

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

MEMOIRE

Présenté

AU DEPARTEMENT DE MECANIQUE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
UNIVERSITE DE BATNA

Pour obtenir le Diplôme de

MAGISTERE EN GENIE MECANIQUE
Option : Science des matériaux

Par
ABDELKRIM Mourad

*Etude de l'influence de la température de coupe dans l'usure
des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des
alliages usinés*

Soutenu publiquement le 23/01/ 2008, devant le jury composé de :

Dr Amar ABBASSI	M.Conférences, Université de Batna	Président
Dr Mourad BRIOUA	M.Conférences, Université de Batna	Rapporteur
Dr Rachid BENBOUTA	M.Conférences, Université de Batna	Co-Rapporteur
Dr Said BENSAAADA	M.Conférences, Université de Biskra	Examineur
Dr Kamel ZIDANI	M.Conférences, Université de Batna	Examineur

Dédicace

JE dédie ce modeste travail à :

Mon très cher père et ma très chère Mère qui sont sans cesse à mes cotés ;

Mes très chers frères et mes très chères sœurs qui m'ont toujours soutenu ;

Mes grands parents, mes oncles ;

Toute ma famille ;

Tous mes amis et mes collègues.

À la mémoire du penseur algérien Malek Ibn Nabi.

A. Mourad

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant tous ces années d'études.

Les travaux effectués dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire des machines outils au niveau du hall technologique du Département de Mécanique- Université de Batna. Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur BRIOUA Mourad, Maître de conférences, pour avoir assuré la direction de ce mémoire pour sa confiance et pour ses encouragements tout au long de ces longues années de travail.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Benbouta Rachid, Maître de conférences et chef de département de mécanique, université de Batna, pour m'avoir assuré le co-encadrement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Docteur Amar ABBASSI, Maître de conférences, université de Batna, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ce mémoire ainsi qu'a:

Monsieur Kamel ZIDANI, Maître de conférences, université de Batna,

Monsieur Saïd BENSAAÏDA, Maître de conférences, université de Biskra.

Mes remerciements vont également à :

Mes collègues et amis pour leur soutien et leur aide à finaliser ce travail,

Enseignants, techniciens et doctorants du Département de Mécanique, pour leur soutien moral et leur accueil chaleureux,

Je n'oublie pas, enfin, d'exprimer ma profonde reconnaissance à :

Mes parents mes frères et mes sœurs que Dieu les garde.

Abdelkrim Mourad

Chapitre I:

Présentation de l'usinage par enlèvement de matière

Introduction générale	01
I.1 Introduction.....	03
I.2 Formation du copeau	05
I.3 La mise en forme par enlèvement de matière.....	07
I.4 Le tournage.....	07
I.4.1 Principe du tournage.....	07
I.4.2 Opérations de base.....	07
I.4.3 Les paramètres de coupe.....	08
I.4.4 La vitesse de coupe.....	09
I.4.5 La profondeur de passe.....	09
I.4.6 l'avance	09
I.5 Influence des paramètres de coupe sur l'usure.....	10
I.5.1 Avance.....	10
I.5.2 Profondeur de passe	10
I.5.3 Matériau usiné	10
I.5.4 Lubrification.....	10
I.6 Endommagement des outils de coupe.....	10
I.6.1 Introduction.....	10
I.6.2 Les outils.....	11
I.6.3 Choix d'un outil de coupe à plaquette rapportée.....	11
I.6.4 Matières de la plaquette.....	12
I.7 forme d'usure.....	15
I.7.1 L'usure en dépouille ou usure frontale.....	15
I.7.2 La cratérisation de la face d'attaque.....	16
I.7.3 Entaille	16
I.7.4 Ebréchures et fissuration d'arête.....	16
I.7.5 Critères d'usure et durée de vie des outils	17
I.7.5.1 Critères de surveillance de l'usure.....	17
I.8 Caractéristiques des surfaces usinées.....	19
I.8.1 Etat métallurgique de la surface.....	19
I.8.2 Etats de surface.....	20
I.8.3 Contraintes résiduelles.....	20

Chapitre II:

Méthodologie d'étude expérimentale de la coupe

II.1 Chaleur et température	22
II.1.1 Sources de chaleur.....	22
II.2 Mesure de la température.....	23
II.2.1. Mesure de température par la méthode optique.....	23
II.3 Méthodologie d'étude expérimentale de la coupe.....	24
II.3.1 Analyse thermique de la coupe.....	24
II.3.1.1 Mesures indirectes de température.....	25
II.3.1.2 Mesures directes de température.....	25
II.3.1.2.1 Mesure de température de coupe par thermocouple.....	25
II.4. Mesure de température de coupe par analyses métallographiques.....	29

Chapitre III : Matériaux et Méthodes Expérimentales

III.1 Matériaux.....	30
III.1.1 Introduction.....	30
III.1.1.1 Les aciers au carbone.....	30
III.1.1.2 La microstructure des aciers au carbone.....	31
III. 2 Matériaux utilisés.....	32
III.3 Plaquettes utilisées	33
III.3.1 Introduction.....	33
III.3.2 Plaquettes utilisées de type P10.....	33
III.3.2.1 Fabrication de la poudre.....	33
III.3.2.2 Composition chimique.....	33
III.3.2.3 Analyse chimique	34
III.3.2.4 Caractéristiques techniques.....	34
III.3.2.5 Structure métallographique.....	34
III.3.3 Plaquettes utilisées de type P35.....	35
III.3.3.1 Fabrication de la poudre.....	35
III.3.3.2 Composition chimique.....	35
III.3.3.3 Analyse chimique	35
III.3.3.4 Caractéristiques techniques.....	36
III.3.3.5 Structure métallographique.....	36
III.4 Procédures d'essais.....	37
III.4.1 Eléments considérés lors des campagnes d'essais.....	37
III.4.1.1 Paramètres à tester.....	37
III.4.1.2 Résultats à observer	37
III.5 Méthodologie d'essais.....	38
III.5.1 Essais d'usinage.....	39
III.5.2 Température de coupe en fonction des conditions de coupe.....	39
III.5.3 Essais d'usure.....	39
III.5.3.1 Etude de l'évolution de l'usure.....	39
III.6 Mesure avec un microscope optique.....	40
III.6.1 Observation microscopique.....	40
III.6.1.1 Objet de l'étude.....	41
III.9.2 Techniques de mesures.....	41
III.6.1.2 Découpe du Lopin.....	41
III.6.1.3 Polissage, attaque et observation de la surface.....	42
III.8 Mesure de la micro dureté.....	42
III.8.1 Microdureté.....	42
III.9.Conclusion.....	43

Chapitre IV: Résultats et Interprétations

IV.1 Introduction	44
IV.1 Mesure la température	44
IV.2.1 Mesure la température pour différents régimes de coupe.....	45
IV.2.1.1 Mesure de la température en fonction de la vitesse de coupe (Vc).....	45
IV.2.1.2 Mesure de la température en fonction de l'avance (f).....	51
IV.2.1.3 Mesure de la température en fonction de la profondeur de passe (ap).....	55
IV.3 Influence de la vitesse de coupe (Vc) sur les critères de rugosité.....	58
IV.4 Influence du temps de coupe sur l'usure en dépouille (VB)	60

SOMMAIRE

IV.5 analyse des surfaces usinées	61
IV-6 Conclusions de l'analyse expérimentale de la coupe.....	62
Conclusion générale	63
Perspectives.....	65
Références bibliographiques.....	66

Nomenclature

a_p	Profondeur de passe (m).
D ou D_i	Diamètre de la pièce (mm).
f	Avance (mm.tr ⁻¹).
N	Vitesse de rotation de la broche (tr.min ⁻¹).
V_c	Vitesse de coupe (m.s ⁻¹).
r_ε	Rayon de bec (mm).
α	Angle de dépouille (rd).
β	Angle de taillant (rd).
δ	Paramètre définissant l'épaisseur du cisaillement secondaire
φ	Angle de cisaillement primaire (rd).
γ	Angle de coupe (rd).
S	Surface de contact (m ²).
T	Température de la matière (°C).
L	Longueur de la plaquette (mm).
ZI	Zone de cisaillement primaire
ZII	Zone de cisaillement secondaire
ZIII	Zone de cisaillement tertiaire
Ra	Rugosité (μm)
(HV)	Dureté de Vickers
VB	Usure en dépouille
KT	Usure en cratère
C	Carbone
WC	Carbure de tungstène
Co	Cobalt
Ti	Titane
MEB	Microscope à balayage électronique

Introduction générale

La surface de l'outil en contact avec le copeau subit diverses formes d'usure qui sont le résultat de mécanismes telles que l'adhésion, l'abrasion et la diffusion. La qualité de la surface usinée ainsi que la durée de vie des outils dépend largement des conditions dans lesquelles s'effectue la coupe. L'interface outil copeau qui est générée lors d'un processus d'usinage par enlèvement de matière est un lieu d'interactions complexes entre phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques.

En particulier, l'emploi de fluides de coupe est un paramètre important puisqu'il permet de limiter l'élévation de la température dans les zones de coupe cependant, dans le souci de protection de l'environnement et de la santé des opérateurs, la tendance actuelle est de limiter, et même de supprimer, l'emploi des lubrifiants.

Dans le cas de l'usinage des structures en alliage métallique, la suppression des fluides de coupe est très néfaste car l'outil voit sa géométrie modifiée par la présence de dépôts sur la face de coupe.

Dans l'industrie, les méthodes d'optimisation sont encore largement basées sur les connaissances acquises au cours des années et sur des essais longs et coûteux. Mais avant de mettre en place des solutions ou de développer des modèles, il est nécessaire de caractériser de manière précise les différents modes d'endommagement et de maîtriser tous les facteurs qui conduisent à l'usure des outils. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail. Il s'applique en particulier à l'usinage à sec de l'alliage XC18 (C22) avec des outils carbure de tungstène (P10) et (P35).

Les mécanismes de dégradation de surface étant très sensibles aux conditions de sollicitations, à l'interface outil-copeau (température).

L'étude se propose de fournir les éléments nécessaires à la compréhension des mécanismes d'endommagement et se présente comme un travail préparatoire aux méthodes d'optimisation.

Dans le Chapitre I, nous avons présenté les principaux mécanismes associés à la coupe des métaux, notamment les sollicitations thermiques et mécaniques qui existaient à l'interface outil-copeau.

Le Chapitre II est consacré aux différents mécanismes d'endommagement des outils qui ont lieu lors d'une opération de coupe. Un état des lieux des connaissances des modes d'endommagement dans le cas de l'usinage à sec des alliages a été alors établi.

Le Chapitre III présente le dispositif expérimental mis en place dans le laboratoire. Il permet de visualiser la formation du copeau en temps réel, de mesurer le flux de chaleur transmis dans l'outil.

Dans le Chapitre IV, nous avons effectués des essais d'usure dans une large gamme de conditions de coupe. Les résultats expérimentaux ont servi à déterminer les distributions de la température à l'interface outil-copeau.

En conclusion, nous avons dressé un bilan des résultats obtenus et nous avons proposé quelques perspectives d'études pouvant donner suite aux travaux déjà réalisés.

L'objectif final était de développer des solutions technologiques permettant de répondre aux spécifications des industriels utilisateurs et de comprendre les relations qui existaient entre les différents paramètres caractérisant le contact et d'analyser l'influence des conditions de coupe sur ces paramètres.

Chapitre (I)

Présentation de l'usinage par enlèvement de matière

I.1 Introduction

Les nécessités d'une production largement accrue, la disponibilité des matériaux plus facilement utilisables (métal) entraînent naturellement une mécanisation plus poussée.

C'est seulement à partir du milieu du XVIII^e siècle, qu'on a pensé à relier directement l'outil à la machine qui, auparavant, n'était destinée qu'à donner le mouvement nécessaire.

Dans le domaine industriel, les progrès consistent à automatiser davantage les machines existantes. La machine-outil connaît un véritable développement, surtout aux Etats-Unis ; en effet, elle facilite beaucoup la fabrication des pièces qui entrent dans les machines.

L'usinage par enlèvement de matière est réalisé avec le déplacement d'un outil coupant par rapport à la pièce. Généralement, les machines-outils permettent de générer deux mouvements distincts : le mouvement de coupe défini par la trajectoire et la vitesse de coupe et, le mouvement d'avance définie par la trajectoire et la vitesse d'avance. Ces deux mouvements peuvent êtres appliqués à l'outil, à la pièce ou aux deux.

En tournage (Fig.I.1) le mouvement de coupe (M_c) est appliqué à la pièce avec une trajectoire circulaire et une fréquence de rotation définissant la vitesse de coupe (V_c). Le mouvement d'avance (M_f) est appliqué à l'outil avec une trajectoire coplanaire et une vitesse d'avance sur une matière donnée, la formation du copeau dépend de la géométrie de l'outil et des paramètres de coupe.

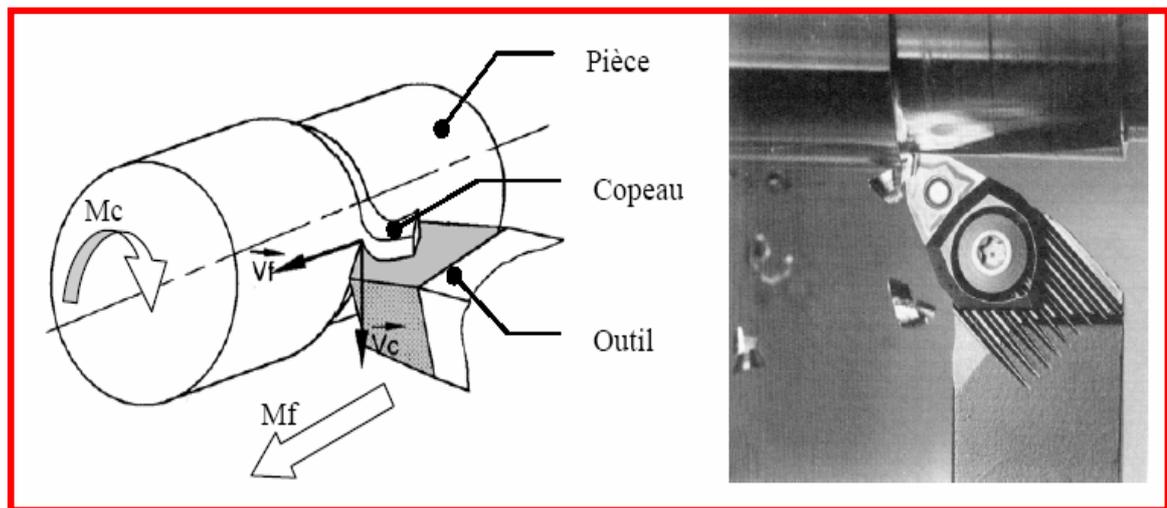


Figure (I.1) Opération de chariotage en tournage [1]

La figure (Fig. I.2) montre l'emplacement de la face de dépouille et de coupe ainsi que l'arête principale et l'arête secondaire sur un outil de chariotage.

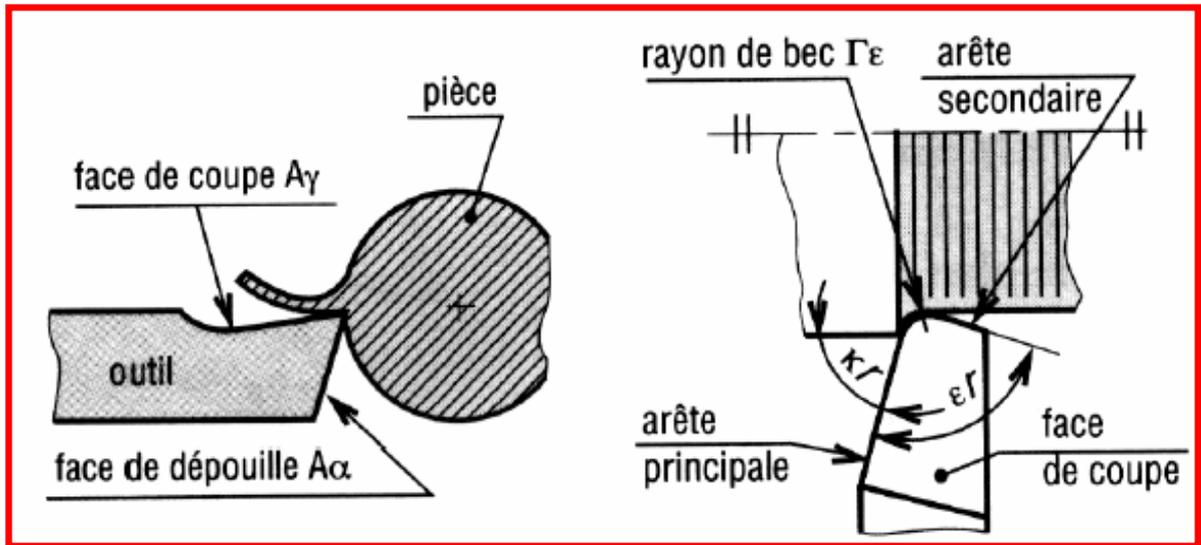


Figure (I.2) Représentation des faces et des arêtes d'un outil de chariotage [1]

Ces surfaces sont orientées dans l'espace à l'aide des plans d'outil normalisés (Fig.I.3)

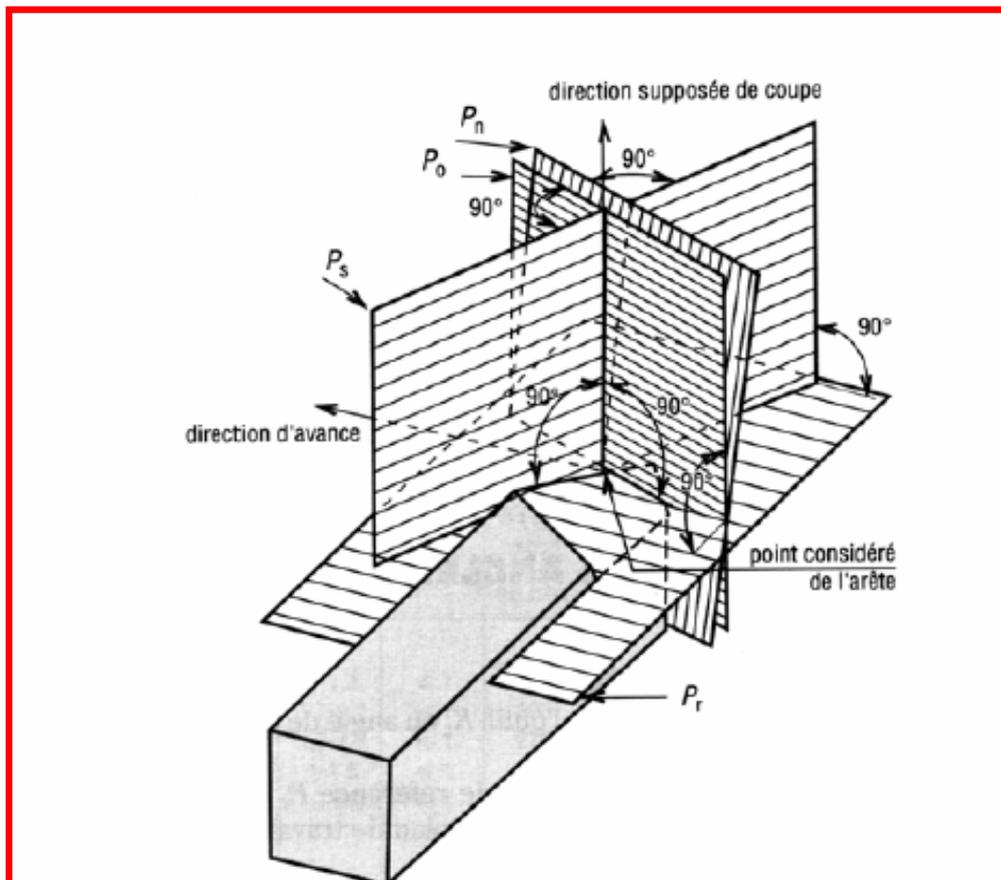


Figure (I.3) Plans d'outil en main sur un outil de chariotage d'après la norme NF E 66-503[1].

I.2 Formation du copeau

L'étude de la formation du copeau est assez délicate car la zone d'étude est très petite (quelques dizaines de millimètres carré) et les phénomènes thermomécaniques sont extrêmement violents, et localisés sur des bandes de quelques micromètres. Estime le taux de déformation dans la zone primaire (I) supérieur à 2 unités avec des vitesses de déformation de 10^4 à 10^6 S⁻¹. Il estime à plus de 400 °C l'échauffement dans cette zone dû au cisaillement intense de la matière et à plus de 800 °C l'échauffement de la zone secondaire (II) dû au frottement outil / copeau. Ces conditions extrêmes rendent donc les mesures extrêmement délicates à réaliser et beaucoup d'inconnues persistent.

Pendant la coupe, seules des valeurs macroscopiques comme les trois composantes de l'effort de coupe, la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance par tour peuvent être mesurées assez simplement.

L'aspect thermique peut être estimé en mesurant le flux thermique dans l'outil et en utilisant des caméras thermiques proches infrarouges qui permettent d'estimer le champ de température de la zone de coupe [1].

L'étude de l'intégrité de surface de la pièce (rugosité, contraintes résiduelles, écrouissage...), du copeau (morphologie, transformations microstructurales...) et l'outil (usure, dépôt métallique...) donne des indications supplémentaires sur la formation du copeau (Fig.I.4.)

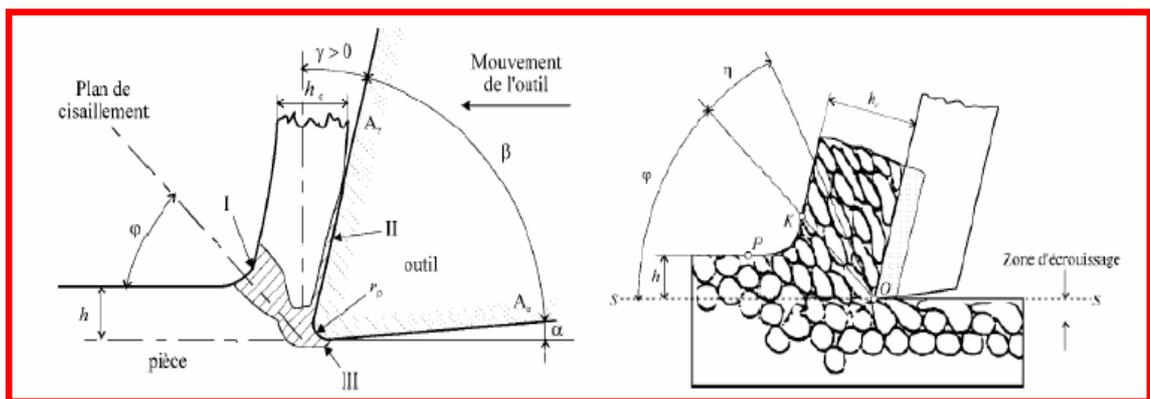


Figure (I.4) Zones de déformations lors de la formation du copeau. [1]

La compréhension des différents phénomènes qui interviennent lors du tournage est complexe et pas encore maîtrisée. La force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, une forte compression de la matière (une déformation plastique et un échauffement considérable) et engendre une zone de cisaillement intense entre la pointe de l'outil

et la surface externe du copeau. Cette zone est appelée zone de cisaillement primaire (ZI) et c'est aussi la zone de formation de copeau. En outre, le copeau formé s'écoule et frotte sur la face de coupe de l'outil. Ce frottement intense génère la zone de cisaillement secondaire (ZII) Cette dernière est constituée d'une fine bande de frottement intense entre le copeau et l'outil et d'une autre bande d'influence du frottement du copeau sur l'outil (cisaillement secondaire). De plus, pendant l'avance de l'outil, la face en dépouille de ce dernier frotte sur la nouvelle surface et produit une troisième zone de cisaillement nommée zone de cisaillement tertiaire ZIII. [2]

Ainsi et comme le montre la (Fig.I.5), la formation du copeau peut être décrite en définissant différentes zones d'absorption de l'énergie mécanique apportée lors de la coupe, une zone de forte pression hydrostatique au niveau de la pointe de l'outil et les trois zones de cisaillement citées précédemment.

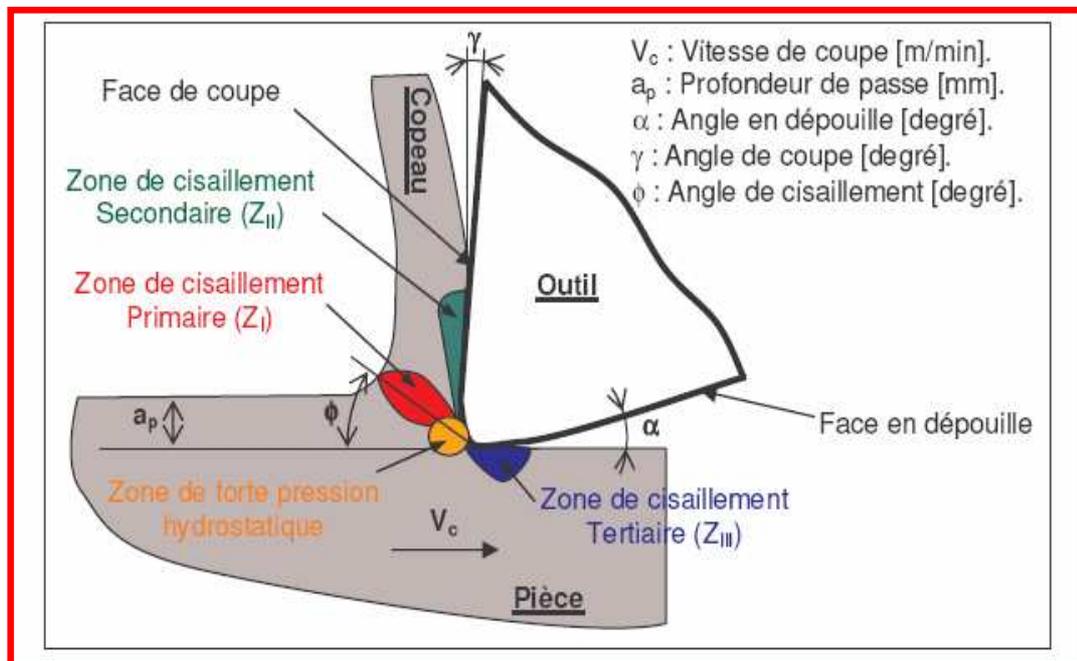


Figure (I. 5) Les différentes zones de déformation lors de la formation d'un copeau [2]

Le phénomène complexe de formation de copeau dépend également de :

- ☒ La rhéologie du matériau usiné (matériau dur, matériau à usinabilité amélioré ...etc.) ;
- ☒ Les propriétés thermo-physiques du matériau usiné et usinant ;
- ☒ La nature et la géométrie de l'outil;
- ☒ La nature du contact outil-copeau ;
- ☒ La nature de l'opération effectuée (chariotage, coupe orthogonale, ...etc.) ;
- ☒ Procédé d'usinage utilisé (usinage dur, usinage avec assistance ...etc.).

I.3 La mise en forme par enlèvement de matière

La mise en forme par enlèvement de matière est un procédé d'élaboration de pièce mécanique. Un outil de coupe enlève de la matière à une pièce dans le but de générer une nouvelle surface. Il existe différents types de configurations : la coupe orthogonale, la coupe oblique, la coupe tridimensionnelle. Ces différentes configurations sont appliquées aux procédés d'usinage tels que le rabotage, le tournage, le fraisage, le perçage, etc. [3]

I.4 Le tournage

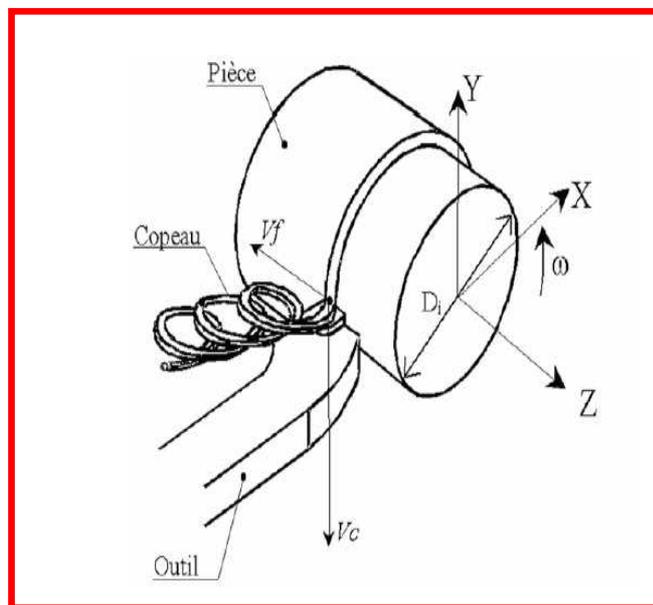


Figure (I. 6) Opération de tournage [3]

L'opération de tournage (fig. I.6) est rencontrée lorsque la pièce est animée d'un mouvement de rotation et que l'outil se déplace en translation (dans une ou deux directions) afin de générer les surfaces désirées.

I.4.1 Principe du tournage

I.4.2 Opérations de base

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, quatre opérations de base (fig. I.7) :

- ☒ Tournage longitudinal, ou chariotage;
- ☒ Dressage;
- ☒ Tournage de cônes;
- ☒ Contour nage;

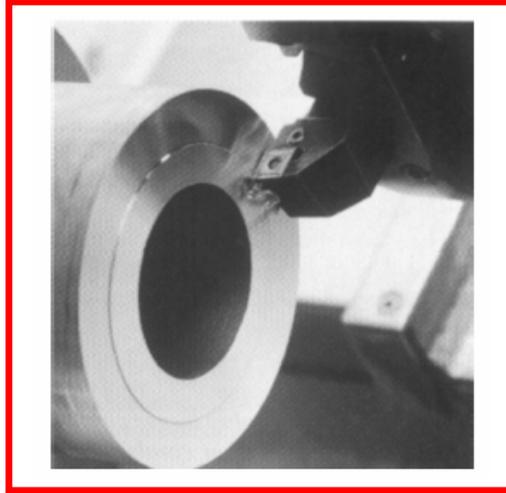


Figure (I.7) Dressage d'un tube [3]

En chariotage, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.

En dressage, le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe (fig.I.7).

En combinant les deux types de déplacements précédents (avance de l'outil en translation rectiligne oblique/axe), on génère des cônes de révolution. Enfin, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil de contour nage), on peut obtenir une forme de révolution quelconque. Les tours à commandes numériques de contournage permettent de suivre de tels profils, définis géométriquement par des combinaisons d'éléments simples (segments, cercles...) ou analytiquement par une fonction, ou encore point par point dans le cas de profils non définis mathématiquement.

I.4.2 Les paramètres de coupe

L'introduction des paramètres de coupe est indispensable pour la suite de l'étude car ce sont eux qui conditionnent la modélisation des phénomènes physiques rencontrés lors de la coupe.

I.4.3 La vitesse de coupe

La vitesse de coupe (figure I-1) notée V_c est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce.

La vitesse de rotation de la pièce est définie par:[3]

$$N = \frac{100 \times V_c}{\pi \times D} \quad (I.1)$$

Où D (mm) est le diamètre final de la pièce

I.4.4 La profondeur de passe

La profondeur de passe (fig. I.8) notée a_p , correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage.

I.4.5 l'avance

L'avance (fig. I.8) notée f , correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage).

La profondeur de passe et l'avance vont influencer aussi la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière.

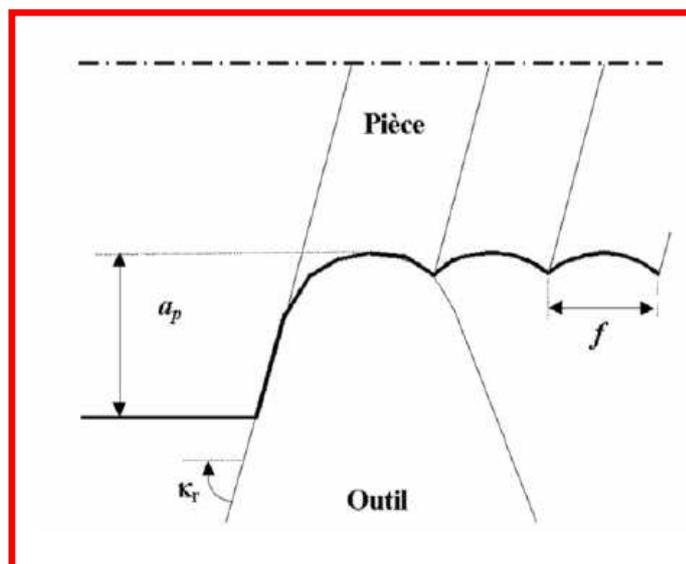


Figure (I.8) a_p et f en tournage [3]

I. 5 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)

I.5.1 Vitesse de coupe

La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe, ce paramètre aura une très grande influence sur l'usure

I.5.2 Avance

Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe, et diminuent la durée de vie de l'outil,

I.5.3 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,

I.5.4 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),

I.5.5 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.

I.6 Endommagement des outils de coupe

I.6.1 Introduction

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grande vitesse, consiste à trouver les conditions de coupe en tournage, en établissant un compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils

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 la 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 toute 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.

Dans l'usinage des métaux, on constate que la forme géométrique et l'état physique de l'outil sont modifiés par l'action combinée des forces de coupe et par la température atteinte par le tranchant. Ces modifications qui augmentent progressivement avec la durée d'usinage, sont couramment regroupées sous le terme usure de l'outil.

Les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par des modifications d'aspect visibles à l'œil nu ou à l'aide d'un microscope.

Le travail mécanique fourni pour créer un copeau est presque intégralement transformé en chaleur. L'élévation de température qui en résulte est l'une des causes majeures de l'endommagement de l'outil.

I.6.2 Les outils

L'outil de coupe est l'élément qui enlève la matière. Il existe une très grande variété d'outils de coupe : différents type de géométries, de matériaux et de revêtements.

Les outils ont connu une évolution importante. L'industrie est passée de l'outil monobloc en acier rapide à l'outil à plaquettes carbures rapportées évitant ainsi les ré-affutages nombreux et coûteux. Aujourd'hui, ce sont les plaquettes carbures revêtues qui se développent.

I.6.3 Choix d'un outil de coupe à plaquette rapportée

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe.

Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance.

☒ **Systèmes de fixation de la plaquette**

Il existe, dans la gamme Sandvik-Coromant, deux types principaux de systèmes de fixation de plaquettes.

- Tmax U (figure I.9 a) : fixation par vis centrale, plus particulièrement destinée à la finition, avec des plaquettes à géométrie positive.
- Tmax P (figure I.9 b) : robuste fixation par levier ou bride-coin adaptée à l'ébauche pour utilisation de plaquettes à géométrie négative.

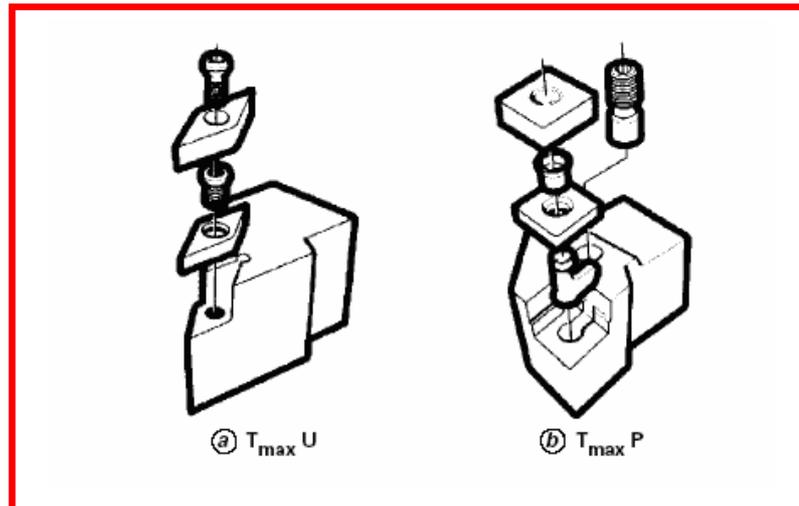


Figure (I.9) Systèmes de fixation de la plaquette [3]

I.6.4 Matières de la plaquette

Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont les suivantes (fig.I.10)

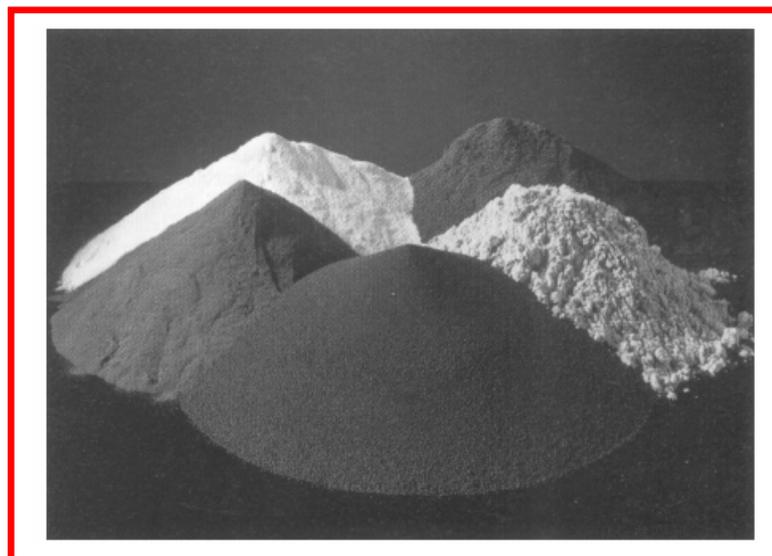


Figure (I.10) Carbures non revêtus [3]

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

Ces carbures non revêtus sont aujourd'hui utilisés dans des opérations spéciales, hors du domaine standard.

- ☒ **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.13).

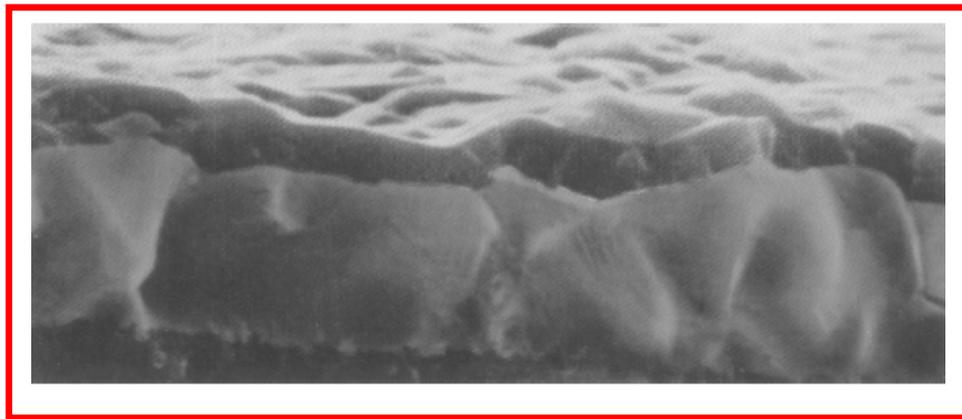


Figure (I.11) Carbures revêtus [3]

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.

- ☒ **Les cermets** sont des carbures à base de titane, liés au nickel et/ ou au cobalt. 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 (fig.I.12).

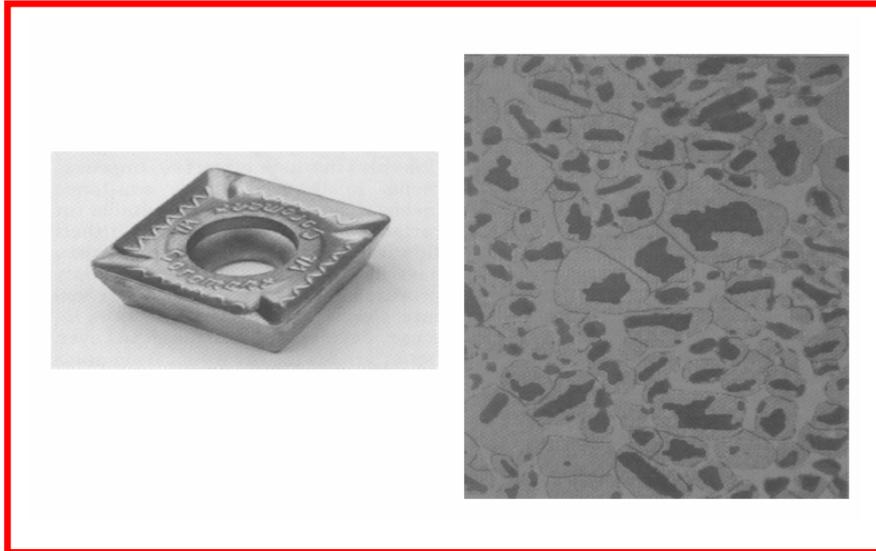


Figure (I.12) Cermets [3]

☒ **Les céramiques (CC)** (fig.I.13) 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.

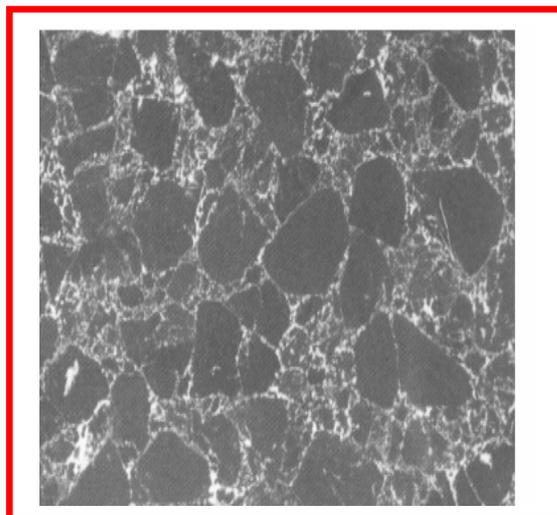


Figure (I.13) Céramiques [3]

I.7 forme d'usure

Le frottement copeau-outil donne lieu à des phénomènes de grippage et d'arrachement, ce qui correspond à l'usure adhésive. A partir d'une certaine vitesse, donc d'une certaine température correspondant à l'apparition d'une couche de glissement facile et d'une arête rapportée, l'usure adhésive (Fig.I.14) devient moins importante et se traduit par un changement de pente sur la courbe. Si l'on augmente la vitesse de coupe, le mécanisme d'usure par diffusion entre alors en jeu. Avec l'intensification des effets thermiques, il peut apparaître une usure par effet d'oxydation, l'amélioration relative apportée par l'apparition de la couche de glissement facile se trouve alors neutralisée. Si l'on augmente encore la vitesse, l'usure par diffusion croît de façon très importante.

Effets mécaniques et l'usure par effets physico- chimiques.

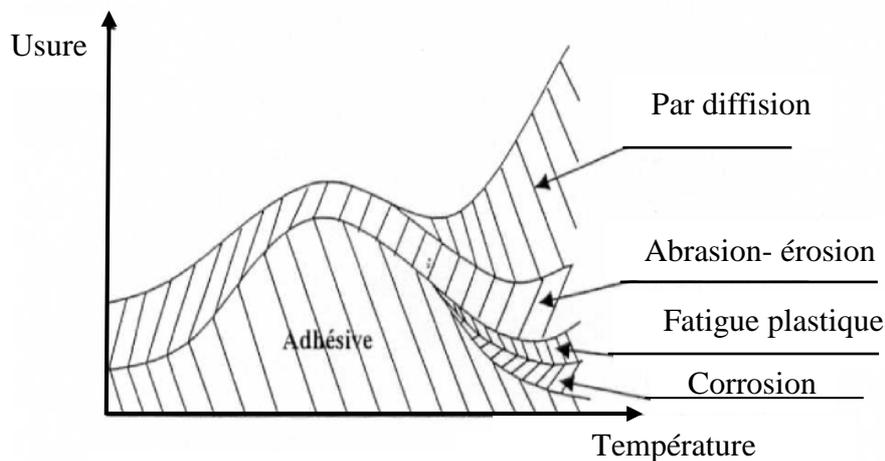


Figure (I.14) Phénomène d'usure [4]

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent essentiellement de la nature de l'outil, du matériau usiné, des conditions de coupe et du type d'usinage. De manière habituelle, pour des outils usuels, les formes suivantes sont décrites.

I.7.1 L'usure en dépouille ou usure frontale

Elle est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête, et elle est caractérisée par la largeur moyenne de cette bande VB (fig.I.15). Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante à considérer, puisqu'elle détermine la précision dimensionnelle et l'état de surface de la pièce usinée.

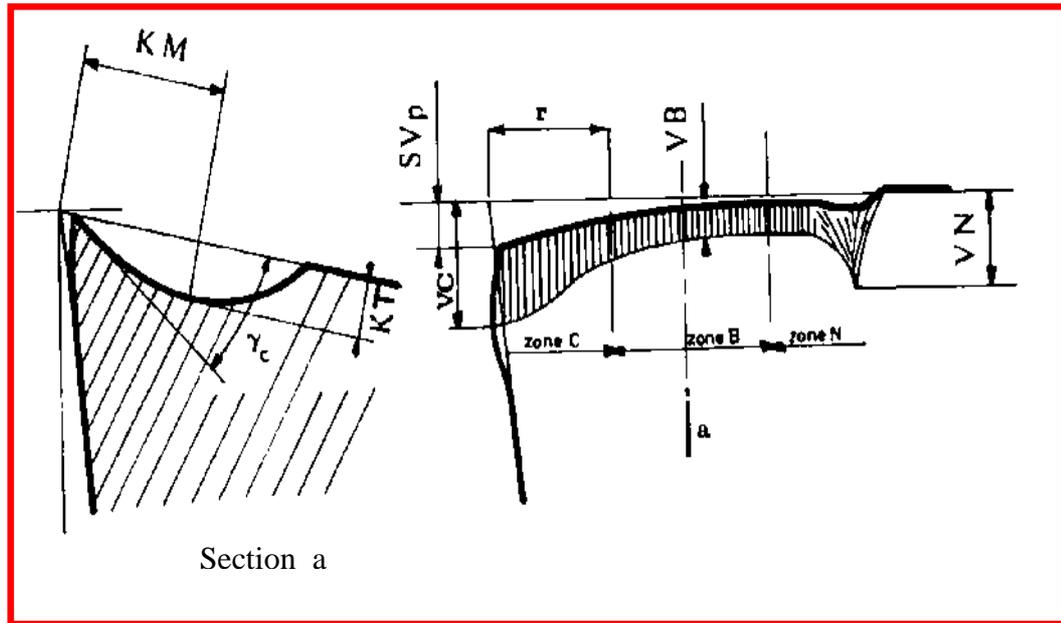


Figure (I.15) Formes d'usure des outils de coupe [5]

I.7.2 La cratérisation de la face d'attaque

Elle est caractérisée par une cuvette formée sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau. Au cours de l'usure, les dimensions et la profondeur KT de même que la position du cratère évoluent et influent en particulier sur le rayon d'enroulement du copeau ; le flanc arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'une brise copeau naturel.

I.7.3 Entaille

Pour certains outils, et dans certaines conditions de coupe, il se produit une entaille sur l'arête tranchante, à la hauteur du diamètre périphérique de la pièce. Ce phénomène est dû au mode d'évacuation de l'arête rapportée. Au niveau de cette entaille, les conditions de coupe devenant mauvaises, le refoulement de matière sur la périphérie de la pièce provoque une auto - accélération du phénomène. L'entaille peut alors atteindre une valeur VN (fig.I.15) importante par rapport à la valeur VB de la largeur de bande d'usure frontale, et affaiblir considérablement le bec de l'outil.

I.7.4 Ebréchures et fissuration d'arête

Dans le cas des usinages avec chocs, mécaniques ou thermiques, ou avec des variations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures et d'ébréchures sur l'arête de coupe qui diminuent considérablement la vie de l'outil(Fig.I.16).

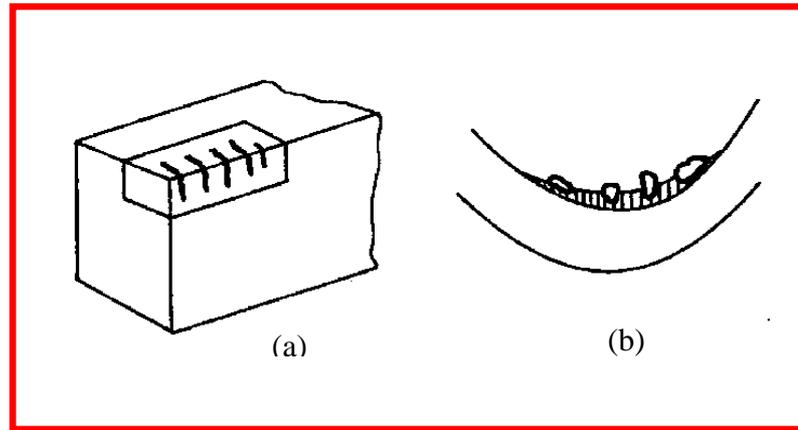


Figure (I.16) (a) : Fissuration d'arête, (b): ébréchure d'arête [5]

I.7.5 Critères d'usure et durée de vie des outils

I.7.5.1 Critères de surveillance de l'usure

L'usure est souvent définie comme la quantité de matière perdue par l'outil. Lorsque que l'usure se caractérise par la formation d'un cratère (formé par abrasion, adhésion ou diffusion) sur la face de coupe ou l'apparition de bandes striées sur la face en dépouille, des critères de durée de vie peuvent être établis à partir d'observations directes sur l'outil.

Sur la face de coupe, deux mesures sont habituellement faites pour évaluer le niveau de l'usure en cratère. La première est la profondeur du cratère notée KT et la deuxième est la distance du centre du cratère à partir de l'arête de l'outil notée KM (Fig.I.17).

Le frottement de la pièce contre la face en dépouille fait apparaître une zone d'usure frontale, dont la hauteur VB est plus ou moins régulière. Une entaille de hauteur VN peut également apparaître sur l'arête tranchante de l'outil affaiblissant considérablement cette dernière.

Il est également possible d'évaluer l'état d'endommagement d'un outil de coupe à partir de critères indirects basés sur les performances ou la qualité de l'usinage. Ainsi, l'état de surface et les tolérances géométriques des pièces peuvent servir d'indicateurs du niveau d'usure.

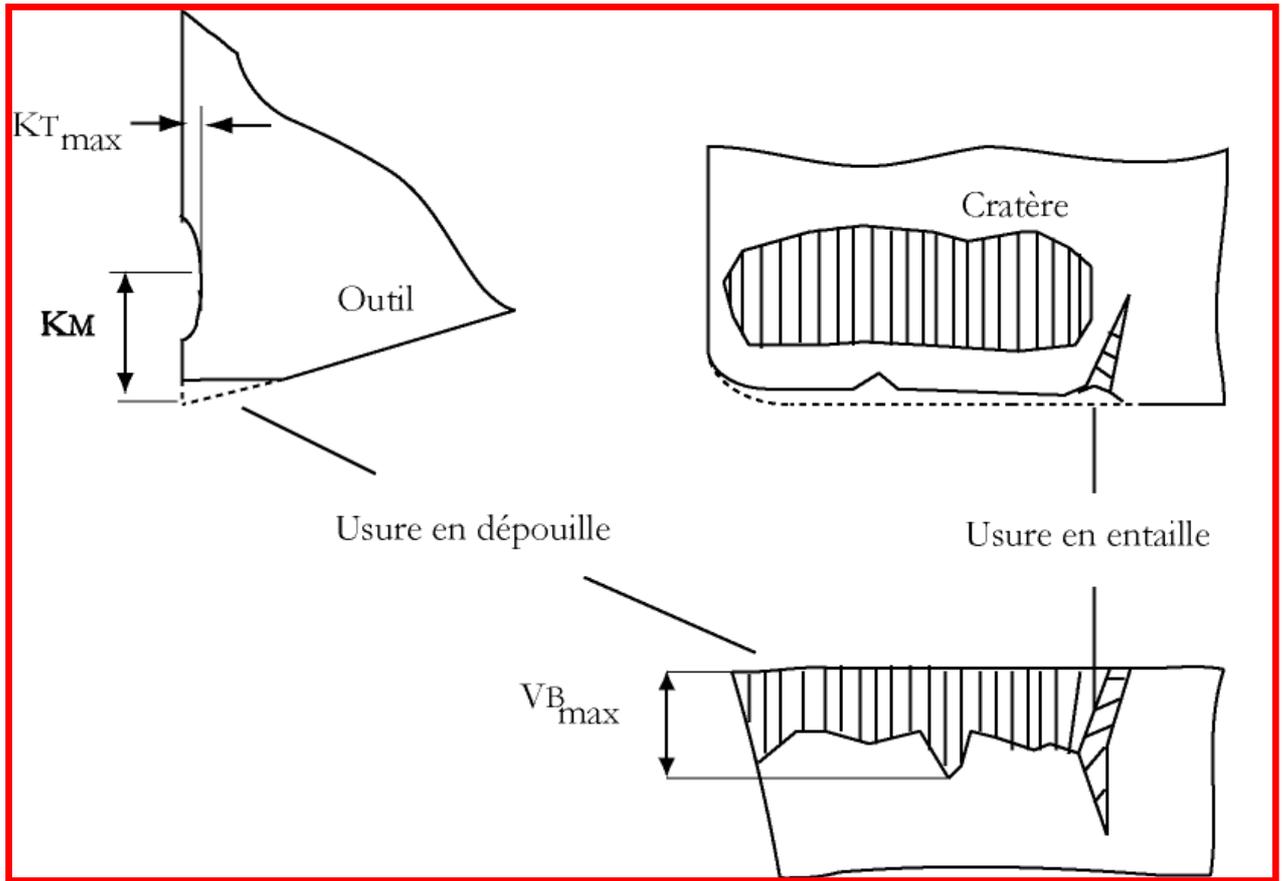
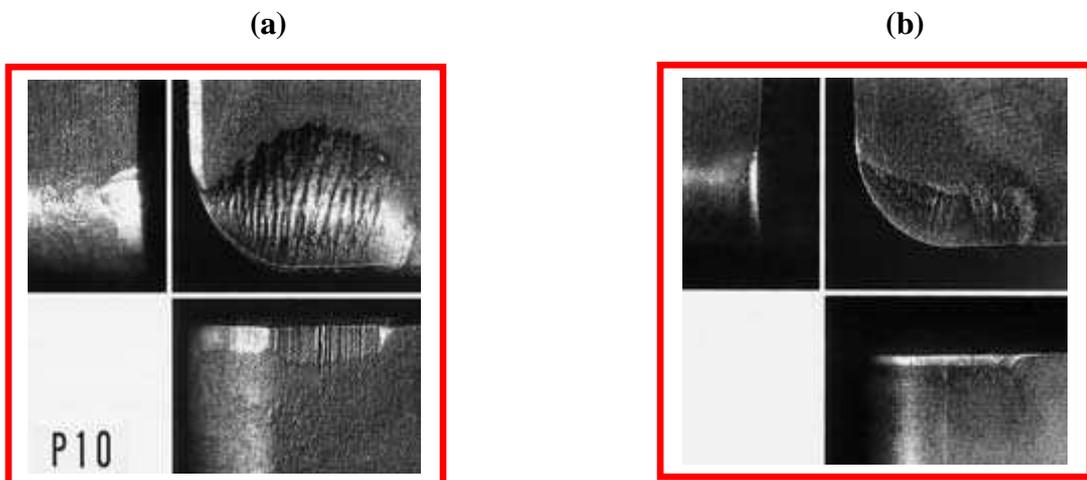


Figure (I.17) Manifestation et mesures des usures. [4]

D'autres systèmes de surveillance sont également mis au point pour informer l'opérateur sur l'état d'endommagement de l'outil (Fig.I.18, a, b, c, d). au cours de l'usinage. Ils sont basés sur le contrôle de l'évolution des efforts de coupe ou de la température mesurée dans les zones de coupe. Ces dernières années, des méthodes de surveillance d'usure par l'étude des signaux d'émission acoustique se sont également développées. Les signaux étudiés proviennent des ondes générées par la libération brutale d'énergie durant la déformation de matière, [4].



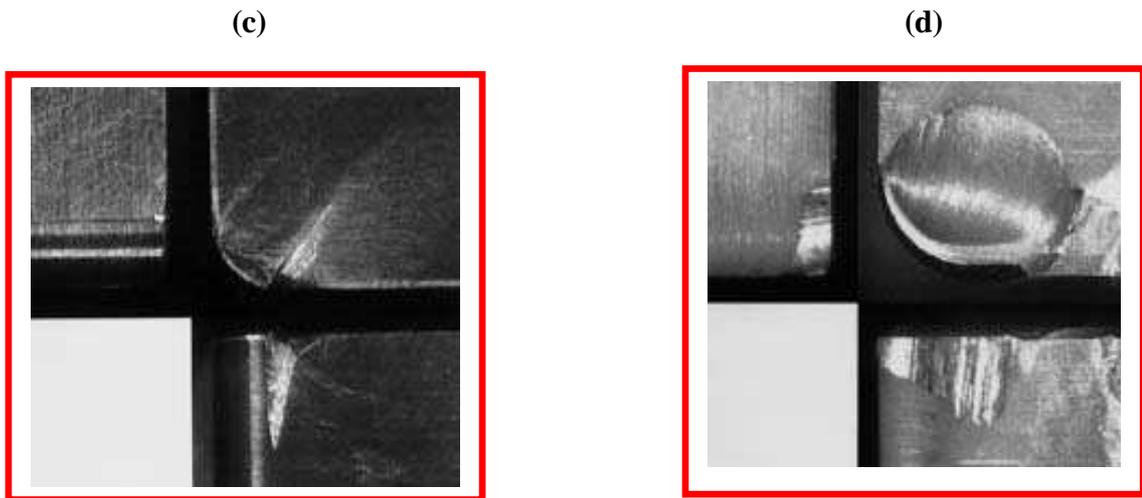


Figure (I.18, a, b, c, d) Usure en dépouille et en cratère [7]

I.8 Caractéristiques des surfaces usinées

I.8.1 Etat métallurgique de la surface

La formation du copeau à grande vitesse génère sur la surface usinée (Fig.I.19), des contraintes résiduelles dues à la faible proportion de matériau déformé plastiquement sur la surface usinée

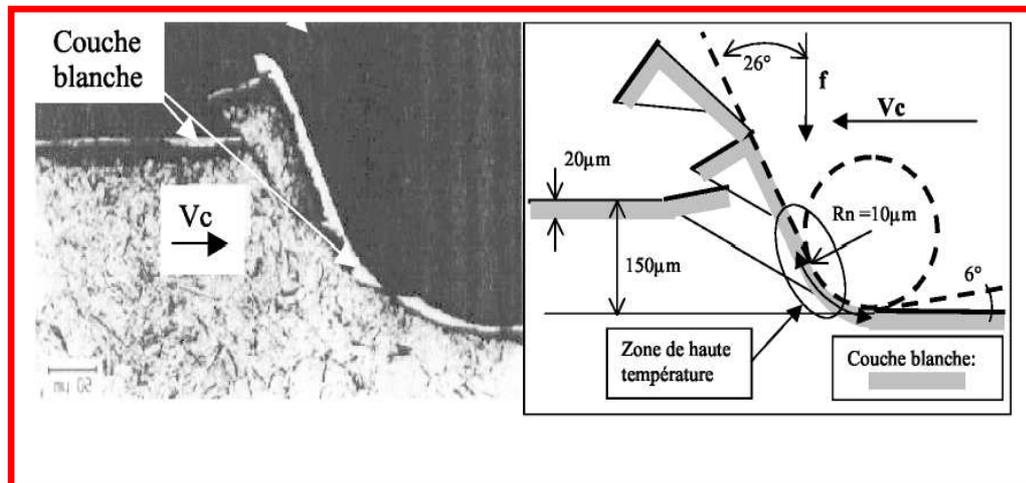


Figure (I.19) Etude géométrique de la couche blanche [5]

La zone de haute température produit un matériau (austénite) ramolli qui dans certains cas, flue à la fois vers le haut et sous l'outil. Les conséquences de ce phénomène sont :

- une surface finie modelée par l'outil
- une couche superficielle trempée par l'air ambiant (martensite pour les aciers).

I.8.2 Etats de surface

L'acier à l'état durci est aujourd'hui fini dans des conditions qui conduisent à des surfaces comparables à celles de la finition précise (R_a de 0.2 à 0.4 μm). Ceci est dû à la disponibilité de céramiques et de CBN de qualité et à des machines outil de grande rigidité.

Pour produire des surfaces de bonne qualité avec des avances par tour raisonnables, il faut un outil de grand rayon de bec. La rugosité théorique totale, indépendante de la profondeur de passe, est $R_t = f_2 / 8R_e$. Une bonne approximation de la rugosité arithmétique moyenne est $R_a = f_2 / 32 R_e$.

Tous les rapports d'expériences montrent que l'état de la surface usiné s'améliore avec la vitesse de coupe. La figure (I.20) illustre ces observations pour des vitesses classiques. Les états pratiques mesurés sont très voisins de la rugosité théorique calculée avec la géométrie de l'outil et de l'avance. [5]

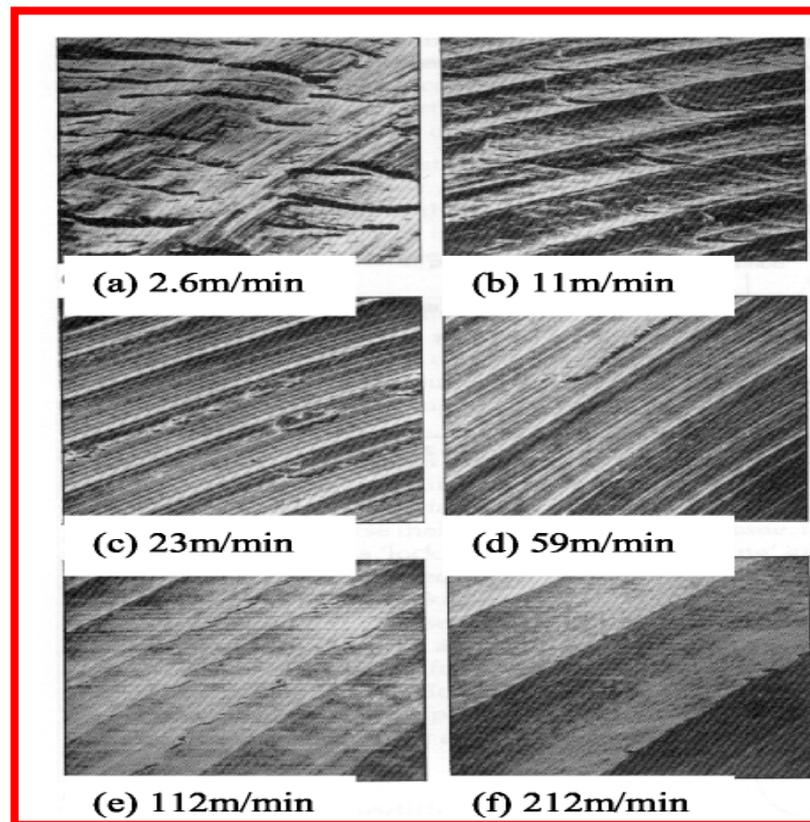


Figure (I.20) Micro géométries de surface pour diverses vitesses de coupe [5]

I.8.3 Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles dans une structure sont les contraintes qui existent en l'absence de toute sollicitation extérieure. Les processus de fabrication sont souvent à l'origine de contraintes

résiduelles. Les effets de ces contraintes peuvent s'ajouter ou se retrancher aux contraintes de service selon leur amplitude, leur signe et leur répartition

Les effets de ces contraintes sont souvent préjudiciables. Elles constituent alors un facteur d'endommagement et de mauvaise tenue en fatigue des pièces. C'est pourquoi la mesure de leurs valeurs avec ce nouveau procédé de fabrication qu'est le tournage dur présente de l'intérêt.

Une augmentation des vitesses peut conduire à la production de contraintes résiduelle importantes en liaison avec les contraintes mécaniques élevées générées sur les surfaces lors de l'usinage. De plus, les forces transversales augmentent avec l'usure des outils.

Les températures associées au frottement augmentent en provoquant une contrainte de traction résiduelle au voisinage de la surface de la pièce usinée et des contraintes de compression dans la zone la plus profonde de la surface (fig. I.21).

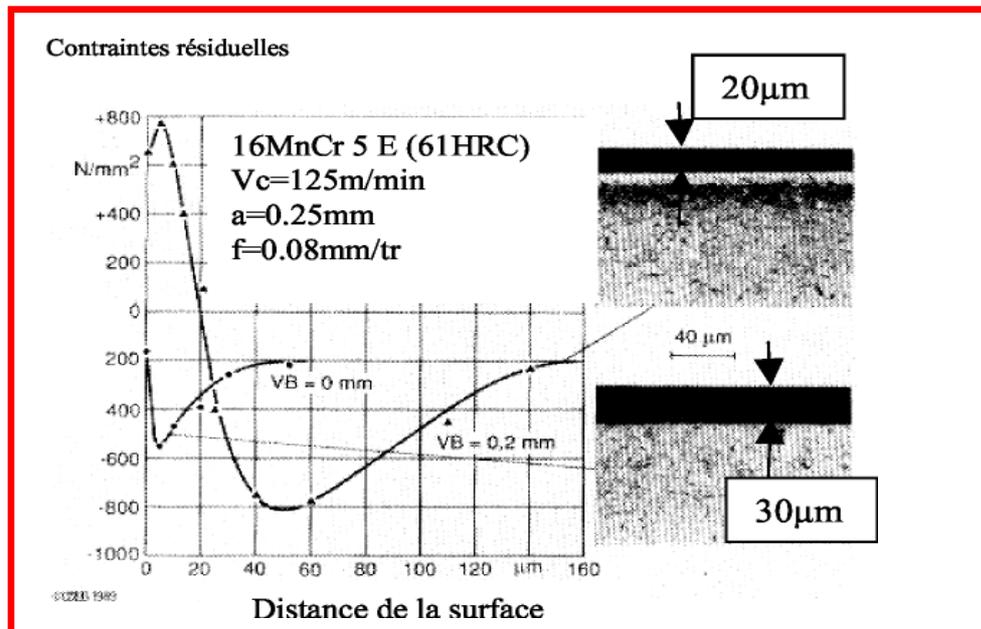


Figure (I.21) Contraintes résiduelles en sous-couche [6]

Confirme l'effet de l'usure sur la surface usinée en tournage dur. On observe ici une couche trempée de $20\mu\text{m}$ et de $30\mu\text{m}$. L'état de contrainte est également donné pour deux valeurs de l'usure d'outil repérée par l'usure sur la surface en dépouille VB. [6]

Chapitre (II)

Méthodologie d'étude expérimentale de la Coupe

II .1 Chaleur et température

II.1.1 Sources de chaleur

La température a des effets importants sur les efforts de coupe et l'usure des outils, l'aspect thermique de la coupe a donc été largement étudié depuis de nombreuses années. Pourtant, à cause de la complexité des phénomènes mis en jeu en usinage, il est très difficile de prédire l'intensité et la distribution des sources de chaleur. Les processus mécaniques et thermiques sont extrêmement couplés, en particulier parce que les propriétés des matériaux varient avec la température. On indique souvent que 90 à 100 % de l'énergie mécanique consommée est finalement convertie en énergie thermique, Les principales sources de chaleur proviennent :

- des déformations plastiques des zones de cisaillement primaire et secondaire ;
- de la dissipation du frottement générée à l'interface outil-copeau et entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée de la pièce. La chaleur ainsi créée va se répartir dans les différentes parties de l'outil, de la pièce et du copeau (Fig. II.1). Le transfert de chaleur dans le copeau et dans la pièce s'effectue majoritairement par transport alors que dans l'outil le transfert s'effectue principalement par diffusion. De fait, la répartition des flux ne se fait pas de manière équivalente et dépend bien sûr des conditions de coupe et des propriétés thermiques des matériaux. Seul un faible pourcentage de la chaleur générée est transmis à l'outil et la pièce, la majorité étant évacuée par le copeau [6]

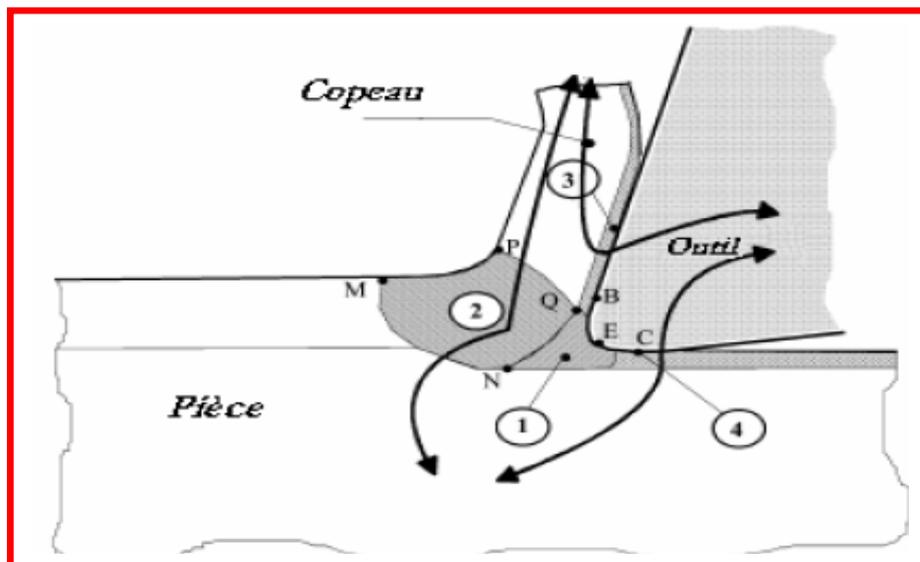


Figure (II.1) Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur, [6].

II.2 Mesure de la température

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'élévation de température en usinage [8] l'utilisation de thermocouples, la caméra infrarouge, l'analyse métallographique, l'utilisation de poudres fines à température de fusion constante et l'emploi de peintures thermosensibles, appliquées à l'usinage.

La technique des thermocouples s'utilise de deux façons différentes :

- ☒ avec des thermocouples de faibles dimensions insérés dans l'outil de coupe ;
- ☒ en utilisant le thermocouple naturel formé par la pièce et l'outil eux-mêmes.

Bien qu'assez simple d'utilisation, les techniques des thermocouples restait imprécises et ne permettent d'obtenir qu'une température moyenne à l'interface outil copeau. Pour avoir une information complète sur la distribution de la température d'autres techniques doivent être envisagées.

II.2.1 Mesure de température par la méthode optique

Les techniques les plus répandues sont le pyromètre optique, la caméra infrarouge et la caméra proche infrarouge.

Le pyromètre est une technique basée sur l'émission d'onde électromagnétique.

Le principe consiste à comparer deux énergies (dans la même bande de longueur d'onde) : celle émise par le corps chauffé à celle émise par une source étalon. L'étalonnage d'un pyromètre se fait à l'aide d'un corps noir.

Il existe plusieurs types de pyromètres ; ici nous ne parlerons que des pyromètres mono et bi chromatique.

La technologie CCD-Proche Infrarouge (CCD-PIR) a été adaptée au tournage pour la première fois à l'ENSAM de Paris par Le Calvez 1995 [6]. Ce dernier utilise une seule caméra pour observer la face latérale de coupe. L'analyse thermique a permis de montrer avec précision l'évolution et la position du point chaud en fonction des conditions de coupe, de la dureté du matériau et des différentes plaquettes utilisées.

II.3 Méthodologie d'étude expérimentale de la coupe

Durant l'usinage, il est supposé que la majorité de la puissance mécanique mise en oeuvre se transforme en puissance thermique. Les zones de cisaillement (primaire, secondaire, et tertiaire) générées par la coupe sont le siège de production de chaleur. Les flux de chaleur issus de ces zones sources sont dissipés, d'une façon non équivalente, dans la pièce, l'outil de coupe, le copeau, et une partie minime est évacuée par l'air (Fig. II.2)

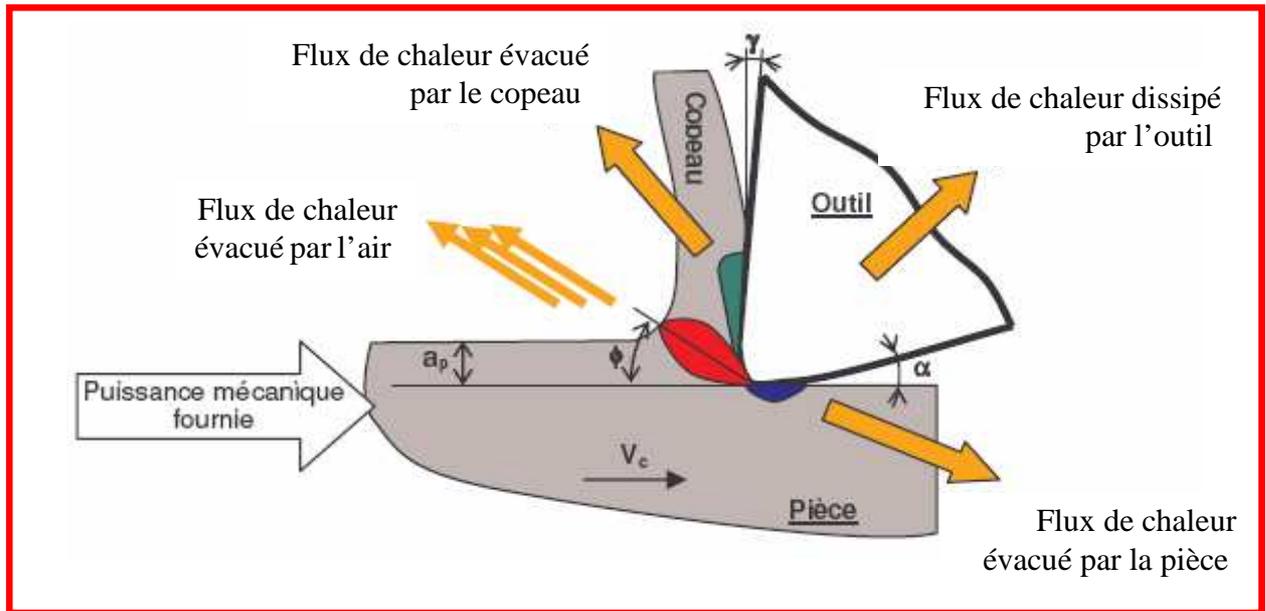


Figure (II.2) Distribution des flux de chaleur générés par une coupe orthogonale [6]

Lors de la coupe, la connaissance des phénomènes thermiques induits est primordiale pour la compréhension de la coupe et pour améliorer l'usinabilité de certains matériaux. De plus, ces températures influent sur le produit final (contraintes résiduelles, états de surfaces, tolérances géométriques ...).

II.3.1 Analyse thermique de la coupe

L'analyse de température dans la zone de coupe est très complexe et difficile. En effet, les forts gradients thermiques et le mouvement des différents antagonistes (pièce, outil, copeau) nécessitent d'avoir un système de mesure de température qui prend en compte toutes ces spécificités. Pour ce faire, il existe plusieurs méthodes permettant de remonter à la température de l'arête de coupe de l'outil. Dans ce qui suit, nous ferons un état de l'art sur quelques techniques permettant la détermination de la température à l'arête de coupe lors de l'usinage. Nous ne considérons que les techniques les plus utilisées en usinage. [8]

II.3.1.1 Mesures indirectes de température

En 1971, Rosseto et Al [8]. ont mesuré la température de coupe à l'aide d'un vernis thermosensible. Ce dernier est déposé sur l'outil et change de couleur à partir d'une valeur de température bien définie. La frontière entre deux couleurs présente l'isotherme. Casto 1989 a utilisé une méthode inspirée de celle mise en place par Rosseto et Al. Elle consiste à introduire une poudre, dont on connaît le point de fusion, entre deux parties d'une plaquette. Lorsque la température de fusion de la poudre est atteinte, l'essai est arrêté. Les points où la poudre a atteint son point de fusion matérialisent l'isotherme [8].

Dans le cas des aciers rapides, la cartographie de la température de l'outil peut être décrite par la mesure des microduretés dans le matériau. Après une calibration préalable duretés/températures, cette méthode propose de remonter à la distribution de la température dans l'outil par les mesures de microduretés à la fin des essais. Dans la même logique que cette dernière, Trent [9] propose de relier l'apparition de phases caractéristiques en fonction de la température sur le copeau et l'outil.

II.3.1.2 Mesures directes de température

II.3.1.2.1 Mesure de température de coupe par thermocouple

La mesure de la température par un thermocouple se base sur le principe suivant : si deux métaux sont soudés à leurs extrémités et si une de ces soudures est portée à une température bien déterminée, l'autre étant maintenue à une température différente, on observera alors une force électromotrice entre les deux jonctions. L'évaluation de cette force, qui dépend des matériaux utilisés, symbolise la température mesurée. L'avantage des thermocouples est la simplicité et la flexibilité de réalisation et d'utilisation pour de simple acquisition et ce à moindre coût.

Il existe plusieurs types de thermocouples, les plus répandus sont les thermocouples standard et dynamique. [9]

☒ Thermocouples dynamiques

Ce type de thermocouple est généralement utilisé en tribologie. Le principe est de prendre deux corps en mouvement relatif comme deux éléments d'un thermocouple. Cette méthode est nommée technique de Herbert-Gottwein [10].

Elle a été mise en oeuvre durant les années 20. Cette technique a été utilisée par Trigger 1948 pour estimer la température à l'interface outil-copeau pendant l'usinage. L'outil est utilisé comme un élément du thermocouple et la pièce comme étant le deuxième élément. A l'interface entre ces deux éléments, il y a formation d'une jonction qui par la suite jouera le rôle d'un thermocouple. Cette méthode a aussi été utilisée en meulage par Outwater et al et dans le cas de contact glissant de deux corps métalliques par Bowden Ling 1963 Furey 1964 [11].

☒ **Thermocouples incorporés (standard)**

Ce sont les plus utilisés pour l'évaluation de la température. En usinage, l'utilisation de ces thermocouples nécessite des perçages de trous dans lesquels les thermocouples sont insérés. Pour estimer la température dans la zone de coupe et d'établir la cartographie thermique dans l'outil, plusieurs auteurs Bittés 1993 Bouzid 1993 Le Calvez 1995 Abrão 1997 [6]. Ont eu recours aux thermocouples. Dans ce cas, on cherche à placer un ou plusieurs thermocouples au plus près de la zone sollicitée. L'avantage de cette méthode est la possibilité de les utiliser dans tous les procédés de coupe (avec ou sans lubrification). Bouzid 1993 a utilisé cette méthode avec succès pour l'évaluation de la cartographie thermique dans un outil carbure. Dans la suite de ces travaux, Le Calvez a optimisé le contact thermique entre le thermocouple et les parois des trous en utilisant une colle d'argent qui assure une bonne fixation des thermocouples (à 0,5 mm des faces de coupe et de dépouille) et une bonne conductivité thermique. Par contre, le temps de réponse (temps de réponse dans l'air agité est différent au temps de réponse dans l'air calme) de ces thermocouples n'autorise que l'analyse des régimes stationnaires. Comme pour Bouzid 1993, les résultats de Le Calvez 1995 ont permis de tracer une cartographie thermique dans l'outil en fonction des conditions de coupe. Ces résultats montrent que loin du point chaud, la température est faiblement sensible aux variations de vitesse et d'avance. Après comparaison avec d'autres techniques de mesure (pyromètre, caméra thermique ...), à une position de 0,5 mm de l'arête de coupe, l'erreur de mesure due au thermocouple est estimée à environ 05%.

Matsumoto 1987 a utilisé les thermocouples pour étudier l'évolution de la température en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe et d'avance) et de la dureté du matériau.

En utilisant un thermocouple implanté à une profondeur de 0,025mm à partir de la surface de la pièce usinée, il a été démontré qu'avec l'élévation de l'énergie de coupe, la propagation de la chaleur dans la pièce est plus élevée dans le cas d'un acier dur que dans le cas d'un acier doux.

Les principaux inconvénients dus à l'utilisation des thermocouples sont :

Le temps de réponse du thermocouple ;

La difficulté d'implantation des thermocouples et leur localisation dans l'outil ;

Le risque de modification du champ thermique et de la conductivité en présence de trous et des capteurs ;

La fragilisation de la tête de l'outil lors de l'intégration des thermocouples ; L'impossibilité d'accéder à la température en tête d'outil ;

Les gradients de température dans la zone de coupe étant très importants, une variation de position entraîne des différences de température très importante.

Récemment, la société CIRTES 2004 [6] a mis en oeuvre une technique où une sonde est intégrée dans la plaquette dès la fabrication de celle-ci (Fig. II.3). Le but de cette méthode est de détecter le seuil d'usure de l'outil en cours d'usinage et d'effectuer un contrôle en continu de l'arête de coupe par une mesure de la température de la zone de coupe.

Les inconvénients majeurs de cette technique sont : Plaquettes très onéreuses (nécessite l'intégration de la sonde) ; La sonde peut être endommagée, dans le cas de l'usure de la plaquette; Dans la zone de coupe, les gradients thermiques sont très importants et par conséquent les mesures ne sont pas très précises ; L'introduction de la sonde fragilise la pointe de l'outil.

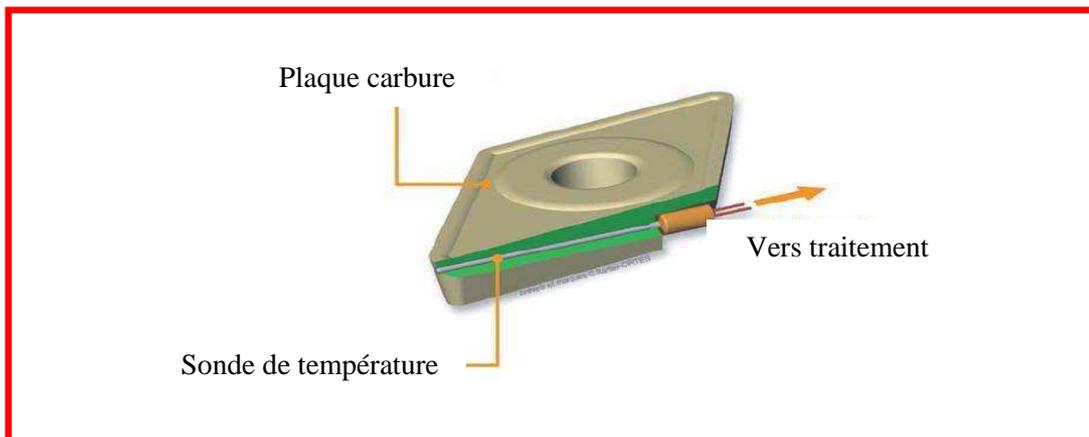


Figure (II.3) Plaquette instrumentée CIRTES d'après [6]

L'utilisation des thermocouples ne permet d'obtenir qu'une cartographie des températures loin de la pointe d'outil, voire dans le meilleur des cas une température globale de la zone de coupe. Plusieurs chercheurs ont choisi d'estimer la température moyenne au niveau l'arête de coupe en utilisant une méthode de résolution du problème inverse de diffusion de la chaleur dans l'outil. Les premières approches dans ce domaine ont été développées par Groover 1971. A l'aide de deux thermocouples implantés dans l'outil, la température est mesurée en deux endroits. Ensuite, un modèle très simplifié est utilisé pour remonter à la température en pointe de l'outil.

En 1996, El Wardany [6] a utilisé une méthode proche de celle de Groover 1971. La différence réside dans le modèle développé pour remonter à la température à la pointe d'outil. Les travaux d'El Wardany consistent à discrétiser le transfert thermique dans l'outil par la méthode des éléments finis. La relation entre la température à la pointe de l'outil et la température mesurée par le thermocouple est ainsi déterminée par identification des paramètres d'une loi empirique de type puissance.

Cette méthode présente des limites. Elle néglige la dynamique du système expérimental d'identification de la température à l'arête de coupe de l'outil.

Dans son étude Lazard 2004, utilise deux thermocouples qui sont insérés à deux endroits différents dans une plaquette. Pour reproduire les conditions expérimentales, un bruit est ajouté à l'évolution de la température. L'évolution de la température à la pointe de l'outil est estimée par un modèle inverse. A savoir que, le transfert de chaleur est décrit à l'aide d'une formulation quadripolaire. En testant ses résultats avec un code de calcul numérique développé, une bonne corrélation est montrée entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus en utilisant la méthode des volumes finis. L'inconvénient de ce modèle c'est qu'il ne correspond pas à la réalité. Le bruit introduit n'est pas représentatif des gradients de température élevés observé en coupe. De plus, il ne prend pas en compte de la géométrie complexe de l'outil et des transferts de chaleur dans celui-ci qui sont tridimensionnels. [10]

Du fait de la complexité de la géométrie de l'outil et les transferts de chaleur dans celui-ci, on peut conclure que les différents modèles et techniques de chauffe utilisés pour la calibration (non représentatifs des conditions thermiques, à la pointe d'outil, générées en coupe) présentés ci-dessus rendent les résultats très approximatifs. [12]

II. 4 Mesure de température de coupe par analyses métallographique

Il est possible de remonter à la distribution de température dans l'outil à partir d'analyses métallographiques effectuées sur l'outil après usinage (Fig.II.4).

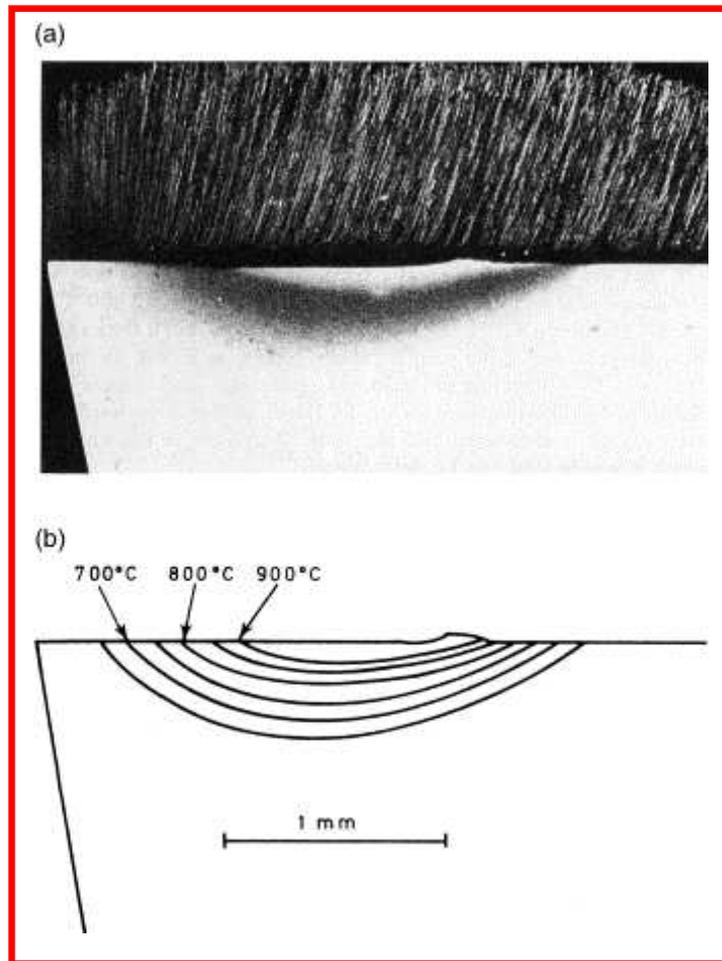


Figure (II.4) Détermination du champ de température par méthode métallographique d'après Trent et Wright [Tren_00]. (a): Micrographie d'un outil en acier rapide après usinage d'une pièce en fer, $V_c=3,048$ m/s, $f=0,25$ mm/tr, $w=1,25$ mm, (b): Distribution de température dans l'outil. [13]

La méthode s'appuie sur la relation qui existe entre la dureté, la microstructure et la température qui a été atteinte dans les différents endroits de l'outil. Cette méthode permet de mesurer des températures avec une précision de ± 25 °C, mais elle est difficile et longue à mettre en oeuvre et n'est employée que pour des outils en acier rapide. [13]

Chapitre (III)

Matériaux et Méthodes Expérimentales

III.1 Matériaux

III.1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en oeuvre pour une approche expérimentale méthodique. Ce chapitre va consister aussi en une présentation du matériel qui sert à l'étude des évolutions de la température de coupe, de l'usure et du relevé de profil des plaquettes utilisées, des mesures des pièces usinées et des observations microscopiques.

III.1.1.1 Les aciers au carbone

Les aciers au carbone représentent environ 90 pour cent en volume de l'acier utilisé. Leur application est notamment dans la construction: les ponts, les conteneurs, des poutres, les tôles de chassie de voiture, des bateaux etc. sont des exemples d'application. Vu ces applications, les exigences principales aux aciers au carbone sont: résistance mécanique élevée, ductilité/ténacité élevée, et soudabilité.

Pour comprendre les aciers au carbone et les aciers faiblement alliés, il faut garder en tête le diagramme de phase binaire du fer/carbone. En contraste avec les additions délibérées d'éléments d'alliages dans les aciers faiblement alliés, les aciers au carbone contiennent toujours des traces de manganèse (0.5-1.5 %) et de silicium (0.5 %) qui sont présentes dans le fer dû à sa production industrielle [13].

D'autres éléments comme le chrome, le nickel et le cuivre entrent notamment par la ferraille en raison de quelques dixièmes de pour cent. Cette faible teneur en élément d'alliage n'affecte pas le diagramme fer carbone.

À température ambiante, les aciers au carbone sont dans une structure ferritique perlitique et la fraction volumique des deux phases dépend de la teneur en carbone. Plus la teneur en carbone est élevée, donc plus la fraction volumique de carbures est élevée, plus la résistance mécanique augmente.

L'augmentation de la concentration en carbone diminue malheureusement la ductilité et fait que la résilience chute à de plus en plus hautes températures.

La chute en valeur de résilience marque une transition en mécanisme de rupture dans l'acier: à plus haute température, la rupture est facilitée par de la déformation plastique, alors qu'à très basse température, la rupture se fait par séparation le long des plans cristallographique.

La température à laquelle cette transition se fait est appelée la température de transition ductile fragile.

III.1.1.2 La microstructure des aciers au carbone

La microstructure des aciers au carbone change d'une manière marquée avec la teneur en carbone: de 0 à 0.85 % poids de carbone, la microstructure de ferrite est graduellement remplacée par la perlite, (Fig. III.1). A des teneurs encore plus élevées de carbone il y a formation de cémentite aux anciens joints de grains de l'austénite [14].

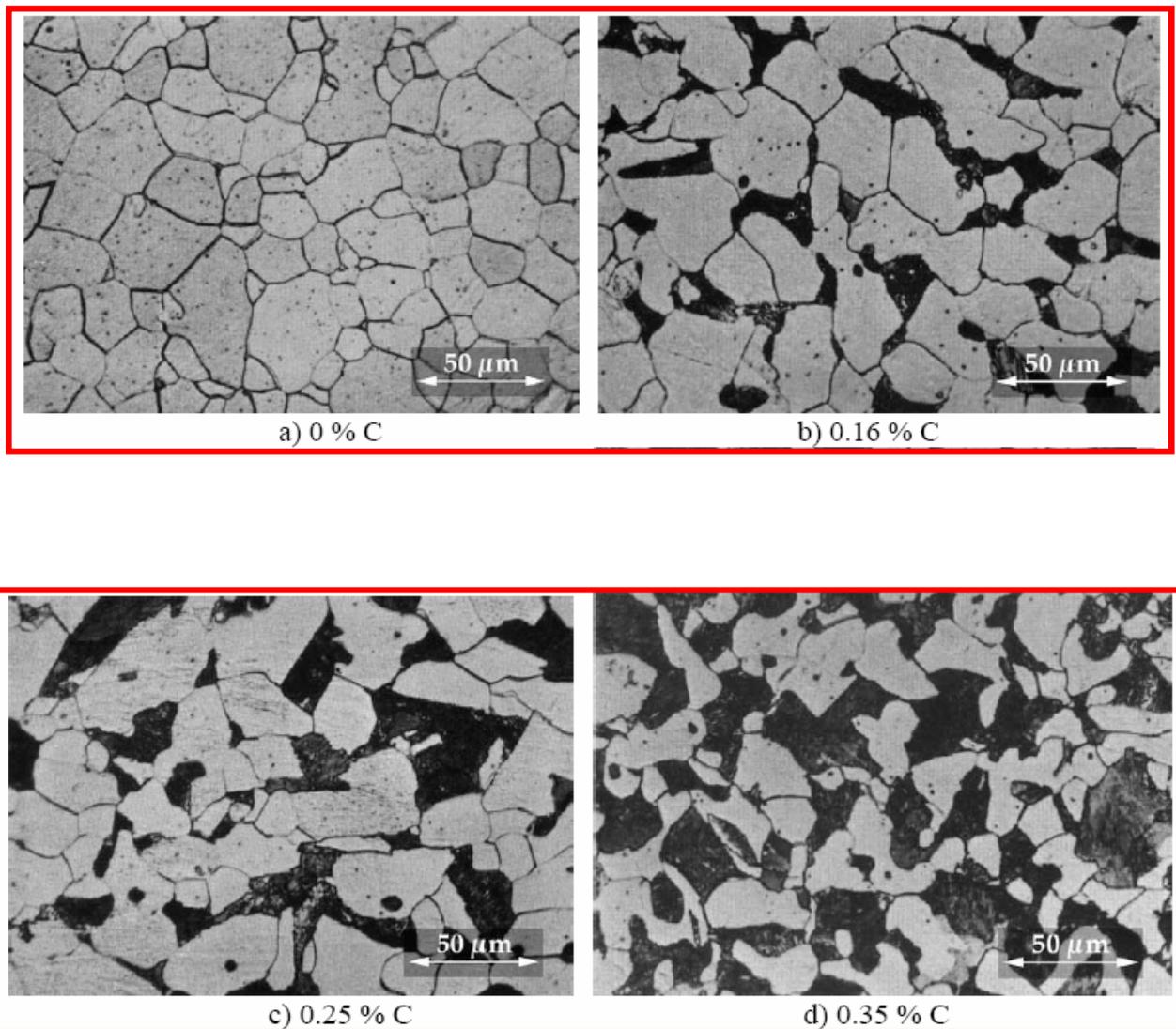


Figure (III.1, a, b, c, d) Microstructures des aciers au carbone en fonction de la teneur en carbone [14].

III. 2 Matériaux utilisés

La composition chimique d'acier utilisé dans ce travail est donnée dans le tableau III.1)

Tableau (III.1) Composition chimique de l'acier utilisé

Composition	C	Mn	Si
%	0.18	0.58	0.25

L'examen micrographique (Fig.III.2), permet de voir l'aspect et la distribution des phases à des grossissements généralement élevés et supérieurs à 50µm.



Figure (III.2) Echantillon de l'acier XC18, Grossissement: 500x

III.3 Plaquettes utilisées

III.3.1 Introduction

Des plaquettes en carbure non revêtu de nuances P10 et P35, sont utilisées comme outils de coupe. Elles sont fixées sur des corps d'outils qui ont été spécialement conçus pour le tournage. Ils permettent de disposer de quatre angles de coupe. La face de coupe des plaquettes outils n'est pas réaffûtée, la surface présente un état hétérogène du point de vue de la composition chimique. Les observations au microscope électronique montrent en effet des zones très riches en grains de tungstène (W) à côté de zones très riches en liant cobalt (Co).

III.3.2 Plaquettes utilisées de type P10

Le carbure de tungstène YT 15 à une haute force combinée avec haute résistance à l'usure convenable pour les outils abrasifs et non abrasif norme ISO P10.

III.3.2.1 Fabrication de la poudre

Le tableau (III.1) illustre le mode d'élaboration des plaquettes de type P10

Tableau (III.1) Mode d'élaboration de la plaquette P10

Température de frittage (°C)	1520
Temps de broyage (heures)	72
Type de broyage	Humide (Alcool)

III.3.2.2 Composition chimique

Le tableau (III.2) montre la composition chimique des plaquettes (outils) de nuance P10 utilisées lors de l'usinage. Notons que, ces plaquettes sont fabriquées par l'entreprise "ERIS", elles ont respectivement la composition chimique:

Tableau (III.2) Composition chimique de la plaquette P10

Composition	Co	WC	(Ti-W)C
%	6.00	56.2	37.8

III.3.2.3 Analyse chimique

L'analyse chimique des échantillons de type P10 utilisés, est présentée dans le tableau (III.3)

Tableau (III.3) Analyse chimique de la plaquette P10

Indice technique	Carbone totale (%)	Carbone libre (%)	Oxygène (%)	Cobalt (%)	Titane (%)
Exigence technique	7.4-8.0	≤0.3	≤0.8	5.7-6.3	11.7-12.5

III.3.2.4 Caractéristiques techniques

La mesure des différents critères à savoir la dureté, la densité et la résistance à la rupture des plaquettes de nuance P10 utilisées toujours dans notre travail est regroupée dans le tableau (III.4).

Tableau (III.4) Caractéristiques techniques de la plaquette P10

Dureté (HRA)	91
Densité (g/cm³)	11.7
Résistance à la rupture (N/mm²)	1550
Rétrécissement (%)	1.22

III.3.2.5 Structure métallographique

Les observations micrographiques des échantillons des plaquettes de nuance P10 (Fig. III.3) ont été relevées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB).

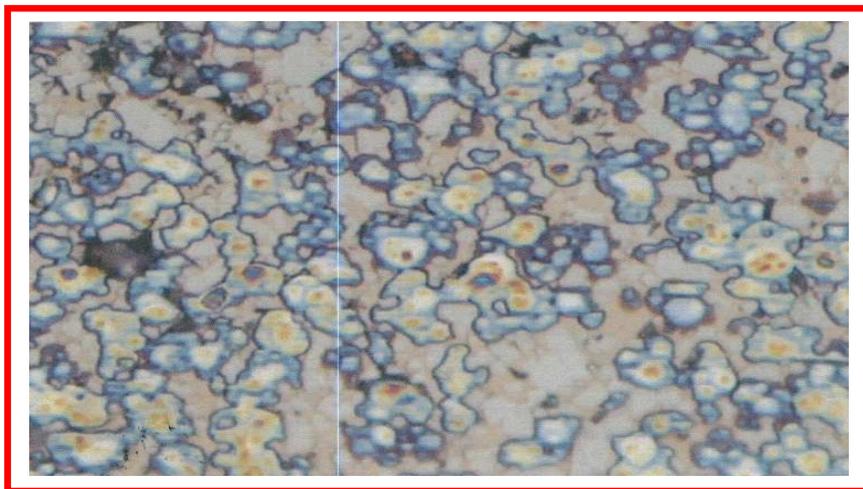


Figure (III.3) illustrant la structure des échantillons des plaquettes, type P10, Grossissement 500x

III.3.3 Plaquettes utilisées de type P35

Les plaquettes de type P35 est un produit fabriqué et lancé sur marché par l'entreprise "ERIS", c'est un matériau composé de carbure de tungstène, qui a une haute force combinée avec haute résistance à l'usure convenable pour les outils non abrasif norme ISO P35.

III.3.3.1 Fabrication de la poudre

Le tableau (III.4) illustre le mode d'élaboration des plaquettes de type P35.

Tableau (III.4) Mode d'élaboration de la plaquette P35

Température de frittage (°C)	1480
Temps de broyage (heures)	120
Type de broyage	Humide (Alcool)

III.3.3.2 Composition chimique

Le tableau (III.5) montrent la composition chimique des plaquettes (outils) de nuance P35 utilisées lors de l'usinage. Notons que, ces plaquettes sont fabriquées toujours par l'entreprise "ERIS", elles ont respectivement la composition chimique:

Tableau (III.5) Composition chimique de la plaquette P35

Composition	Co	WC (B)	(Ti -W)C	TaC	Nb C
%	9.5	61.0	27.5	1.0	1.0

III.3.3.3 Analyse chimique

L'analyse chimique des échantillons de type P35 utilisés, est présentée dans le tableau (III.6)

Tableau (III.6) Analyse chimique de la plaquette P10

Indice technique	Carbone totale (%)	Carbone libre (%)	Oxygène (%)	Cobalt (%)	Titane (%)
Exigence technique	6.7-7.2	≤0.3	≤0.8	09.0-10.0	08.5-09.5

III.3.3.4 Caractéristiques techniques

La mesure des différents critères à savoir la dureté, la densité et la résistance à la rupture des plaquettes de nuance P35 utilisées toujours dans notre travail est regroupée dans le tableau (III.7).

Tableau (III.7) Caractéristiques techniques de la plaquette P35

Dureté (HRA)	88-89
Densité (g/cm²)	11.96
Résistance à la rupture (N/mm²)	1815.16
Rétrécissement (%)	1.18

III.3.3.5 Structure métallographique

Les observations micrographiques des échantillons des plaquettes de nuance P35 (Fig. III.4) ont été relevées à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB).

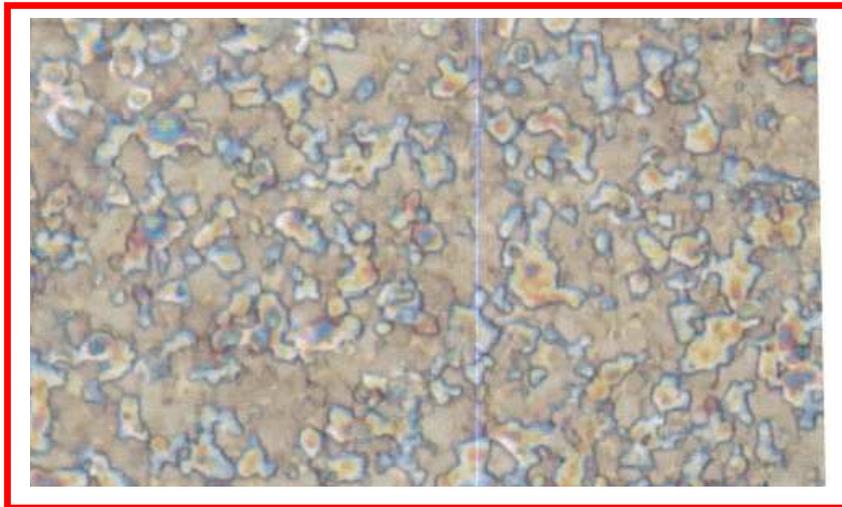


Figure (III.4) illustrant la structure des échantillons des plaquettes, type P35, Grossissement 500x

III.4 Procédures d'essais

III.4.1 Eléments considérés lors des campagnes d'essais

La technique étant nouvelle et la connaissance du comportement du procédé encore limitée, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités à un ensemble de points à explorer:

- ☒ paramètres de coupe : vitesse de coupe, avance et profondeur de passe ;
- ☒ gammes des plaquettes à employer Intégrité des surfaces usinées ;

En considérant l'ensemble des résultats à obtenir et des facteurs qui influents à priori, sur leur niveau, on peut établir un bilan récapitulatif.

III.4.1.1 Parameters à tester

- ❖ vitesse de coupe;
- ❖ vitesse d'avance;
- ❖ profondeur de passé;
- ❖ plaquettes ;

III.4.1.2 Résultats à observer

- ❖ La température de coupe;
- ❖ Suivi d'usure des plaquettes;
- ❖ Relevé des surfaces usinées;
- ❖ Etat métallurgique des pieces;
- ❖ Microdureté;

Donc:

Le but du travail consiste à établir et quantifier les modes d'évolution de ces résultats en fonction de l'ensemble des paramètres recensés.

III.5 Méthodologie d'essais

Les essais sont effectués en chariotage sur des éprouvettes cylindriques en acier (diamètre 80 mm et longueur 280 mm) avec différentes duretés. Les lopins ont été pris en mors doux épaulés. Pour la prise de mors, une portée de 80 mm a été usinée ce qui laisse une longueur usinable de 200mm (fig.III.5). Les deux faces ont été dressées et un chariotage extérieur a été effectué sur une profondeur voisine des 3mm pour éliminer la couche superficielle brute.

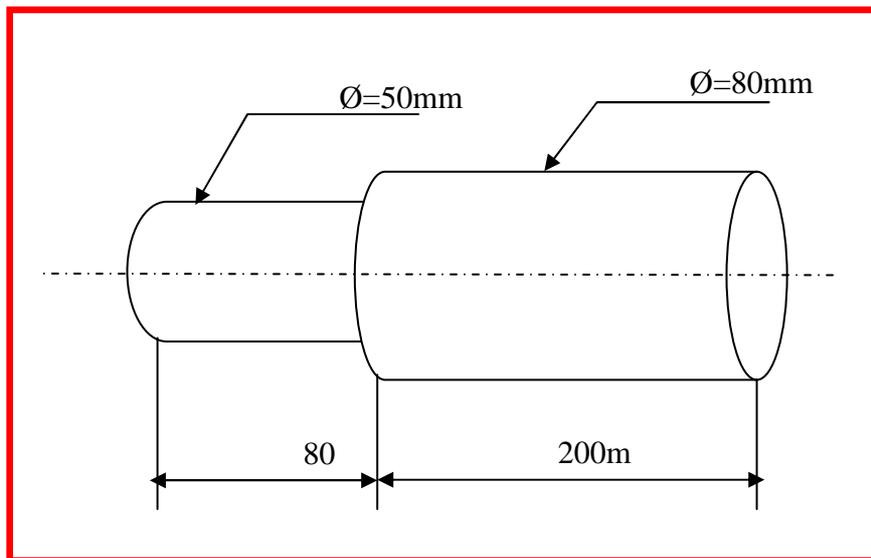


Figure (III.5) Illustrant la forme de l'éprouvette

Notons:

Les essais ont été menés avec les plus grandes précautions. La démarche générale des essais est la suivante :

- ❖ Mise en position de l'éprouvette sur le tour ;
- ❖ Remise au rond de l'éprouvette. Lors de la mise en place de la pièce, un défaut de remise en position existe. Pour des vitesses de coupe relativement importantes, il convient particulièrement d'éviter les faux ronds de la pièce ;
- ❖ Réglage de l'avance, de la profondeur de passe et choix de la plage de vitesse ;
- ❖ Afin de s'affranchir d'une erreur sur la profondeur de passe, nous avons effectué une mesure du diamètre avant et après usinage ;
- ❖ Mesure de la température ;
- ❖ Contrôle des états de surface Ra ;
- ❖ Démontage de la plaquette ;

- ❖ Observation visuelle périodique des plaquettes utilisées (face de coupe, et la face de dépouille) ;
- ❖ Observation et mesure géométrique des différents paramètres de la plaquette (usure...) au microscope à la fin de la dernière passe ;
- ❖ Traitement informatique des données ;
- ❖ Analyse des résultats ;

III.5.1 Essais d'usinage

Etant donné l'influence d'un grand nombre de paramètres sur chaque résultat, il nous a fallu définir un plan d'expériences où chaque paramètre variait d'une façon indépendante des autres. Notre objectif était de qualifier des conditions de coupe associées à chaque type de plaquette pour un acier dur. Au de là de cette qualification, nous attendions également de l'analyse des résultats de quantifier l'influence des paramètres sur les résultats, pour acquérir une première base de connaissance dans des conditions maîtrisées de tournage dur.

Notre observation a porté sur la température de coupe, la rugosité, les défauts de surface, l'usure pour déterminer les limites du domaine d'usage du couple outil matière, il s'agit de déterminer un domaine de validité de production d'une surface dans de bonnes conditions technologiques en fonction des trois paramètres : la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (a) et l'avance (f).

III.5.2 Température de coupe en fonction des conditions de coupe

L'objectif de cette campagne est de voir l'évolution de la température de coupe spécifique au cours du temps et d'observer son allure pour différentes valeurs de vitesses de coupe. Il est à noter que lors de cet essai, l'avance et la profondeur de passe sont restées constantes.

III.5.3 Essais d'usure

III.5.3.1 Etude de l'évolution de l'usure

Nous avons vu au premier chapitre à la fois les origines et les manifestations de l'usure pour des outils et des matériaux à usiner classiques. Dans le cas d'acier dur et d'outils nouveaux, l'étude de l'usure doit être abordée suivant une démarche progressive et systématique. Il s'agit d'observer diverses manifestations de l'usure et leurs évolutions respectives. Il s'agit ensuite de déterminer jusqu'à quel stade de cette évolution l'outil pourra

conserver des qualités de coupe suffisantes pour la bonne exécution du travail, en fonction des qualités exigées [15]. Cette deuxième partie n'a pas été traitée complètement dans le cadre de notre étude. Par contre pour la première partie, nous avons déterminé les critères simples qui prennent compte du phénomène.

Les essais d'usure ont été réalisés avec des vitesses de coupe constantes et variables.

A chaque passe, la plaquette était démontée et observée au microscope. De manière usuelle, le critère de réforme retenu est l'usure en dépouille (VB).

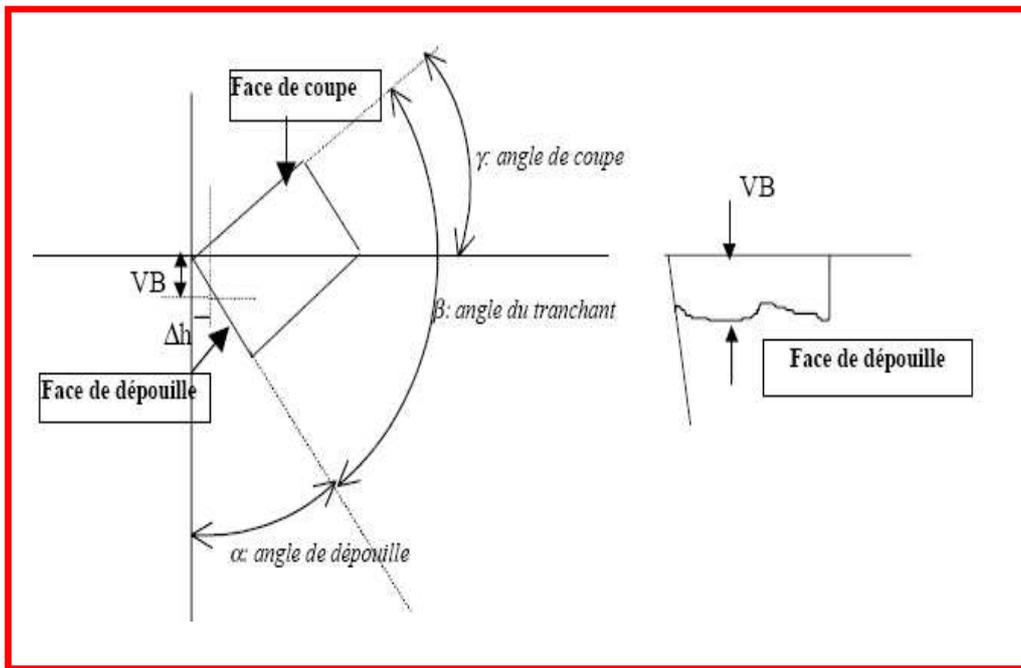


Figure (III.6) Géométrie de l'usure en dépouille [16].

III.6 Mesure avec un microscope optique

Les grandeurs à mesurer correspondent à des surfaces qui ne sont pas situées dans un même plan. On obtient donc en microscopie des aberrations géométriques et la mesure devient inexacte. Cependant, cette méthode permet de vérifier la validité des résultats obtenus par le rugosimètre..



Figure (III.7) Microscope utilisé

III.6.1 Observation microscopique

III.6.1.1 Objet de l'étude

L'objet de cette étude est de savoir si l'usinage des aciers durs modifie la structure superficielle de la pièce, ainsi que sa dureté.

Les études précédemment réalisées ont montré la présence en tournage dur, d'une « couche blanche » à la surface du copeau en contact avec l'outil lors de l'usinage [16].

Cette couche se forme par l'élévation de la température entre l'outil et la pièce: selon la bibliographie la zone de contact Outil / Pièce qui est à haute température, produit un matériau (austénite) ramolli qui flue à la fois vers le haut et sous l'outil. C'est ce que nous avons voulu savoir.

La couche blanche qui est le résultat d'une modification de la structure superficielle du copeau se retrouve-t-elle sur la pièce?

Sachant que c'est le copeau qui évacue la plus grosse partie de la chaleur, et qui est donc modifié par la haute température, en est-il de même pour la surface usinée?

III.6.1.2 Découpe du Lopin

Afin de pouvoir observer le cœur de la pièce, il est obligatoire d'extraire un échantillon. Pour la découpe de l'échantillon (Fig.III.8), il est nécessaire de trouver un procédé qui soit capable de l'effectuer, et qui en plus, n'induit pas de contraintes résiduelles dans le matériau.

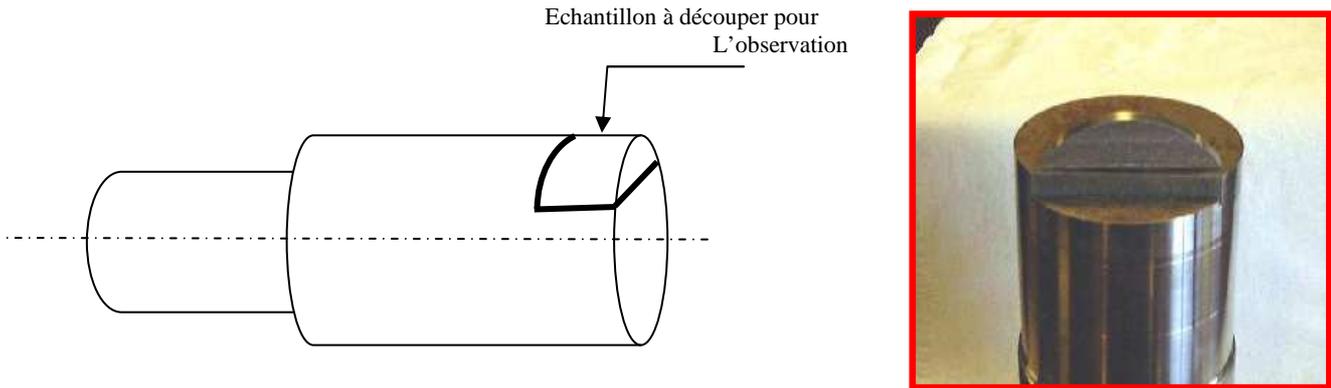


Figure (III.8) Découpe du lopin

III.6.1.3 Polissage, Attaque et Observation de la surface

La face en demi-lune de la pièce est polie puis attaquée au nital. On l'observe ensuite au microscope optique.

L'observation est effectuée respectivement au cœur de la pièce puis en se rapprochant de plus en plus de l'arête arrondie, afin de voir s'il existe une réelle modification de la structure métallurgique

III.8 Mesure de la micro dureté

III.8.1 Microdureté

La micro dureté consiste à utiliser des indenteurs de taille submillimétrique. Les empreintes ne couvrent alors qu'un à quelques grains, et les résultats présentent une dispersion significative, ce qui nécessite de multiplier les mesures[18].

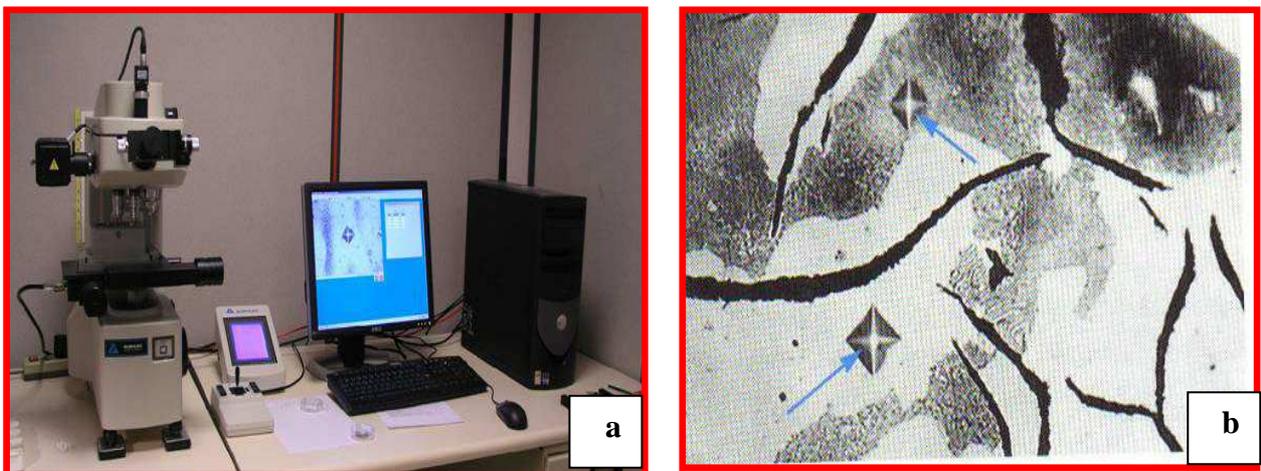


Figure (III.9) (a): Dispositif d'essais de micro dureté piloté par ordinateur avec Acquisition d'images. (b): Empreinte d'un essai

III.9. Conclusion

Après avoir fait une présentation détaillée du matériel utilisé lors de nos travaux, nous avons, par la suite, décrit les différentes procédures d'essais ainsi que les éléments considérés.

L'approche expérimentale a été décomposée en une étude des températures de coupe, l'étude de l'usure, la mesure du profil des plaquettes, des pièces ainsi que l'observation microscopique.

Dans ce qui suit (chapitre IV), l'évolution des températures de coupe est présentée en fonction des différents paramètres de coupe et pour différentes nuances de plaquettes P10, P35.

Chapitre (IV)

Résultats & Interprétations

IV.1 Introduction

Dans le processus d'usinage parmi les paramètres qui peuvent être déterminés expérimentalement et qu'on étudie fréquemment dans le cas du tournage, les efforts dans le couple outil pièce, la température et les contraintes résiduelles.

La température qui se forme suite au frottement dans le couple outil/pièce, a une influence sur la durée de vie de l'outil. La mesure de la température est un procès très difficile à cause de la complexité de la géométrie de l'outil, la connaissance de la température de coupe est très importante car elle a une grande influence dans le choix des matériaux et des conditions optimales d'usinage.

IV.2 Mesure la température

Les intervalles de variation des éléments du régime de coupe, tableau (IV.1), pour les plaquettes types P10 et P35 sont respectivement: $V_c = (60, 90, 100, 150 \text{ et } 180) \text{ m/mn}$;

$f = (0.08, 0.11, 0.14, 0.20 \text{ et } 0.28) \text{ mm/tr}$; $a_p = (0.25, 0.5, 0.75, 1.0 \text{ et } 1.5) \text{ mm}$. Les essais ont été réalisés à sec.

Notre démarche expérimentale est basée sur l'instrumentation d'un porte-outil de tournage à l'aide d'un thermocouple (Fig. IV.1). Le thermocouple permet de déterminer la température locale avec différentes plaquettes et différentes conditions de coupe, durant une opération d'usinage.

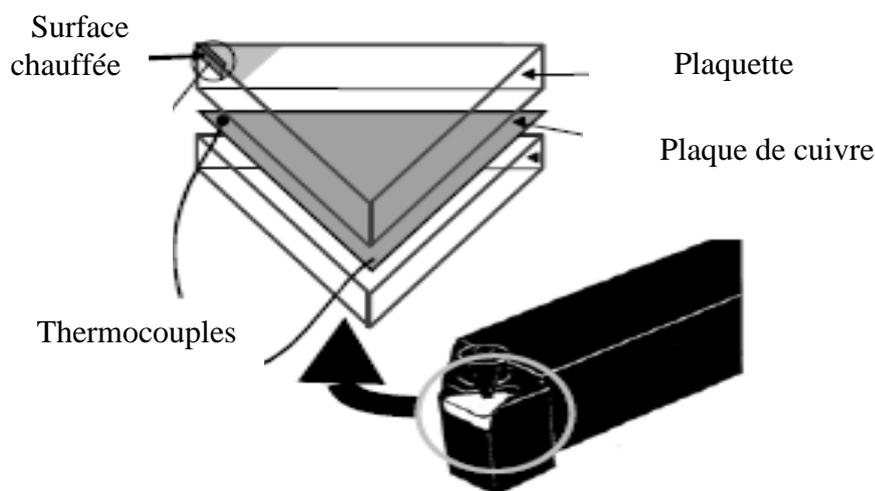


Figure (IV.1) Illustration de la position du thermocouple sur le porte-outil

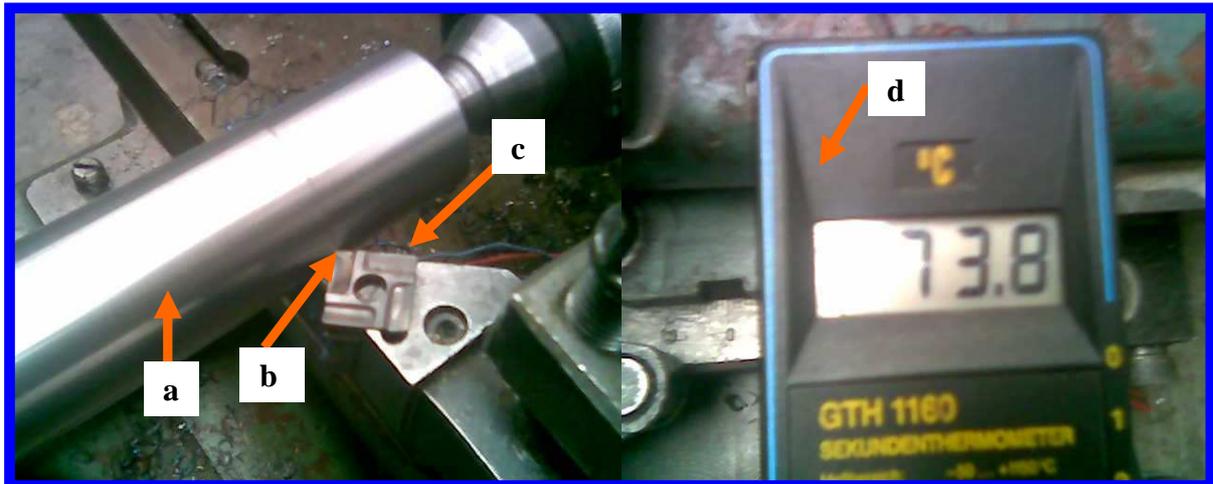


Figure (IV.2) Dispositif de mesure de la température, (a): pièce, (b): plaquette, (c): thermocouples et (d): appareil de mesure.

Le thermocouple est constitué d'une feuille de cuivre d'épaisseur 0.3 mm, découpée selon la forme du logement de plaquette, sur laquelle est soudée un fil de constantan de 0.35 mm de diamètre (Fig. IV.1) Les deux fils de ce thermocouple sont reliés à des bornes en laiton maintenues à température ambiante. Les mesures sont enregistrées sur un thermomètre digital spécial qui nous permet de lire directement la valeur de la température mesurée.

Le thermocouple cuivre/constantan (type T) a une sensibilité moyenne de $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ et est linéaire jusqu'à 300°C . Le cuivre présente l'avantage d'être ductile afin d'optimiser le contact thermocouple/plaquette.

Le thermocouple est localisé suffisamment loin de la zone de coupe pour ne pas être influencé par des variations de la zone de contact outil/copeau. Il doit cependant être placé suffisamment près pour avoir le maximum de précision dans l'estimation du flux de chaleur.

Les essais ont été réalisés à avec un outil identique mais instrumenté avec un thermocouple afin de balayer différentes conditions de vitesse et d'avance et de profondeur.

IV.2.1 Mesure la température pour différents régimes de coupe

IV.2.1.1 Mesure la température en fonction de la vitesse de coupe (V_c)

L'influence de la vitesse de coupe sur le champ de température a été étudiée pour les deux états métallurgiques (avec et sans traitement thermique) du matériau usiné, pour une avance ($f = 0,08 \text{ mm/tr}$) et une profondeur de passe ($a_p = 0.5\text{mm}$). Les essais d'usinage ont été conçus en tournage dur avec deux matériaux à outils de types P10 et P35.

Les résultats de la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe, pour les deux matériaux à outil testés sont illustrés dans les figures (IV.3, 4). L'analyse de ces résultats permet de voir que les plaquettes type P10 induisent des températures plus importantes, et ceux ci avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

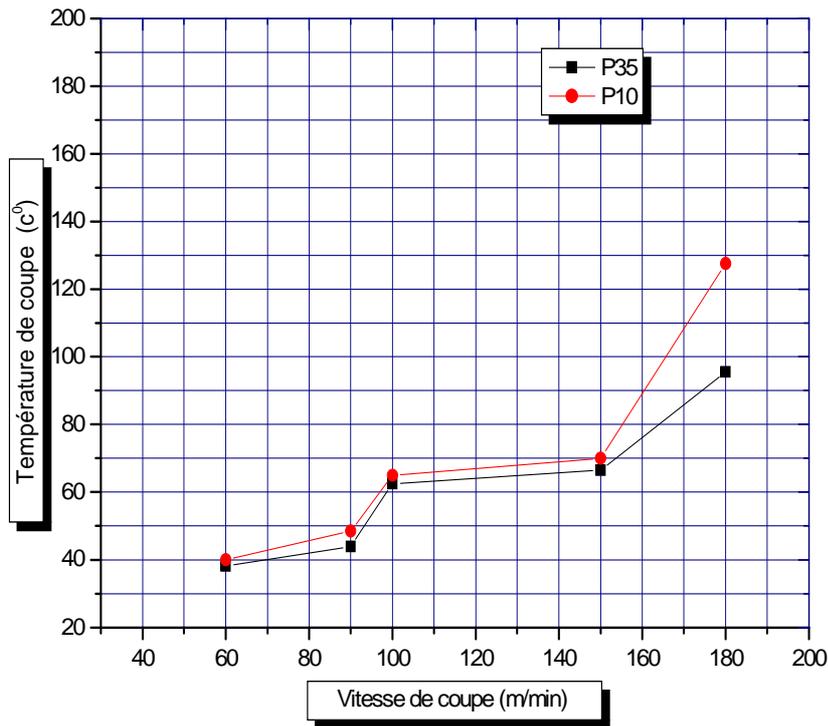


Figure (IV.3) Influence de la vitesse de coupe sur la température de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (brut de livraison) à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm

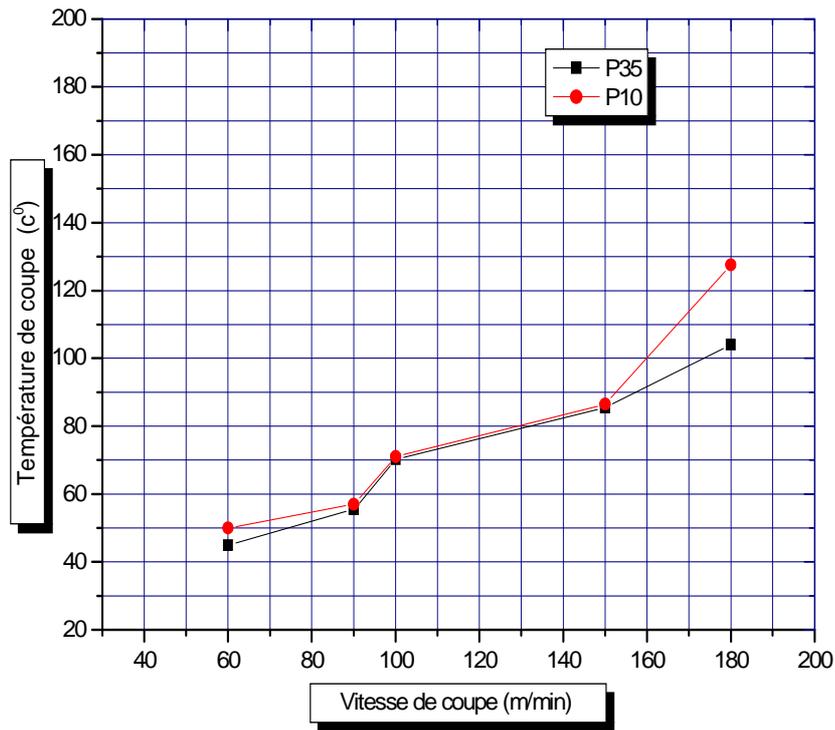


Figure (IV.4) Influence de la vitesse de coupe sur la température de coupe, obtenues avec des plaquettes Types P10 et P35, échantillon XC18 (trempé) à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm

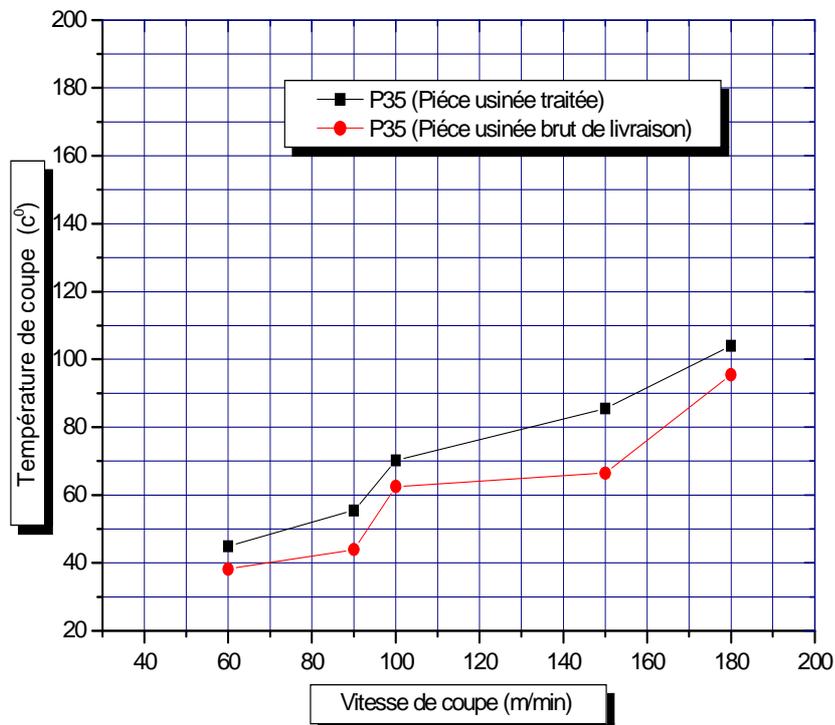


Figure (IV.5) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction de la vitesse de coupe, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (trempé et brut de livraison) à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm

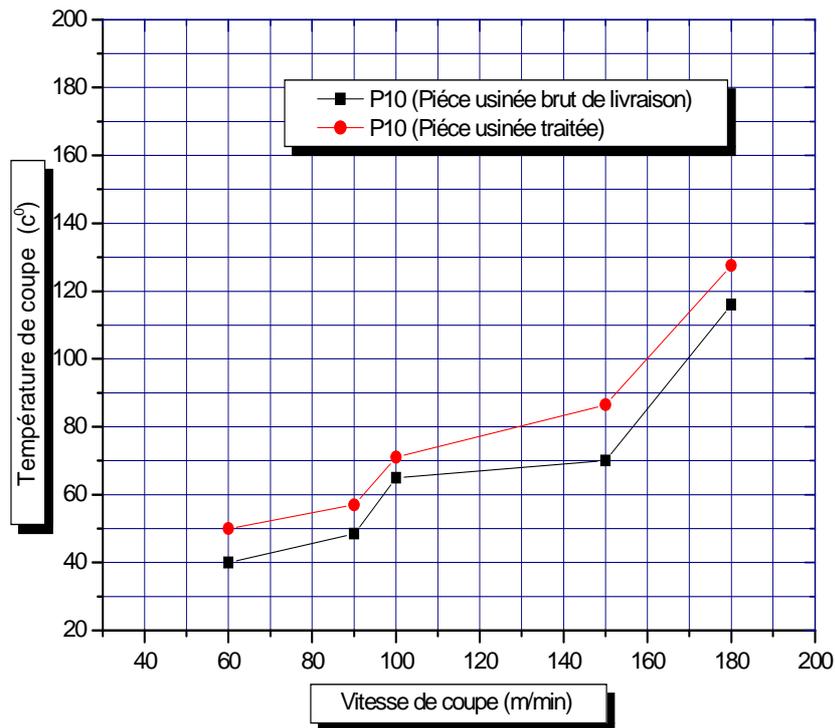


Figure (IV.6) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction de la vitesse de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10, échantillon XC18 (trempé et brut de livraison) à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm

L'influence de la vitesse de coupe sur le champ de température a été étudiée pour les deux états métallurgiques du matériau usiné (avec et sans traitements thermiques), les courbes figures (IV.3,4) montrent que pendant l'usinage avec des plaquettes type P35 la température atteinte par le thermocouple est visiblement inférieure à celle obtenue par l'outil type P10, Ceci s'explique par le fait que les matériaux à outils utilisés P35 ont d'une part une grande résistance à l'usure et d'autre part la matière à usiner a une microstructure très fine suite au traitement thermique qui lui a été appliqué.

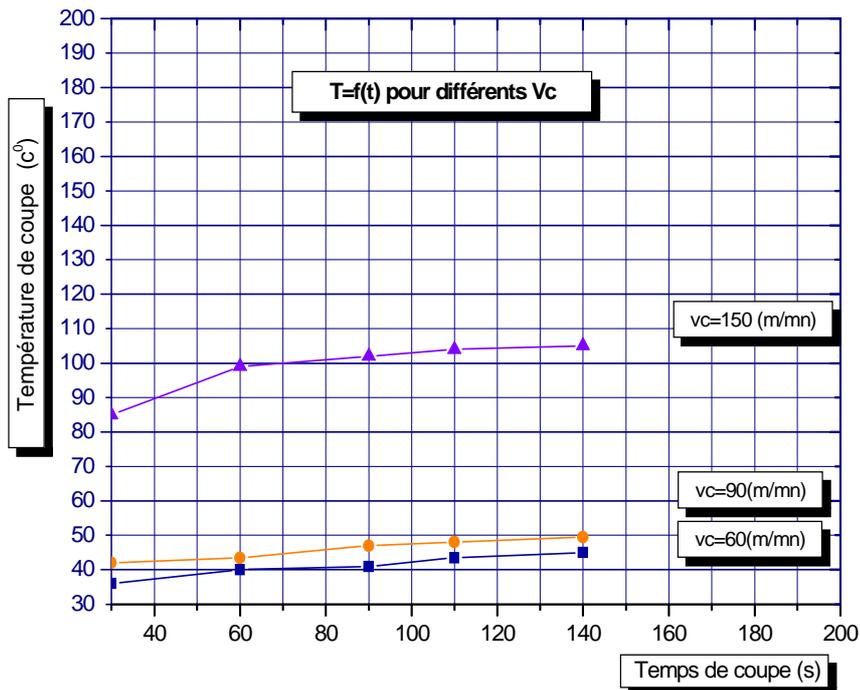


Figure (IV.7) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différents vitesses de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10, échantillon XC18 (brut de livraison) à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm

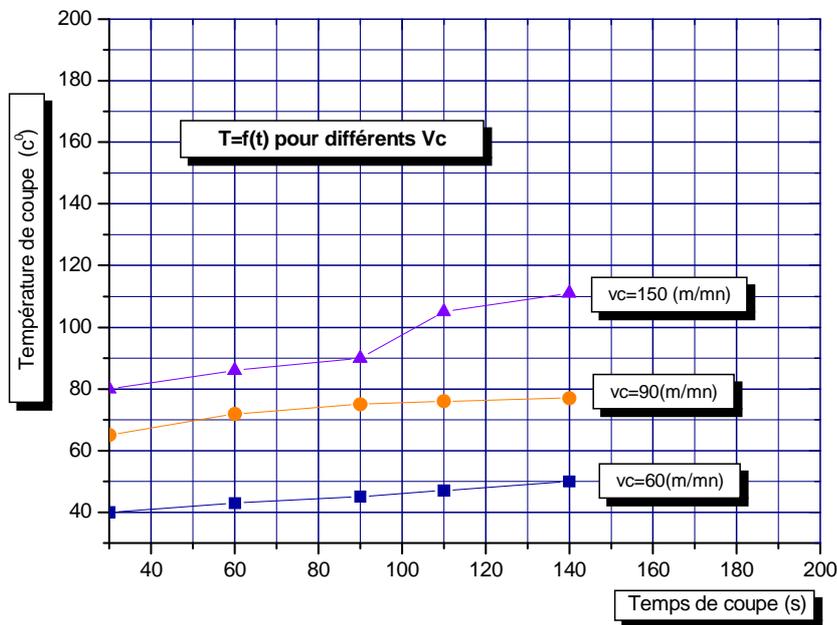


Figure (IV.8) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différents vitesses de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10, échantillon XC18 (trempé) à $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.5$ mm

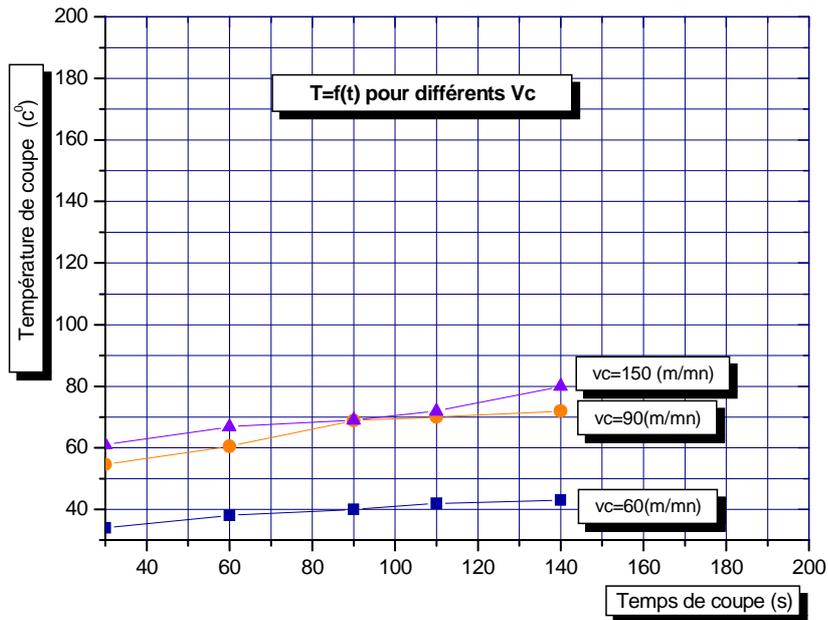


Figure (IV.9) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différents vitesses de coupe, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (brut de livraison) à $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.5 \text{ mm}$

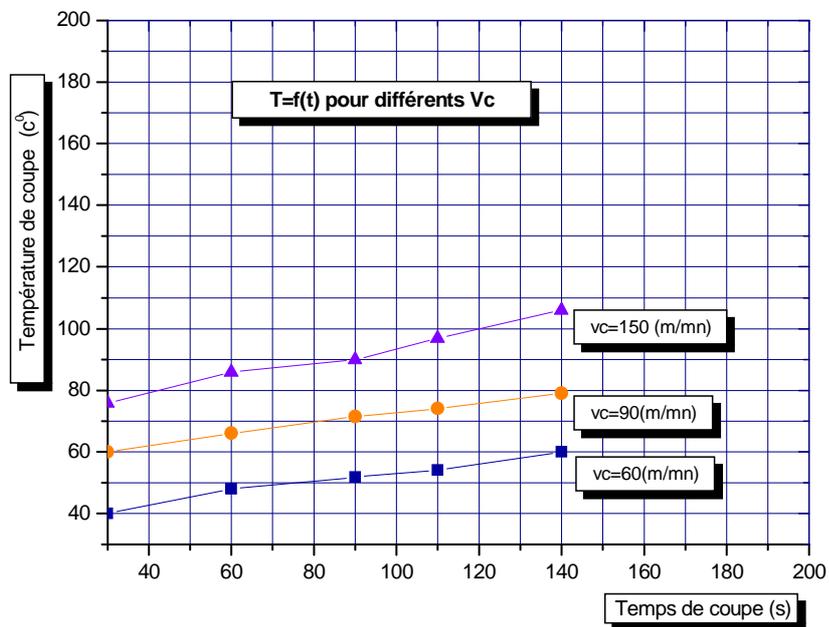


Figure (IV.10) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différents vitesses de coupe, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (trempé) à $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.5 \text{ mm}$

L'analyse de l'évolution de la température en fonction du temps d'usinage aux différentes vitesses de coupe $V_c = 60, 90$ et 150 m/min , $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0,5 \text{ mm}$, pour les deux états métallurgiques du matériau usiné (avec et sans traitement thermique), pour les deux types de plaquettes P10 et P35 (Figures 7, 8, 9 et 10), d'une manière générale on observe une évolution croissante de la température plus ou moins rapide suivant la vitesse de coupe, le type de plaquettes utilisées ainsi que par les propriétés mécaniques du métal œuvré. Cette évolution s'achève dans tout les cas par un palier final.

La comparaison des cinétiques obtenues sur des échantillons du métal usiné dans les deux états métallurgiques (avec et sans traitement thermique) avec le même type de plaquette montre bien que:

Les niveaux du début d'évolution de la température correspondant aux vitesses de coupe plus élevées sont supérieurs à ceux des vitesses plus basses, les niveaux des paliers de fin d'évolution sont aussi différents.

IV.2.1.2 Mesure de la température en fonction de l'avance (f)

Le même travail avec une série d'essais d'usinage a été réalisé sur l'acier XC18. L'influence de l'avance sur le champ de température a été étudiée pour les deux états métallurgiques (avec et sans traitements thermiques) du matériau usiné, pour une vitesse de coupe ($V_c = 150 \text{ m/mn}$) et une profondeur de passe ($a_p = 0.5 \text{ mm}$). Les essais d'usinage ont été conçus en tournage dur avec deux matériaux à outils de types P10 et P35.

Les résultats de la variation de l'avance en fonction de la température, ainsi obtenues sont présentés sur les figures (IV. 11 et 12).

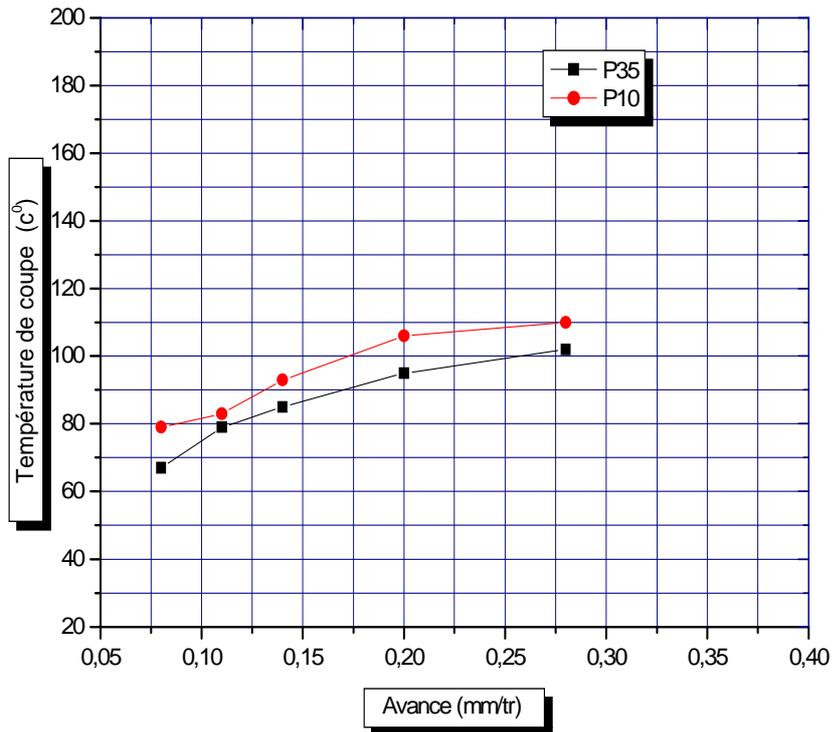


Figure (IV.11) Influence de l'avance sur la température de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (brut de livraison) à $V_c = 150$ m/mn et $a_p = 0.5$ mm

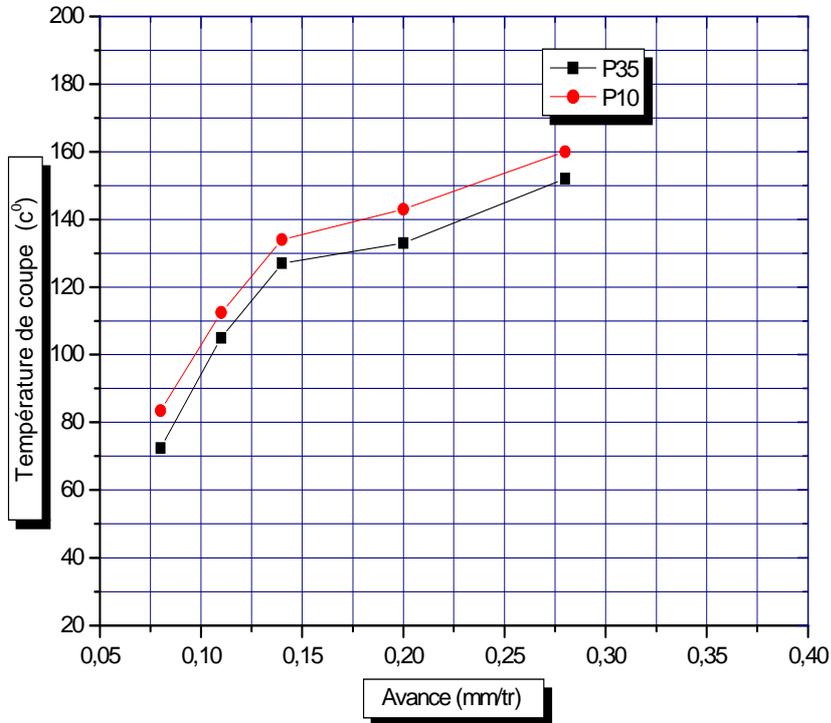


Figure (IV.12) Influence de l'avance sur la température de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (trempé) à $V_c = 150$ m/mn et $a_p = 0.5$ mm

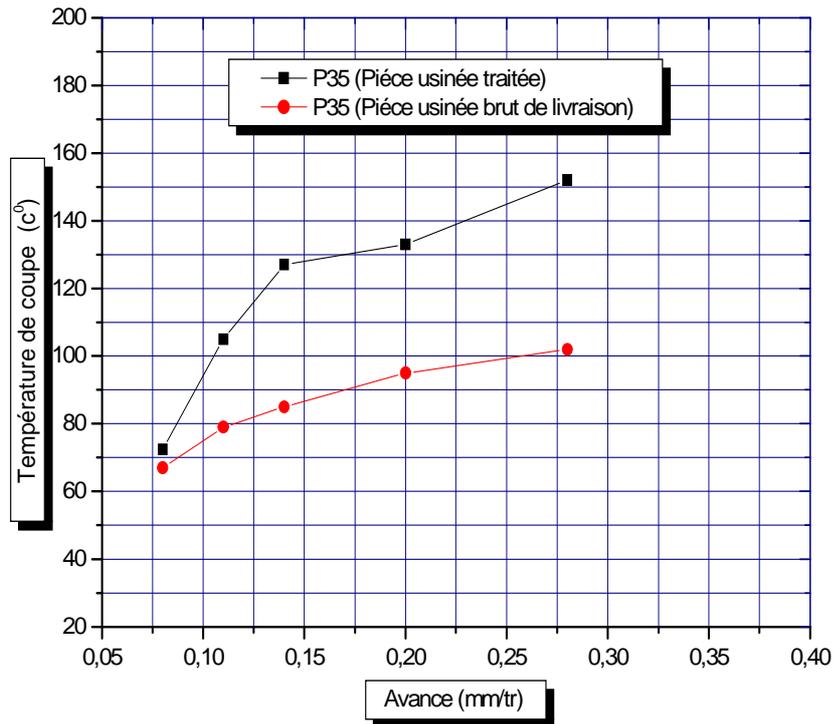


Figure (IV.13) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction de l'avance, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (trempé et brut de livraison) à $V_c = 150$ m/mn et $a_p = 0.5$ mm

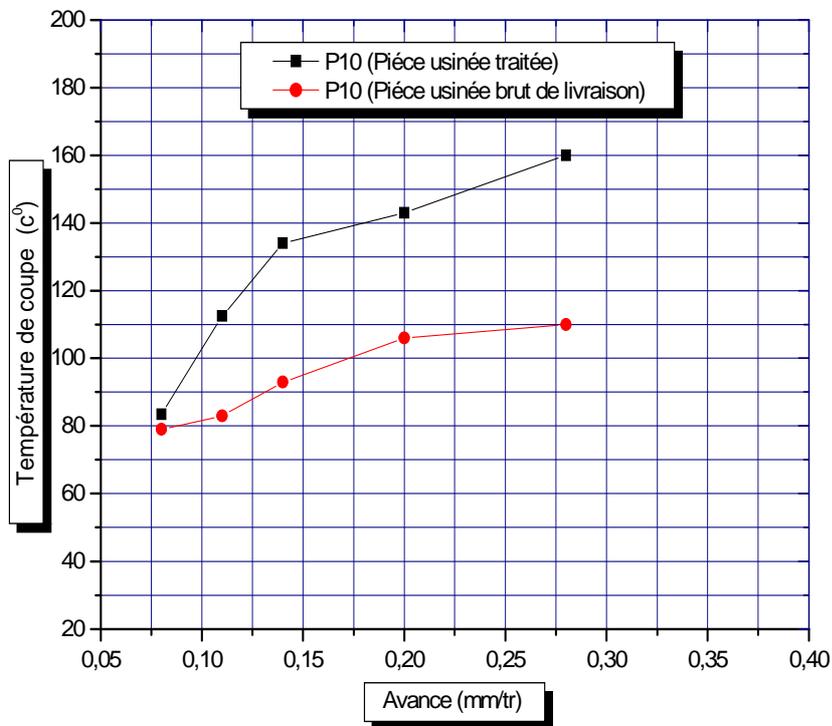


Figure (IV.14) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction de l'avance, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (trempé et brut de livraison) à $V_c = 150$ m/mn et $a_p = 0.5$ mm

L'analyse des courbes obtenues figures (IV.13 et 14) dans des conditions expérimentales identiques pour les deux matériaux de coupe montre que les performances des plaquettes P35 dépassent et de loin celles de l'outil P10.

Les performances des outils élaborés en P35 pour les opérations de finition de l'acier traité, peuvent être expliquées par la haute rigidité et la tenue exceptionnelle de ces arêtes de coupe, ainsi qu'à sa grande dureté et sa stabilité chimique aux hautes températures [17].

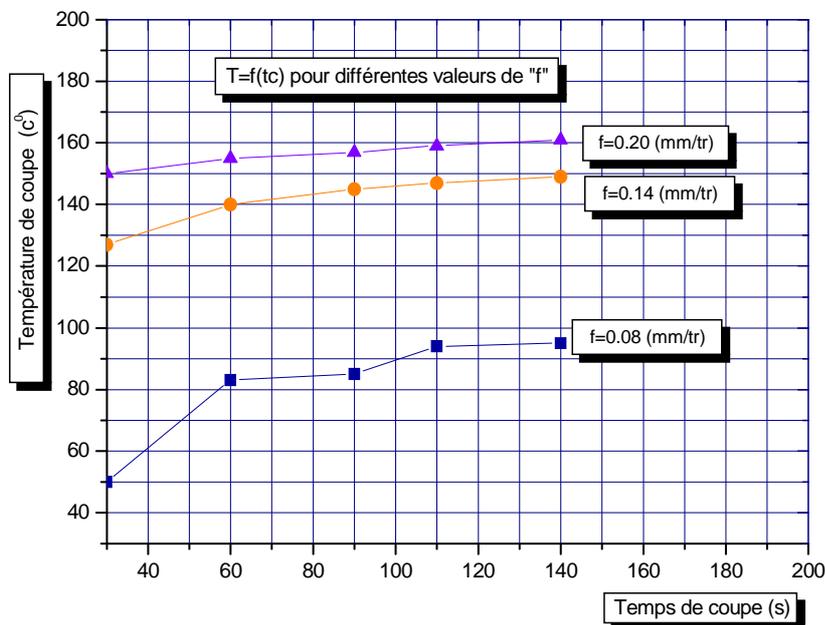


Figure (IV.15) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différentes valeurs des avances, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (trempé)

à $V_c = 150$ m/mn et $a_p = 0.5$ mm

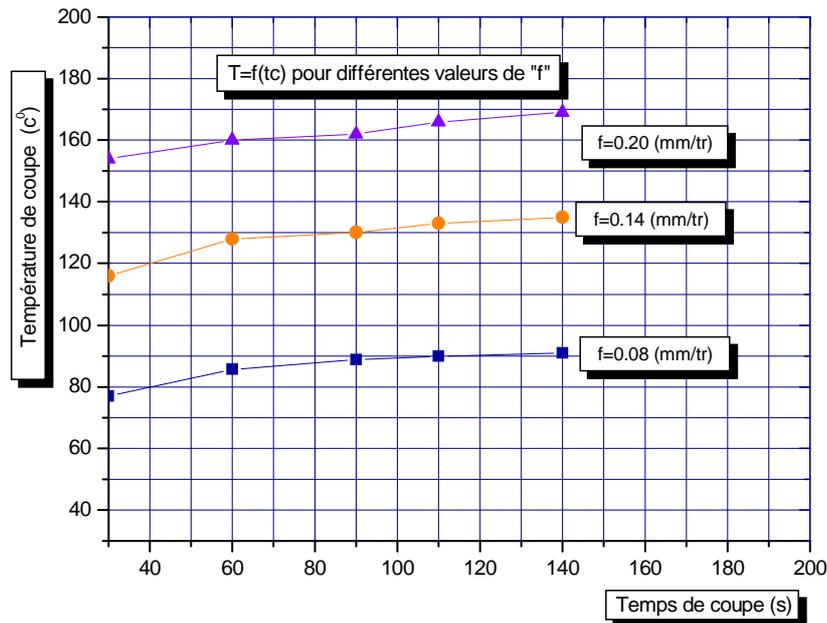


Figure (IV.16) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différentes valeurs des avances, obtenues avec des plaquettes types P10, échantillon XC18 (trempé) à $V_c = 150$ m/mn et $a_p = 0.5$ mm

La comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe figures (IV. 15 et 16), montrent que les amplitudes des températures atteintes augmentent en fonction de l'avance. D'une manière générale on observe une évolution croissante de la température plus ou moins rapide suivant la valeur de l'avance, cette évolution s'achève dans tout les cas par un palier final.

IV.2.1.3 Mesure de la température en fonction de la profondeur de passe (a_p)

L'influence de la profondeur de passe sur le champ de température a été étudiée pour les deux états métallurgiques (avec et sans traitement thermique) du matériau usiné, pour une vitesse de coupe de 150m/min, une avance de 0.08mm/tr. Les essais d'usinage ont été conçus en tournage dur avec deux matériaux à outils de types P10 et P35.

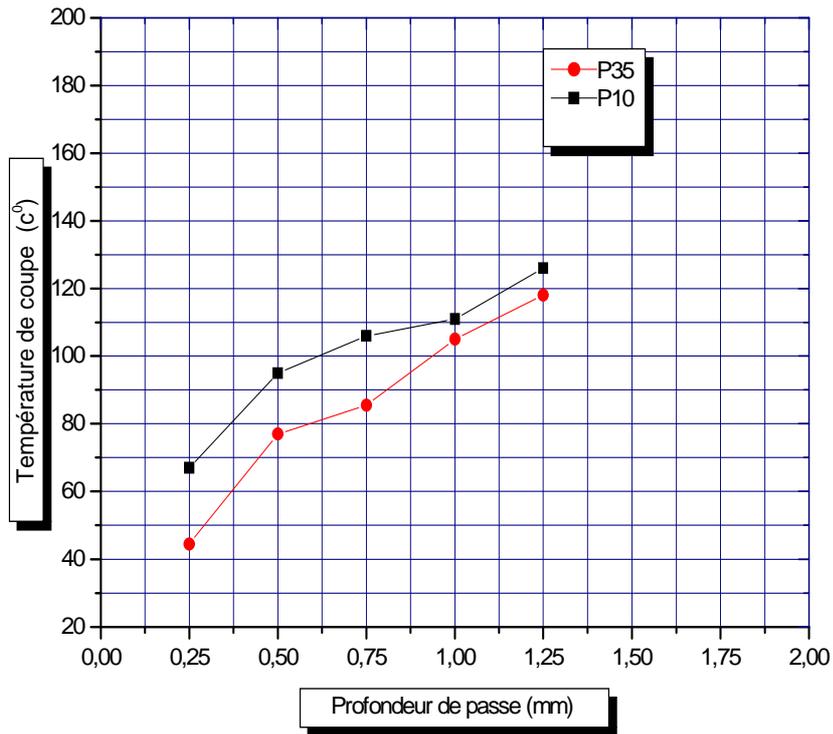


Figure (IV.17) Influence de la profondeur de passe sur la température de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (brut de livraison), à $V_c = 150$ m/mn et $f = 0.08$ mm/tr

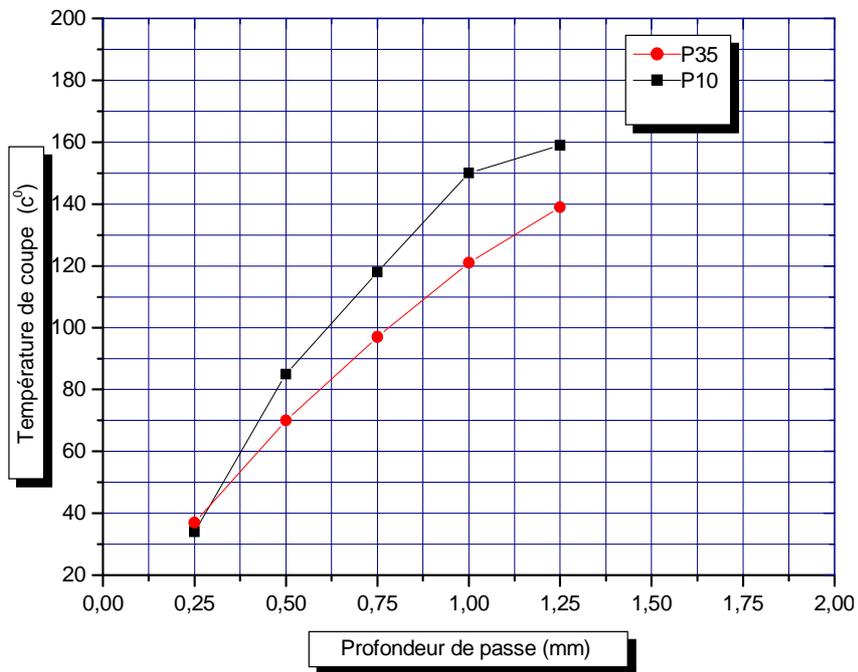


Figure (IV.18) Influence de la profondeur de passe sur la température de coupe, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (trempé), à $V_c = 150$ m/mn et $f = 0.08$ mm/tr

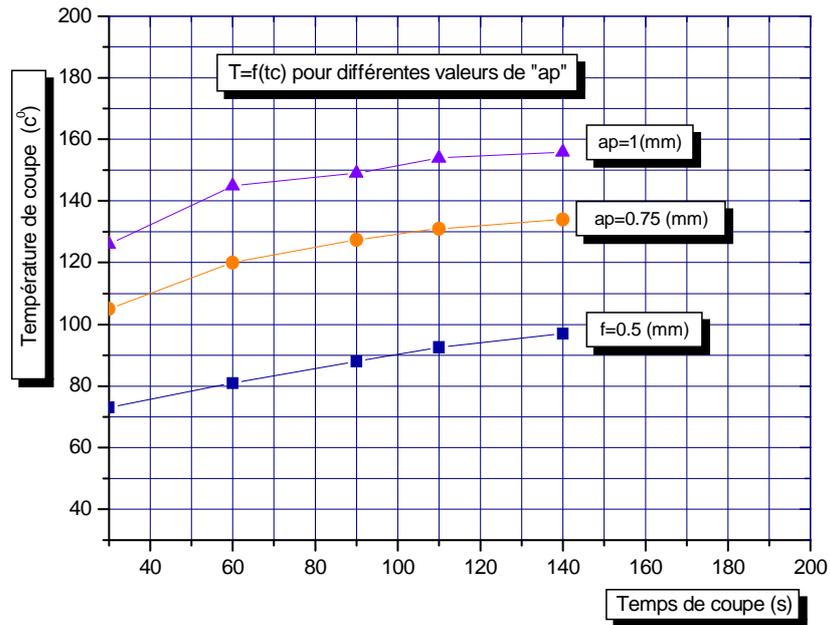


Figure (IV. 19) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différentes valeurs de la profondeur de passe, obtenues avec des plaquettes types P10, échantillon XC18 (trempé) à $V_c = 150$ m/mn et $f = 0.08$ mm/tr

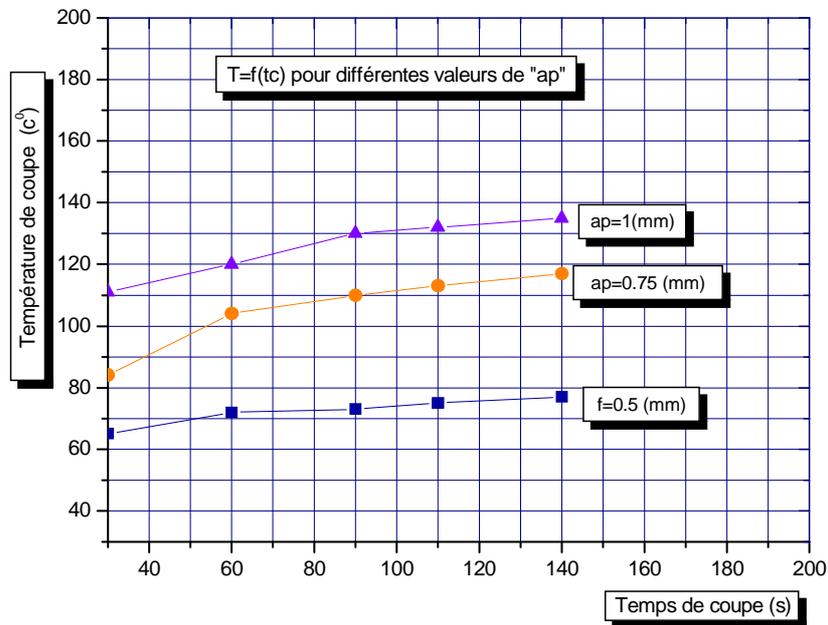


Figure (IV. 20) Comparaison des cinétiques d'évolution de la température de coupe en fonction du temps de coupe, pour différentes valeurs de la profondeur de passe, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (trempé) à $V_c = 150$ m/mn et $f = 0.08$ mm/tr

Les résultats obtenus figures (IV.17. 18 et 19,20) mettent en évidence :

L'augmentation de la profondeur de passe provoque l'accroissement de la quantité totale de la chaleur dégagée et ceci pour les deux cas étudiés.

Les cinétiques d'évolution s'amorcent plus rapidement pour les valeurs des profondeurs les moins importantes.

La quantité de chaleur en fonction de la profondeur de passe s'accompagne de l'accroissement de la longueur engagée de l'arête tranchante.

Le contact plus élevée améliore l'évacuation de la chaleur dans le corps de l'outil, car le volume de la partie active de l'outil augmente.

IV.3 Influence de la vitesse de coupe (V_c) sur les critères de rugosité

Les essais d'usinage ont été conçus en tournage dur avec deux matériaux à outils de types P10 et P35. Les résultats de la variation de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe sont présentés sur les figures (IV.21, 22et 23.)

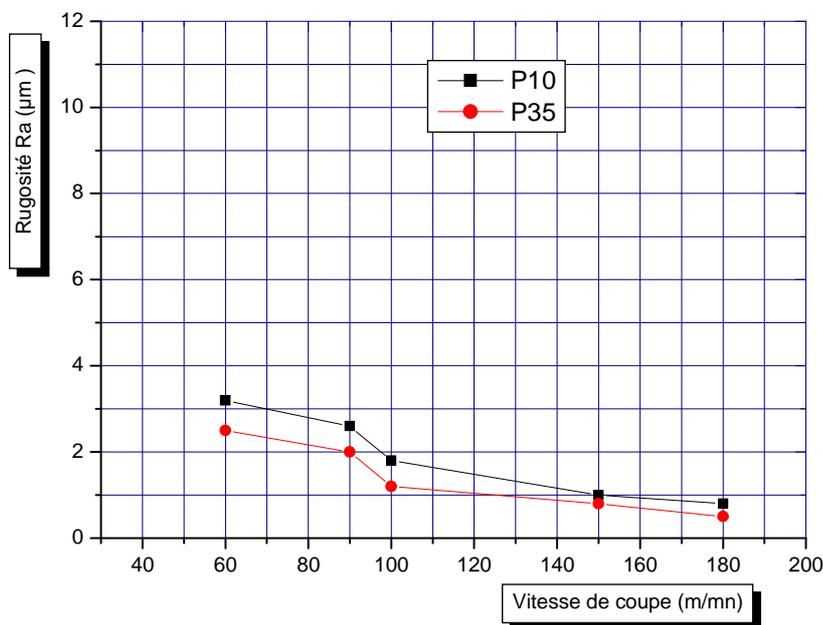


Figure (IV. 21) Influence de la vitesse de coupe (V_c) sur les critères de rugosité, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (trempé), $f=0.08$ (mm/tr) et $a_p=0.5$ (mm)

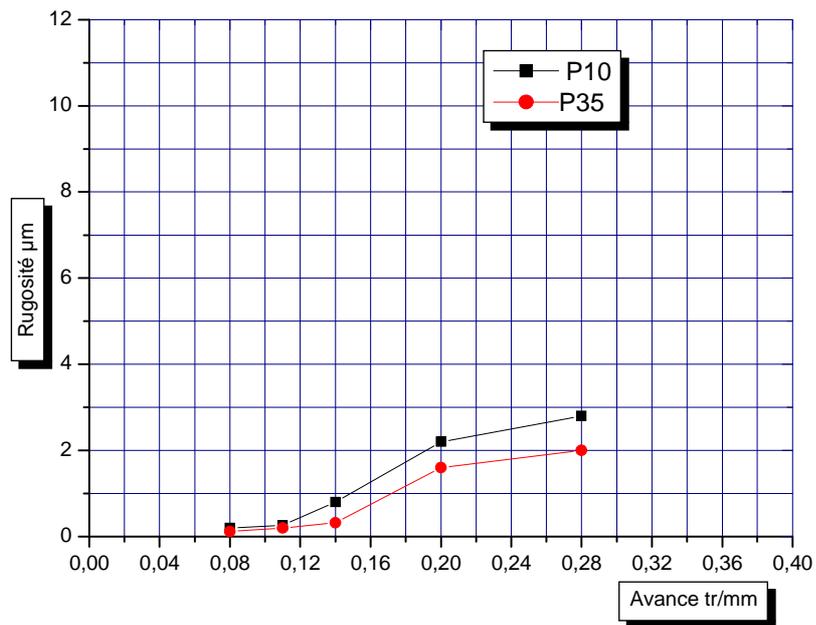


Figure (IV. 22) Influence de l'avance sur les critères de rugosité, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (trempé), $V_c = 150$ (m/mn) et $a_p = 0.5$ (mm)

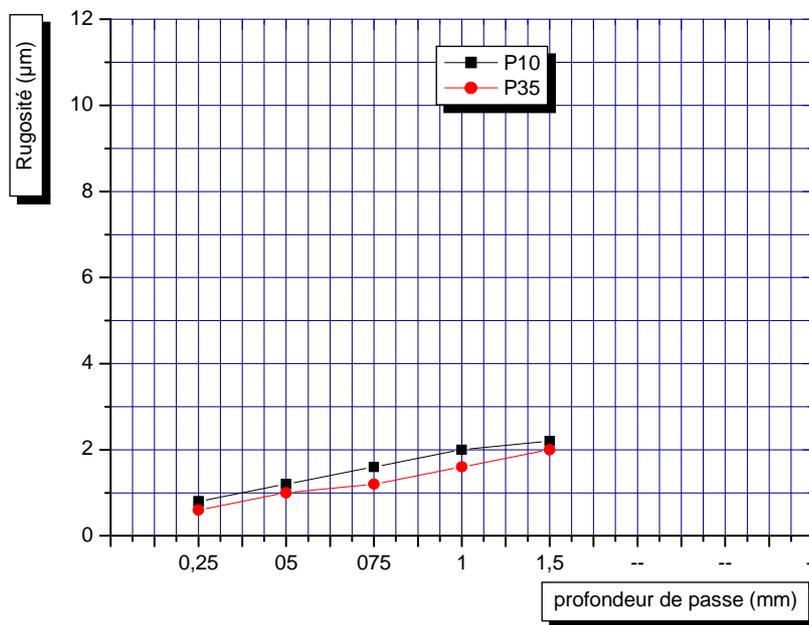


Figure (IV. 23) Influence de la profondeur de passe sur les critères de rugosité, obtenues avec des plaquettes types P10 et P35, échantillon XC18 (trempé), $V_c = 150$ (m/mn) et $f = 0.08$ (tr/mm)

Les résultats des rugosités obtenus par les deux matériaux de coupe figures (IV.21. 22et 23) sous l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), a permis de montrer que l'avance est le facteur déterminant de la qualité de l'état de surface usinée. Une augmentation de la vitesse de coupe conduite à une diminution de la rugosité de même l'effet de la profondeur de passe est faible sur la rugosité.

IV.4 Influence du temps de coupe sur l'usure en dépouille (VB)

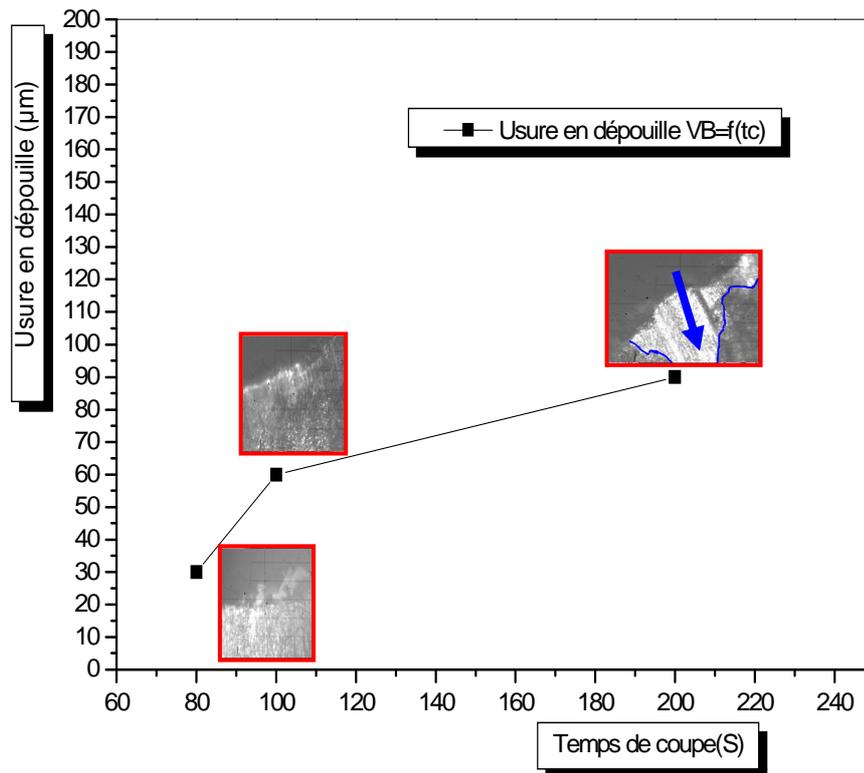


Figure (IV. 24) Evolution de l'usure en dépouille VB en fonction du temps de coupe, obtenues avec des plaquettes types P35, échantillon XC18 (trempé), $V_c = 150$ (m/mn) , $f = 0.08$ (tr/mm) et $a_p = 0,5$ mm

Le frottement de la pièce contre la face en dépouille fait apparaître une zone d'usure frontale, dont la hauteur VB est plus ou moins régulière.

Le suivi de l'évolution de l'usure en dépouille VB pour le matériau à outil testé est représenté sur la figure (IV. 24), on remarque que l'usure augmente avec l'augmentation de temps de coupe.

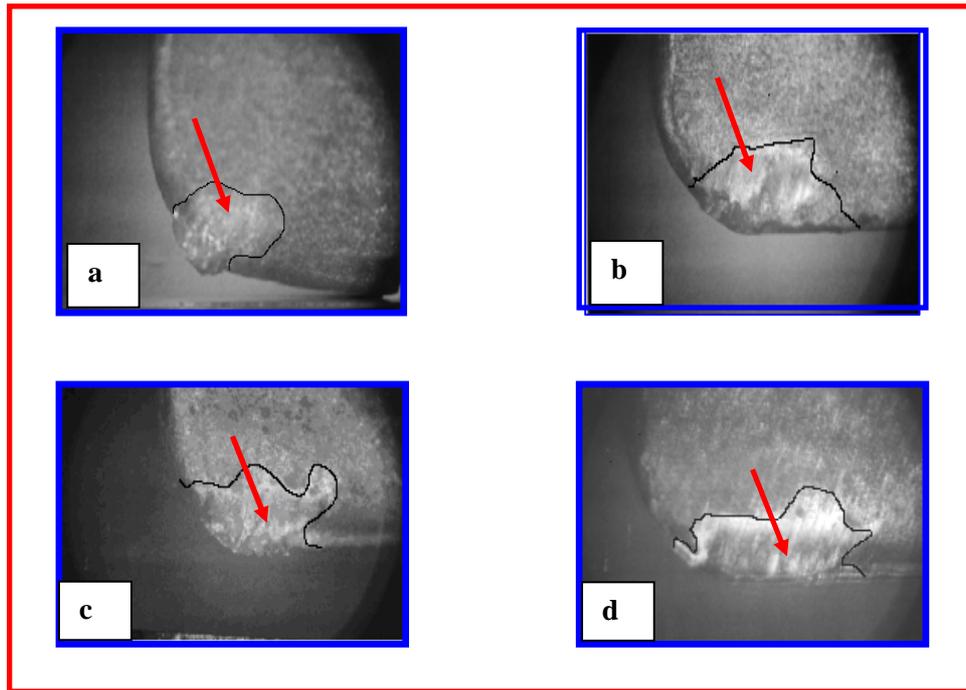


Figure (IV. 25, a, b, c et d) Micrographie de l'usures en cratère KT en fonction du temps de coupe , obtenues avec des plaquettes types P10, échantillon XC18 (trempé), $V_c = 150$ (m/mn) , $f = 0.08$ (tr/mm) et $a_p = 0,5$ mm

L'analyse de ces résultats de l'usure en cratère KT figure (IV.25), se caractérise par une évolution plus stable, qui devient de plus en plus intense et qui s'accroît brusquement.

IV.5 analyse des surfaces usinées

L'augmentation des paramètres de coupe (vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) se traduit par une élévation de température de coupe ce qui favorise la formation des zones blanches, donc l'élévation de la température de coupe va produire de l'austénite qui va se transformer lors du refroidissement en martensite qui apparaît blanche sur les micrographies, figure (IV.26)

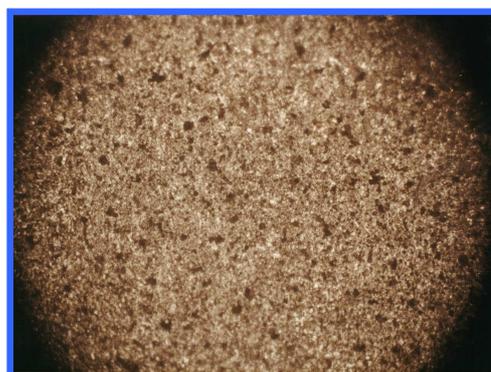


Figure (IV.26) Micrographies des surfaces usinées observées au microscope échantillon XC18, plaquettes type P35, $V_c = 150$ (m/mn), $f = 0.08$ (tr/mm) et $a_p = 0,5$ mm et dureté $H_v = 185$

Ces traces de changement de phase ont été aussi observées en extrême surface de la pièce que ce soit pour l'usinage avec un matériau P10 ou pour le cas P35.

Il a été observé que sa présence est d'autant plus nette que la vitesse de coupe augmente. Par contre, concernant son épaisseur, il est difficile de se prononcer compte tenu de sa faible valeur (~ 1 à $2 \mu\text{m}$).

Par tournage, les pièces métallique auront une surface durcie s'averre très compliquée à cause des mécanismes qui apparaissent au niveau du contacte outil coupe pièce.

Il y a aussi des modifications dans la structure, cette dureté donne naissance à une couche déformée plastiquement par usinage.

En utilisant un micro dure mètre pour mesurer la nouvelle couche superficielle modifiée figure (IV.27) à l'aide d'un teste de micro dureté

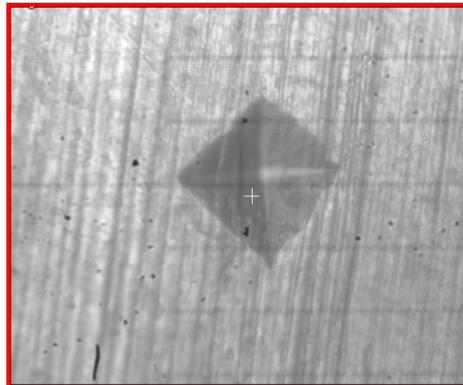


Fig IV.27 micrographie pour mesurer la nouvelle dureté de la couche superficielle modifiée Après l'usinage

IV.6 Conclusions de l'analyse expérimentale de la coupe

A travers cette étude expérimentale sur les phénomènes physiques mis en jeu à l'interface outil-pièce-copeau et des analyses des produits de coupe (pièce et copeau), nous avons mis en évidence la complexité des mécanismes thermomécaniques intervenant pendant la coupe.

Cependant, une première étude sur la coupe tridimensionnelle a parmi de montrer l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), de la dureté apparente et de la microstructure du matériau usiné sur la température de coupe et l'intégrité de surface usinée. L'analyse des résultats pourrait nous permettre de définir des conditions de coupe et un état métallurgique optimaux permettant d'obtenir de bons états de surface avec des gradients de contraintes favorables pour augmenter la résistance en fatigue des pièces usinées et pour diminuer les efforts de coupe afin de diminuer l'usure de l'outil et augmenter sa durée de vie.

Conclusion générale

Dans la première partie de ce travail nous avons pu concevoir et monter un appareil de mesure de la température avec une précision acceptable malgré les problèmes auxquels nous nous sommes confrontés on en cite le manque de fils de thermocouples.

Dans la deuxième partie de ce travail nous avons abouti aux conclusions suivantes:

- Cet appareil de mesure a permis de mettre clairement en évidence l'évolution de la température lors de l'usinage en tournage d'un échantillon XC 18 (C22) avec des matériaux différents P10 et P35.
- L'intérêt que représente les mesures, comme la température, le flux thermique lors de la coupe.
- Les phénomènes d'apparition de couches blanches en tournage dur.
- Le rôle de la coupe et de l'état métallurgique du matériau sur l'intégrité des surfaces usinées.
- Les techniques permettant d'analyser les mécanismes qui interviennent lors de la formation de copeau et d'apporter une contribution sur la compréhension de la coupe.
- L'analyse des aspects thermiques de la coupe par thermocouple a permis de dégager des tendances intéressantes sur l'usinabilité de l'acier.
- L'influence de la microstructure sur la température de la face latérale et de la face de coupe.

En fin nous pouvons définir des conditions de coupe et un état métallurgique optimal permettant d'obtenir de bons états de surface avec des gradients de contraintes favorables à l'augmentation de la résistance en fatigue des pièces usinées et de diminuer les efforts de coupe afin de réduire l'usure de l'outil et d'augmenter ainsi sa durée de vie.

Perspectives

- La possibilité d'une modélisation du contact à l'interface outil copeau basée sur l'hypothèse d'un écoulement viscoplastique dans la région du copeau adjacente à la face de coupe et la pointe de l'outil.
- Les aspects d'intégrité de surface et de comportement du matériau en usinage dur.

- [1] **Guénaël GERMAIN**, contribution a l'optimisation du procédé d'usinage assiste laser.
Thèse doctorat de l'école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, décembre 2006, P 175 France.
- [2] **Olivier BARRAU**, Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud.
Thèse de l'institut national polytechnique de Toulouse (décembre 2004) P 177, France.
- [3] **Alain PASSERON**, Tournage Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique BM, 7, P 86.
- [4] **Gautier LIST**, Étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure wc-co par la caractérisation de l'interface outil copeau application a l'usinage a sec de l'alliage d'aluminium Aéronautique AA2024 T351. Thèse de Mécanique et Matériaux, (décembre 2004) ,P156 paris.
- [5] **Mehdi Remadna**, Le comportement du système usinant en tournage dure. Application au cas d'un Acier trempé usine avec des plaquettes de CBN (nitrure de bore cubique). Thèse a été préparée au Laboratoire de conception et analyse de systèmes mécaniques (C.A.S.M) de l'INSA de LYON P 175.
- [6] **Malek HABAK**, Étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le Comportement en tournage de l'acier a roulement 100cr6. Thèse de Mécanique et Matériaux. ENSAM, (décembre 2006), P 191, paris.
- [7] **Thomas Childs, Katsuhiko Maekawa Yasuo Yama** , Metal Machining Theory and Applications, Great Britain in (2000), P416.
- [8] **Ali Benamar et Mohamed Boumahrat**. Durée de vie d'un carbure P20 pour le chariotage d'un acier C38 `a rugosité contrôlée, article Mécanique & Industries Oran (2006).
- [9] **Claire Gobbé Jean-poul Caltagirone**, Thermique et matériaux.
Actes du congrès annuel de la Société française des thermiciens France (19 mai 1999).p365 (15-21)
- [10] **ASM International Handbook Committee**, Machining. Vol. 16, March 1997 by ASM International P 1089.

- [11] **ASM International. Handbook Committee**, Metallographic and Microstructures. Officers and Trustees of ASM International (2003–2004)
- [12] **Stéphanie BISSEY** Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable a des familles d'outils : cas du Fraisage des aciers traités thermiquement, Paris 2005, P164
- [13] **Ioan Valentin Marin, Graziela Dinu-Stanciulescu, Gina Stoica** Aspects théoriques et expérimentaux concernant l'état des surfaces issus d'un procédé de tournage
Universitatea Politehnica din București, România 2003
- [14] **J.M.Bergheau, M.Dursapt, H.Hamdi, C.Pagès, J.Rech, H.Zahouani** usinage a grande Vitesse. Article J.Rech (2002), C.Pagès (2003), M.Barge (2005)
- [15] **Dave Doerwald 1 , Thomas Krug 1 , Roel Tietema 1 , Wei-Ming Sim 2, Quanshun Luo 3.**
New Tool Coatings for Light Metal Cutting. Article P 9.
- [16] **Raynald LAHEURTE** Application de la theorie du second gradient a la coupe des matériaux
École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur. Décembre 2004 université Bordeaux P 148
- [17] **Lakhdar Boulanouar***, **Mohamed Athmane Yallese**, **Kamel Chaoui**. Effet du matériau à outil et des conditions d'usinage sur la qualité de surface de l'acier 100Cr6 Trempé. Article de Laboratoire Mécanique et Structure, Université 8 Mai 1945, P 8
- [18] **Joël RECH** Contribution a la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des Revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures a la fraise-mere à grande vitesse.
19 décembre 2002 Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Cluny LILLE,
METZ – PARIS P 268.

Résumé

Aujourd'hui, en raison des contraintes environnementales et économiques l'usinage fait parti des domaines en plein développement. Le tournage dur est un procédé récent qui permet d'usiner des aciers traités avec des duretés élevées. Il permet en particulier d'obtenir, sans lubrification des pièces avec un état de surface et une précision proche de ceux issus de la rectification. La maîtrise du procédé d'usinage nécessite la compréhension des mécanismes intervenant dans la zone de coupe. L'objectif de cette étude, c'est l'effet de température de coupe sur l'usure des outils et les caractéristiques métallurgiques des alliages usinés.

Mots-clés : usinage à sec, plaquettes, usure des outils, analyse de surface, température, thermocouple,

ملخص

لأسباب اقتصادية وأخرى بيئية هناك عدة بحوث في مجال التصنيع للتحكم في التصنيع (الخراطة) من أجل الحصول على قطع مصنعة ذات صلادة عالية و حالة سطح جيدة و دقيقة, قريبة من المحصل عليها بعملية التخليخ, بدون استعمال سائل التبريد. الهدف من هذه البحث هو دراسة تأثير درجة حرارة القطع علي تآكل أدوات القطع وتأثيرها على الخصائص المعدنية للمواد المصنعة. **كلمات مفتاحيه** : الترموكوبل، الحرارة، معالجة الأسطح، التصنيع الجاف، تآكل الأداة.