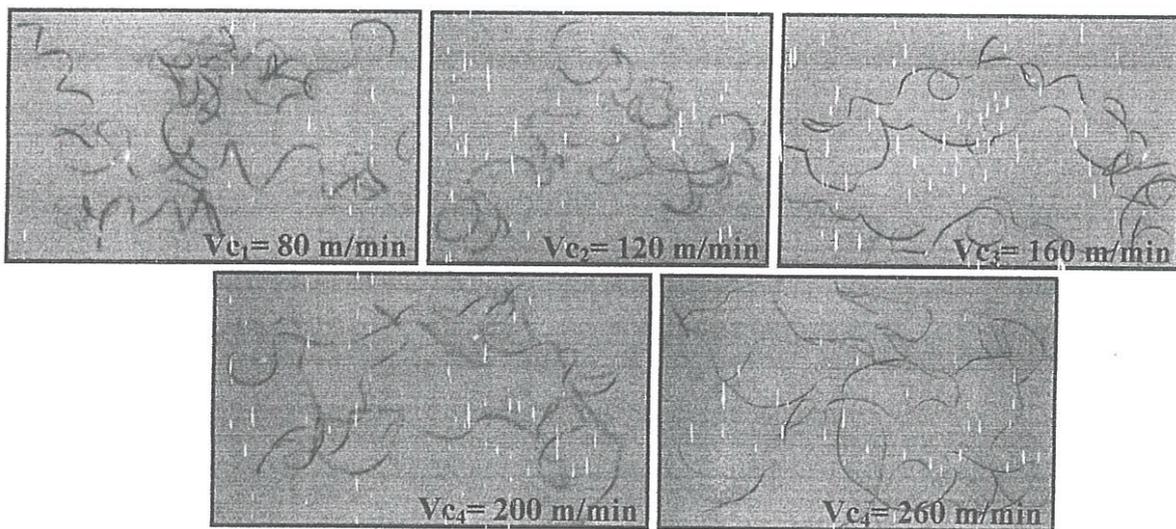
L'analyse de ces résultats montre que les composantes de l'effort de coupe avant traitement thermique sont supérieures à celles après traitement thermique. Ces différences sont exprimées par les ratios (1.36, 1.71, 1.29), respectivement (Fa, Fr et Fz) ceci pour la vitesse 80m/min. Par contre au-delà de la vitesse $V_c= 160$ m/min, l'allure de ces courbes a tendance à donner des résultats inverses. En effet les valeurs des composantes Fa, Fr et Fv enregistrées lors de l'usinage de l'acier traité surmontent celle de l'acier à l'état recuit. Les résultats exprimant ces différences sont respectivement 1.49, 1.45 et 1.38 pour Fa, Fr et Fv à $V_c=260$ m/min.

L'analyse de ces différences de comportement montre qu'elle est due probablement aux déformations plastiques qui sont plus intenses aux faibles vitesses de coupe lors de l'usinage de l'acier à l'état recuit. Par contre aux grandes vitesses, l'acier traité devient plus difficile à usiner en exprimant sa grande résistance à la formation du copeau.

- *Comparaison des copeaux ; (Figure III-11-b)*

Le type du copeau soit en tournage dur (acier trempé) ou en tournage conventionnel (acier recuit) est continu. Cependant, il se distingue par des angles d'hélices différents. En effet, pour les plages de vitesses de coupe ($80 \div 160$ m/min) le copeau après traitement thermique est plus hélicoïdal qu'avant traitement thermique. Ce qui permet de réduire le frottement avec la face d'attaque et par conséquent l'effort de coupe diminue. Ceci est encore un autre argument pour la supériorité des efforts de coupe à faibles vitesses, cas de l'usinage de l'acier recuit. Pour les vitesses plus élevées ($200 \div 260$) m/min, le copeau avant traitement thermique subit un adoucissement considérable à cause des hautes températures, par contre le copeau de la pièce traitée garde sa ténacité et continue à exercer des pressions importantes sur la face d'attaque.

- *Morphologie du copeau de l'acier avant trempe :*



- *Morphologie du copeau de l'acier trempé :*

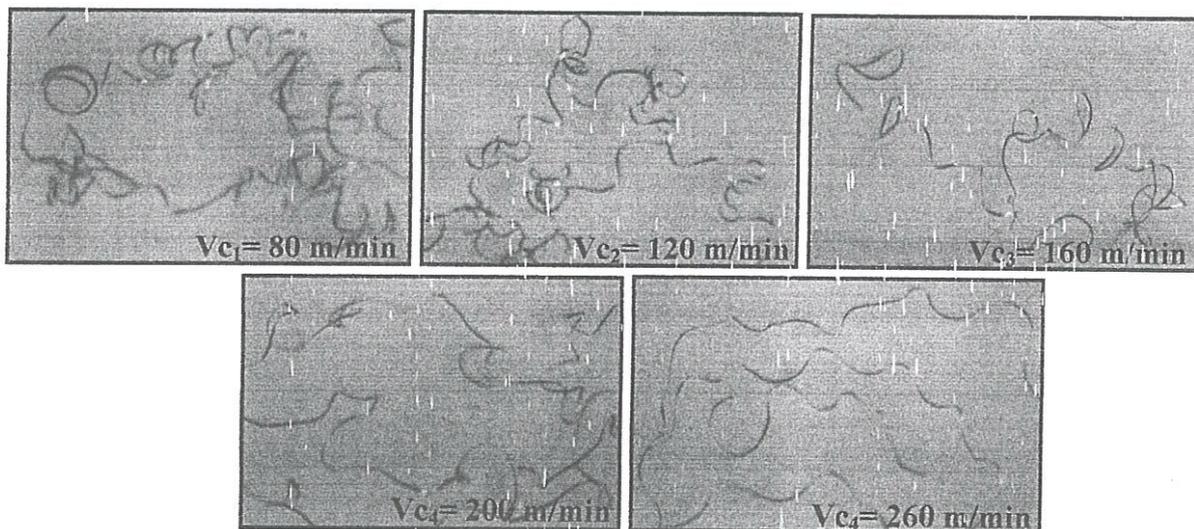


Figure III-11-b: Morphologie du copeau avant et après traitement thermique à différentes vitesses de coupe, ($f= 0.08$ mm/tr et $a_p= 0.4$ mm).

III -1-1-3-b)- Influence de l'avance sur les efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 avant et après trempe:

La figure (III-12-a), représente les tendances des efforts de coupe avant et après traitement thermique en fonction de l'avance.

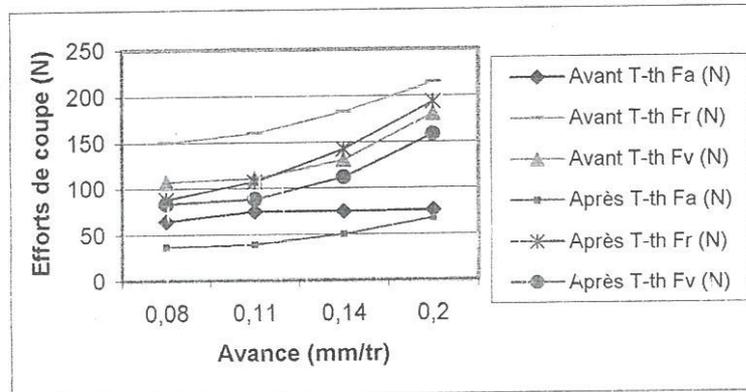


Figure III-12-a : Comparaison des composants de l'effort de coupe avant et après traitement thermique en fonction de l'avance ($V_c = 120 \text{ m/min}$, $a_p = 0,4 \text{ mm}$).

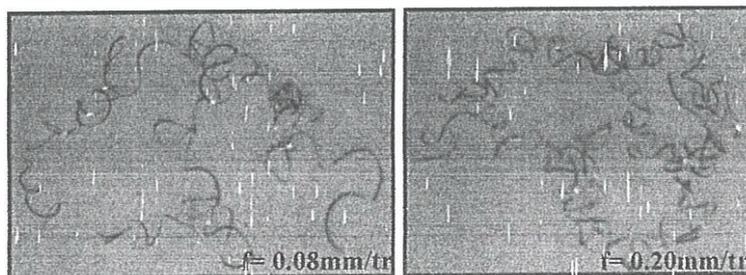
Les résultats indiquent que l'effort de coupe avant traitement thermique est plus grand que celui après traitement thermique pour chaque augmentation de f . Pour la composante axiale, plus l'avance augmente plus les valeurs de (F_a) ont tendance à se rapprocher. Ce comportement est favorisé par une diminution de F_a avant trempe et une augmentation de f_a après trempe.

A la valeur de $f = 0,08 \text{ mm/tr}$, l'effort axial de coupe lors de l'usinage de l'acier à l'état recuit dépasse celui à l'état trempé de 1,75 fois. Alors qu'à $f = 0,20 \text{ mm/tr}$ cette différence diminue jusqu'à 1.13 fois.

- Comparaison des copeaux ; (Figure III-12-b)

Pour $(f = 0,08 \text{ mm/tr})$, après traitement thermique le copeau est continu, ayant une épaisseur faible et avec un angle d'hélice assez grand ce qui diminue la pression sur la face d'attaque et par conséquent l'effort est moindre. Cependant, lorsqu'on travaille de même l'acier traité à $f = 0,20 \text{ mm/tr}$, le copeau formé est cisailé, ayant un rayon de courbure plus petit, ce qui conduit à la réduction des frottements sur la surface d'attaque et par la suite les efforts de coupe.

- Morphologie du copeau avant traitement thermique:



- Morphologie du copeau après traitement thermique:

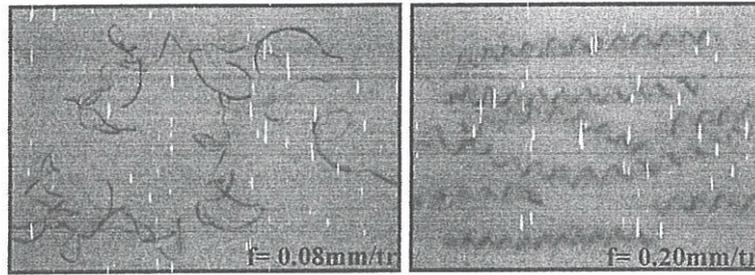


Figure III-12-b: Morphologie du copeau avant et après traitement thermique à différentes valeurs de l'avance. Avec : $V_c = 120$ mm/tr et $a_p = 0.4$ mm.

III -1-1-3-c)- Influence de la profondeur de passe sur l'effort de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 avant et après trempe:

La représentation graphique des composants de l'effort de coupe avant et après t-th en fonction de la profondeur de passe est illustrée sur la figure (III-13-a).

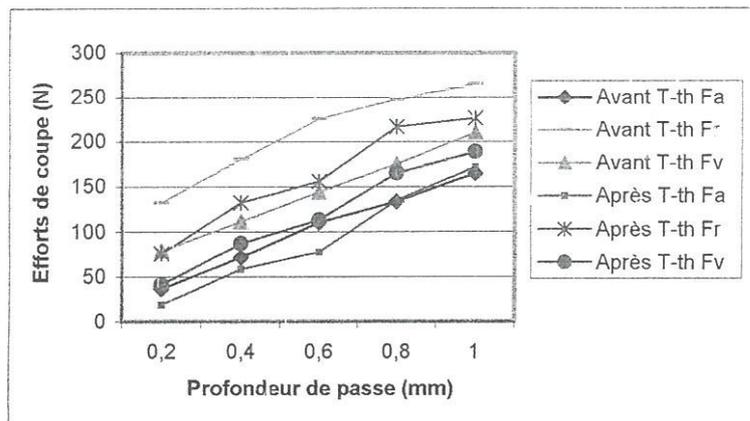


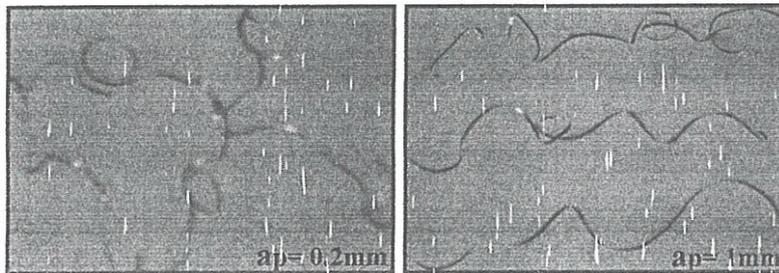
Figure III-13-a: Comparaison des composants de l'effort de coupe avant et après traitement thermique en fonction de la profondeur de passe ($V_c = 120$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr).

Pour la profondeur de passe, l'effort de coupe avant traitement thermique reste supérieur à celui après traitement thermique. Cependant, l'analyse indique que pour $a_p = 0.2$ mm la différence est (2, 1.75, 1.9) fois, respectivement (Fa, Fr, Fv), et pour $a_p = 1$ mm la différence est de (0.959, 1.17, 1.11) fois.

- Comparaison des copeaux ; (Figure III-13-b)

Les copeaux formés lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 à l'état recuit sont continus et ayant un angle d'hélice plus important que celui obtenu lors de l'usinage de l'acier trempé. (Figure III-13-b). Ceci justifie encore une fois pourquoi les composantes de l'effort en tournage conventionnel sont supérieures à celles en tournage dur.

- Morphologie du copeau (Acier à l'état recuit):



- Morphologie du copeau (Acier trempé):

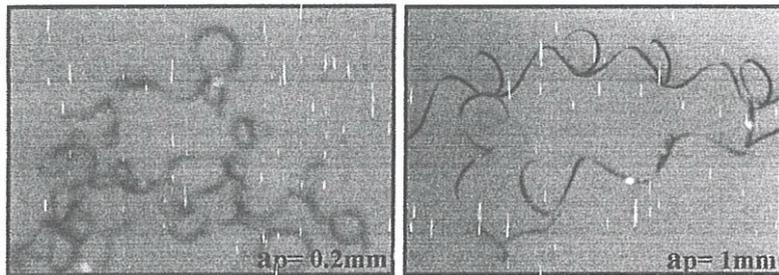


Figure III-13-b: Morphologie du copeau avant et après traitement thermique à différentes valeurs de la profondeur de passe, ($V_c = 120$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr).

III-1-2) Étude de l'évolution de la rugosité en fonction des conditions de coupe:

▪ *Rappel :*

Dans le but de limiter l'influence seulement aux conditions de coupe sur la rugosité, nous avons surveillé périodiquement l'évolution de l'usure durant la réalisation des essais. A cet effet l'usure VB maximale a atteint en fin d'usinage la valeur de 0.096 mm.

III-1-2-1)- L'influence des conditions de coupe sur les critères de la rugosité de surface :

III-1-2-1-a)- Influence de la vitesse de coupe:

La figure (III-14); illustre la variation des critères de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe, quand l'avance et la profondeur de passe sont maintenues respectivement constantes ($f= 0.08$ mm/tr et $a_p= 0.4$ mm).

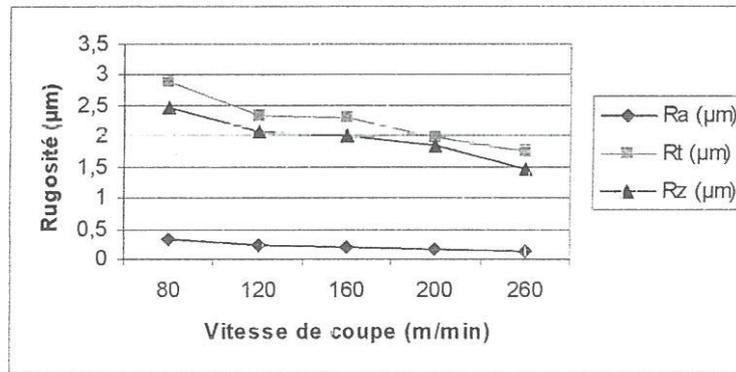


Figure III-14: Evolution des critères de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe.

L'augmentation de la vitesse de coupe V_c de 80 à 260 m/min, fait diminuer les critères de la rugosité R_a , R_z et R_t , respectivement de (2.28, 1.67 et 1.64) fois. Cette amélioration de l'état de surface s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de la vitesse, les efforts de coupe diminuent, permettant ainsi le travail dans un système usinant plus stable.

III -1-2-1-b)- Influence de l'avance:

Les résultats de l'influence de l'avance sur la rugosité sont illustrés sur la figure (III-15).

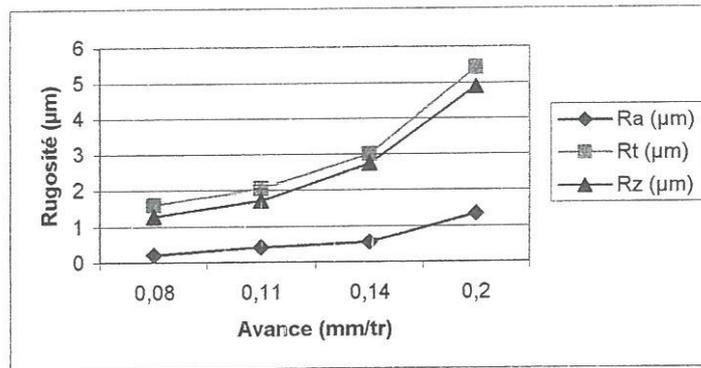


Figure III-15 : Evolution des critères de la rugosité en fonction de l'avance.
(Vc= 120 m/min et ap= 0.4 mm)

Les résultats indiqués sur la figure (III-15), interprètent l'influence de l'avance sur la rugosité de la surface. La croissance de l'avance de (0,08 ÷ 0,20 mm/tr), provoque l'élargissement de l'empreinte des sillons hélicoïdaux du tranchant de l'outil sur la surface usinée ainsi que leur profondeur (défaut du troisième ordre). Cette augmentation accélère aussi l'arrachement de la matière à usiner à cause de l'insynchronisation entre la vitesse de coupe et l'avance (défaut du quatrième ordre). Le couplage de ces deux défauts conduit à une augmentation de la rugosité de l'ordre (6.38, 3.85, 3.40) fois, respectivement pour (Ra, Rz, Rt).

III -1-2-1-c)- Influence de la profondeur de passe:

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (III-16).

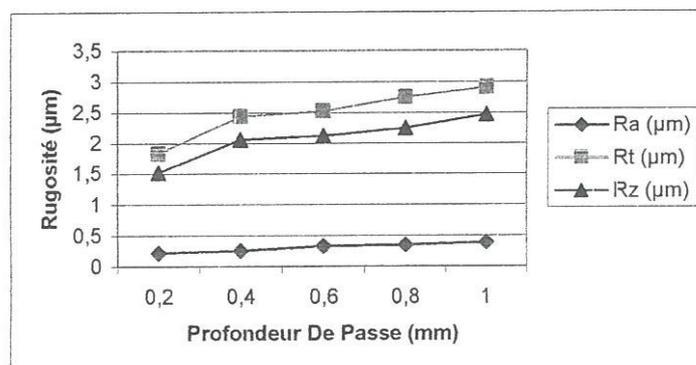


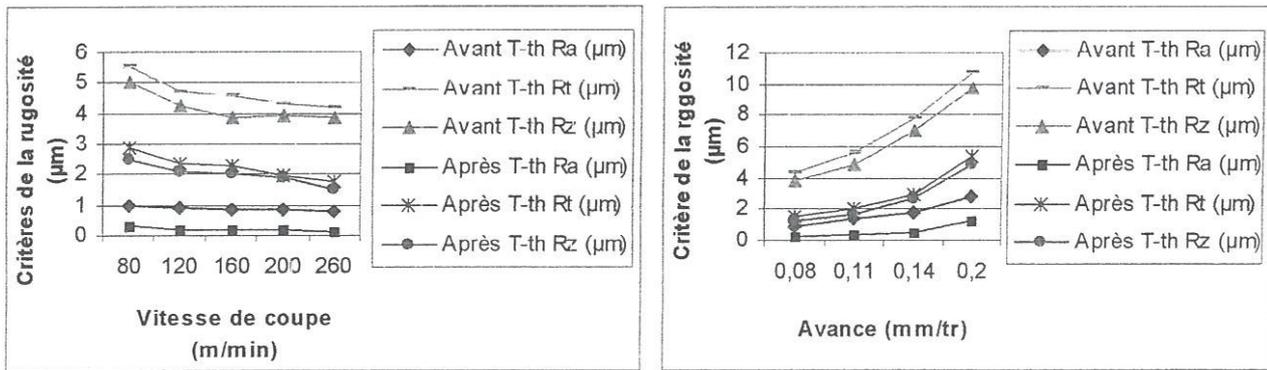
Figure III-16: Evolution des critères de la rugosité en fonction de la profondeur de passe.
(Vc= 120 m/min et f= 0.08 mm/tr)

Les résultats montrent que la profondeur de passe est un autre facteur influant sur la rugosité de surface mais moins que l'avance. La croissance de la profondeur de passe de (0.2 à 1mm), augmente la quantité de la matière à enlever ainsi que l'effort nécessaire à la coupe ce qui provoque des vibrations dans le système usinant. Ceci influence négativement sur l'état de la surface usinée. Pour l'intervalle choisi, la rugosité augmente de (1.77, 1.62, 1,58) fois respectivement pour (Ra, Rz, Rt).

III-1-2-2)- Étude comparative de la rugosité lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et non trempé :

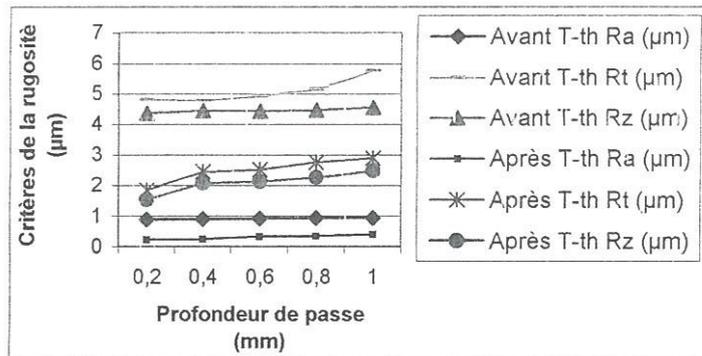
L'amélioration de l'état de surface est remarquable lors de l'usinage dur par rapport à l'usinage conventionnel. Cependant, on peut remarquer que pour la vitesse de coupe 260m/min, la rugosité de la surface est diminuée pour chaque critère étudié de l'ordre de (5.64, 2.61, 2.37) fois respectivement pour (Ra, Rz, Rt), pour $f= 0.08$ mm/tr, de (4, 2.75, 3) fois, et pour la profondeur de passe ($a_p= 0.2$ mm) de l'ordre (4, 2.86, 2.62 f) fois, (Figure III-17).

La dureté de la matière à usiner (60 HRC), peut améliorer plusieurs caractéristiques intrinsèques de la matière à usiner (tenacité, allongement). Cependant, ces caractéristiques rendent la matière plus stable, sous les hautes températures et plus résistante aux effets extérieurs. Ce qui contribue positivement lors de l'usinage.



a) Influence de la vitesse de coupe.

b) Influence de l'avance.



c) Influence de la profondeur de passe.

Figure III-17: Comparaison des critères de la rugosité en fonction des paramètres de régime de coupe lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 trempé et non trempé.

III-1-3)- Détermination des modèles mathématiques:

III-1-3-1)- Modèles mathématiques de l'effort de coupe en fonction des conditions de coupe :

III-1-3-1-a)- Méthode unifactorielle :

A partir des courbes obtenues de l'effort de coupe en fonction des conditions de coupe (V_c , f , ap) on peut déterminer par la méthode des moindres carrés les modèles mathématiques des composantes de l'effort de coupe (tab III-1) sous la forme :

$$F_{(Fa, Fr, Fv)} = C_1 \cdot ap^x \quad (III-1)$$

$$F_{(Fa, Fr, Fv)} = C_2 \cdot f^y \quad (III-2)$$

$$F_{(Fa, Fr, Fv)} = C_3 \cdot Vc^z \quad (III-3)$$

Où: C_1, C_2, C_3 sont des constantes qui tiennent compte des conditions de coupe ;

x, y, z : Exposants qui indiquent l'influence des différents facteurs (V_c, f, ap) sur les composants de l'effort de coupe.

Paramètres de régime de coupe		Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
Variable	Constant		
Vitesse de coupe V_c (m/min)	f, ap	$Fa = 56,723Vc^{-0,3313}$	$R^2 = 0,8608$
		$Fr = 109,62Vc^{-0,1797}$	$R^2 = 0,9336$
		$Fv = 97,241Vc^{-0,1855}$	$R^2 = 0,8871$
Avance f (mm/tr)	Vc, ap	$Fa = 33,833f^{0,4105}$	$R^2 = 0,813$
		$Fr = 82,352f^{0,5443}$	$R^2 = 0,9165$
		$Fv = 76,274f^{0,4223}$	$R^2 = 0,7672$
Profondeur de passe ap (mm)	f, Vc	$Fa = 19,229ap^{1,3734}$	$R^2 = 0,9851$
		$Fr = 76,936ap^{0,6977}$	$R^2 = 0,9825$
		$Fv = 42,057ap^{0,9505}$	$R^2 = 0,9924$

Tableau III-1 : modèles mathématiques de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe.

III-1-3-1-b)- Méthode multifactorielle :

Les résultats de la variation des composantes des efforts de coupe pour les différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (Vc, f, ap) sont représentés dans le tableau III-2.

Le but est de mettre au point des corrélations entre les composantes de l'effort de coupe et les paramètres d'usinage sous la forme suivante :

$$F_i = C \cdot f^{K_1} \cdot ap^{K_2} \cdot Vc^{K_3} \tag{III-4}$$

Où C : est une constante ;

K₁, K₂, K₃ sont des coefficients qui indiquent le degré d'influence de chaque facteur examiné sur l'effort de coupe.

N° d'essais	Ordre essais	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)
1	3	120	0,08	0,2	43,33	105	93,38
2	6	260	0,08	0,2	19,32	59,96	53,29
3	1	120	0,20	0,2	72,76	274,12	91,48
4	8	260	0,20	0,2	21,83	73,11	71,73
5	4	120	0,08	1	97,57	113,7	160,19
6	2	260	0,08	1	83,78	107,7	138,51
7	5	120	0,20	1	141,06	214,21	327,15
8	7	260	0,20	1	184,2	282,78	307,58

Tableau III-2 : Résultats des essais de l'effort de coupe.

Paramètres variables	composantes	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
Vc (m/min)	Effort de coupe	$F_a = e^{8,9809} \cdot Vc^{-0,6134} \cdot f^{0,4903} \cdot ap^{0,7881}$	R ² = 0,6558
f (mm/tr)		$F_r = e^{9,4356} \cdot Vc^{-0,5362} \cdot f^{0,7531} \cdot ap^{0,2752}$	R ² = 0,5433
ap (mm)		$F_v = e^{8,0823} \cdot Vc^{-0,3297} \cdot f^{0,4879} \cdot ap^{0,6563}$	R ² = 0,9034

Tableau III-3 : modèles mathématiques des composantes de l'effort de coupe.

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus au tableau (III-2), a permis la détermination des modèles mathématiques statistiques, exprimant les relations entre les différentes composantes de l'effort de coupe et les paramètres de régime de coupe (Vc, f, ap) tableau (III-3). Pour déterminer les constantes de ces modèles mathématiques nous avons utilisé un programme en Matlab, qui nous donne directement les valeurs de C, K₁, K₂, K₃ et le coefficient de détermination R² ainsi que les valeurs prédites tableau (III-4), des composantes de l'effort de coupe.

Valeurs théoriques		
Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)
34.3855	92.3896	68.5945
21.3989	61.0332	53.2715
53.8866	184.0424	107.2675
33.5348	121.5797	83.3056
122.2463	143.8624	197.2482
76.0765	95.0365	153.1859
191.5756	286.5774	308.4551
119.2216	189.3150	239.5509

Tableau III-4 : Valeurs calculées (prédites) d'après les modèles de l'effort de coupe.

Les modèles présentés dans tableau (III-3), montrent que l'accroissement de la vitesse de coupe conduit à la diminution des efforts de coupe. L'augmentation de l'avance ou de la profondeur de passe augmente la section de la matière à enlever ainsi que l'effort de coupe. Par conséquent, si on cite le classement des exposants (K_i), des modèles obtenus en valeur absolue, on déduit que la profondeur de passe est le facteur le plus influent sur l'augmentation de l'effort de coupe suivie par l'avance, et en fin la vitesse de coupe.

III-1-3-2)- Modèles mathématiques de la rugosité de surface en fonction des conditions de coupe :

III-1-3-2-a)- Méthode unifactorielle :

En se basant sur les courbes de la rugosité en fonction des conditions de coupe (V_c , f , a_p), on peut déterminer les modèles mathématiques des différents critères (R_a , R_z , R_t) de la rugosité en fonction des conditions de coupe.

Paramètres de régime de coupe		Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
Variable	Constant		
Vitesse de coupe Vc (m/min)	f, ap	$Ra = 0,3218Vc^{-0,4770}$	$R^2 = 0,9566$
		$Rz = 2,5278Vc^{-0,2726}$	$R^2 = 0,8525$
		$Rt = 2,9145Vc^{-0,2851}$	$R^2 = 0,9289$
Avance f (mm/tr)	Vc, ap	$Ra = 0,1905f^{1,2191}$	$R^2 = 0,9089$
		$Rz = 1,1127f^{0,9232}$	$R^2 = 0,8867$
		$Rt = 1,4023f^{0,8237}$	$R^2 = 0,8624$
Profondeur de passe ap (mm)	f, Vc	$Ra = 0,2116ap^{0,3688}$	$R^2 = 0,9509$
		$Rz = 1,5748ap^{0,2794}$	$R^2 = 0,9411$
		$Rt = 1,8894ap^{0,2748}$	$R^2 = 0,9554$

Tableau III-5 : modèles mathématiques de la rugosité en fonction des paramètres de coupe.

III-1-3-2-b)- Méthode multifactorielle :

Suivant le plan d'expérience indiqué dans le tableau (III-6), une série d'essais a été réalisée pour différentes combinaisons des éléments du régime de coupe. Le but est de mettre au point des corrélations entre les critères de rugosité et les paramètres d'usinage sous la forme suivante :

$$R (Ra, Rz, Rt) = C \cdot f^{K1} \cdot ap^{K2} \cdot Vc^{K3} \quad (III-5)$$

Où C : est une constante ;

K_1, K_2, K_3 sont des exposants qui indiquent le degré d'influence de chacun des paramètres de coupe sur la rugosité.

N° d'essais	Ordre essais	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	Rt (µm)	Rz (µm)
1	3	120	0,08	0,2	0,16	1,39	1,12
2	6	260	0,08	0,2	0,12	1,89	1,60
3	1	120	0,20	0,2	0,77	6,11	5,61
4	8	260	0,20	0,2	0,68	5,95	5,36
5	4	120	0,08	1	0,19	2,61	2,08
6	2	260	0,08	1	0,14	2,37	1,92
7	5	120	0,20	1	1,13	5,53	7,07
8	7	260	0,20	1	0,94	6,75	6,32

Tableau III-6 : Résultats des essais de la rugosité pour les différentes combinaisons du plan d'expérience.

Paramètres variables	Critères	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
Vc (m/min)	Rugosité	$Ra = e^{4,5613} \cdot Vc^{-0,2915} \cdot f^{1,9079} \cdot ap^{0,1605}$	$R^2 = 0,9903$
f (mm/tr)		$Rz = e^{4,0503} \cdot Vc^{0,1414} \cdot f^{1,4283} \cdot ap^{0,1860}$	$R^2 = 0,9742$
ap (mm)		$Rt = e^{3,2148} \cdot Vc^{0,1240} \cdot f^{1,2072} \cdot ap^{0,1371}$	$R^2 = 0,9338$

Tableau III-7 : Modèles mathématiques de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe.

Le traitement des résultats obtenus au tableau (III-6), permet de déterminer les modèles mathématiques exprimant la relation entre les différents critères de la rugosité et les paramètres du régime de coupe. Pour ce faire on utilise donc un programme en Matlab, qui permet le calcul des constantes des modèles mathématiques C, K_1, K_2, K_3 les coefficients de détermination R^2 ainsi que les valeurs prédites des critères de la rugosité.

Valeurs théoriques		
Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
0.1479	1.5062	1.7254
0.1180	1.4892	1.8863
0.8495	5.3511	5.1808
0.6781	5.2907	5.6639
0.1915	1.9501	2.1370
0.1528	1.9281	2.3363
1.0999	6.9281	6.4167
0.8779	6.8499	7.0150

Tableau III-8 : Valeurs prédites (calculées) des critères de la rugosité.

Les modèles mathématiques déterminés aux tableaux III-5 et III-7 montrent que l'avance est le facteur le plus influençant sur les différents critères étudiés de la rugosité. Les pièces usinées présentent des sillons hélicoïdaux sculptés sur leur surface. La géométrie de ces sillons est l'empreinte du tranchant de l'outil engendrée sur la surface usinée. Cette empreinte dépend de l'avance et de la valeur de l'angle au sommet (ϵ_r), ainsi que le rayon du bec d'outil. Par conséquent, le deuxième facteur influent sur l'état de surface est la vitesse de coupe suivie par la profondeur de passe. En effet une augmentation de Vc diminue l'effort de coupe. Aussi l'augmentation de la profondeur de passe augmente la section du copeau et conduit à une bonne évacuation de la chaleur au contact outil- matière.

Les valeurs obtenues du coefficient de détermination R^2 tendent vers l'unité, ce qui confirme la concordance entre les résultats expérimentaux et prédites.

III-2)- RÉSULTATS ET INTÈPRETATION DE L'USURE ET INTÉRACTION AVEC LES AUTRES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUES:

✓ Introduction:

La coupe des métaux est interprétée par le contact outil-matière « face d'attaque- copeau et face de dépouille- surface usinée». Les mouvements relatifs outil- pièce respectivement (M_a - M_c), animés par les conditions de coupe (V_c , f , et a_p). L'outil de coupe est obligé de supporter des charges normales élevées générées par le copeau sur la face d'attaque et par la surface usinée sur la face de dépouille de l'outil. Cependant, l'action mécanique de la coupe rend cette zone plus sollicitée par l'effet de l'effort de coupe et du frottement ainsi que la température de coupe. Ces effets provoquent des transformations physicochimiques intenses, pouvant influencer sur la qualité du travail de l'outil ainsi que la qualité de la surface usinée.

Une série d'essais a été effectuée, dans le but d'analyser l'évolution des paramètres technologiques d'usinage (effort de coupe, rugosité et température de coupe) en fonction des conditions de coupe et de l'usure.

III-2-1)- Étude de l'évolution de l'usure en fonction des conditions de coupe :

La méthode multifactorielle est réalisée pour deux niveaux de variation de chaque paramètre de régime de coupe (V_c , f et a_p). Dans notre cas nous avons huit essais. En se basant donc sur les combinaisons des conditions de coupe concernant le travail de finition.

On obtient les combinaisons suivantes pour chaque paramètre de coupe :

- Pour la vitesse de coupe, essais $N^{\circ} = (1/2)$ tel que $V_{c_{\min}} = 120$ m/min et $V_{c_{\max}} = 260$ m/min avec $f = 0.08$ mm/tr, $a_p = 0.2$ mm.
- Pour l'avance, essais $N^{\circ} = (2/4)$ tel que $f_{\min} = 0.08$ mm/tr et $f_{\max} = 0.20$ mm/tr avec $V_c = 260$ m/min, $a_p = 0.2$ mm.
- Pour la profondeur de passe, essais $N^{\circ} = (2/6)$ tel que $a_{p_{\min}} = 0.2$ mm et $a_{p_{\max}} = 1$ mm avec $V_c = 260$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr.

✓ Résultats obtenus des essais concernés : 1- 2- 4- 6;

Les critères d'usure présentés sont (VB, VB_{max}, KT, VN et VC)

▪ Essai N°=1

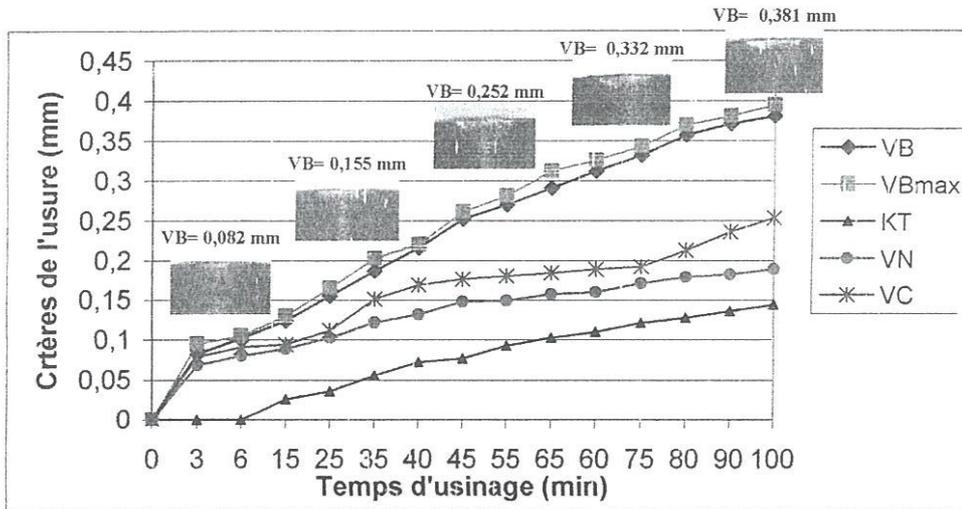


Figure III-18 : Evolution des critères de l'usure en fonction du temps pour la combinaison N° 1 du plan d'expérience, (Vc=120 m/min, f= 0.08mm/tr, ap=0.2mm).

▪ Essai N°=2

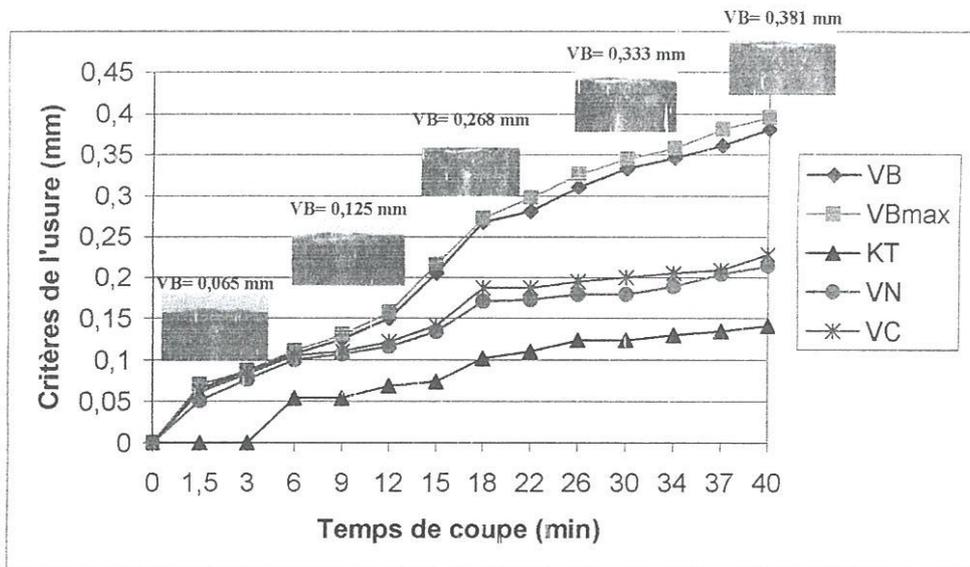


Figure III-19 : Evolution des critères de l'usure en fonction du temps pour la combinaison N° 2 du plan d'expérience, (Vc=260 m/min, f= 0.08mm/tr, ap=0.2mm).

▪ Essai N°=4

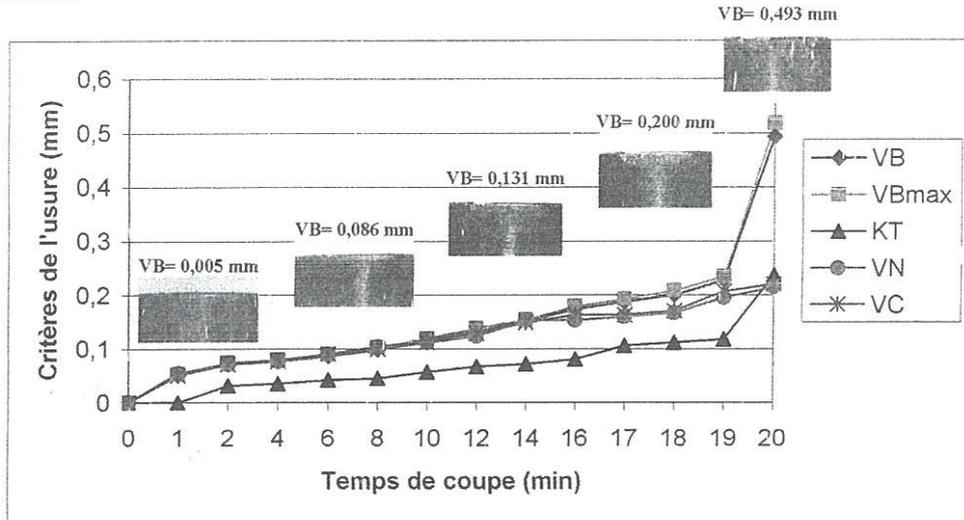


Figure III-20 : Evolution des critères de l'usure en fonction du temps pour la combinaison N° 4 du plan d'expérience, ($V_c=260$ m/min, $f= 0.20$ mm/tr, $a_p=0.2$ mm).

▪ Essai N°=6

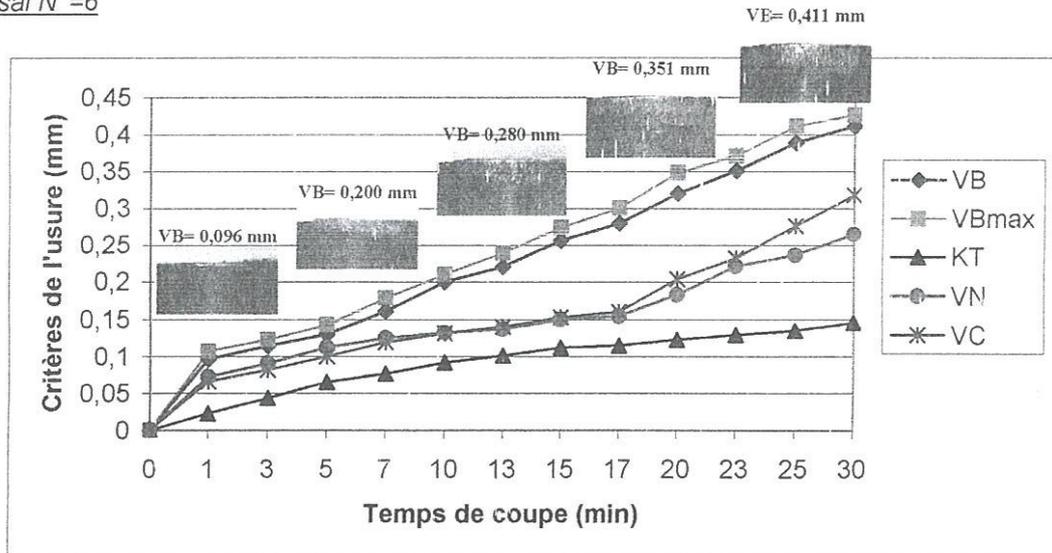


Figure III-21 : Evolution des critères de l'usure en fonction du temps pour la combinaison N° 6 du plan d'expérience, ($V_c=260$ m/min, $f= 0.08$ mm/tr, $a_p=1$ mm).

III-2-1-1)- Evolution de l'usure en fonction de la vitesse de coupe :

L'analyse des résultats présentés sur les figures III-18 et III-19 montre que lors de l'élévation de la vitesse de coupe de 2,16 fois (120 à 260 m/min), la durée de vie de l'outil est réduite à 2,5 fois (100 à 40 min) ce qui implique que la vitesse de coupe a une influence capitale sur l'usure.

III-2-1-2)- Evolution de l'usure en fonction de l'avance :

L'analyse des résultats des essais concernant l'influence de l'avance sur l'usure (figures III-19 et III-20), montre que lorsque l'avance augmente de 2.5 fois, elle conduit à une diminution de la durée de vie de l'outil de 2 fois (40 à 20 min). Par conséquent l'avance est le paramètre le plus influent sur l'usure de l'outil après la vitesse de coupe.

III-2-1-3)- Evolution de l'usure en fonction de la profondeur de passe :

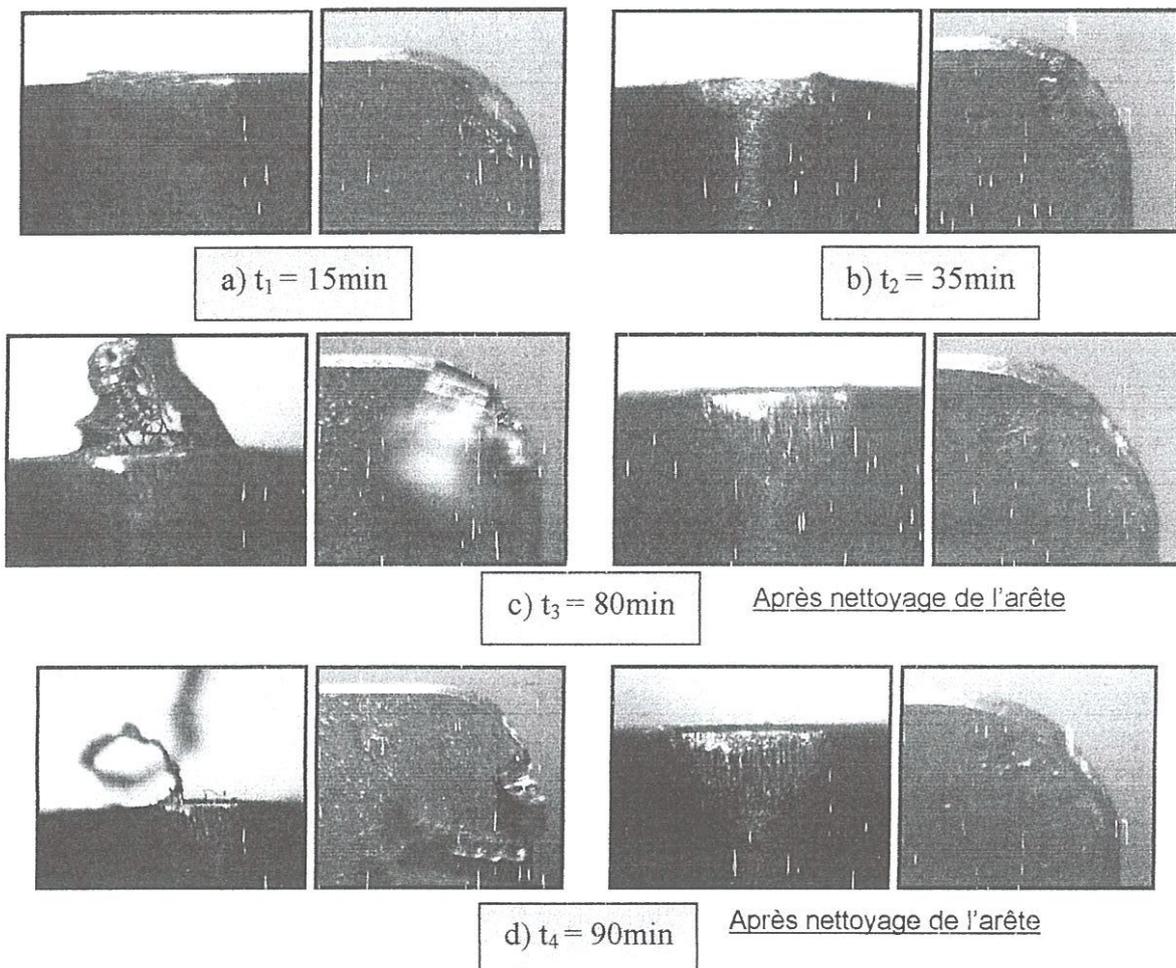
Les figures (III-19 et III-21) présentent les résultats de l'évolution de l'usure en fonction de la profondeur de passe ap. L'analyse de ces résultats fait ressortir que ap augmente de 5 fois (0.2à 1 mm), la durée de vie chute de 1.33 fois. Autrement dit elle passe de 40 min à 30 min.

L'analyse globale de l'influence des paramètres de coupe sur l'usure montre que la profondeur de passe est le facteur le moins influent sur la durée de vie, car son augmentation améliore les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe.

III-2-1-4)- Observation micrographique de la morphologie de l'usure :

L'observation micrographique est un suivi plus pratique de l'usure de l'outil, en dépouille et en cratère. La micrographie présente l'évolution de l'usure en fonction des conditions de coupe à différents moments du travail de l'outil de coupe;

III-2-1-4-a)- Régime N°=1 : (figure III-22).



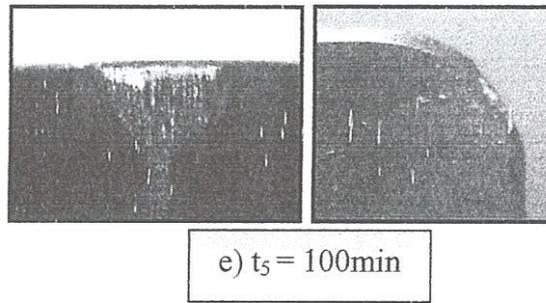
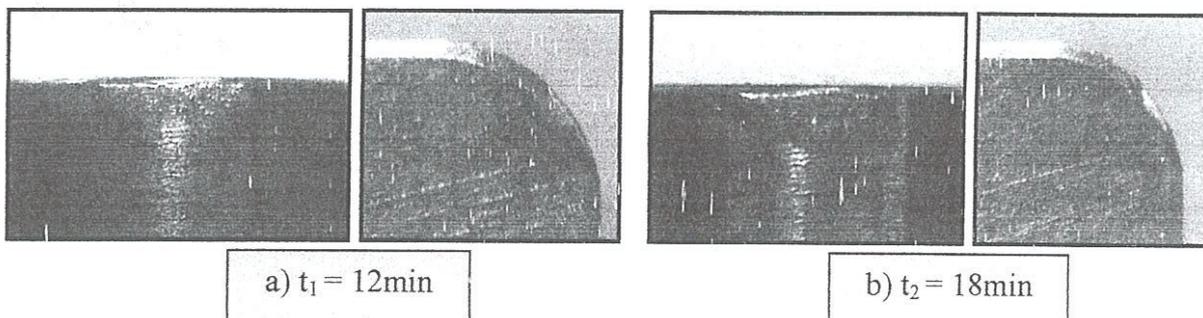


Figure III-22: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°1 sous les conditions ($V_c = 120\text{m/min}$, $f = 0.08\text{ mm/tr}$, $a_p = 0.2\text{mm}$).

L'analyse de la micrographie de l'usure concernant le premier régime ($V_c = 120\text{m/min}$, $f = 0.08\text{ mm/tr}$, $a_p = 0.2\text{mm}$), montre qu'après 15 minutes de travail où l'usure en dépouille a atteint 0.124 mm et le cratère $KT = 0.026\text{ mm}$, on observe que le chanfrein de l'arête subit une usure accentuée causée par les hauts frottements entre le bec de l'outil et la surface usinée. On remarque également l'apparition d'un petit cratère contenant une arête rapportée (phénomène d'adhésion). À 35 min d'usinage le VB et le cratère sont élargis, ainsi que la hauteur de l'arête rapportée devient plus grande. À $t_3 = 80\text{ min}$ le $VB = 0,357\text{mm}$, les hautes températures conduisent à des transformations physico-chimiques intenses (phénomène de diffusion), où il y a l'adhésion de la matière à usiner sur le matériau de l'outil. Ce phénomène est interprété par la formation des microsoudures localisées dans la cuvette du cratère suite aux frottements et aux pressions intenses. Le même phénomène est répété à la quatre-vingt-dixième minute du travail avec $VB = 0.371\text{ mm}$. En fin et après dix minutes du travail à $t_4 = 100\text{ min}$, $VB = 0.381\text{ mm}$ le cratère $KT = 0.144\text{ mm}$, $VN = 0.189$, $VC = 0,253\text{ mm}$.

III-2-1-4-b)- Régime N°=2 : (figure III-23).



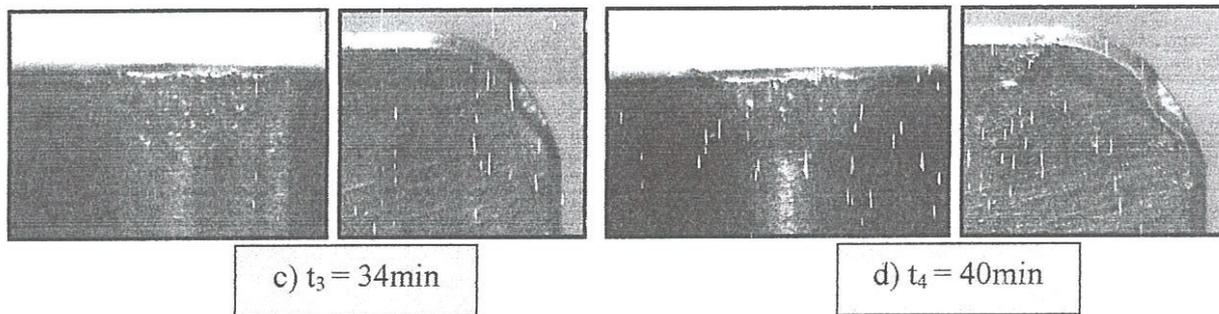


Figure III-23 : Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°2 sous les conditions (Vc= 260 m/min, f= 0,08 mm/tr et ap= 0,2).

Quand on augmente la vitesse de coupe de 46,15%, à $t_1 = 12\text{min}$ le $VB = 0.150\text{ mm}$, on observe l'usure en dépouille sous forme d'une bande striée, causée par le frottement entre la surface de dépouille principale et la surface de coupe « transition » de la pièce (phénomène d'abrasion mécanique). À $t_2 = 18\text{min}$ où $VB = 0,268\text{ mm}$ et $KT = 0,102\text{ mm}$, l'usure en dépouille continue de s'élargir avec l'apparition d'une rainure brillante qui devient profonde au niveau du chanfrein de l'arête de coupe. Elle constitue la trace de frottement du copeau sur la surface d'attaque, qui se traduit en cratère avec le temps. À $t_3 = 34\text{ min}$, l'élargissement du VB et du KT avec des rayures brillantes sur la face de dépouille, ainsi que sur la cuvette du cratère. La couleur brillante indique probablement la solubilité de la matière usinée dans le matériau à outil (diffusion causée par les hautes températures de coupe), où $V_c = 260\text{m/min}$.

III-2-1-4-c)- Régime N°4 : (figure III-24).

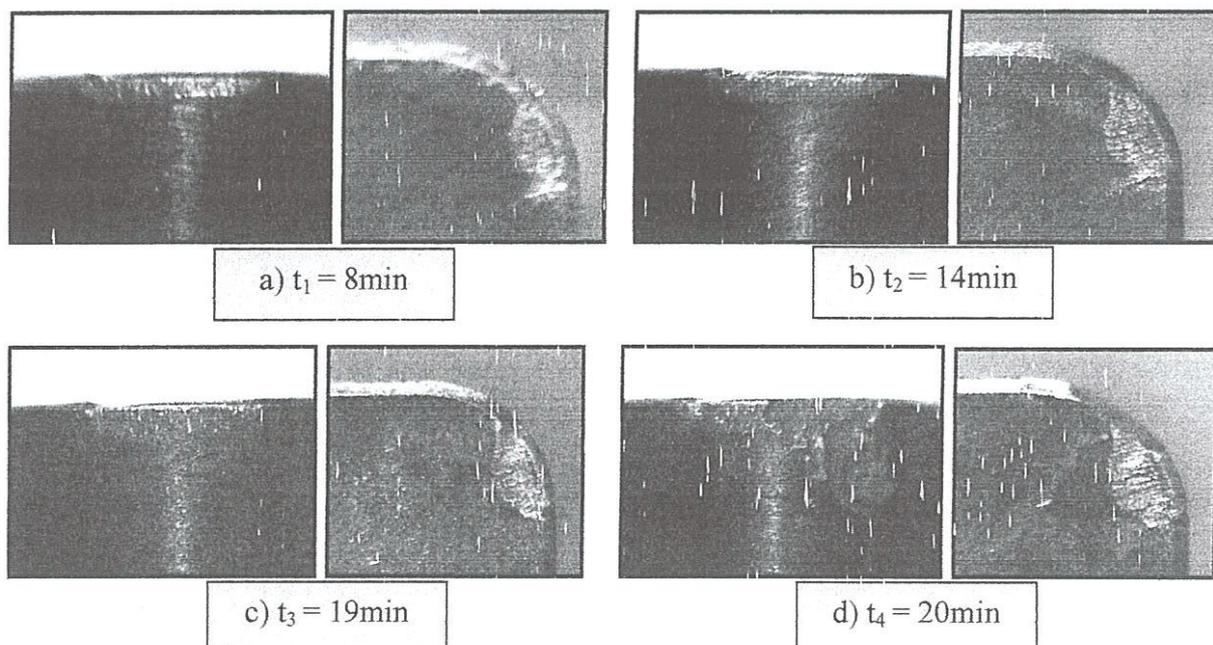


Figure III-24 : Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°4 sous les conditions (Vc= 260 m/min, f= 0,20mm/tr et ap= 0,2 mm).

Pour le régime ($V_c = 260$ m/min, $f = 0,20$ mm/tr et $a_p = 0,2$ mm), l'avance est augmentée de 2.5 fois. A $t_1 = 8$ min, $VB = 0,098$ mm et $KT = 0.045$ mm on peut remarquer sur cette micrographie l'usure en entaille, produite suite aux frottements entre la surface extrême écrouit de la pièce et la face de dépouille principale ($VN = 0.104$ mm). A $t_2 = 14$ min le $VB = 0.154$ mm, $KT = 0.072$ mm et $VN = 0.153$ mm, l'usure en dépouille reste régulière avec l'apparition des rayures sur la face d'attaque signifiant l'accélération du mécanisme d'adhésion copeau- cratère. Cependant, l'usure en entaille devient plus profonde. A $t_3 = 19$ min, le cratère est plus profond et le VB continue à s'élargir avec l'apparition des stries plus brillantes sur la face de dépouille. A la dernière minute de travail $t_4 = 20$ min, se produit un effondrement brusque de l'arête.

III-2-1-4-d)- Régime N°6 : (figure III-25).

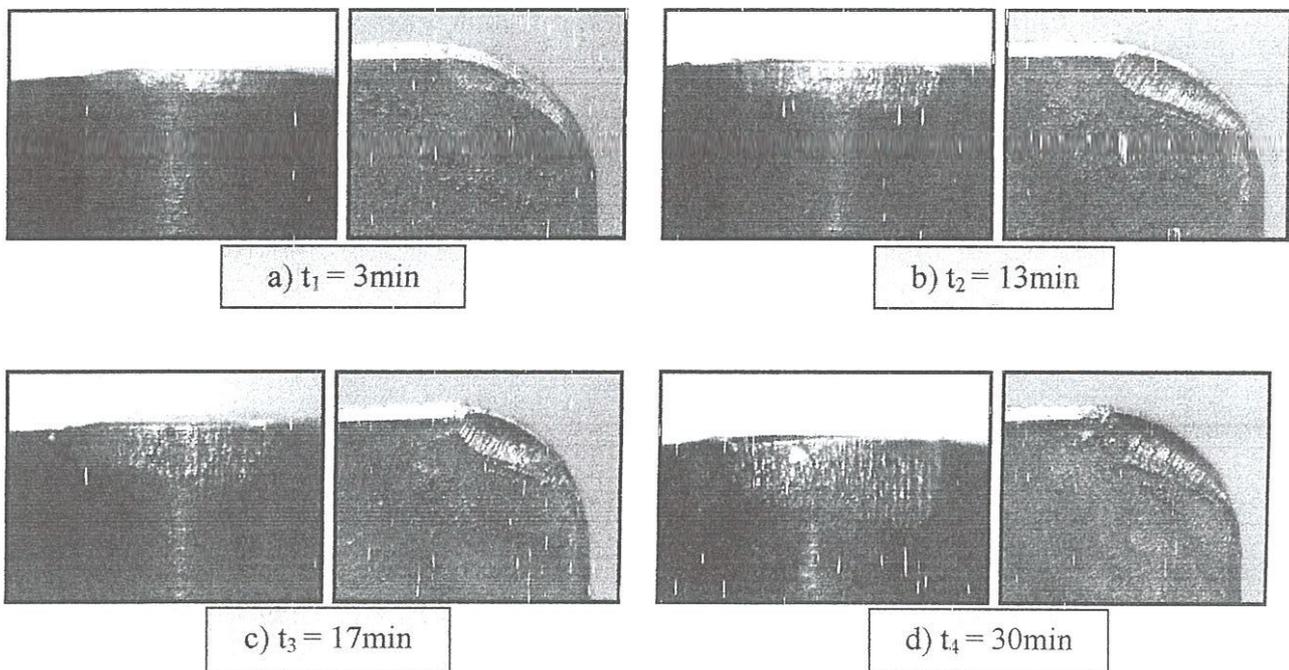


Figure III-25 : Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°6 sous les conditions ($V_c = 260$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 1$ mm).

La quantité de la matière à enlever est relativement importante ($a_p = 1$ mm). L'usure apparaît sous forme d'une bande régulière après 3 min d'usinage où $VB = 0,114$ mm avec une faible profondeur du cratère mais large, ainsi que l'apparition des microsoudures sur la face d'attaque (adhésion de particules). Après dix autres minutes d'usinage, le cratère s'est approfondi et le VB s'est élargi avec l'apparition d'une couche brillante caractérisée par des sillons sur la face de dépouille et le cratère. A $t_3 = 17$ min et $t_4 = 30$ min, des microsoudures se sont localisées au bord de la cuvette du cratère.

III-2-1-5)- Autres micrographies d'usure sous différents régimes de coupe:

L'analyse de la micrographie d'usure des autres combinaisons du plan d'expériences (3,5,8 et 8), nous montre d'autres mécanismes d'usure qui peuvent apparaître à différentes conditions de travail.

III-2-1-5-a)- Régime N°=3 : (figure III-26).

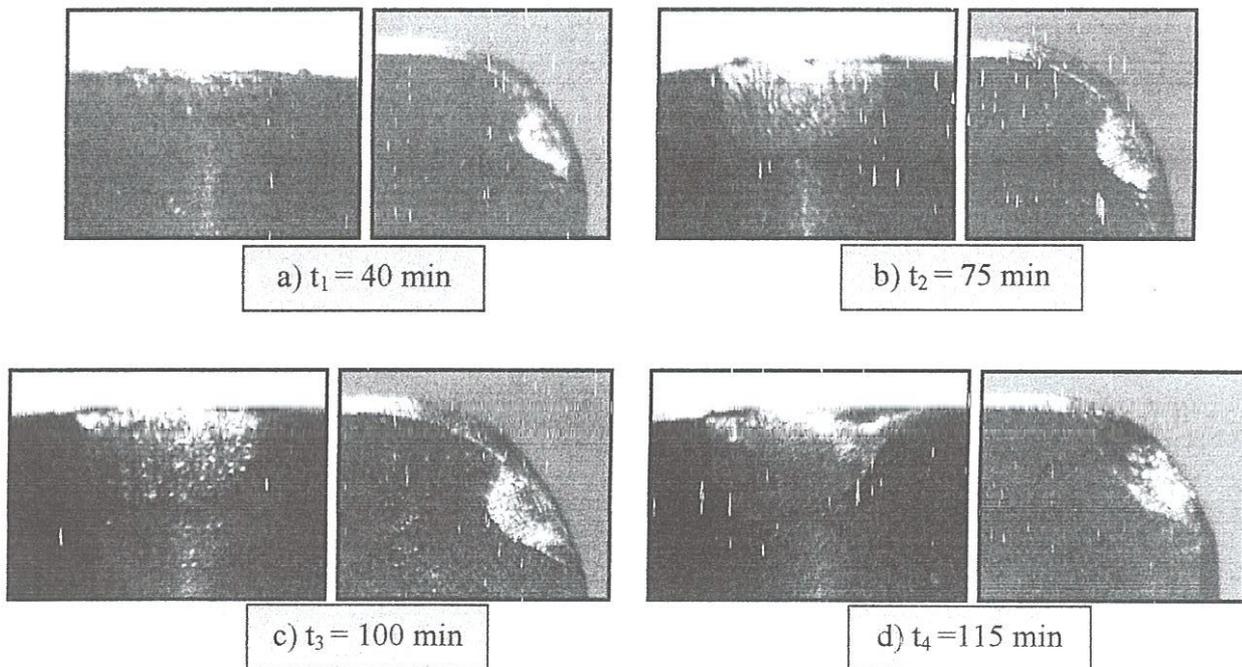


Figure III-26 : Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°3 sous les conditions ($V_c=120$ m/min, $f= 0.20$ mm/tr et $a_p= 0,2$ mm).

Cette micrographie (figure III-26), présente l'évolution de l'usure en dépouille et l'usure en cratère à différents moments de la coupe, jusqu'à la 20^{ème} min l'usure est présentée sous forme d'arrachement de petites particules de la matière de la surface de dépouille de l'outil. A ce stade le cratère est encore superficiel et brillant. À $t_2= 75$ min l'usure VB s'élargit avec l'apparition de rayures causées par le mécanisme d'abrasion. Aussi une partie brillante juste au sommet de la face de dépouille causée par le mécanisme d'adhésion des particules. Le cratère commence à s'élargir à son tour mais avec une faible profondeur. À $t_3= 100$ min, le VB dépasse sa valeur admissible 0,3 mm avec un cratère plus profond. Et à $t_4= 115$ min on assiste à un effondrement de l'arête causé par les transformations physicochimiques dues aux efforts et aux températures de coupe élevées au niveau des interfaces « Outil-Pièce ».

III-2-1-5-b)- Régime N°=5 : (figure III-27).

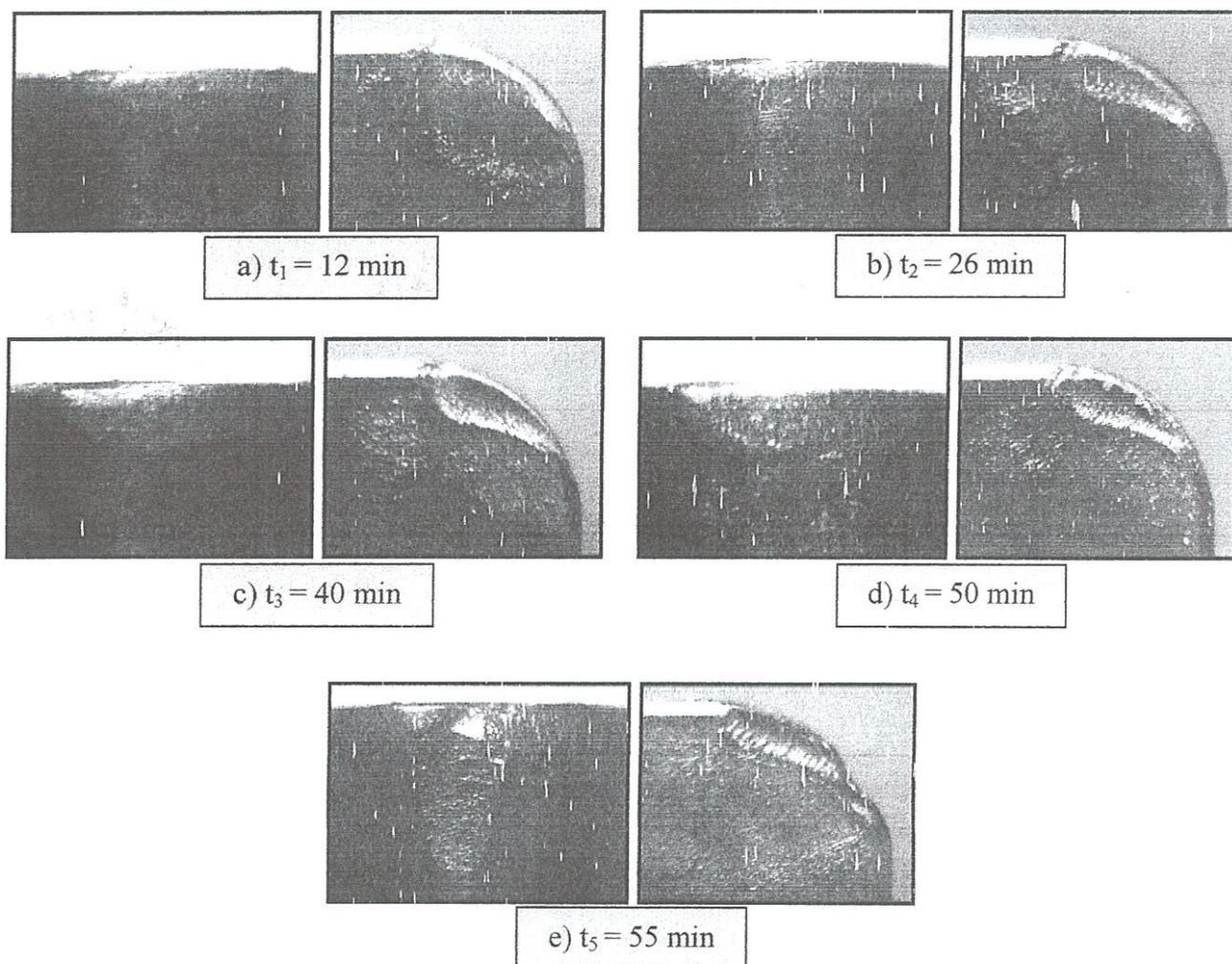


Figure III-27 : Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°5 sous les conditions ($V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 1$ mm).

Dans ce cas la profondeur de passe $a_p = 1$ mm est maximale. Elle conduit à un écaillage après 55 min de travail. Dans ces conditions de coupe, le contact devient plus important, suite à l'augmentation de la section du copeau. Par conséquent l'arête de coupe se trouve plus sollicitée. Ce qui nous conduit à un affaiblissement du bec de l'outil et l'augmentation rapide de la profondeur du cratère ($K_T = 0,134$ mm).

III-2-1-5-c)- Régime N°=7 : (figure III-28).

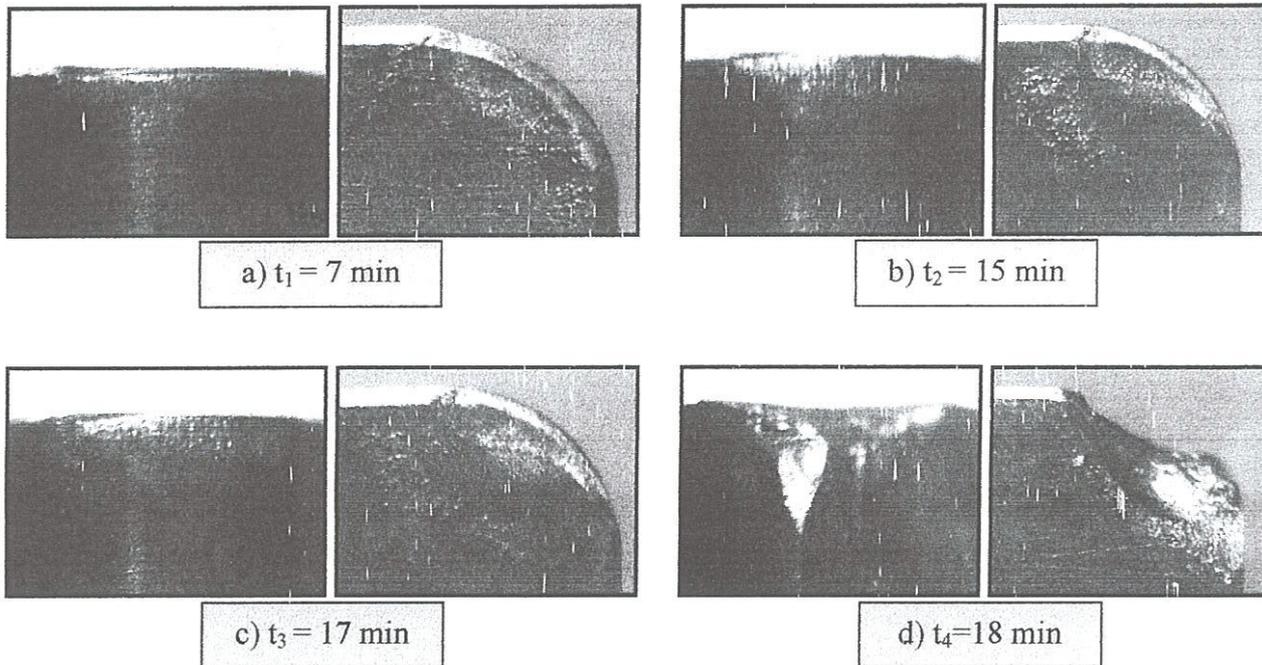


Figure III-28 : Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°7 sous les conditions ($V_c = 120$ m/min, $f = 0.20$ mm/tr et $a_p = 1$ mm).

Après une augmentation de l'avance de 2,5 fois et en présence d'une profondeur de passe maximale, l'usinage devient plus difficile, la plaquette (Figure III-29) est endommagée complètement. Les résultats présentés (figure III-28) sont obtenus par une nouvelle plaquette où l'arête de cette dernière résiste jusqu'à la dix-septième minute à $VB = 0,163$ mm et $KT = 0,084$ avant son effondrement à la dix-huitième minute $VB = 0,430$ mm. Un grand avance avec une grande profondeur de passe, constituent un régime provoquant des efforts de coupe et des frottements intenses ainsi que des vibrations dans le système usinant, ce qui accélère les mécanismes d'usure exercée sur un tranchant d'une plaquette céramique sensible aux chocs.

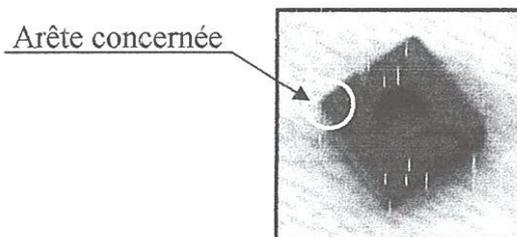


Figure III-29 : Présentation photographique de la plaquette endommagée.

III-2-1-5-d)- Régime N°=8 : (figure III-30).

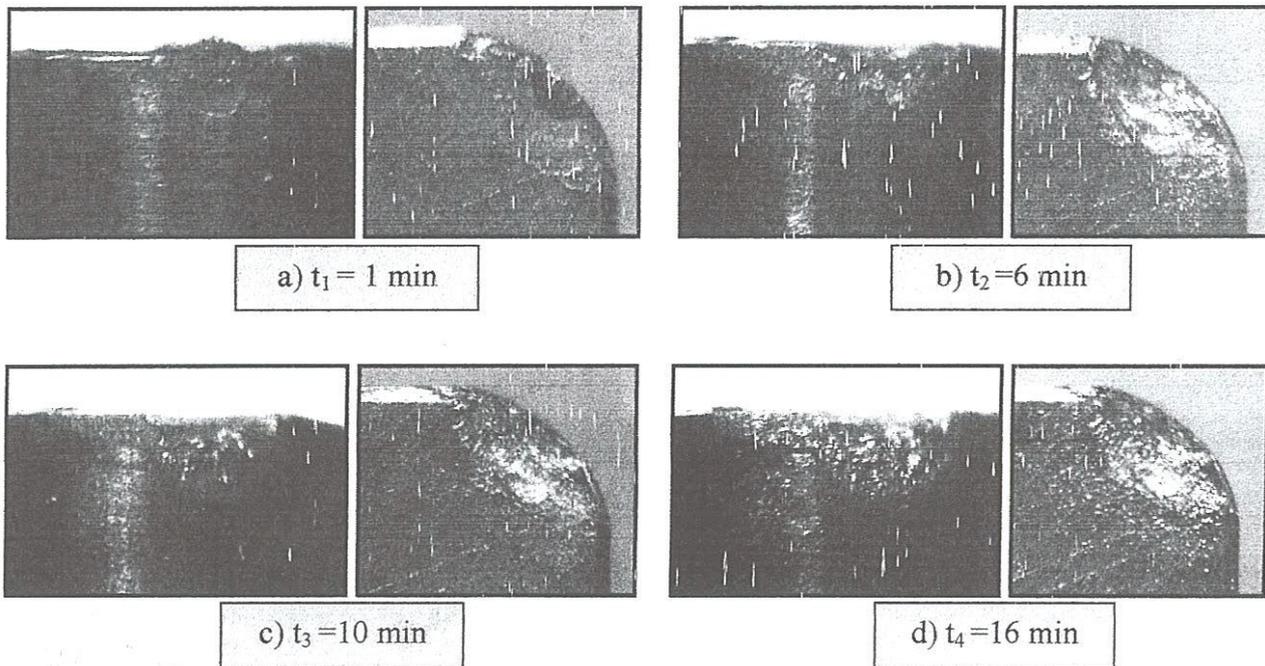


Figure III-30: Micrographie de l'usure en dépouille et en cratère pour l'essai N°8 sous les conditions ($V_c = 260$ m/min, $f = 0.20$ mm/tr et $a_p = 1$ mm).

Dans ce cas l'usinage s'effectue avec les niveaux max des facteurs (V_c , f et a_p), (Figure IV-30). En effet l'augmentation de la vitesse de coupe accompagnée de celle de l'avance et de la profondeur de passe, rend les conditions de travail très pénibles, ce qui limite ses capacités de coupe. Par conséquent à $t_1 = 1$ min d'usinage une quantité de matière usinée de couleur marron s'est soudée sur l'arête de coupe. Une entaille VN profonde est apparue sur la face de dépouille principale, ainsi que des particules collées sur le cratère.

Après cinq minutes de travail, L'usure en dépouille VB atteint 0,257 mm et le cratère KT est à 0.1 mm de profondeur. À $t_3 = 10$ min l'usure VB dépasse sa valeur admissible et $KT = 0,134$ mm, des particules brillantes sont apparues sur la cuvette du cratère. À $t_4 = 16$ min l'usure VB et KT dépassent tous les deux leurs valeurs admissibles.

III -2-1-6)- DISCUSSION :

Le critère d'usure prépondérant est l'usure en dépouille principale. Elle s'est caractérisée durant tous les essais, avec une vitesse d'accroissement plus grande que celle de l'usure en cratère. L'usure en cratère a dépassé sa valeur admissible dans l'essai N°4, où est survenue une ébréchure, qui a conduit à une profondeur $KT = 0.237$ mm et une $VB = 0.493$. Ceci est ainsi car ce régime est le résultat du couplage des valeurs maximales des facteurs les plus influents ($V_c = 260$ m/min et $f = 0.20$ mm/tr).

L'évolution des paramètres technologiques d'usinage dépend principalement de l'intensité du contact entre l'outil et la pièce usinée. Cependant, ce contact augmente avec l'élargissement de l'usure en dépouille VB, où il crée des frottements et des vibrations supplémentaires au niveau du système MODOP, ce qui influe non seulement sur l'état de la surface usinée, mais aussi sur d'autres paramètres, tels que les efforts, la température de coupe et la précision dimensionnelle. L'usure est un phénomène complexe, au cours duquel se déroulent plusieurs mécanismes (abrasion, adhésion, diffusion... etc). Ces mécanismes sont conditionnés par les conditions de travail, notamment les éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p).

Ces mécanismes d'usure sont cités par Gabriel C. [37], lors de l'usinage de l'acier de roulement 100Cr6 par différents matériaux à outil (CB7020, DBN45, céramique CC670 et CC650) où il a varié deux facteurs (V_c , f), tout en maintenant $a_p = 0,25$ mm constante. Il a trouvé les tenues suivantes pour chaque matériau de coupe testé; (CB7020/ $T_{max} = 200$ min, DBN45/ $T_{max} = 170$ min, CC650/ $T_{max} = 160$ min, CC670/ $T_{max} = 40$ min).

J. Paulo D. [45], lors de l'usinage de l'acier AISI D2 avec deux différentes plaquettes en céramique (CC650, CC650WG), Il aboutit après une observation micrographique de l'usure à la conclusion que les principaux mécanismes provoquant l'usure en d'épouille sur les plaquettes céramiques sont ; le processus d'abrasion et d'adhésion causés par les pressions élevées et les hautes températures de coupe ($1200 - 1500^\circ\text{C}$), où la solubilité pleine de Fe_2O_3 en Al_2O_3 [46].

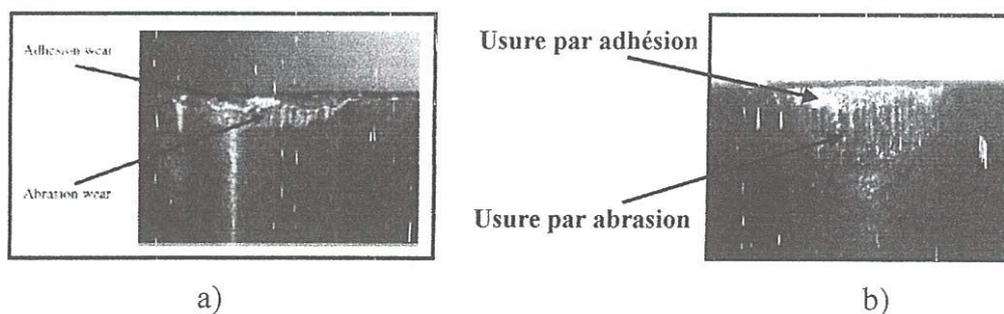


Figure III-31: a) Usure selon J Paulo D [45] ($V_c = 150$ m/min, $f = 0,1$ mm/tr et $a_p = 0,2$ mm).

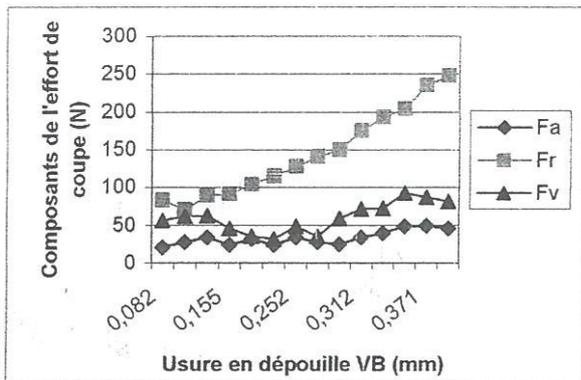
b) $V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm.

III-2-2)- Étude de l'évolution des paramètres technologiques d'usinage en fonction de l'usure en dépouille VB et des conditions de coupe:

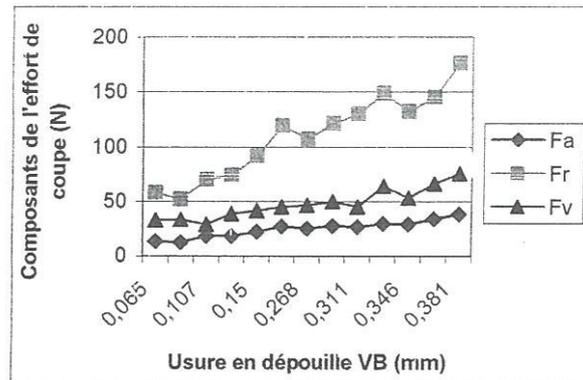
Les essais concernés, sont :

- Pour la vitesse de coupe, essais N°= (1/2).
- Pour l'avance, essais N° = (2/4).
- Pour la profondeur de passe, essais N°= (2/6).

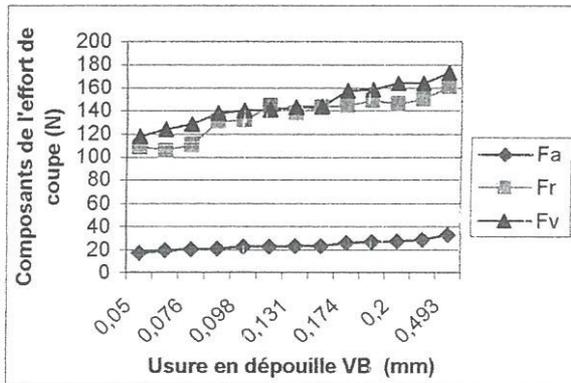
III -2-2-1)- Évolution de l'effort de coupe en fonction de VB et des conditions de coupe :



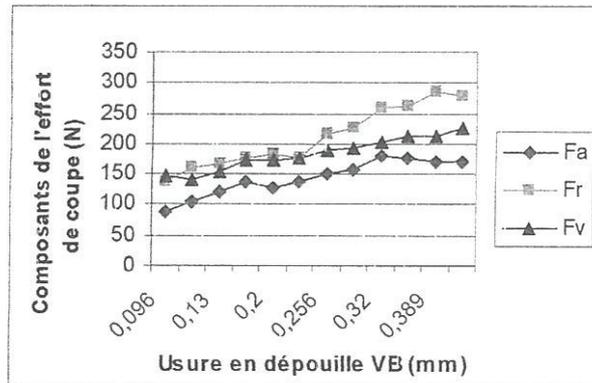
a)- Essai N°1.



b)- Essai N°2.



c) Essai N° 4.



d) Essai N° 6.

Figure III-32: Evolution de l'effort de coupe en fonction de VB, (Essais N°= 1, 2, 4 et 6).

III -2-2-1-a)- En fonction de la vitesse de coupe :

On peut remarquer lors de l'augmentation de la vitesse de coupe de l'ordre 2,16 fois que l'effort de coupe au début d'usinage diminue (1.48, 1.41, 1.7) fois, respectivement (Fa, Fr, Fv) avec la croissance de VB en fonction du temps d'usinage, les composantes de l'effort de coupe augmentent mais la différence reste inchangeable.

III -2-2-1-b)- En fonction de l'avance :

Ces résultats concernent les essais N°= 2 et 4 où l'accroissement de l'avance de 2,5 fois nous conduit à une augmentation des composantes de l'effort de coupe (1.26, 1.86, 3.57) fois, respectivement (Fa, Fr, Fv).

Le couplage d'une grande avance et d'une grande vitesse de coupe, conduit à une usure brutale, causée par l'élargissement rapide de la bande d'usure VB. La composante la plus sensible à l'usure en d'épouille est la composante tangentielle Fv.

III -2-2-1-c)- En fonction de la profondeur de passe :

Après une augmentation de la profondeur de passe de cinq fois, les composantes de l'effort de coupe augmentent (6.48, 2.35, 4.44) fois, respectivement pour (Fa, Fr, Fv). La composante la plus sensible à cette croissance de ap est la composante axiale Fa. Ce résultat indique que la pénétration du tranchant de l'outil dans la direction axiale est difficile à cause de l'augmentation de la section droite du copeau enlevé, et des frottements aux interfaces « Outil-Pièce ». À la fin de l'usinage VB> 0.3 mm la différence se trouve diminuée de (4.42, 1.56, 2.96) fois, respectivement (Fa, Fr, Fv), ceci est probablement dû au recule du bec de l'outil suite à l'usure. Ce recul se traduit par une diminution de la profondeur de passe effective avec le temps.

III -2-2-2)- Évolution de la rugosité de surface en fonction de VB et des conditions de coupe:

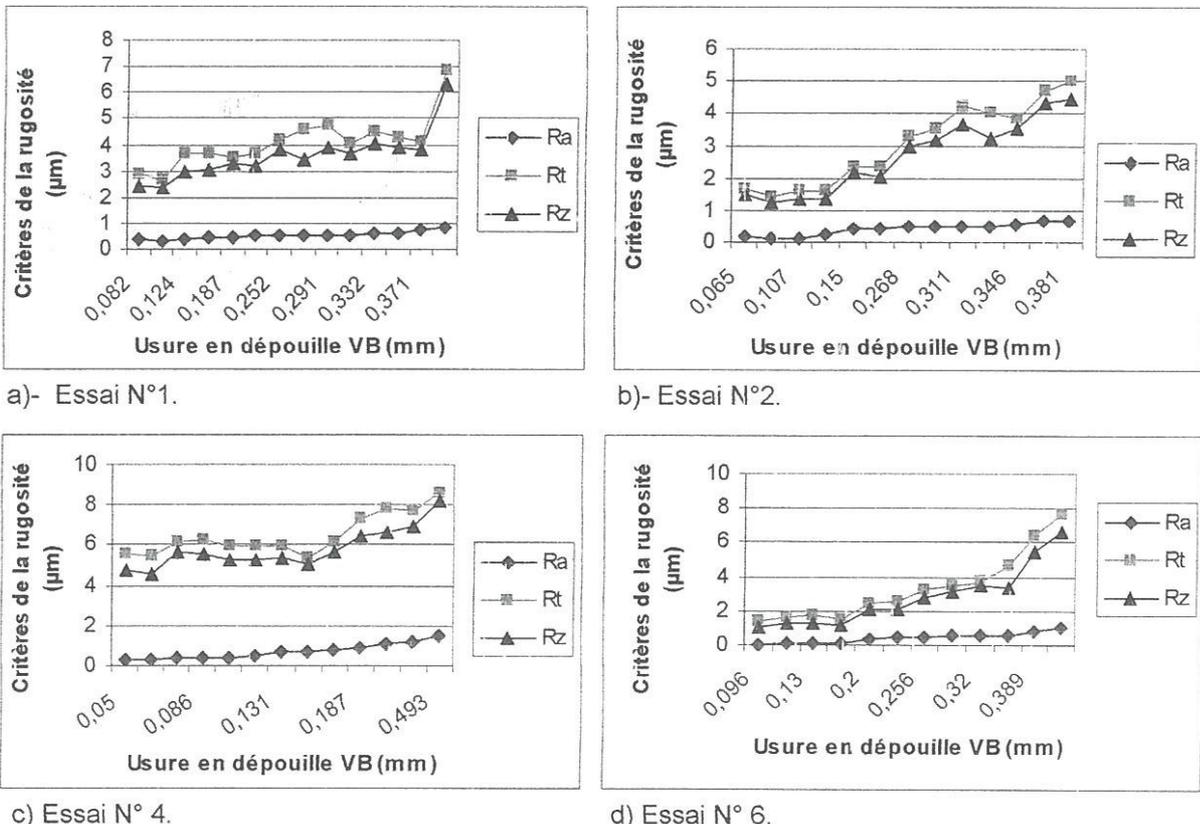


Figure III-33: Evolution des critères de la rugosité de surface en fonction de VB, (Essais N°= 1, 2, 4 et 6).

III -2-2-2-a)- En fonction de la vitesse de coupe :

L'état de la surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe, où les critères de la rugosité diminuent au début de l'usinage de (1.8, 1.7, 1.69) fois, respectivement pour (Ra, Rt, Rz). Cependant, la dégradation de l'état de surface en fonction de VB pour Vc= 260m/min est plus accélérée par rapport à celui de Vc= 120 m/min. La différence diminue de (1.22, 1.37, 1.42) respectivement pour (Ra, Rt, Rz) à cause de l'influence réciproque de la vitesse de coupe et VB sur l'état de surface.

III -2-2-2-b)- En fonction de l'avance :

L'avance est le facteur le plus influent sur l'état de surface. En effet après une augmentation de 2.5 fois on enregistre une croissance de la rugosité (1.5, 3,36, 2,29) fois, au début de l'usinage mais cette croissance va changer avec le temps et l'augmentation de l'usure en dépouille VB, où la différence devient (2.1, 1,72, 1,84) fois, respectivement (Ra, Rt, Rz).

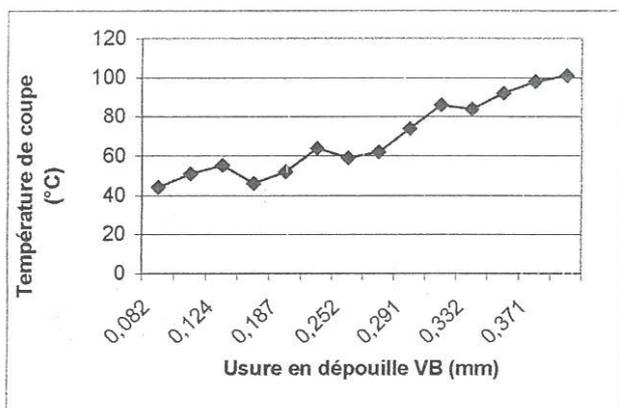
On peut remarquer donc une diminution de Rt et Rz, par contre Ra augmente ce qui explique l'augmentation des écarts entre les piques et les creux, causés par l'empreinte des sillons de l'avance du bec de l'outil et des stries de l'usure VB.

III -2-2-2-c)- En fonction de la profondeur de passe :

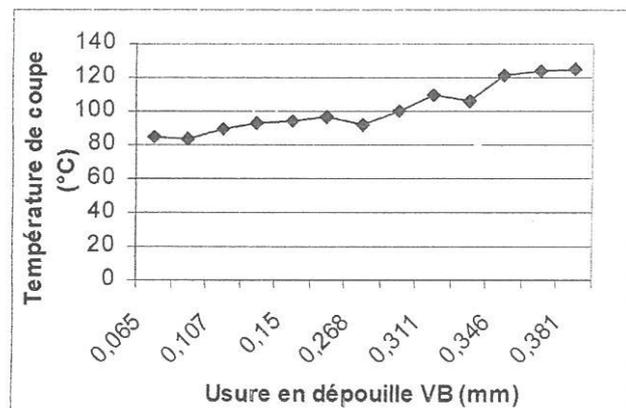
La profondeur de passe est le paramètre le moins agissant sur l'usure et sur l'état de surface. Une augmentation de ce dernier de l'ordre de cinq fois (0.2 à 1mm), conduit au début de l'usinage à une diminution de la rugosité de (1.11, 1.15, 1) fois, respectivement pour (Ra, Rt, Rz). Cette raison va changer, par contre en fin d'usinage ces rapports changent et deviennent (1.57, 1.35, 1.55) fois. Ceci est dû à l'augmentation de VB et des efforts de coupe lors l'usinage avec la vitesse de coupe de 260m/min, qui créent des vibrations intenses, influençant négativement la stabilité du système usinant.

III-2-2-3)- Évolution de la température de coupe en fonction de VB et des conditions de coupe:

La température est mesurée sur la face d'attaque, où l'écoulement du copeau est uniforme.



a)- Essai N°1.



b)- Essai N°2.

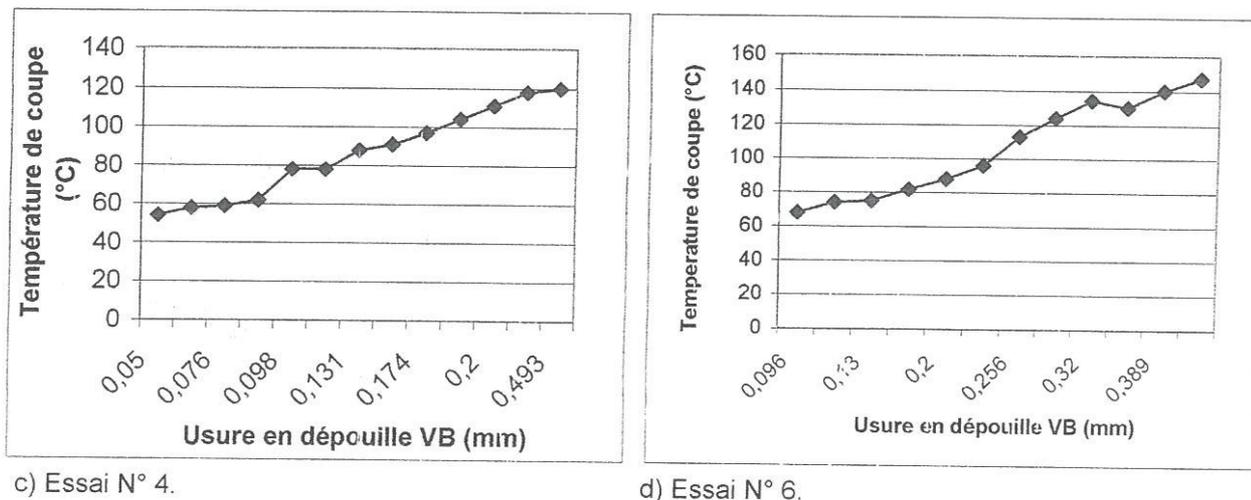


Figure III-34: Evolution de la température de coupe en fonction de VB, (Essais N°= 1, 2, 4 et 6).

III-2-2-3-a)- En fonction de la vitesse de coupe :

La vitesse de coupe est le facteur le plus influant sur la température de coupe. En effet au début d'usinage une augmentation de V_c de 2,16 fois conduit à une élévation de la température de coupe de deux fois. À la fin de l'usinage où $VB \approx 0.380$ mm, ce rapport a diminué pour atteindre 1,2 fois. Ceci est dû à l'augmentation de l'usure VB en fonction du temps pour les deux vitesses envisagées.

III -2-2-3-b)- En fonction de l'avance :

En augmentant l'avance de 2.5 fois, la température mesurée au début de l'usinage enregistre une diminution de l'ordre de 1,57 fois, car l'accroissement de l'avance augmente la section du copeau, ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur de la zone de coupe. Par conséquent la température de coupe diminue.

L'augmentation accélérée de la température pour la valeur de $f = 0.20$ mm/tr diminue en fin d'usinage l'écart jusqu'à 1.04 fois, ceci à cause de l'augmentation de l'usure VB.

III -2-2-3-c)- En fonction de la profondeur de passe :

L'augmentation de la profondeur de passe conduit à l'accroissement de la section droite du copeau enlevé, ce qui rend les pressions sur la face d'attaque plus intenses d'une part et d'autre part les frottements avec la surface de dépouille accélèrent le processus d'usure VB. Le travail avec $a_p = 1$ mm génère une température 1,7 fois plus grande que lorsqu'on usine avec $a_p = 0,2$ mm.

III-2-3)- Détermination des modèles mathématiques:

III-2-3-1)- Modèles mathématiques de la méthode multifactorielle concernée par "L'usure, la température de coupe, effort de coupe et rugosité de surface ":

III-2-3-1-a)- Modèle de Gilbert :

Ce modèle mathématique exprime la relation fonctionnelle entre la durée de vie de l'outil et les paramètres du régime de coupe qui sont en l'occurrence la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Le modèle de Gilbert est sous la forme suivante:

$$T = C \cdot Vc^{k1} \cdot f^{k2} \cdot ap^{k3} \quad (III-6)$$

Où C: une constante tenant compte de l'influence de tous les autres facteurs ne figurant pas dans cette formule.

K1, k2, k3 : des exposants indiquant le degré d'influence de chaque facteur correspondant sur la durée de vie.

- La détermination des constantes C, k1, k2 et k3 a été réalisée à l'aide d'un programme en MATLAB (Annexe). Ce programme a servi également au calcul des valeurs prédites.

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	T (min)
1	120	0.08	0.2	64
2	260	0.08	0.2	24
3	120	0.20	0.2	90
4	260	0.20	0.2	20
5	120	0.08	1	44
6	260	0.08	1	19
7	120	0.20	1	18
8	260	0.20	1	16

Tableau III-9 : Résultats des essais de la tenue de l'outil, pour toutes les combinaisons du plan d'expérience.

Usure en dépouille	Modèles mathématiques (Gilbert)	Coefficient de détermination
VB= 0.3 mm	$T = e^{8.3452} \cdot Vc^{-1.1130} \cdot f^{-0.2474} \cdot ap^{-0.3791}$	$R^2 = 0.7199$

Tableau III-10: Modèle mathématique de Gilbert pour [VB]= 0.3 mm ainsi que le coefficient de détermination R².

Valeurs calculées
70.2323
29.7015
55.9827
23.6753
38.1523
16.1347
30.4115
12.8611

Tableau III-11 : Valeurs calculées par le modèle de Gilbert.

Ce modèle montre que la durée de vie est inversement proportionnelle à l'augmentation des éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p). En prenant les valeurs absolues des exposants, on peut estimer le degré d'influence de chaque facteur des conditions de coupe (V_c , f et a_p) sur la tenue.

L'analyse des différents exposants montre que l'influence de la vitesse de coupe est plus significative que celle de l'avance ainsi que celle de la profondeur de passe.

III-2-3-1-b)- Modèles mathématiques de la température de coupe :

La forme du modèle qui nous permet de mettre au point des corrélations entre la température de coupe et les paramètres du régime de coupe (V_c , f , a_p) est choisie sous la forme suivante :

$$\theta = C \cdot V_c^{K1} \cdot f^{K2} \cdot a_p^{K3} \quad (III-7)$$

θ : est la température de coupe enregistrée sur la surface d'attaque.

La détermination des constantes est faite avec le même programme (Annexe), et les valeurs théoriques ainsi que le coefficient de détermination R^2 .

N°	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	T_{max} (°C)
1	120	0.08	0.2	101
2	260	0.08	0.2	125
3	120	0.20	0.2	89
4	260	0.20	0.2	120
5	120	0.08	1	141
6	260	0.08	1	147
7	120	0.20	1	124
8	260	0.20	1	152

Tableau III-12 : Résultats des essais de la température maximale mesurée sur la surface d'attaque.

	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
Température de coupe (Surface d'attaque)	$t_{\max}^{\circ} = e^{3,5308} \cdot Vc^{0,2448} \cdot f^{-0,2278} \cdot ap^{0,1652}$	$R^2 = 0,9063$

Tableau III-13: Modèle mathématique de la température maximale mesurée sur la surface d'attaque ainsi que le coefficient de détermination R^2 .

Valeurs calculées
101.2930
122.4065
94.8630
114.6362
132.1537
159.6998
123.7646
149.5621

Tableau III-14 : Valeurs calculées de la température de coupe obtenues par les modèles.

Le modèle mathématique déterminé (tableau III-13), montre que la vitesse de coupe est le facteur qui a la plus grande influence sur la température de coupe. L'augmentation de la vitesse de coupe provoque l'augmentation des frottements et des déformations plastiques dans (ZCP, ZCS), ce qui explique l'élévation intense de la température dans la zone de coupe.

III-2-3-1-c)- Modèles mathématiques concernés par l'évolution de l'effort de coupe et de la rugosité en fonction des conditions de coupe et de l'usure :

Le modèle mathématique est fonction des paramètres de coupe (Vc , f , ap). Et pour lier les modèles à l'usure VB , on prend en considération les valeurs des résultats obtenus de l'effort de coupe et de la rugosité, au début de l'usinage et/ou l'usure en dépouille arrive à sa valeur admissible $VB = 0.3\text{mm}$.

o Au début d'usinage :

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Au début d'usinage					
				Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)
1	120	0.08	0.2	0,36	2,91	2,47	20,14	82,4	56,34
2	260	0.08	0.2	0,2	1,64	1,46	13,54	58,19	33,09
3	120	0.20	0.2	1,51	9,92	8,91	21,3	100	71,4
4	260	0.20	0.2	0,39	6,1	5,67	20,43	110,68	128,77
5	120	0.08	1	0,19	1,82	1,63	80,09	114,88	111,41
6	260	0.08	1	0,14	1,74	1,32	120,53	166,3	154,4
7	120	0.20	1	0,88	6,95	6,46	120,46	232,67	169,38
8	260	0.20	1	1,52	8,08	7,8	125,96	249,69	277,71

Tableau III-15: Résultats des essais de l'effort de coupe et de la rugosité de surface au début d'usinage.

	Critère	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
Au début d'usinage	Rugosité	$Ra = e^{5,4062} \cdot Vc^{-0,5497} \cdot f^{1,6423} \cdot ap^{-0,1002}$	$R^2 = 0,6063$
		$Rz = e^{5,9461} \cdot Vc^{-0,3084} \cdot f^{1,4775} \cdot ap^{-0,2770}$	$R^2 = 0,9139$
		$Rt = e^{6,1129} \cdot Vc^{-0,3234} \cdot f^{1,5506} \cdot ap^{-0,2966}$	$R^2 = 0,9069$
	Effort de coupe	$Fa = e^{5,1948} \cdot Vc^{0,0640} \cdot f^{0,2509} \cdot ap^{1,1057}$	$R^2 = 0,9545$
		$Fr = e^{5,9814} \cdot Vc^{0,2308} \cdot f^{0,5316} \cdot ap^{0,4722}$	$R^2 = 0,9537$
		$Fv = e^{5,1261} \cdot Vc^{0,2839} \cdot f^{0,7098} \cdot ap^{0,5987}$	$R^2 = 0,9121$

Tableau III-16 : Modèles mathématiques des composantes de l'effort de coupe et des critères de la rugosité au début d'usinage ainsi que le coefficient de détermination R^2 .

Valeurs théoriques					
Effort de coupe			Rugosité		
Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
16.5145	65.2960	41.6476	0.2645	2.3602	2.0180
16.5750	68.5427	51.8743	0.1729	1.8594	1.5716
20.7830	106.2823	79.8106	1.1910	9.1395	8.5886
20.8592	111.5670	99.4084	0.7786	7.2001	6.6885
97.8862	139.6352	109.1666	0.2531	2.0908	1.7724
98.2449	146.5783	135.9729	0.1655	1.6471	1.3803
123.1869	227.2843	209.1994	1.1399	8.0962	7.5434
123.6383	238.5856	260.5689	0.7452	6.3782	5.8745

Tableau III-17 : Valeurs théoriques calculées d'après les modèles.

○ À VB= 0.3 mm :

N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	à VB = 0,3 mm					
				Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)	Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)
1	120	0.08	0.2	0,53	4,7	3,88	24,83	150,15	58,86
2	260	0.08	0.2	0,47	4,18	3,66	26,41	130,01	44,98
3	120	0.20	0.2	2,92	12	11,1	55,5	301,23	127,08
4	260	0.20	0.2	1,2	7,74	6,92	28,58	150,01	164,03
5	120	0.08	1	0,4	3,03	2,8	151,48	244,69	207,23
6	260	0.08	1	0,59	3,76	3,53	179,51	259,28	202,67
7	120	0.20	1	0,94	7,36	6,79	143,35	262,36	298,78
8	260	0.20	1	2,32	10,14	9,78	181,65	278,04	303,48

Tableau III-18: Résultats des essais de l'effort de coupe et de la rugosité de surface à [VB] =0.3mm.

	Critère	Modèles mathématiques	Coefficient de détermination
à VB= 0.3mm	Rugosité	$Ra = e^{2,1068} \cdot Vc^{0,3362} \cdot f^{1,3280} \cdot ap^{0,3018}$	$R^2 = 0,5691$
		$Rz = e^{3,6555} \cdot Vc^{-0,0852} \cdot f^{0,9366} \cdot ap^{-0,1186}$	$R^2 = 0,8129$
		$Rt = e^{3,5386} \cdot Vc^{0,0781} \cdot f^{0,9880} \cdot ap^{-0,2902}$	$R^2 = 0,7942$
	Effort de coupe	$Fa = e^{5,8952} \cdot Vc^{-0,2324} \cdot f^{0,2291} \cdot ap^{1,0132}$	$R^2 = 0,9004$
		$Fr = e^{7,3293} \cdot Vc^{-0,2344} \cdot f^{0,2670} \cdot ap^{0,2574}$	$R^2 = 0,5269$
		$Fv = e^{7,1473} \cdot Vc^{-0,0890} \cdot f^{0,7729} \cdot ap^{0,6577}$	$R^2 = 0,8575$

Tableau III-19: Modèles mathématiques des composantes de l'effort de coupe et des critères de la rugosité à [VB] =0.3mm ainsi que le coefficient de détermination R².

Valeurs théoriques					
Effort de coupe			Rugosité		
Fa (N)	Fr (N)	Fv (N)	Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
29.4635	166.9585	60.6408	0.5078	4.2657	3.6377
28.0586	139.2732	60.3330	0.5449	4.2450	3.6979
36.3482	213.2518	123.1303	1.7144	10.0629	8.9314
34.6152	177.8900	122.5054	1.8400	10.0140	9.0792
150.4970	252.6830	174.7776	0.4449	3.5243	3.2038
143.3213	210.7827	173.8905	0.4775	3.5072	3.2569
185.6640	322.7454	354.8836	1.5024	8.3140	7.8663
176.8116	269.2273	353.0824	1.6124	8.2736	7.9965

Tableau III-20 : Valeurs théoriques calculées d'après les modèles.

Les valeurs de R² (0.5691 et 0.5269), trouvées dans le tableau (III-19), montre que la force de liaison entre Ra et Fr d'une part et les éléments du régime de coupe d'autre part est faible. Ce qui nécessite d'introduire les effets mutuels dans le modèle proposé.

III-3)- CONCLUSION PARTIELLE:

Les résultats obtenus de l'effort de coupe montrent que la composante radiale F_r est prédominante ($F_r > F_v > F_a$). Cependant, le travail avec la limite du rayon du bec de l'outil provoque une longueur effective d'usinage très petite ce qui implique que F_r est la plus grande, soit pour le tournage dur ou conventionnel.

La comparaison des efforts de coupe avant et après t-th de l'acier 100Cr6 montre que l'effort en tournage conventionnel est supérieur à celui en tournage dur, soit pour V_c , f ou a_p . Ceci peut être expliqué par la forme et le type du copeau, ainsi que la variation de son angle d'hélice. En effet, le copeau en tournage dur présente un angle d'hélice plus grand que celui en tournage conventionnel.

Cette partie de l'étude, permet de découvrir les propriétés avantageuses du tournage dur par rapport au tournage conventionnel. Cette technologie montre qu'elle est concurrente à la rectification en terme de rugosité de surface. Ceci notamment quand on travaille avec des faibles avances, des vitesses de coupe élevées et des profondeurs de passe faibles (travail de finition). Ces résultats encourageant permettent de réduire les phases de fabrication des pièces, en réalisant sur la même machine, les opérations d'ébauche de demi-finition et finition. Par conséquent on réduit considérablement les erreurs de positionnement, le prix de revient et le temps de fabrication.

A partir des résultats de l'évolution des critères d'usure en fonction des conditions de coupe, on peut conclure que; la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent sur l'usure suivi par l'avance et en fin la profondeur de passe.

La micrographique de l'usure de l'outil à différents moments de la coupe nous permet d'identifier les différents phénomènes d'usure ;

A titre d'exemple, nous pouvons citer les faibles valeurs des conditions de coupe (V_c , f et a_p), conduisant à la création des mécanismes d'abrasion et d'adhésion caractérisés par l'apparition de stries et d'arête rapportée (figure III-22, t_1 , t_2 et t_4). L'augmentation de la vitesse de coupe favorise le déclenchement du mécanisme d'usure par diffusion (figure III-22, III-23). L'augmentation de l'avance provoque l'écaillage de l'arête (figure III-24, t_4), ainsi que le travail avec des grandes avances et petites (V_c , a_p) provoque le mécanisme d'usure par abrasion/adhésion (figure III-26, t_3). L'augmentation des deux paramètres (f et a_p) ou a_p peut être à l'origine de l'effondrement brusque de l'arête de coupe, figure (III-28, t_4 et III-27, t_5). L'accroissement simultané des trois paramètres de coupe, conduit à l'usure catastrophique, où les trois mécanismes d'usure « abrasion, adhésion et diffusion », peuvent se présenter (figure III-30).

L'influence des conditions de coupe sur les paramètres technologiques est consolidée avec l'augmentation de l'usure. En effet les efforts, la température de coupe, et la rugosité de la surface usinée sont très sensibles à l'accroissement de l'usure.

Les modèles mathématiques, permettent d'exprimer la relation qualitative et quantitative entre les paramètres d'optimisation et les paramètres d'entrée. Ils permettent également la prédiction et l'optimisation. Les exposants (K_i) indiquent le degré d'influence de chaque facteur des conditions de coupe sur chaque paramètre technologique d'usinage étudié.

En se basant sur les résultats obtenus par ces modèles, on conclut que ;

Le facteur le plus influent sur l'effort de coupe est la profondeur de passe (a_p), sur la rugosité de surface est l'avance (f). Tandis que sur la température de coupe et l'usure c'est la vitesse de coupe (V_c).

Conclusion générale

Les principales conclusions tirées de cette étude sont :

Les résultats obtenus de l'effort de coupe, montrent que la composante radiale F_r est prédominante. ceci lorsqu'on travaille dans la limite du rayon du bec de l'outil, c'est à dire la longueur effective d'usinage est très petite. L'étude comparative des efforts de coupe montre que l'effort de coupe en T-D est inférieur à celui en T-C, et ceci pour tous les éléments du régime de coupe. Cependant quand la vitesse de coupe dépasse 160 m/min, les efforts de coupe mesurés en tournage dur changent de comportement et ont tendance à devenir plus grands que ceux du tournage conventionnel.

Cette étude, a permis de découvrir les propriétés avantageuses du tournage dur par rapport au tournage conventionnel. En effet cette technologie peut être une alternative de substitution à la rectification. Cet avantage présente un atout économique considérable, du fait qu'il permet de réduire les phases de fabrication des pièces, en réalisant sur la même machine les opérations d'ébauche, semi-finition et finition.

L'usure de l'outil de coupe joue un rôle déterminant quant à la qualité d'usinage. En se basant sur les résultats obtenus, l'outil céramique CC650 a montré qu'il est capable de garder sa stabilité. En effet en travaillant à $V_c = 120 \text{ m/min}$, $f = 0.20 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.2 \text{ mm}$, il a assuré une durée de vie de 90 min.

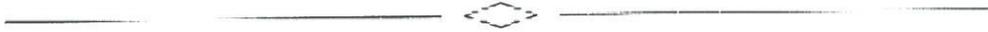
L'effet mutuel Outil-Matière (céramique CC650/100Cr6), est interprété par l'action de l'outil de coupe et la réaction de la matière usinée lors de la coupe. Cependant, en terme d'usure pour l'outil et de qualité de surface par rapport à la pièce usinée. La méthode multifactorielle a pour but d'évaluer l'usure de l'outil de coupe et les autres paramètres technologiques d'usinage "effort de coupe, température de coupe, rugosité de la surface usinée" en fonction des conditions de coupe, où nous avons vu l'usure avec tous ses aspects; écaillage et de stries. Les différents mécanismes d'usure; abrasion, adhésion et diffusion ont été observés. Les paramètres technologiques (efforts et température de coupe, rugosité) d'usinage augmentent avec l'accroissement de l'usure.

L'intensification de cette dernière favorise le déclenchement des processus physico-chimiques aux interfaces « Outil-Pièce » qui sont le siège d'un dégagement de chaleur et de pression intenses.

Perpectives

Les résultats obtenus dans ce travail de recherche ouvrent des perpectives prometteuses:

- ✓ Etude des vibrations du système usinant en fonction de l'environnement de travail en tournage dur.
- ✓ Etude de l'influence de l'usure sur la précision dimensionnelle en fonction des conditions de travail en tournage dur.
- ✓ Simulation de l'usinage.



Référence Bibliographique

- [1] **MEHDI REMADNA**, « le comportement de système usinant en tournage dur. Application du cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure De Bord Cubique) », Annexe 1, Année 2001
- [2] **CHRISTIAN PAGES**; «Comportement De Revêtements Céramiques Sur Outil En Tournage A Sec De Finition.» N° D'ordre : 2003-37, Année 2003.
- [3] **RAYNALD LAHEURTE**; «Application De La Théorie Du Second Gradient A La Coupe Des Matériaux.» N° d'ordre : 2935, Année 2004.
- [4] **ALAIN PASSERON**, Tournage, technique de l'ingénieur BM 7 086-22.
- [5] **BENOIT BROQUERIE**, Fluides de coupe; technique de l'ingénieur, BM7064-13.
- [6] http://philippe.berger2.free.fr/productique/ressources/outils/les_outils.htm.
- [7] **M. FIELD, M.E. MERCHANT** : “The mecanism of the formation of the discontinuous chip in the metal cutting“ Trans. ASME, Vol 71, 1949
- [8] **MEHDI REMADNA**, « le comportement de système usinant en tournage dur. Application du cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure De Bord Cubique) », chapitre1, Année 2001
- [9] **N.H. COOK, I. FINNIE and M.C. SHAW** : “Dicontinuous chip formation“ Trans ASME, Vol 76, 1954
- [10] **M.C. SHAW** : “*Assesment of machinability*” The iron and steel institute, London, 1967
- [11] **J.C. LEMAIRE, W.A. BACKOFFEN** : “Adiabatic instability in the orthogonal cutting of steel” Metall. Trans. 1972
- [12] **R. KOMANDURI, R.H. BROWN** : “The mechanics of chip segmentation in machining“ ASME journal of engeneering for industry, 1981
- [13] **MATSUMOTO Y., et al.**, « cutting mechanism during machining of hardned steel », Materiels science and technology, April 1987, Vol.3, pp. 299-305.
- [14] **W. KONIG, A. BERKTOLD**: “Turning versus grinding – A comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies“1993

- [15] **G. BRANDT** : “Développement des outils de coupe en céramique” Colloque International du Cercle d’Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996, pages 8-21.
- [16] **H. PASTOR** : “L’évolution des matériaux pour outils de coupe” Colloque International du Cercle d’Etudes des Métaux, 13 et 14 Novembre 1996, pages 7-11
- [17] **Yallese M.A.**, « Etude du comportement à l’usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur », Thèse de doctorat, Annaba 2005.
- [18] **BOSSOM.P.K**, Finich machining of hard ferrous work pieces ; industriel diamond Review ; Vol (5) page (228-233);1990.
- [19] **TAKATSU,S. Shimada, H,and Otani, K.** “effects of CBN content on the cutting performance of polycrystalline CBN tools”, Internation Jornial of Refractory and Hard Metals, Vol (2) N°pp.175-178;1983
- [20] **BOGGIO.U**; the recipe for good hard turning; Manufacturing Engineering; page (95-105); March 1996
- [21] **BARRY.J; Byrne.G.** Cutting tool wear in the machining of hardened steels, Part I: alumina/ Tic cutting tool wear; wear; Vol – (247) page (139-151); 2001.
- [22] **ZIMMERMAN, M, Lahres, M, Viens, D.V, Loube,B.L,** “ investigation of the wear of cubic boron nitride cutting tools using Auger electron spectroscopy and X-rayanalysis by EPMA”, wear, Vol. (207) pp.(241-249), 1997.
- [23] **KLIMENKO, S.A, Mukovoz, Y.A, and Ogo rodkink, V.V;** “ on the wear mechanism of cubic boron nitride tools”, wear, Vol. (157)pp. (1-7); 1992.
- [24] **HODGSON, P.H.H Trendler,** ”turning hardened tool steels with cubic boron nitride insert”, annals of the CIRP, Vol. 30/01/1981, pp63-66.
- [25] **SHIGLEY, josph E ; Mischke, charles R.;** Mécanical Engeneering, design, Mc Graw- Hill;1989.
- [26] **NARUTAKI; Y. Yamane,** “tool wear and cutting temperature of CBNtools in machining of hardned steels “, Anals of the CIRP, Vol.28/01/1979,pp.23-28.
- [27] **CHOU. B.T, K.J. trigger,** Trans. ASME 73 (1951) 777-792.
- [28] **G. CHRYSSOLOURIS ;** « Turning of hardened steels using CBNTools », I.Applied Metal Working, Vol 2, N°:2, January 1982.

- [29] **DAVIES, M.A., Fick. S.E., Evans, C.J.**, “ Dynamic Measurement of shear Band Formation in Precision Hard Turning”, in *Liber Amicorum*, Professor Paul Vanherck , Ingenieur and pedagoog, ISBN 90-73802-56-3, Katholieke Univarsiteit Press, Leuven, Chapter 5;1996.
- [30] **W. KONIG, M. KLINGER, R. LINK** : “Machining hard matériels with geometrical defined cutting edges – Field of application and limitations“ *Annals of the CIRP* 1990
- [31] **K. NAKAYAMA, M. ARAI, T. KANDA** : “Machining characteristics of hard materials” *Annals of CIRP* 1988
- [32] **H. SCHULTZ** : “Hohgeschwindigkeitsfrasen matalisher und nicht metallisher werkstoffe“ Carl Hanser verlag, 1989
- [33] **H. WINKLER** : “La formation des copeaux par usinage à grande vitesse“ *Bulletin du cercle d`Etudes des Métaux* , 1983
- [34] **G. BOOTHROYD** : “Temperature in orthogonal metal cutting“ 1963
- [35] **P.K. WRIGHT** : “Effects of rake face design on cutting tool temperature distributions“ *ASME* 1980
- [36] **P. OXLEY** : “Modelling machining processes with a view to their optimisation and to the adaptive control of metal cutting machine tools“ *Robotics Computer Integrated Manufacturing* 1988
- [37] **GABRIEL C. Benga, Alexandre M. Abrao.**, “Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools”, *Journal of Materials Processing Technology* 143–144 (2003).
- [38] **YALLESE M. A, Boulanouar L et Chaoui K.**, « Usinage de l’acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique ». *Mécanique & Industries* 5, 355–368 (2004).
- [39] **SAHBI BEN SALEM, Béchir HADJ SASSI & Alphonse MOISAN** ;
« Evaluation des performances des outils de coupe en UGV par la méthode des plans d’expériences » 16ème Congrès Français de Mécanique- Nice, 1-5 septembre 2003.
- [40] **FRANÇOIS LEROY**, « Endommagement des outils de coupe », *technique de l’ingénieur* Doc. 7 042.
- [41] **ANDRE CHEVALIER** ; « Guide du dessinateur industriel », Edition 2004.

[42] <http://www.ac-teil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>.

[43] **JACQUES BOULANGER**, tolérance et écart dimensionnel, technique de l'ingénieur Doc. B 7 010.

[44] **AB SANDVIK COROMANT**; “High-productivity, high-quality finish turning of case-hardened steel surfaces”, SE-811 81 Sandviken, Sweden; C-1040:069 ENG/2005.

[45] **J PAULO DAVIM et L Figueira**, “Comparative evaluation of conventional and wiper ceramic tools on cutting forces, surface roughness, and tool wear in hard turning AISI D2 steel”, Proc. IMechE Vol. 221, pp 630; 2007.

[46] **KRISHNAMURTHY,R. et Gokularathnam, C. V.** Phase transformation toughened materials for cutting tool applications. In ceramic cutting tools (Ed. E. Dow Whitney), pp 120–121, 1994.

Annexe

```

%*****
%-----Programme d'identification des paramètres physiques d'un
%modèle par la méthode de moindres carrés-----
%*****
%-----Le modèle non linéaire-----
%Y=C*X1^K1*X2^K2*X3^K3*.....*Xm^Cm
%-----Linéarisation de modèle-----
%On pose: Z=log(Y) , Fi=log(Xi) pour i=1,2,.....m
%          P0=log(C) , Pi=Ki pour i=1,2,.....m
%-----Le modèle linéaire-----
%Z=P0+P1*F1+P2*F2+p3*F3+.....+pm*Fm
%La matrice des variables descriptives du modèle non linéaire
%X=[X1 X2 X3 ..... Xm]
%Chaque élément de X est un vecteur colonne de n élément
%Xi=[x1i;x2i;x3i;.....;xni] pour i=1,2,3,.....m
%n=le nombre d'essais pratiques(d'épreuves)
%m=le nombre de variables descriptives Xi du modèle non linéaire
%-----Introduction de données-----
m=input('Le nombre de variables descriptives: m=')
n=input('Le nombre de d'essais pratiques: n=')
%La matrice des données expérimentales X
X=input('La matrice des données expérimentales: X=')
%Le vecteur colonne Y
Y=input('Les valeurs expérimentales de: Y=')
%La matrice W du modèle linéaire
F=log(X);
G=[ones(n,1) F];
%Le vecteur Z
Z=log(Y);
%Condition d'identification
if det(F'*F)==0
    erreur('Il existe des vecteurs colonnes lineairement dependent')
end
%Evaluation de vecteur des paramètres du modèle
P=inv(G'*G)*G'*Z;
C=exp(P(1));
K=[];
for i=1:m
    Ki=P(i+1);
    K=[K;Ki];
end
digits(6)
K=vpa([C;K]);
%La moyenne de Y
Y_moy=mean(Y);
%Calcul de Y à partir du modèle
Z_cal=G*P;
Y_cal=exp(Z_cal);
%Coefficient de corrélation
R=sqrt(1-sum((Y-Y_cal).^2)/sum((Y-Y_moy).^2));
R_2=R^2;
%Affichage des résultats
disp('Les paramètres Ki du modèle')
K
disp('Les valeurs théoriques de Y')
Y_cal
disp('Coefficient de corrélation R')
R
disp('Coefficient de détermination')
R_2

```