

N° d'ordre : 171/ Mag/ 2007  
Série : 004/ GM/ 2007

## Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de magister  
En Génie Mécanique

Option : **Mécanique appliquée en engineering**

### Intitulé

# Impact du phénomène de coupe sur la géométrie des outils de coupe

Soutenu le : 24/06//2007

Par

**Bentaleb Fayçal**

Devant le jury

Président	BOUGHOUAS	Hamlaoui	M.C Université Mentouri - Constantine
Rapporteur	AMARA	Idriss	M.C Université Mentouri - Constantine
Examineur	BOUKEBBAB	Salim	M.C Université Mentouri - Constantine
Examineur	FERKOUS	Embarek	M.C Université Mentouri - Constantine

# *Remerciements*

Je voudrais remercier très vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner cette thèse et tout particulièrement les examinateurs Messieurs Boukebab Salim et Ferkous Embarek, qui m'ont apporté de précieuses remarques, ainsi que Monsieur Boughous Hamlaoui qui a accepté la présidence du jury.

Je tiens à remercier chaleureusement le rapporteur de la thèse, Monsieur Amara Idriss, qui se montre toujours disponible malgré un emploi du temps très chargé. Merci pour votre écoute, vos conseils et vos encouragements qui m'ont été précieux pour mener ce travail à son terme.

Je remercie également tous les membres du laboratoire de Génie Mécanique de l'Université de Badji Mokhtar à Annaba, ainsi que tous les membres du laboratoire de l'I.U.T d'Aix en Provence en France, pour m'avoir guidé efficacement pendant ce travail et de m'avoir permis de mener à terme cette thèse.

Je remercie Monsieur Chouiter Salim, pour ses précieux conseils et pour son aide.

Que mes amis soient aussi récompensés par des grands remerciements, pour m'avoir apporté leur aide, leur soutien et la chaleur humaine dont j'avais tant besoin.

Enfin, je remercie chaleureusement toute ma famille et particulièrement mes parents pour leur soutien et leurs encouragements.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les outils de coupe</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Procédés d'usinage .....	4
I.2.1 Le perçage .....	4
I.2.2 La rectification .....	4
I.2.3 Le rabotage .....	4
I.2.4 Le tournage.....	4
I.2.4.1 Principaux éléments d'une pièce en tournage .....	5
I.2.4.2 Opération de base dans le tournage .....	5
I.3 Mouvement relatif outil / pièce .....	6
I.3.1 Mouvement de coupe $M_c$ .....	7
I.3.2 Mouvement d'avance $M_a$ .....	7
I.3.3 Mouvement de pénétration $M_p$ .....	7
I.4 Les paramètres de coupe .....	7
I.4.1 Vitesse de coupe .....	8
I.4.2 Vitesse d'avance $V_f$ .....	9
I.4.3 Avance par tour $f$ .....	10
I.4.3.1 Avance longitudinale .....	10
I.4.3.2 Avance transversale .....	10
I.4.3.3 Avance oblique .....	10
I.4.4 Profondeur de coupe $a_p$ .....	11
I.4.5 Temps de fabrication .....	12
I.4.5.1 Temps manuels « $T_m$ ».....	12
I.4.5.2 Temps technico-manuels « $T_{tm}$ » .....	12
I.4.5.3 Temps masqué « $T_z$ » .....	12
I.4.5.4 Temps série « $T_s$ » .....	12
I.4.5.5 Temps fréquentiel « $T_f$ » .....	12
I.4.5.6 Temps technologique « $T_t$ » .....	12
I.5 Géométrie sur les outils de coupe .....	12

I.5.1	Introduction .....	12
I.5.2	Les catégories des outils de coupe.....	13
I.5.2.1	Différentes parties de l'outil.....	13
I.5.2.2	Géométrie de l'outil de coupe .....	15
I.5.2.3	Plans caractéristiques de l'outil de coupe .....	16
I.5.2.4	Les Angles caractéristiques de l'outil de coupe .....	18
I.5.3	La géométrie de l'arête de coupe .....	20
I.5.3.1	Description géométrique du contact en tournage .....	20
I.5.3.2	Définition de la ligne d'arête .....	21
I.5.3.3	Définition de la ligne de coupe .....	22
I.5.3.4	Considérations sur la cinématique du copeau .....	22
I.6	Influence de la géométrie de l'outil .....	23
I.6.1	Influence de l'angle de direction d'arête .....	24
I.6.2	Influence de l'angle d'inclinaison d'arête .....	24
I.6.3	Influence de l'angle de coupe .....	25
I.7	Matériaux utilisés pour les outils de coupe .....	25
I.7.1	Les carbures métalliques frittés .....	26
I.7.1.1	Les carbures .....	26
I.7.1.2	Les carbures revêtus .....	27
I.7.2	Les céramiques .....	29
I.7.2.1	Céramique oxydée et céramique renforcée par Whiskers .....	30
I.7.2.2	Céramique non oxydée (nitrure de silicium) .....	31
I.7.2.3	Les cermets .....	31
I.7.2.4	Perspectives des céramiques .....	32
I.7.3	Le Nitrure de Bore Cubique (CBN) .....	32
I.8	Formation du copeau .....	33
I.8.1	Coupe orthogonale .....	33
I.8.2	Morphologie des copeaux .....	35
I.8.3	Efforts de coupe .....	36
I.9	Chaleur et température .....	37
I.9.1	Sources de chaleur .....	37
I.9.2	Mesure de la température .....	38
I.10	Contact à l'interface outil copeau.....	40
I.10.1	Température à l'interface outil copeau .....	40

I.10.2 Distributions des contraintes à l'interface outil copeau .....	41
I.10.3 Coefficient de frottement .....	44
I.11 Etat de surface .....	46
I.12 Conclusion .....	46

## ***Chapitre II : Recherche bibliographique***

II.1 Introduction .....	47
II.2 Influence des paramètres de coupe sur l'usure .....	48
II.2.1 Vitesse de coupe .....	49
II.2.2 Avance .....	49
II.2.3 Profondeur de passe .....	49
II.2.4 Matériau usiné .....	49
II.2.5 Lubrification .....	49
II.3 Formes d'usure .....	49
II.3.1 La cratérisation de la face d'attaque .....	50
II.3.2 L'usure en dépouille ou usure frontale .....	51
II.3.3 Entaille .....	52
II.3.4 Usure en cratère .....	52
II.3.5 Ecaillage de l'arête de coupe .....	53
II.3.6 Rupture par cassure en pointe .....	53
II.3.7 Arête rapportée .....	54
II.3.8 Déformation plastique .....	54
II.3.9 Fissuration de l'arête de coupe ou usure en peigne .....	55
II.4 Les mécanismes d'usure des outils .....	55
II.4.1 Usure par adhésion .....	56
II.4.2 Usure par abrasion .....	57
II.4.3 Usure par diffusion .....	58
II.4.4 Usure par fluage et oxydation .....	60
II.4.5 Usure avec effets de chocs .....	61
II.5 Critères d'usure .....	61
II.5.1 Les critères directs .....	61
II.5.2 Les critères indirects .....	62
II.5.3 Point de vue pratique .....	62
II.6 Modèles de lois d'usure .....	63

II.6.1	Modèle de Taylor généralisé .....	63
II.6.2	Modèle de Gilbert .....	63
II.6.3	Modèle de Colding .....	63
II.6.4	Modèles de Koning-Depiereux (1969) .....	64
II.6.5	Bilan des modèles d'usure .....	64
II.7	Détermination de la loi d'usure .....	65
II.8	Modélisation de l'usure des outils de coupe .....	65
II.8.1	Modèle de Remadna Mehdi .....	66
II.8.2	Modèle de Christian Pagés .....	70
II.9	Conclusion .....	74
<b><i>Chapitre III : Expérimentation</i></b>		
III.1	Introduction .....	75
III.2	Détermination des paramètres d'entrée .....	75
III.2.1	Outils et revêtements .....	75
III.2.1.1	Description de la porte plaquettes .....	76
III.2.1.2	Description des plaquettes .....	76
III.2.2	Géométrie de la coupe .....	77
III.2.3	Matière usinée .....	78
III.2.4	Paramètres de coupe .....	79
III.2.5	Détermination de l'effort de coupe.....	81
III.3	Présentation de l'expérience .....	82
III.3.1	Micromesure 2 .....	82
III.3.2	Logiciel CHR Monitor .....	84
III.4	Procédure d'exécution .....	84
III.4.1	Méthodologie d'exécuter l'expérience .....	84
III.4.2	Contrôle de l'usure de l'outil de coupe .....	88
III.4.2.1	Modes d'usure étudiés .....	89
III.4.2.2	Procédure de contrôle.....	90
III.5	Conclusion .....	92
<b><i>Chapitre IV : Résultats et interprétations</i></b>		
IV.1	Introduction .....	93
IV.2	Analyse de l'expérience .....	93
IV.2.1	Validation des essais .....	93

IV.2.2 La détermination des variables de sortie .....	93
IV.2.3 Analyse de l'expérience .....	93
IV.3 Etude du contact outil-pièce .....	97
IV.3.1 Usure en dépouille .....	97
IV.3.2 Usure en cratère .....	98
IV.3.3 forme de l'arête de coupe après usinage .....	99
IV.4 Evolution des copeaux .....	103
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>105</b>

## I.1 Introduction :

La coupe des métaux est un processus thermomécanique fortement couplé dans lequel les déformations plastiques, la chaleur et les phénomènes de frottement jouent un rôle critique en terme d'usure. Quand un outil pénètre dans une pièce métallique pour former un copeau, la matière située près de la surface est fortement cisailée. La déformation s'effectue à très grandes vitesses et le copeau se trouve en contact intime avec la face de coupe de l'outil. Les contraintes et la température à l'interface sont considérablement élevées et conduisent à des phénomènes physico-chimiques très complexes. Ceux-ci ayant lieu dans une région très petite autour de la pointe de l'outil, les phénomènes liés à la tribologie de la coupe sont très difficiles à étudier et à modéliser [Gaut\_04].

L'étude de ces phénomènes de coupe des matériaux consiste à rechercher les relations entre les caractéristiques du matériau usiné, celles de l'outil et les paramètres fondamentaux caractérisant les conditions de coupe (forces, puissance consommée, usure d'outil et qualité de coupe). L'ensemble des conditions et données détermine les performances du procédé.

Dans l'absolu, on pourrait imaginer dissocier l'effet de l'environnement (machine) du procédé lui-même qui résume les interactions entre la pièce et l'outil.

Dans la réalité, de nombreuses études ont montré que ce n'était pas possible car la zone d'interaction pièce - outil est comprise dans un système (figure I.1). Par exemple l'outil est monté sur une tourelle, elle-même montée sur un bâti, de même la pièce est maintenue dans un mandrin lui-même supporté par une broche.

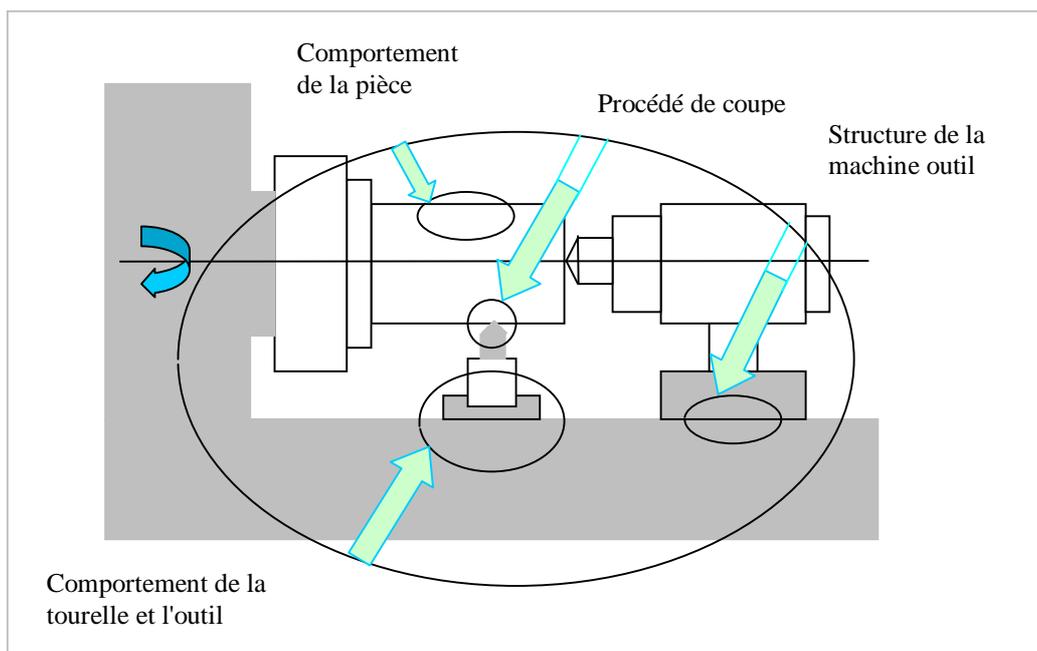


Figure I.1 : Définition du système usinant [Rema\_01].

On cherche cependant à limiter les effets périphériques à la coupe pour focaliser l'observation dans une zone proche de la coupe.

## **I.2 Procédés d'usinage :**

L'usinage s'effectue dans le but de donner aux pièces brutes la forme, les dimensions nécessaires, et la pression demandée par le concepteur dans son dessin de définition par enlèvement de copeau (de la surépaisseur) sur des machines outils appropriées. En fonction de la forme à donner et du type de la machine outil, on distingue les opérations de coupe suivantes : le tournage, le perçage, la rectification, le fraisage, le rabotage, etc....

### **I.2.1 Le perçage :**

Pendant le perçage, la pièce est fixe, tandis que l'outil est animé de deux mouvements continus simultanés : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance suivant l'axe de l'outil.

Le perçage s'effectue sur des machines à percer appelées perceuses.

### **I.2.2 La rectification :**

Au cours de la rectification, l'outil de coupe (meule) est animé d'un mouvement de rotation, la pièce se déplace en translation (rectification plane) ou tourne autour de son axe tout en se déplaçant en translation le long de son axe (rectification cylindrique).

La rectification se fait sur des rectifieuses planes et cylindriques.

### **I.2.3 Le rabotage :**

Lors du rabotage, le mouvement rectiligne intéresse soit la pièce, soit l'outil. Sur une raboteuse, on met en mouvement la pièce tout en déplaçant latéralement l'outil d'une quantité égale à l'avance. Sur un étau limeur, c'est l'outil qui s'effectue un mouvement rectiligne en revenant à l'origine à la suite de chaque course de travail, tandis que la pièce se déplace latéralement d'une quantité égale à l'avance désirée.

Le rabotage s'effectue sur des machines outils appelées raboteuses ou étaux limeurs.

### **I.2.4 Le tournage :**

Pendant le tournage, la pièce tourne autour de son axe, tandis que l'outil s'engage dans sa surface à une profondeur déterminée. L'outil est animé d'un mouvement d'avance continu parallèle ou perpendiculaire à l'axe de la pièce.

Le tournage s'effectue sur machine tour.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'impact du phénomène de coupe sur la géométrie des outils de coupe pendant les opérations de tournage.

### **I.2.4.1 Principaux éléments d'une pièce en tournage :**

La figure I.2 illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage due à les opérations précédentes. La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée « surface coupée » [Norm\_02].

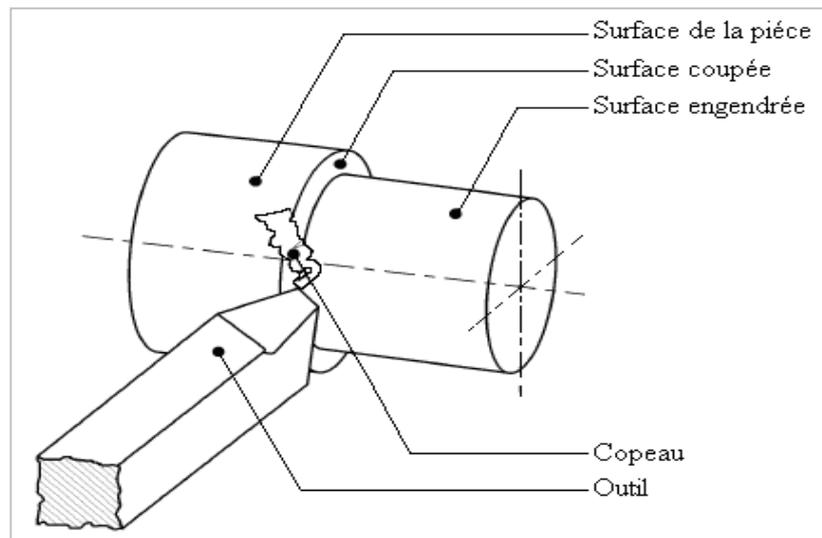


Figure I.2: Surfaces de la pièce [Norm\_02].

### **I.2.4.2 Opération de base dans le tournage :**

Il existe quatre opérations de base (figure I.3) [Pass-A]:

- Tournage longitudinal, où chariotage (figure I.3.1),
- Dressage (figure I.3.2),
- Tournage de cônes (figure I.3.3),
- Contournage (figure I.3.4).

Pour faciliter le choix des outils et des paramètres de coupe, on peut souvent dissocier l'usinage des pièces complexes en profils de coupe élémentaires énumérer précédemment [Pass\_A].

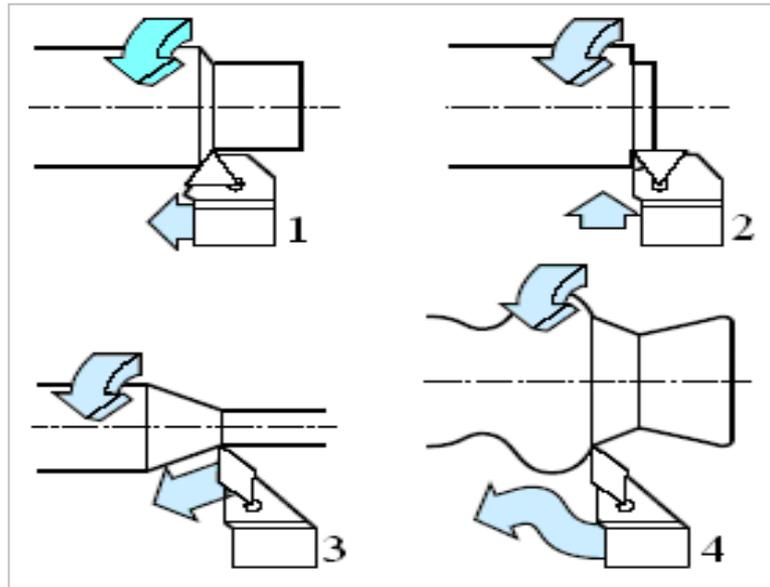


Figure I.3 : Opération de base en tournage [Pass\_A].

### ▼ Chariotage :

Lors d'une opération de chariotage (figure I.3.1), la pièce est animée d'un mouvement de coupe, qui est une rotation, le mouvement d'avance 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 [Pass\_A].

### I.3 Mouvement relatif outil / pièce :

Lors de la génération d'une surface par enlèvement de matière, la surface engendrée sur la pièce est due au mouvement de l'outil par rapport à la pièce [Geli\_95].

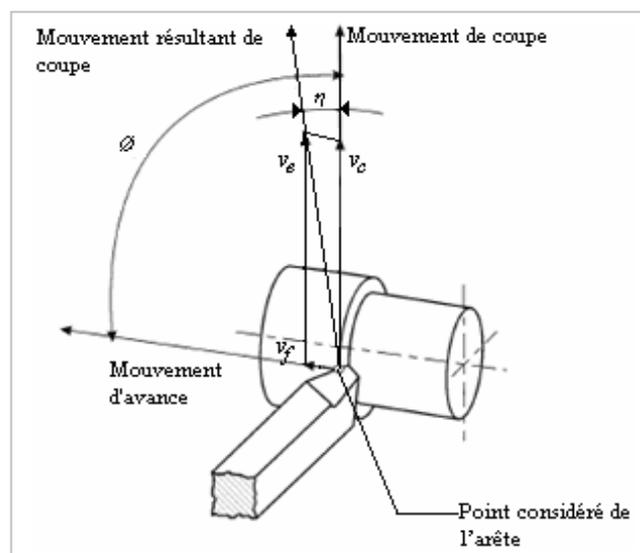


Figure I.4 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage [Norm\_02].

### I.3.1 Mouvement de coupe $M_c$ :

Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce [Norm\_02]. Il participe directement au détachement de la matière sous forme de copeaux pendant la course de travail [Cour\_03].

### I.3.2 Mouvement d'avance $M_a$ :

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance a pour but de décaler latéralement une quantité  $f$  dite avance, pour que l'outil puisse à la nouvelle course de travail détacher d'autres copeaux.

Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance combinés constituent le mouvement résultant de coupe ( $v_e$ ), alors que l'angle contenu entre ces deux mouvements est appelé angle de direction d'avance ( $\theta$ ) (figure I.4) [Cour\_03] [Norm\_02].

### I.3.3 Mouvement de pénétration $M_p$ :

C'est le mouvement qui détermine l'épaisseur de la couche de métal à enlever à chaque opération qui prend le nom de passe [Cour\_03].

## I.4 Les paramètres de coupe :

Les paramètres de la coupe sont, d'une part, des grandeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres cinématiques de coupe) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres géométriques de coupe) (Figure I.5) [Norm\_02].

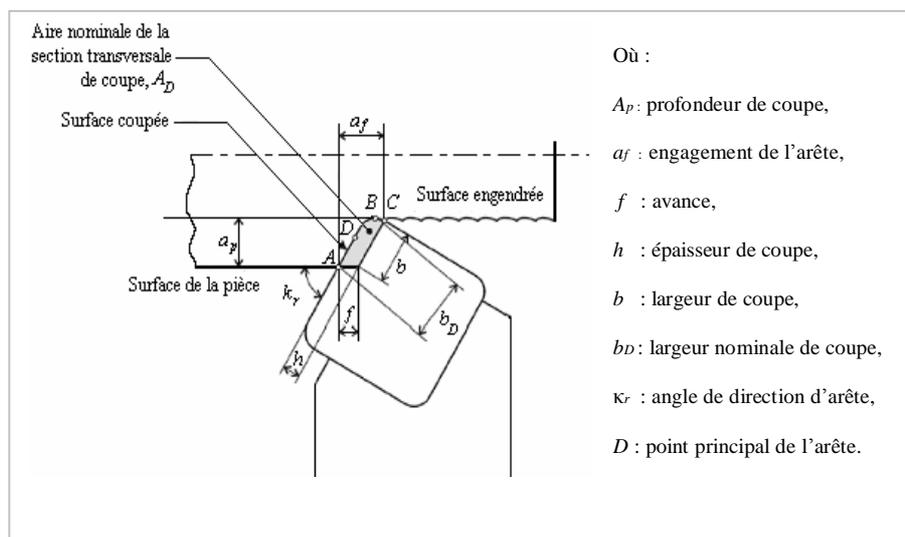


Figure I.5 : Dimensions de coupe dans le cas de tournage [Norm\_02].

### 1.4.1 Vitesse de coupe :

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire  $w$  [rad/s] (soit  $N$  [tr/min]), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via la porte pièce.

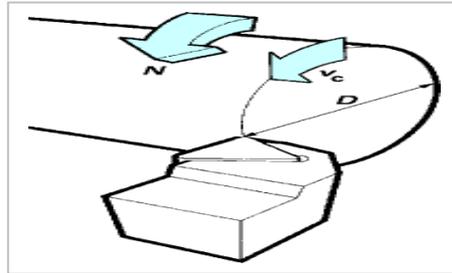


Figure I.6 : vitesse de coupe [Pass\_A].

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

$$V_c = \frac{D}{2} \times W \quad (\text{I-1})$$

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

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi D} \quad (\text{I-2})$$

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

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

Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante (figure I.7).

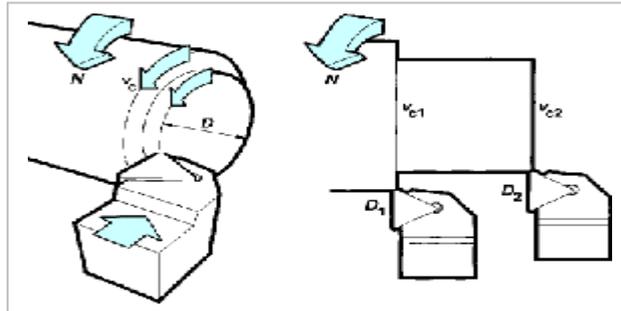


Figure I.7 : définition des trois variables :  
Vitesse de coupe  $V_c$ , diamètre  $D$ , Vitesse de rotation  $N$  [Pass\_A].

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

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

Les fabricants de matériaux à outils fournissent des valeurs de vitesse de coupe pour chaque type de plaquette en fonction du matériau de pièce, et ce pour une durée de vie standard de la partie active de l'outil (45 [min] par exemple).

La valeur numérique de  $V_c$  peut aller, à titre indicatif, de 40 [m/min] avec un outil en acier rapide coupant une pièce en acier à 0,3 % de carbone, à plus de 600 [m/min] pour la même pièce, avec un outil céramique, en passant par des valeurs courantes autour de 200 [m/min] pour des outils à pastille en carbure métallique.

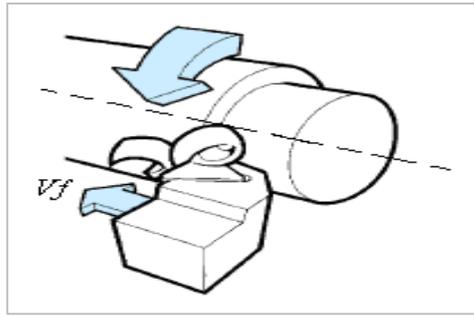
L'évolution de ces valeurs de vitesses de coupe en une trentaine d'années a imposé une évolution parallèle des puissances à la broche des tours, afin de pouvoir utiliser au mieux les propriétés des outils.

#### 1.4.2 Vitesse d'avance $V_f$ :

La vitesse d'avance  $V_f$  (figure I.8) est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en [mm/min] soit en [mm/tour].

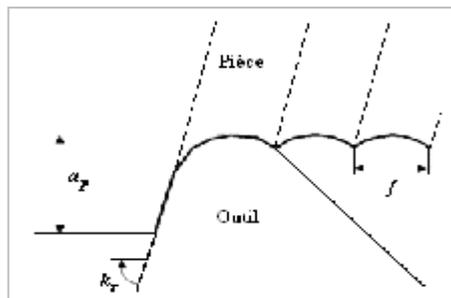
La vitesse d'avance :

$$V_f = f \times N \quad (\text{I-3})$$

Figure I.8 : Vitesse d'avance  $V_f$  [Pass\_A].

### I.4.3 Avance par tour $f$ :

L'avance notée  $f$  est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. Elle influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent (figure I.9).

Figure I.9 : L'avance  $f$  dans le cas de tournage [Enac\_72].

On distingue trois sortes d'avance [Bena\_06] :

#### I.4.3.1 Avance longitudinale :

On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.

#### I.4.3.2 Avance transversale :

On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.

#### I.4.3.3 Avance oblique :

On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.

L'avance peut être désignée par :

- Avance par tour "  $f_{tr}$  ",
- Avance par battement "  $f_{bat}$  ",
- Avance par dent "  $f_z$  ",

- Avance par minute "  $f_{\min}$  ".

Elle s'exprime respectivement par :

- Millimètre par tour [**mm/tr**], lors du tournage, fraisage, perçage, ...etc,
- Millimètre par battement [**mm/bat**], lors du rabotage, mortaisage, ...etc,
- Millimètre par dent [**mm/dent**], lors du fraisage, brochage, ...etc,
- Millimètre par minute [**mm/min**], dans tous les cas d'usinage.

L'avance représente une donnée clé pour la qualité de la surface usinée, elle influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent [Pass\_A].

#### I.4.4 Profondeur de coupe $a_p$ :

En chariotage, la profondeur de coupe  $a_p$  (figure I.10) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [Pass\_A].

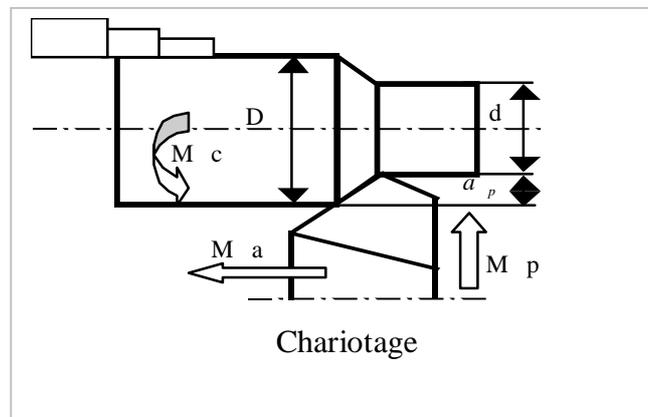


Figure I.10 : Représentation de la profondeur de passe  $a_p$  [Cour\_03].

Il vaut mieux enlever les surépaisseurs d'usinage sans faire beaucoup de passes. Pourtant, quand on prend une profondeur de passe très grande, la précision d'usinage diminue à cause de la présence des efforts de coupe très élevés. Dans ces cas, des vibrations apparaissent et l'état de surface devient plus mauvais. D'habitude, on choisit la profondeur de passe en dépendance des surépaisseurs d'usinage et de la rugosité superficielle demandée. Aussi le nombre de passe dépend de la rigidité du système machine-outil, pièce, outil. Si ce système a une faible rigidité, ou si on usine des pièces ayant le diamètre assez petit et la longueur assez grande, on choisit dans ce cas une profondeur de passe faible [Cour\_03].

La profondeur de passe et l'avance vont influencer aussi sur la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière [Lahe\_04].

#### **I.4.5 Temps de fabrication :**

##### **I.4.5.1 Temps manuels « $T_m$ » :**

C'est la durée d'un travail physique ou mental dépendant uniquement de l'opérateur, il est exprimé en centième de minutes [C min].

##### **I.4.5.2 Temps technico-manuels « $T_m$ » :**

C'est la durée pendant laquelle le travail dépend des actions composantes et simultanées de l'opérateur et de la machine.

##### **I.4.5.3 Temps masqué « $T_z$ » :**

C'est la durée d'un travail humain ou machine accompli pendant l'exécution d'un travail prédominant.

##### **I.4.5.4 Temps série « $T_s$ » :**

C'est la durée des opérations nécessaires pour équiper le poste, ainsi que celles intervenant lors du montage de poste de travail.

##### **I.4.5.5 Temps fréquentiel « $T_f$ » :**

C'est la durée d'une action, ou d'un ensemble d'actions qui modifie périodiquement le déroulement du cycle.

##### **I.4.5.6 Temps technologique « $T_t$ » :**

C'est la durée pendant laquelle le travail effectué dépend uniquement des moyens matériels [Cour\_03].

#### **I.5 Géométrie sur les outils de coupe :**

##### **I.5.1 Introduction :**

Le premier métal à outil de coupe utilisé fut l'acier fondu au carbone (acier fondu au creuset soigneusement dosé); puis vinrent les aciers rapides au wolfram ou tungstène vers 1900, augmentant le pouvoir coupant des outils de 3 à 5 fois .

Aujourd'hui les aciers rapides sont couramment remplacés par des alliages en carbures métalliques, utilisés sous forme de pastille ou plaquette brassée constituant le bec de l'outil de coupe. Leur pouvoir coupant est supérieur de 4 à 6 fois celui des meilleurs outils de coupe en acier rapide [Jite\_02].

Avant d'entamer la présentation des performances des outils de coupe acquises au cours des différents processus, nous présentons tout d'abord la nomenclature descriptive de l'outil de coupe.

### **I.5.2 Les catégories des outils de coupe :**

Les outils de coupe sont classés en trois grandes catégories [Verg\_J] :

Ø **Les outils simples à tranchant unique** : Outils de tour et de rabotage.

Ø **Les outils associés ou outils à arêtes multiples** : Outils fraise, foret, Alésoir, scie, lime.

Ø **Les outils – meules** : Ce sont des outils à arêtes multiples dont le mode d'action est un peu différent de celui des outils de 2<sup>ème</sup> groupe.

Dans cette étude et vue la diversité de l'outillage utilisé en construction et fabrication mécanique, nous limitons nos investigations aux outils de coupe de tournage qui se divisent à leur tour en quatre groupes : les outils de façonnage extérieur, les outils de façonnage intérieur, les outils de forme et les porte-outils.

Parmi les outils usuels, on distingue :

- Les outils à chariote,
- A dresser et à retoucher,
- Les outils pelle, à saigner et à tronçonner.

#### **I.5.2.1 Différentes parties de l'outil : [Geli\_D]**

La forme élémentaire d'un outil de coupe se présente comme un barreau prismatique (corps ou partie passive) terminé par une arête vive (arête tranchante ou partie active) en forme de coin qui s'engage dans le métal sous l'action d'un effort F (figure I.11).

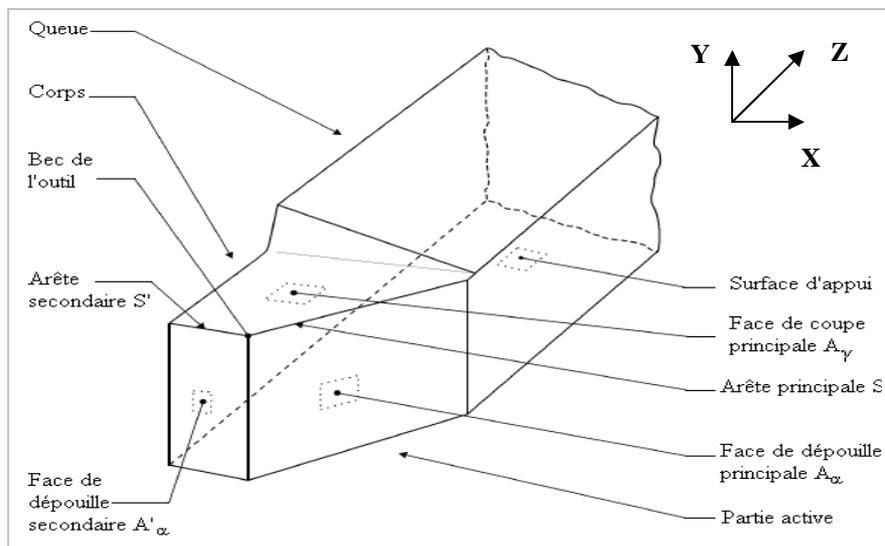


Figure I.11 : corps et parties actives d'un outil de coupe [Norm\_02].

**a. Une partie appelée corps de l'outil :**

C'est la partie de l'outil qui support les éléments composants qui sert à sa fixation et à sa mise en position sur la machine. Elle doit être rigide pour résister aux efforts qui prennent naissance pendant la coupe.

Il est réalisé en acier dans les nuances XC 38 et XC 48. Sa section est carrée, rectangulaire ou circulaire. Il doit permettre aussi un repérage correct de l'outil dans la porte outil. Pour satisfaire cette condition, le corps prismatique possède deux surfaces de références de bonnes qualités géométriques.

Il doit pouvoir être fixé rapidement et facilement dans la porte outil.

**b. La partie active de l'outil :**

C'est la partie fonctionnelle, composée de la face de coupe, des faces en dépouille et des arêtes tranchantes. La dureté de la partie active doit être plus grande que celle du métal à usiner.

**c. La face de coupe ou d'attaque :**

C'est celle sur la quelle glisse le copeau lors de la coupe.

**d. La face en dépouille:**

C'est celle qui est placée devant la partie de la pièce qui vient d'être tournée. Il faut distinguer la face en dépouille principale et les faces en dépouille secondaires. La face en dépouille principale est celle dont l'intersection avec la face de coupe donne l'arête tranchante principale.

**e. La face brise copeau :**

Cette face résulte d'une modification de la face de coupe ayant pour but de briser le copeau afin d'éviter que celui-ci ne soit trop long et s'enroule autour de l'outil.

**f. L'arête tranchante principale :**

C'est l'arête tranchante destinée à la coupe du matériau. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe et de la face en dépouille principale.

**g. L'arête tranchante secondaire :**

C'est une arête qui commence à l'extrémité de l'arête principale et qui s'étend dans une autre direction. Elle résulte de l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille secondaire. Certains outils possèdent plusieurs arêtes secondaires.

**h. Le bec de l'outil :**

C'est la partie où se rejoint l'arête principale et l'arête secondaire, Cette partie peut être vive, arrondie ou droite.

Comportant les mêmes éléments, on trouve les outils de coupe à droite et les outils de coupe à gauche.

### I.5.2.2 Géométrie de l'outil de coupe : [Ferk\_E]

La géométrie de l'outil coupant est définie en fonction de sa situation dans l'espace (figure I.12).

On distinguera cette géométrie dans deux repères bien distincts :

#### a. La géométrie de l'outil en travail :

Elle dépend des conditions cinématiques de travail, ainsi que de la mise en position de l'outil dans son support lié à la machine.

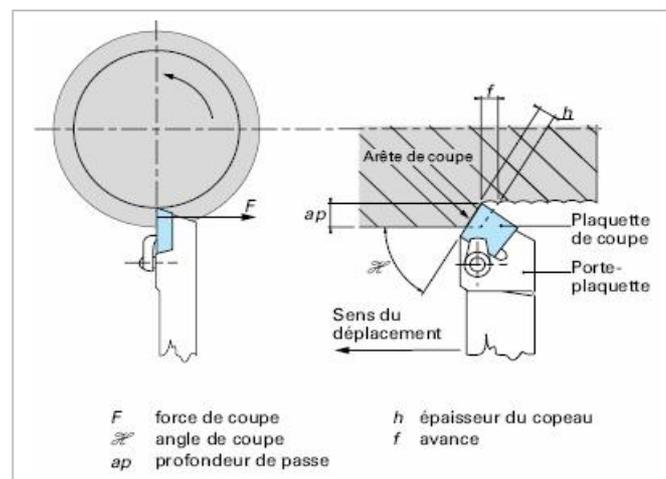


Figure I.12 : Théorie de la coupe ; définitions et principe [Bagu\_F].

#### b. La géométrie de l'outil en main :

Elle est liée aux conditions cinématiques de travail supposées et la forme du corps solidaire de la partie active de l'outil. Dans le cas où les conditions cinématiques de travail de coupe seraient complexes, il faut nécessairement tenir compte des conditions réelles d'usinage et passer obligatoirement par l'étude géométrique de l'outil en travail réel pour déterminer celle de l'outil en main. La connaissance de la géométrie de l'outil en main est nécessaire pour l'exécution de l'affûtage, ainsi que pour la métrologie des différents composants de la partie active de l'outil.

### I.5.2.3 Plans caractéristiques de l'outil de coupe : [Ferk\_E]

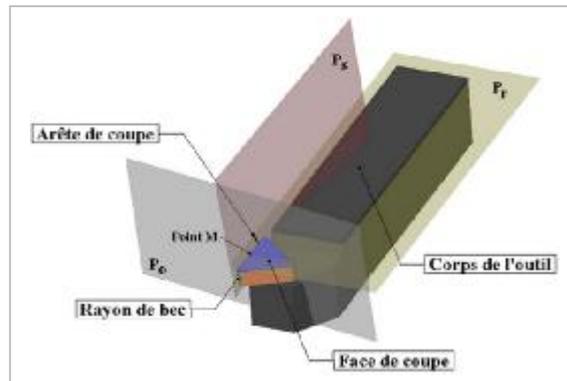


Figure I.13 : éléments caractéristiques par plan de coupe [Lahe\_04].

La partie active de l'outil de coupe comporte un certain nombre de plans caractéristiques qui définissent la relation entre les différentes faces de l'outil de coupe et les directions de coupe (figure I.13).

En fonction de la géométrie de l'outil, qu'il soit en main ou en travail, on distingue les différents plans caractéristiques suivants (figure I.14) :

#### a. Pour le système de l'outil en main : [Pass\_A]

##### Ø Le plan de référence de l'outil en main $P_r$ :

C'est le plan qui passe par le point  $M$  considéré de l'arrêt, et contenant l'axe de l'outil (pour les outils tournants) ou parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps d'outil (pour les outils de tournage et rabotage). Il a pour normale en ce point la vitesse de coupe supposée.

##### Ø Le plan d'arête de l'outil $P_s$ :

C'est le plan tangent à l'arête, au point  $M$  considéré et perpendiculaire au plan de référence de l'outil.

##### Ø Le plan de travail conventionnel $P_f$ :

C'est le plan perpendiculaire au plan de référence de l'outil  $P_r$ , au point  $M$  considéré de l'arête, et parallèle à la direction supposée de la vitesse d'avance de l'outil.

##### Ø Le plan vers l'arrière de l'outil $P_p$ :

C'est le plan passant par le point  $M$  considéré, qui est perpendiculaire à la fois au plan  $P_r$  et au plan  $P_f$ .

Ø **Le plan orthogonal à la face de coupe**  $P_g$  :

C'est le plan perpendiculaire à la fois au point considéré  $M$ , à la face de coupe au plan de référence de l'outil  $P_r$ .

Ø **Le plan orthogonal à la face de dépouille**  $P_b$  :

C'est le plan perpendiculaire à la face de dépouille et au plan de référence  $P_r$ , au point  $M$  considéré.

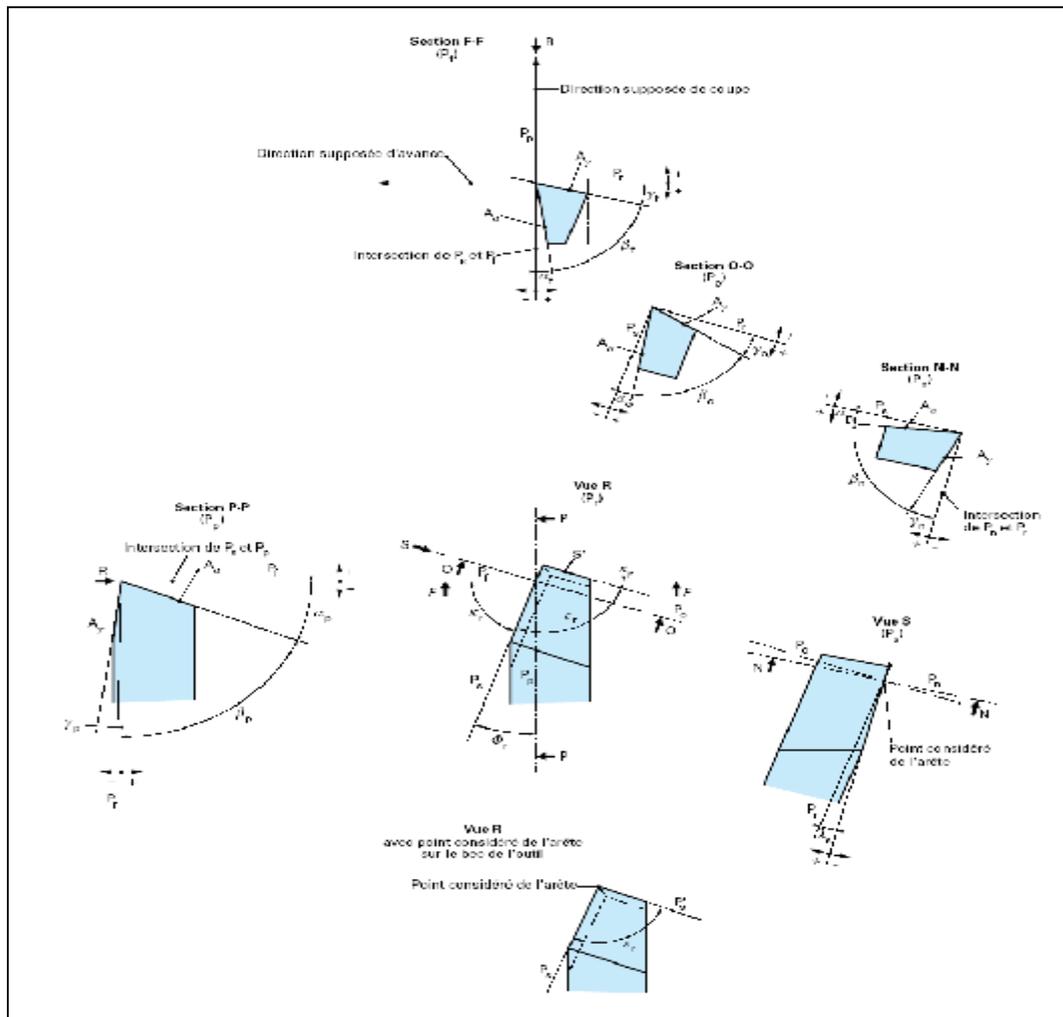


Figure I.14 : Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariotier droit [Pass\_A].

b. **Pour le système de l'outil en travail** : [Pass\_A]

Ø **Le plan de référence en travail**  $P_{re}$  :

C'est le plan perpendiculaire à la direction résultante de coupe, au point  $M$  de l'arête considérée. Il a pour normale en ce point la vitesse effective de coupe.

Ø **Le plan d'arête en travail**  $P_{se}$  :

C'est le plan tangent à l'arête au point  $M$  considéré et perpendiculaire au plan de référence en travail  $P_{se}$ . Ce plan contient la direction résultante de coupe.

Ø **Le plan de travail**  $P_{fe}$  :

C'est le plan contenant la direction de coupe et la direction d'avance au point  $M$  considéré de l'arête, ce plan est perpendiculaire au plan de référence en travail.

Ø **Le plan vers l'arrière en travail**  $P_{pe}$  :

C'est le plan qui passant par le point considéré  $M$  de l'arête, perpendiculaire à la fois au plan  $P_{re}$  et au plan  $P_{fe}$ .

#### I.5.2.4 **Les Angles caractéristiques de l'outil de coupe** :

Les éléments de la partie active d'un outil sont définis par leurs relations géométriques avec l'élément de référence qui est le plan de base : la face par laquelle l'outil repose sur le support. La notion des angles caractéristiques se rapportera à l'étude des angles limités aux plans caractéristiques précédemment définis pour l'outil en main, à partir des vecteurs vitesse de coupe supposée et vitesse d'avance supposée.

La partie active du bec d'un outil est formée par deux angles principaux :

a. **Angle d'arête de l'outil en main** : [Pass\_A]

Ø **Angle de direction d'arête de l'outil**  $K_r$  (figure I.15) :

C'est l'angle, mesuré dans le plan  $P_r$ , entre le plan conventionnel de travail  $P_f$  et le plan d'arête de l'outil  $P_s$ .

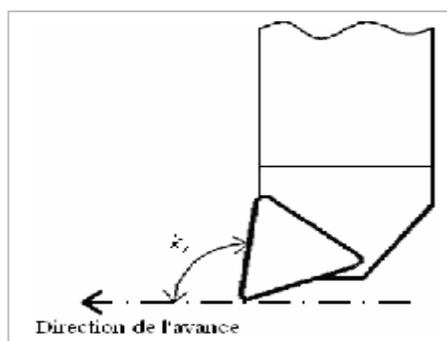


Figure I.15 : Angle de direction d'arrêt de l'outil [Lahe\_04].

Ø **L'angle d'inclinaison de l'arête de l'outil**  $I_s$  (figure I.16) :

C'est l'angle mesuré dans le plan  $P_s$ , entre l'arête et le plan  $P_r$ . L'angle d'inclinaison d'arête est toujours un angle aigu. Il est positif lorsqu'on s'éloigne de la pointe de l'outil l'arête se trouve en dessous du plan  $P_r$ .

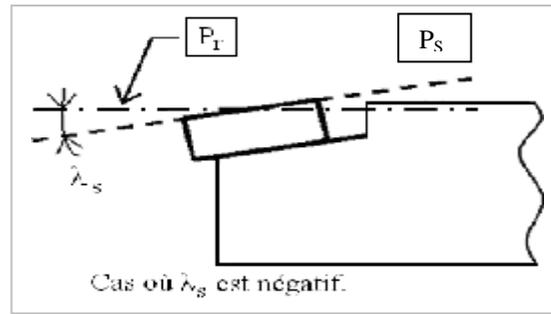


Figure I.16 : Angle d'inclinaison d'arrêt [Lahe\_04].

Ø **L'angle de pointe de l'outil  $e_r$**  :

C'est l'angle, mesuré dans le plan  $P_r$ , entre le plan d'arête  $P_s$  et le plan d'arête secondaire  $P'_s$ .

Ø **L'angle de direction de l'arête secondaire de l'outil  $K'_r$**  :

C'est l'angle mesuré, dans le plan  $P_r$ , entre le plan conventionnel de travail  $P_f$  et de la projection de l'arête secondaire dans le plan de référence de l'outil  $P_r$ .

On note que les angles de direction d'arête de l'outil, de pointe de l'outil et de direction d'arête secondaire de l'outil sont liés par la relation :

$$K_r + e_r + K'_r = 180^\circ \quad (\text{I-4})$$

b. **Angle d'arête de l'outil au travail** : [Pass\_A]

Les deux angles remarquables sont :

Ø **l'angle de direction d'arête en travail  $K_{re}$**  :

C'est l'angle mesuré dans le plan  $P_{re}$ , entre les plans  $P_{fe}$  et  $P_{se}$ .

Ø **L'angle d'inclinaison d'arête en travail  $I_{se}$**  :

C'est l'angle mesuré dans le plan  $P_{se}$ , entre l'arête et le plan  $P_{re}$ .

On note que la convention de signe pour l'angle  $I_{se}$  est la même que pour l'angle  $I_s$ .

c. **Angles des faces** : [Pass\_A]

La position des faces de coupe et de dépouille est définie dans des plans de sections particuliers qui passent tous par un point considéré de l'arête (Figure I.17). Lorsqu'on fait une section de l'outil par ces plans et quelques soit le plan considéré pour définir la section on trouve :

Ø **Angle de dépouille  $\alpha$**  :

C'est l'angle aigu entre la face de dépouille  $A_a$  et le plan d'arête  $P_s$  ( $P_{se}$ ).

Ø **Angle de taillant  $\beta$**  :

C'est l'angle aigu entre la face de coupe  $A_g$  et la face de dépouille  $A_a$ .

### Ø Angle de coupe $\gamma$ :

C'est l'angle aigu entre la face de coupe  $A_g$  et le plan de référence  $P_r (P_{re})$ .

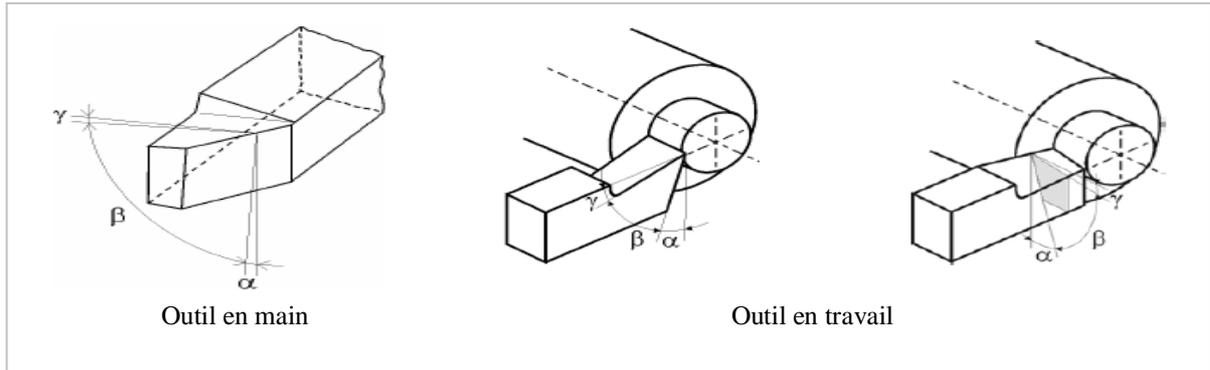


Figure I.17 : Angles des faces [Norm\_02].

Dans un même plan de section, que ce soit dans le système de l'outil en main ou de l'outil en travail, ces trois angles sont liés par la relation :

$$(\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ) \quad (\text{I-5})$$

### I.5.3 La géométrie de l'arête de coupe :

La plupart des modèles de coupe tridimensionnelle caractérisent l'outil suivant trois plans distincts matérialisés par la face de coupe et les faces de dépouilles principale et secondaire (figure I.18 .a) [CNMO\_93]. En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de trois plans raccordés par deux rayons (figure I.18 .b) : le rayon de bec  $r_c$  et le rayon d'acuité  $R$  de l'arête de coupe, qui est souvent négligée dans un grand nombre de modèles [Lahe\_04].

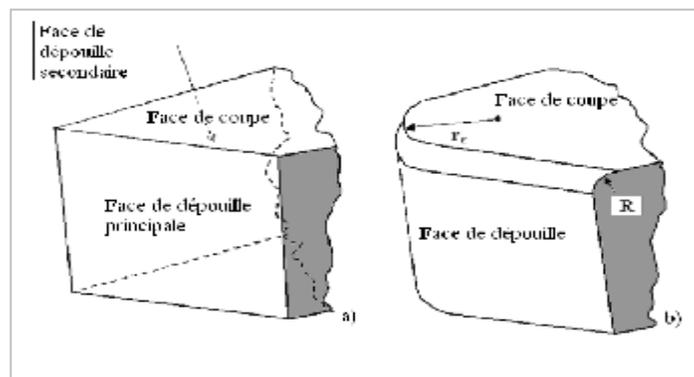


Figure I.18 : Géométrie de l'arête de coupe [Lahe\_02].

#### I.5.3.1 Description géométrique du contact en tournage :

La surface de contact entre l'outil et la pièce est relativement complexe. La définition suivante (figure I.19) découpe la surface de contact à partir d'une ligne directrice (ou ligne d'arête) et d'une ligne d'esquisse (ou ligne de coupe) [Lahe\_04].

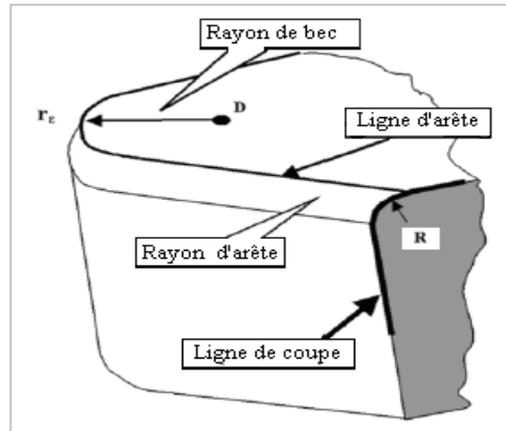


Figure I.19 : Description géométrique de l'outil [Lahe\_02].

### I.5.3.2 Définition de la ligne d'arête :

La ligne d'arête permet de définir en partie la surface de contact entre l'outil et la pièce. Elle est découpée en une zone rectiligne et une zone curviligne (figure I.20). Les dimensions de ces zones dépendent des paramètres géométriques de l'outil tels que l'angle de direction d'arrêt  $k_r$  et le rayon du bec  $r_e$  mais aussi des paramètres cinématiques de coupe tels que la profondeur de passe  $a_p$  et l'avance  $f$  [Lahe\_04].

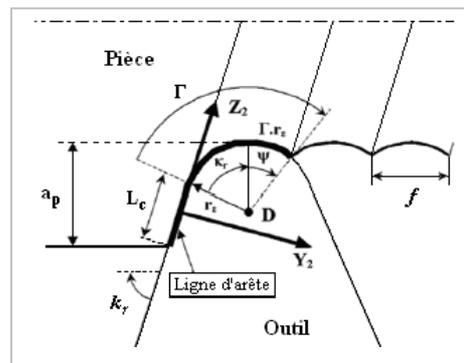


Figure I.20 : Description géométrique de contact [Lahe\_02].

Ainsi, la longueur de contact de la partie rectiligne de l'arête  $L_c$  peut s'exprimer par :

$$L_c = \frac{a_p + r_e (\cos(K_r) - 1)}{\sin(K_r)} \quad (\text{I-6})$$

La longueur de la partie curviligne de l'arête en contact avec la matière dépend de l'angle de contact  $\Gamma$  :

$$\Gamma = k_r + \Psi \quad (\text{I-7})$$

Où  $\Psi$  est l'angle complémentaire de contact sur la face de dépouille secondaire (figure I.20) :

$$\Psi = \arccos \left( \frac{\sqrt{r_e^2 - \frac{f_2}{4}}}{r_e} \right) \quad (\text{I-8})$$

La longueur de contact totale  $L_{cT}$  s'exprime finalement par :

$$L_{cT} = L_c + r_e \Gamma \quad (\text{I-9})$$

### **I.5.3.3 Définition de la ligne de coupe :**

La ligne de coupe permet de compléter la définition de la surface de contact entre l'outil et la pièce. Elle est délimitée par trois zones : la zone BO (face de coupe), la zone OJ (acuité d'arête) et la zone JK (face de dépouille) (figure I.21). Géométriquement, la ligne de coupe est définie par la longueur  $Y$  entre les points B et O, puis par la longueur  $L$  entre les points J et K. le raccordement entre ces deux droites est déterminé par le rayon d'acuité  $R$  [Lahe\_02].

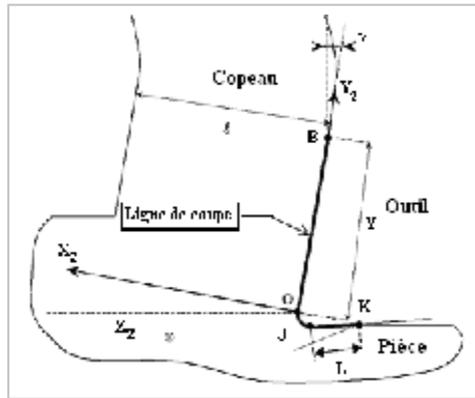


Figure I.21 : Description géométrique de la zone de la coupe [Lahe\_02].

La longueur  $Y$  apparaît comme une inconnue du problème et sera évaluée à partir de considérations d'équilibre. La longueur de contact outil / pièce suivant la dépouille principale  $L$  est estimée à partir de la pression hydrostatique  $p_0$  en O, du module de Young  $E$  de la pièce, de la vitesse de coupe  $V_c$ , de la vitesse d'avance  $V_f$  et du rayon d'acuité  $R$ .

$$L = \frac{K_A P_0 (1 + V_f)(1 - R)}{E(1 + V_c)} \quad (\text{I-10})$$

Où,  $K_A$  et  $V_f$  sont des paramètres correctif [Lahe\_04].

### **I.5.3.4 Considérations sur la cinématique du copeau :**

Des observations expérimentales ont montré que la cinématique du copeau est dépendante des paramètres d'usinage. L'orientation du copeau, définie par l'angle  $\Xi$  dans le

plan de la face de coupe, peut être exprimée à partir d'une moyenne des normales à la ligne de contact pondérée par les longueurs de contact (Figure I.22) [Lahe\_02].

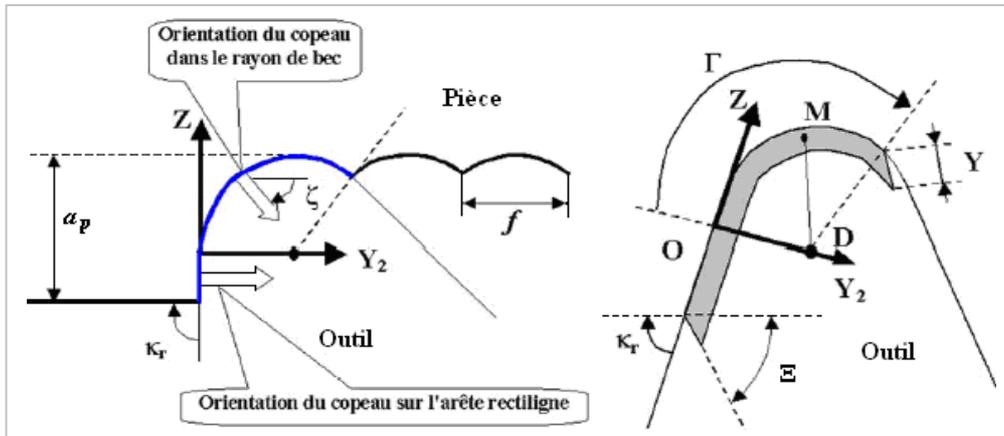


Figure I.22 : Paramètres cinématiques du copeau et répartition du contact sur la face de coupe [Lahe\_02].

L'angle d'éjection du copeau  $\Xi$  peut être défini par la relation [Lahe\_02] :

$$\Xi = \frac{\Gamma \cdot r_e}{L_{cT}} \left( \frac{1}{\Gamma} \int_0^{\Gamma} z dz \right) \quad (\text{I-11})$$

### I.6 Influence de la géométrie de l'outil : [Geli\_D]

Il semble évident que les angles de coupe et de dépouille ont une influence sur la coupe et l'usinage des pièces, l'influence des angles d'arête semble moins évidente.

En fait, les angles de coupe et de dépouille définis dans les différents plans de section sont liés entre eux par un certain nombre de relations entre leurs lignes trigonométriques.

On démontre, entre autre les relations suivantes :

$$\text{tang}_{oe} = \frac{\text{tang}_{ne}}{\tan I_{se}} \quad (\text{I-12})$$

$$\text{tang}_{fe} = \frac{\text{tang}_{ne}}{\cos I_{se}} \sin K_{re} - \tan I_{se} \cos K_{re} \quad (\text{I-13})$$

$$\text{tang}_{pe} = \frac{\text{tang}_{ne}}{\cos I_{se}} \cos K_{re} + \tan I_{se} \sin K_{re} \quad (\text{I-14})$$

$$\tan a_{oe} = \tan a_{ne} \cos I_{se} \quad (\text{I-15})$$

$$\frac{1}{\tan a_{fe}} = \frac{\sin K_{re}}{\tan a_{ne} \cos I_{se}} - \tan I_{se} \cos K_{re} \quad (\text{I-16})$$

$$\frac{1}{\tan a_{pe}} = \frac{\cos K_{re}}{\tan a_{ne} \cos I_{se}} + \tan I_{se} \sin K_{re} \quad (\text{I-17})$$

De ce fait, il est nécessaire d'étudier l'influence des angles de l'arête en même temps que celle des angles de coupe et de dépouille.

### **I.6.1 Influence de l'angle de direction d'arête :**

L'angle de direction d'arête  $K_{re}$  donne à cette dernière une orientation par rapport à l'axe de rotation de la pièce (ou de l'outil) et influe de ce fait sur l'épaisseur et sur la largeur du copeau.

Pour des caractéristiques d'avance et de profondeur de passe identiques, l'épaisseur et la largeur du copeau sont directement liées à l'angle  $K_{re}$ .

Et comme la puissance nécessaire à la coupe étant principalement liée à l'épaisseur du copeau, l'angle de direction d'arête agit donc directement sur celle-ci.

Il est préférable de travailler avec des outils de coupe ayant un angle de direction d'arête inférieur à  $90^{\circ}$ , de façon à ce que l'orientation de l'arête soit telle que lorsque l'outil entre en contact avec la pièce à usiner, la pointe de l'outil se trouve en arrière du point de contact avec la matière.

### **I.6.2 Influence de l'angle d'inclinaison d'arête :**

L'angle d'inclinaison d'arête  $I_{se}$  à plusieurs fonctions. Entre autre, il agit directement sur la direction d'écoulement du copeau.

L'utilisation des valeurs négatives est surtout employée en ébauche et lors des coupes interrompues. En effet, elles permettent une bonne stabilisation du bec de l'outil par réduction des efforts de flexion et dans le cas d'une coupe interrompue, l'effet de cisaillement du copeau a lieu vers l'arrière de l'outil, donc dans une région moins fragile que la pointe. Par contre, une valeur négative de  $I_{se}$  entraîne les copeaux vers la pièce, ce qui peut provoquer une détérioration de la surface usinée par frottement des copeaux.

Les valeurs positives, sont surtout employées pour l'étape de finition, car les copeaux sont dégagés et l'on évite ainsi la détérioration de la surface. De plus une valeur positive de l'angle  $I_{se}$  diminue les efforts radiaux et améliore de ce fait la stabilité dimensionnelle.

Généralement en tournage, pour la finition des pièces, on choisira un angle d'inclinaison d'arête compris entre  $0^{\circ}$  et  $10^{\circ}$ , alors qu'en ébauche et pour des usinages à coupe interrompue, on choisira un angle d'inclinaison d'arête compris entre  $(-4^{\circ})$  et  $(-6^{\circ})$ .

### **I.6.3 Influence de l'angle de coupe :**

Il est délicat de parler de l'influence de l'angle de coupe, étant donné qu'il n'y a pas un angle de coupe, mais plusieurs angles, chacun étant défini dans un plan de section

déterminé, et qu'il sont tous liés entre eux par des relations faisant intervenir les angles d'arête. Il agit directement sur la qualité de la coupe et sur les efforts de coupe.

On observe et d'une façon générale, que l'effort de coupe augmente lorsque l'angle de coupe diminue.

Pour l'opération de tournage, on considère généralement l'angle de coupe latéral  $g_{fe}$  et l'angle de coupe vers l'arrière  $g_{pe}$  ceux-ci étant liés par la relation :

$$\tan g_{pe} = \frac{\tan g_{fe} \cos K_{re}}{\sin K_{re}} \quad (\text{I-18})$$

Dans le processus de séparation du copeau, l'emploi d'un angle de coupe  $g_{pe}$  positif ou négatif influe sur les efforts de coupe et le glissement du copeau sur la face de coupe.

L'emploi d'un angle de coupe positif fait que la résultante du torseur des efforts copeau outil, a une direction telle que la pointe de l'outil est soumise à des contraintes de cisaillement.

Par contre, l'emploi d'un angle  $g_{pe}$  négatif, permet de travailler avec des caractéristiques d'avance et de profondeur de passe plus grandes car la pointe de l'outil étant soumise à des contraintes de compression, elle résiste beaucoup mieux.

De plus, une valeur négative pour cet angle augmente l'angle de taillant (tranche) et permet ainsi une meilleure diffusion de la chaleur due à la coupe vers le corps de l'outil.

Par contre les efforts de coupe sont plus élevés, d'où une augmentation non négligeable de la puissance requise.

### **I.7 Matériaux utilisés pour les outils de coupe :**

Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user ; ainsi la matière qui la constitue doit être plus dure que la pièce à usiner [Comp\_A]. Le corps de l'outil doit résister aux contraintes de flexion et torsion dues à l'effort de coupe. La résilience du corps de l'outil doit être grande, car il ne doit pas casser lorsque se produiront de brusques variations de l'effort de coupe.

Comme la dureté d'un métal et sa résilience varient en sens inverse, on voit qu'il faudra prendre des précautions particulière pour le choix des matériaux constituant les outils de coupe.

Les travaux de recherche sur la coupe des métaux conduisent à rechercher des nouveaux matériaux à outil, dont les performances sont de plus en plus élevées en ce qui concerne :

- La dureté des matériaux susceptibles d'être usinés,

- Les vitesses de coupe utilisables.

Actuellement et en fonction de progrès technique dans le domaine de la métallurgie et les matériaux de base pour l'élaboration des outils de coupe s'étendent de la gamme des aciers rapide, des carbures, des carbures revêtus, des céramiques et des nitrures.

### **I.7.1 Les carbures métalliques frittés :**

#### **I.7.1.1 Les carbures :**

Les outils carbures (à base de carbure de tungstène WC) sont aujourd'hui très utilisés. Ils sont constitués essentiellement de carbure de tungstène (phase *a*), et de carbure de titane, de tantale ou de niobium (phase *g*), et d'un liant généralement le cobalt (phase *b*). Le rôle de l'addition de carbure de titane, tantale ou niobium est d'augmenter les propriétés à haute température (vitesse de coupe élevée) en réduisant le frottement. C'est aussi de diminuer l'usure de la face de coupe en réduisant la diffusion du carbure de tungstène entre l'outil et le copeau. Mais l'accroissement de la proportion de carbure de titane entraîne une augmentation du coefficient de dilatation ce qui peut conduire à des variations dimensionnelles néfastes dans le cas d'usinage de précision.

Le carbure de tungstène, élément dur, donne une résistance à l'usure qu'il conserve à température élevée correspondant à des vitesses de coupe élevées. Le cobalt constituant le liant entre les grains de carbures frittés, donne la ténacité au corps fritté. Les principales évolutions des outils de coupe à base de carbures ont porté sur [Poul\_95]:

- Les nuances à micro grains,
- L'évolution des géométries,
- La généralisation des plaquettes indexables.

Certains carbures élaborés avec des grains ultra-fins sont appelés "micro grains". Ils sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène comprise entre 0.2 et 1 [ $\mu\text{m}$ ] liée par une quantité de cobalt allant de 8 à 20 %. Les nuances à micro grains permettent d'atteindre un compromis dureté/ténacité. Ils permettent ainsi d'utiliser des angles de coupe positifs. La faible dimension des grains permet une grande finesse d'arête pour obtenir des états de surface soignés. Ils sont utilisés à la fois pour des opérations de coupe sévères et pour l'usinage de matériaux difficiles à usiner.

Depuis le début de leur exploitation industrielle, la mise au point de géométries d'outils adaptées à chaque usinage spécifique, le passage de la coupe négative à la coupe positive diminuant les efforts de coupe et les usures des outils, la création de divers brise-copeaux augmentant le fractionnement de celui-ci et la durée de vie d'outil, ont permis de faire progresser

nettement les conditions d'usinage des aciers. La commercialisation de plaquettes indexables affûtées de grande précision a conduit à de meilleurs états de surface et à une généralisation de l'utilisation des carbures métalliques frittés.

### I.7.1.2 Les carbures revêtus :

Les propriétés des nuances de carbures non revêtus constituent un compromis entre résistance à l'usure et ténacité. Ces qualités varient en sens inverse suivant le dosage des constituants. Les carbures revêtus ont été mis au point dans le but d'associer une résistance à l'usure élevée à la surface des plaquettes et une forte ténacité du substrat.

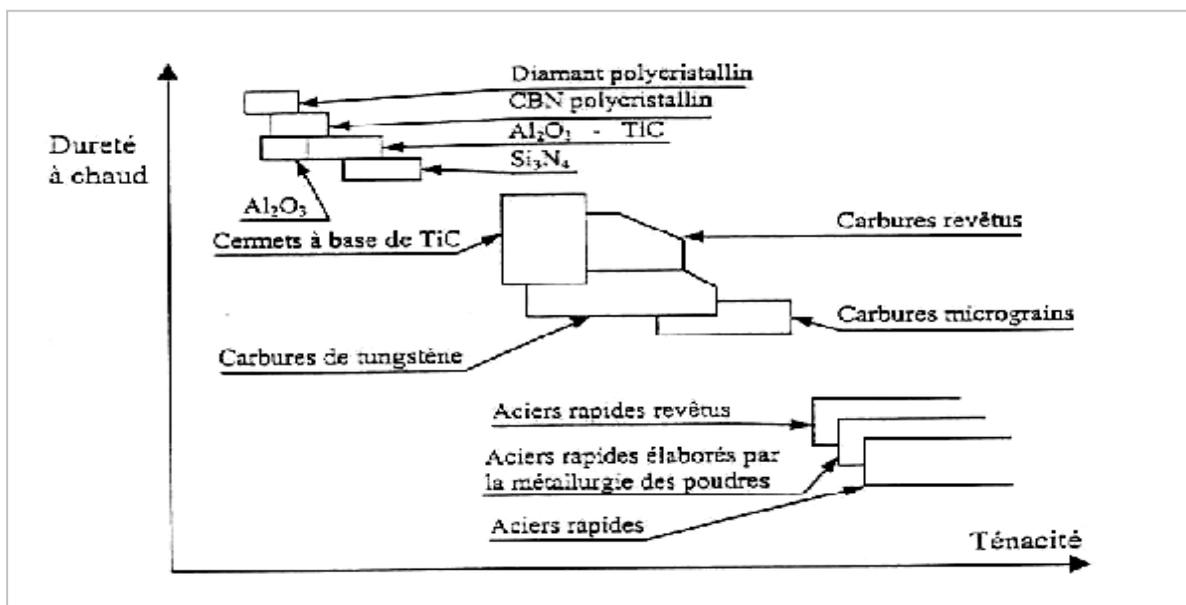


Figure I.23 : Comparaison des matériaux de coupe d'après [Cald\_98].

Les matériaux déposés en revêtement sont très nombreux. Les plus courants sont : le Titane (Ti), le Nitrure de Titane (TiN) et l'Oxyde d'Aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que l'on retrouve en mono couche ou combinés (Ti/TiN, TiC (carbure de titane), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN) (Figure I.24).

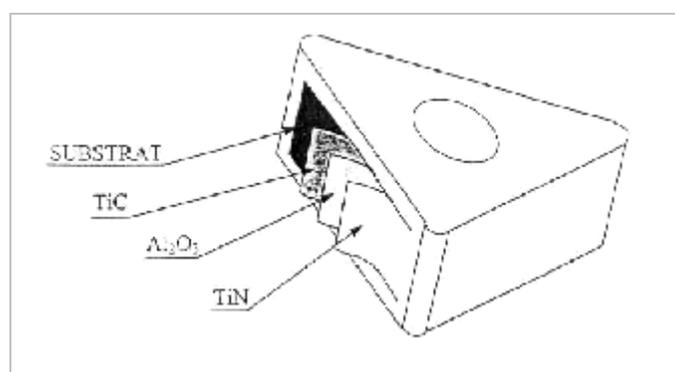


Figure I.24 : Plaquette carbure revêtue, multicouches d'après [Cald\_98].

On peut retenir globalement que :

- Le nitrure de titane (TiN) est réputé mieux résister à l'abrasion. Pour cette raison, il est souvent utilisé en couche externe. De plus, il tolère des dépôts plus épais sans nuire à sa tenue en service. Le TiN est inerte vis-à-vis des aciers et le coefficient de frottement du métal sur le revêtement TiN est plus faible, ce que minimise le risque de formation d'arête rapportée,
- Le carbure de titane (TiC) adhère mieux aux substrats, constituant ainsi une excellente base d'application de couches de revêtement supplémentaires. Par contre, il est fragile et pour cela est déposé en couche n'excédant pas 5 [ $\mu\text{m}$ ],
- L'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) est déposé en couche intermédiaire comme barrière de diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant une excellente résistance à l'usure, ainsi qu'une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et des températures de coupe très élevées.

Un inconvénient majeur dans le cas des revêtements multicouches des plaquettes de finition est la perte de l'acuité d'arête. Pour cette raison, les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couches minces de 1 à 2 [ $\mu\text{m}$ ].

Les gains obtenus dans la coupe des métaux à l'aide de ces revêtements sont importants. Ces gains dépendent essentiellement du couple outil/matière. Cependant, pour caractériser l'influence du revêtement, nous précisons dès maintenant que trois modes de détérioration peuvent intervenir [Leve\_76] :

**a. Abrasion :**

Plus le revêtement est dur et moins ce mode d'endommagement peut intervenir. Les revêtements TiC et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sont performants du point de vue abrasion,

**b. Diffusion (outil/copeau) :**

Ce mode d'endommagement est dans ce cas nettement plus important pour TiC, soluble dans l'austénite à partir de 1100 à 1150 [ $^{\circ}\text{C}$ ] que pour TiN et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tous deux insolubles dans les aciers même liquides,

**c. Fissuration et écaillage :**

La détérioration s'effectue par fissuration du revêtement soumis à de fortes contraintes d'origine thermique entraînant des micro-écaillages (sur l'arête ou sur les flancs) puis une usure contrôlée par diffusion et abrasion.

Ainsi, une couche extérieure de TiN semble aujourd'hui conduire aux meilleurs résultats lors du tournage des aciers inoxydables. L'usure par effets physico-chimiques est très réduite.

### **I.7.2 Les céramiques :**

La céramique est une combinaison d'éléments inorganiques non métalliques et d'éléments métalliques, elle a de bonnes propriétés atomiques de métallisation. Ces éléments ont des températures de fusion très hautes et de grandes duretés ce qui leur permet d'être utilisées en coupe continue. Par contre, dans le cas de coupe intermittente, ces caractéristiques favorisent les ébréchures du bord des plaquettes et du craquage thermique.

La contribution des outils en céramiques au développement de la productivité s'est pendant principalement fait sentir pour l'usinage des matériaux comme les fontes, les aciers trempés et les alliages réfractaires. Les céramiques peuvent alors offrir une excellente productivité comparée aux autres matériaux de coupe.

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

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

Les outils de coupe en céramique souffraient toujours d'être fragiles. Pour donner un degré de dureté à la céramique, une petite taille de grain d'alumine est employée. Le coût de l'alumine est bas, mais les coûts de traitement de fabrication sont coûteux. Il s'agit de découper d'abord de grands blocs en tranches d'alumine dans de petits morceaux avec des scies de diamant [Grah\_89].

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

#### **I.7.2.1 Céramique oxydée et céramique renforcée par Whiskers :**

Alors que le manque de résistance thermique entraîne la défaillance du matériau de l'outil dans le cas des carbures, c'est le manque de dureté et de résistance au choc thermique qui entraîne une défaillance dans le cas des matériaux de l'outil en céramique oxydée. Par suite des cassures se produisant dès le début sur l'arête de coupe, il n'a pas été possible pour une céramique oxydée pure d'obtenir une amélioration de la durée de vie de l'outil par rapport au carbure.

Le renforcement de l'alumine par des fibres « Whiskers », plus efficace que les additions particulières telles réalisées pour les mélanges alumine - zircone et alumine -TiC, permet une meilleure résistance, une plus grande résistance à la rupture ainsi qu'une meilleure résistance aux

chocs thermiques. De plus, le module de Weibull augmente, ce qui se traduit par une réduction des variations de résistance [Bran\_97].

Un Whiskers est une fibre mono cristalline. Les Whiskers de SiC utilisés pour renforcer les outils de coupe en alumine ont un diamètre inférieur à 1 [ $\mu\text{m}$ ] et une longueur comprise entre 5 et 20 [ $\mu\text{m}$ ] (figure I.25).

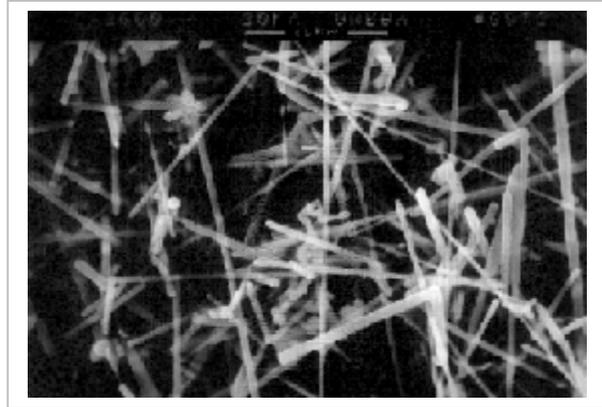


Figure I.25 : Fibres « Whiskers » de SiC utilisés pour renforcer l'alumine d'après [Bran\_97].

Il faut noter que l'augmentation de la durée de vie pour ce type d'outil est relativement limitée par rapport à un carbure non revêtu, et que son utilisation est coûteuse.

De nouveaux composés sont continuellement développés; les plus rencontrés sont Kyon et Sialon, ils sont destinés à la coupe discontinue grâce à leur forte résistance aux chocs. Kyon est une céramique d'alumine renforcée avec des fibres Whiskers de silicium, qui sont les cristaux simples ovales du carbure de silicium. Avec leurs grandes résistances aux chocs, ils améliorent la conductivité thermique. Ces insertions sont ainsi idéales pour des applications d'usinage sur les alliages de nickel. Elles ont une dureté de 45 [HRC] et peuvent être utilisées à des vitesses dix fois plus grandes que le carbure de tungstène.

### **I.7.2.2 Céramique non oxydée (nitrure de silicium) :**

Le nitrure de silicium (SiN) est un composé atomique présentant un certain nombre de propriétés mécaniques intéressantes. La plus intéressante pour l'usinage des métaux est son très faible coefficient de dilatation thermique qui rend ce matériau très résistant aux chocs thermiques.

Le matériau de l'outil en céramique nitrurée avec son élément caractéristique, le nitrure de silicium, a été utilisé jusqu'à présent avec succès principalement pour l'usinage de la fonte.

Dans le procédé d'enlèvement de copeaux continus, comme par exemple le tournage de l'acier, son utilisation n'est pas conseillée en raison de la diffusion du silicium dans le copeau évacué et de la résistance à l'usure plus faible que celle de l'oxyde d'aluminium.

### **I.7.2.3 Les cermets :**

Les CERMETS (CÉRAMique MÉTAl), constitués principalement de TiC ou de TiC/N, possèdent par rapport aux métaux durs conventionnels une densité beaucoup plus faible mais une dureté et une résistance à l'usure plus élevées. Les forts coefficients de dilatation thermique des cermets dus au TiC et TiN par rapport aux outils carbures (WC), sont coresponsables de la faible résistance des cermets aux chocs thermiques.

C'est également ce qui explique leurs faiblesses lors de l'usinage à coupe interrompue. Le remplacement du TiC par le TiN qui possède la plus grande conductivité thermique, a permis d'améliorer la résistance des cermets aux chocs thermiques.

Les cermets sont utilisés pour la finition et l'usinage de précision demandant de grandes vitesses de coupe et des avances faibles. Ils se rapprochent ainsi du domaine d'utilisation des céramiques en étant toutefois résistants. Leur emploi diminue ou supprime le collage des copeaux, évitant ainsi les arrachements sur les matériaux malléables (inox, aciers doux) et conduit à une durée de vie accrue.

La plage des vitesses de coupe est étendue dans le tournage des aciers inoxydables (100 à 200 [m/min]). Les avances sont celles de passes de finition (0.02 à 0.15 [mm/tr]). Les profondeurs de passe ne doivent pas excéder 1 [mm]. Un rodage de l'arête ( $r_B = 0.03$  à 0.1 [mm] ou un plat) est souvent un remède contre les écaillages et les ruptures de l'arête.

En conclusion, on peut retenir les avantages d'utiliser les cermets :

- Résistance à la cratérisation et à la formation de l'arête rapportée supérieure à celle de carbures de tungstène et des céramiques,
  - Résistance à l'usure trois à quatre fois plus grande que celle des carbures non revêtus,
  - Admettent de faibles avances,
  - Vitesse de coupe proche de celles des céramiques mais également utilisables aux vitesses supérieures des carbures de tungstène non revêtus ; ils recouvrent la plage des carbures revêtus.

Il faut noter que les applications des cermets en usinage, sont actuellement très limitées en Europe par rapport à leurs utilisations au Japon. Cela est dû au fait que, en Europe, les gains de productivité sont surtout recherchés dans les moindres usures d'outils. Inversement, au Japon, l'usinage direct en finition à partir de pièces brutes très proches des côtes finales (technologie near net shape) à des vitesses de coupe élevées, mais avec des profondeurs de passe et des avances modérées, est très développé et constitue le domaine de prédilection des cermets.

#### **I.7.2.4 Perspectives des céramiques :**

Les outils de coupe en céramique occupent aujourd'hui 4 à 5 % du marché des plaquettes indexables. Leur principal avantage est qu'ils autorisent des vitesses de coupe plus élevées que les outils en carbure, d'où des gains de productivité élevés.

Leurs principaux inconvénients sont leur fragilité et leur manque de fiabilité. Ils ont pu être surmontés dans une large mesure grâce aux céramiques renforcées qui ont été développées au cours des années 80.

Parallèlement au développement des matériaux céramiques, on a vu également le développement des machines outils qui offrent aujourd'hui plus de puissance et une meilleure stabilité. Elles sont aujourd'hui capables d'usiner selon des paramètres de coupe bien adaptés aux outils céramiques.

La conduite des machines par programmation en Commande Numérique a permis également d'adapter avec plus de précision, le cycle d'usinage au matériau de coupe, afin de réduire au minimum les risques de rupture de la plaquette.

#### **I.7.3 Le Nitrure de Bore Cubique (CBN) :**

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

La couche de CBN a une petite taille de grain. Elle est soumise à des hautes pressions et températures, ce qui permet à un peu de cobalt de se répandre sur la surface et produisant ainsi un enduit très dur.

Après le diamant, le CBN est le matériau le plus dur connu de l'homme. Toute fois, le diamant offre l'inconvénient de s'oxyder sous les températures élevées habituellement générées lors de l'usinage des matériaux ferreux, voisines de 700 [°C] pour les aciers durs. C'est pourquoi son emploi est limité à l'usinage des matériaux non ferreux. Par contre, la coupe des aciers traités s'avère possible avec le CBN car il présente des caractéristiques intéressantes :

- Une dureté élevée,
- Une bonne ténacité.

Il présente également une mauvaise conductibilité thermique, mais on observe que la chaleur de coupe est évacuée par le copeau dans une forte proportion (90 % environ). L'outil CBN s'échauffe assez peu.

Il a été observé que l'utilisation du CBN donne, en particulier en relation avec les aciers durs ayant une teneur en ferrite réduite ou nulle, des augmentations extrêmement importantes de la durée de vie de l'outil.

Le nitrure de bore cubique convient pour un enlèvement de copeaux durs et à grande vitesse. Ainsi, par exemple pour l'usinage de l'acier de roulement 100C6, qui est considéré comme un matériau difficilement usinable en raison de lamelles de cémentite très dures dans sa structure, il est possible d'obtenir des durées de vie 100 fois plus importantes avec le CBN qu'avec le carbure [Rema\_01].

Les inserts de CBN peuvent tourner et fraiser des matériaux non métalliques et non ferreux très abrasifs. En utilisant des insertions de CBN, il est envisagé maintenant de tourner et de fraiser les composants qui étaient rectifiés dans l'état durci, et ce pour augmenter la productivité globale du processus d'usinage.

## I.8 Formation du copeau :

### I.8.1 Coupe orthogonale :

La coupe la plus élémentaire est la coupe dite « orthogonale » (Figure 1.26). Dans cette configuration, l'arête de coupe est perpendiculaire à la fois aux directions de coupe et d'avance. L'outil est incliné de l'angle de coupe  $\alpha$  par rapport à la verticale et se déplace avec la vitesse de coupe  $V_c$ . La quantité de matière enlevée est représentée par l'épaisseur du copeau non déformé  $t_1$  (ou avance par tour  $f$ ) et la profondeur de passe  $a_p$ . Le copeau d'épaisseur  $t_2$  se déplace le long de la face de coupe de l'outil avec la vitesse  $V_{cop}$  et quitte en se courbant l'interface outil copeau à la distance  $l_c$  de la pointe de l'outil (longueur de contact).

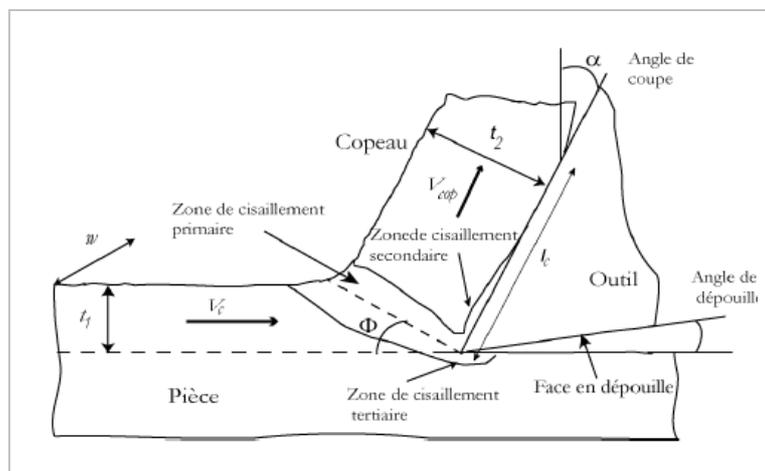


Figure I.26 : Principales zones de déformation et paramètres de la coupe orthogonale [Gaut\_04].

L'observation de la section d'un copeau en formation met en évidence trois zones particulières de déformation :

**a. Zone de cisaillement primaire :**

La zone de cisaillement primaire est le lieu où s'effectue le changement de direction de la matière usinée qui passe de la vitesse de coupe  $V_c$  à la vitesse du copeau  $V_{cop}$ . C'est une zone intense de déformation qui s'étend de la pointe de l'outil jusqu'à la surface libre du copeau. Dans de nombreux modèles de coupe ([Merc1\_45, Merc2\_45]), la zone de cisaillement primaire est idéalement représentée par un plan (dit de « cisaillement ») incliné d'un angle  $\phi$  par rapport à la direction de coupe. L'angle de cisaillement  $\phi$  est alors géométriquement relié à  $t_1$ ,  $t_2$  et  $\alpha$  par la relation :

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin f}{\cos(f-a)} \quad (I-19)$$

Ou:

$$f = \tan^{-1} \left[ \frac{(t_1/t_2) \cos \alpha}{1 - (t_1/t_2) \sin \alpha} \right] \quad (I-20)$$

La conservation du flux de matière s'exprime de la manière suivante :

$$V_c t_1 = V_{cop} t_2 \quad (I-21)$$

D'où l'expression de la vitesse du copeau  $V_{cop}$  :

$$V_{cop} = \frac{\sin f}{\cos(f-a)} V_c \quad (I-22)$$

Une estimation de la déformation  $\gamma$  subie par le matériau dans la zone primaire peut être obtenue géométriquement en supposant un cisaillement pur sur le plan de cisaillement, [Chil\_73]:

$$g = \frac{\cos \alpha}{\sin f \cos(f-a)} \quad (I-23)$$

**b. Zone de cisaillement secondaire :**

Les phénomènes de frottement à l'interface outil copeau induisent également des déformations plastiques dans une région du copeau adjacente à la face de coupe de l'outil. Dans cette zone de cisaillement secondaire, la matière est soumise à de forts taux de cisaillement et subit une forte élévation de température en plus de celle subie lors du passage dans la zone de cisaillement primaire.

**c. Zone de cisaillement tertiaire :**

Le contact entre l'outil (au niveau du bec et de la face en dépouille) et la surface usinée peut également provoquer des déformations plastiques dans la pièce. Elles sont

beaucoup moins intenses que dans les deux précédentes zones de déformation, mais elles dépendent aussi de la qualité de la surface usinée (rugosité et contraintes résiduelles).

### **I.8.2 Morphologie des copeaux :**

En fonction des conditions de coupe et du couple outil/matière, des copeaux de morphologies très différentes peuvent être formés (Figure I.27). On les classe traditionnellement en trois catégories :

- Les copeaux continus formés dans un état de déformation plastique stationnaire (associés à une coupe stable) : les champs de déformation, des vitesses de déformation et de la température sont constants dans le temps,
- Les copeaux formés avec arête rapportée qui résultent d'un état d'équilibre dynamique du système composé de l'outil, du copeau et d'une zone de stagnation de matière au niveau de l'arête,
- Les copeaux discontinus ou segmentés formés dans un état de déformation plastique non stationnaire; les copeaux sont composés d'éléments plus ou moins connectés entre eux. On parle aussi de copeaux ondulants ou festonnés, de copeaux à localisation de déformation ou encore de copeaux à dents de scies. La segmentation des copeaux est très influencée par les phénomènes de fissuration et de rupture, d'instabilité et de localisation des déformations plastiques. La coupe est alors qualifiée d'instable.

Le passage d'un type de copeau à un autre a été expliqué à partir du phénomène de plasticité adiabatique [Pome\_70], le critère d'instabilité s'écrivant :

$$\frac{dt}{dg} = \frac{\partial t}{\partial g} + \frac{\partial t}{\partial \dot{g}} \frac{\dot{g}}{g} + \frac{\partial t}{\partial T} \frac{t}{rC_p} < 0 \quad (\text{I-24})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement dans la zone de cisaillement primaire,  $\gamma$  la déformation de cisaillement et  $\dot{g}$  la vitesse de déformation.  $\frac{\partial t}{\partial \dot{g}}$  représente l'écroutissage du matériau,

$\frac{\partial t}{\partial g}$  sa sensibilité à la vitesse de déformation et  $\frac{\partial t}{\partial T}$  son adoucissement avec la température.  $C_p$

est la chaleur spécifique du matériau et  $\rho$  sa masse volumique. Sachant que  $\frac{\partial t}{\partial T}$  est négatif, il y a fragmentation du copeau lorsque l'adoucissement thermique l'emporte sur l'écroutissage et la sensibilité à la vitesse de déformation. Dans le cas contraire, nous avons une coupe stable.

La vitesse de coupe joue un rôle fondamental sur la stabilité de la coupe. La quantité de chaleur dégagée dans les zones de coupe croît avec la vitesse de coupe, de telle sorte que la

température s'élève avec cette dernière. La segmentation des copeaux est donc principalement observée dans le domaine des grandes vitesses de coupe. Bien que qualifié d'instable, ce phénomène peut être recherché car il est associé à une baisse des efforts et à une amélioration de l'évacuation des copeaux.

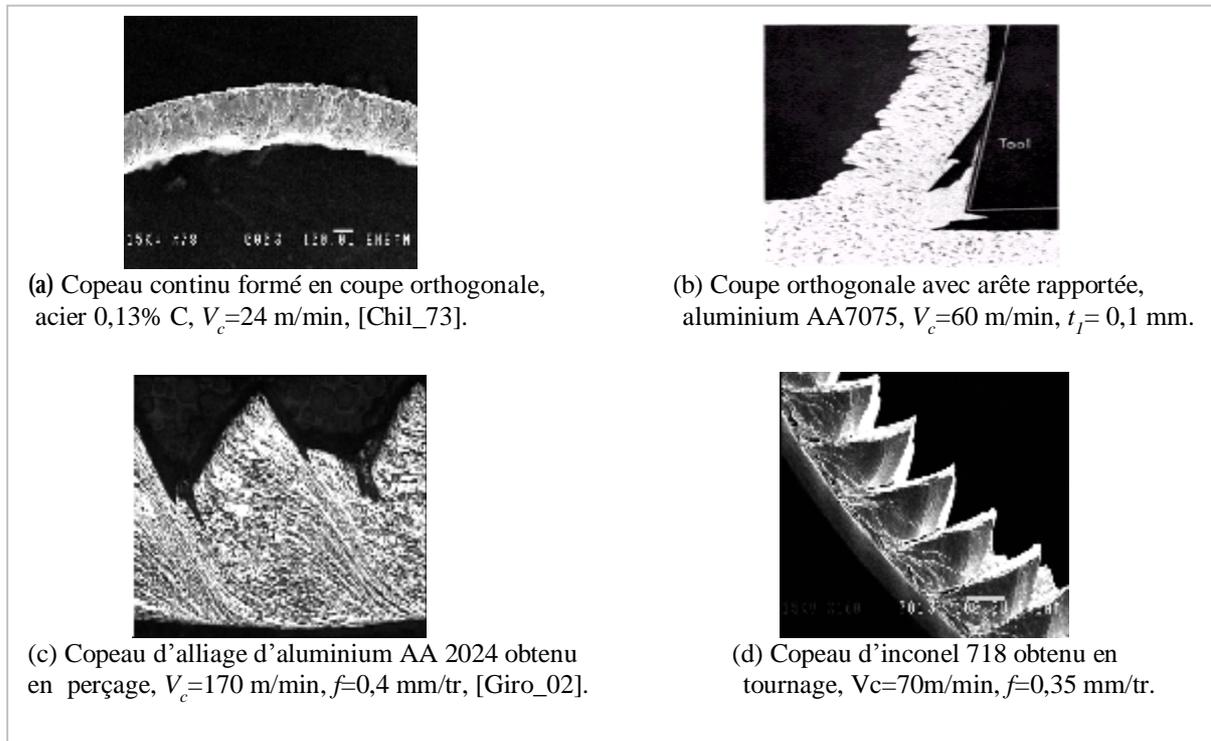


Figure I.27 : Exemples de copeaux aux morphologies différentes.

### I.8.3 Efforts de coupe :

La résultante des efforts exercés sur l'outil peut être décomposée dans les différents plans géométriques (Figure I.28). On définit ainsi les différentes composantes des efforts :

- Par rapport à la vitesse de coupe avec  $F_c$  l'effort de coupe et  $F_f$  l'effort d'avance,
- Par rapport à la face de coupe de l'outil avec  $F_N$  l'effort normal (à la face de coupe) et  $F_T$  l'effort tangentiel ou effort de frottement,
- Ou encore par rapport au plan de cisaillement avec  $F_s$  l'effort de cisaillement (parallèle au plan de cisaillement) et  $F_{ns}$  l'effort normal au plan de cisaillement.

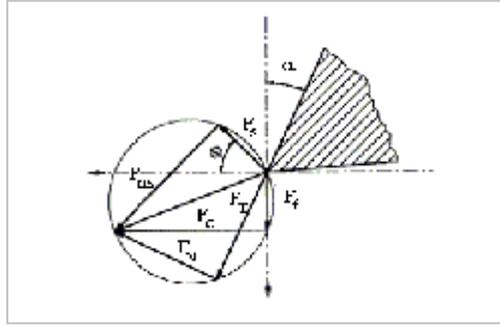


Figure I.28 : Diagramme des efforts en coupe orthogonale [Gaut\_L].

Concrètement, ce sont les efforts de coupe  $F_c$  et d'avance  $F_f$  que l'on mesure expérimentalement à l'aide de tables dynamométriques. On utilise alors les relations de passage suivantes :

$$\begin{cases} F_T = F_c \sin \alpha + F_f \cos \alpha \\ F_N = F_c \cos \alpha - F_f \sin \alpha \\ F_S = F_c \cos f - F_f \sin f \\ F_{NS} = F_c \sin f + F_f \cos f \end{cases} \quad (\text{I-25})$$

On définit également à partir des efforts l'angle de frottement  $\beta$  et le coefficient de frottement apparent  $\mu$  :

$$m = \tan \beta = \frac{F_T}{F_N} = \frac{F_f + F_c \tan \alpha}{F_c - F_f \tan \alpha} \quad (\text{I-26})$$

## **I.9 Chaleur et température :**

### **I.9.1 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 (Figure I.29). 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, [Ay\_98, Rech\_04].

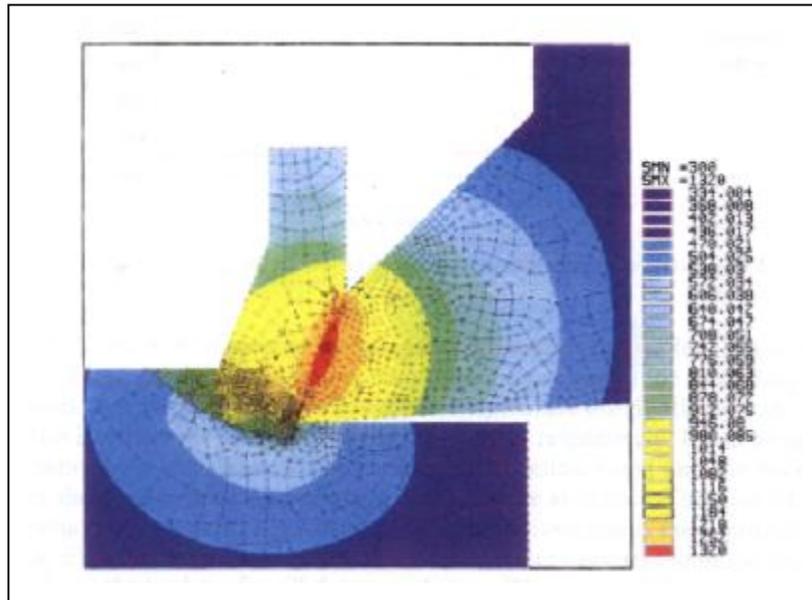


Figure I.29 : Représentation de distribution de la chaleur [Maju\_05].

### **I.9.2 Mesure de la température :**

Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer l'élévation de température en usinage, [Koma\_01] : l'utilisation de thermocouples, la thermographie infrarouge, l'analyse métallographique, l'utilisation de poudres fines à température de fusion constante et l'emploi de peintures thermosensibles. Appliquée 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 simples d'utilisation, les techniques des thermocouples restent 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.

Il est possible de remonter à la distribution de température dans l'outil à partir d'analyses métallographiques effectuées sur l'outil après usinage (Figure I.30). 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  $\pm 25$  [°C], mais elle est difficile et longue à mettre en oeuvre et n'est employée que pour des outils en acier rapide.

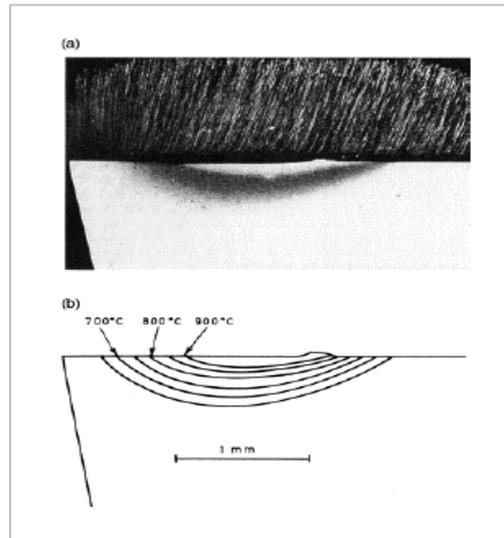


Figure I.30 : Détermination du champ de température par méthode métallographique d'après Trent et Wright

(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,

$a_p=1,25$  mm. (b) Distribution de température dans l'outil [Tren\_00].

Les techniques de thermographie infrarouge sont également utilisées pour mesurer les champs de température dans les zones de coupe. Dès 1961, le dispositif photographique proposé par [Boot\_61] a permis d'obtenir le champ complet de température sur l'outil, le copeau et la pièce (Figure I.31). Les caméras infrarouges sont de plus en plus employées pour mesurer la température et sa distribution, [Vern\_02, Sutt\_03, Potd\_04, M'Sao\_04]. Néanmoins, ces techniques nécessitent un appareillage sophistiqué qui doit être rigoureusement calibré et les différentes méthodes employées ne sont encore capables d'assurer des résolutions spatiales et temporelles élevées rendant l'exploitation des mesures difficile. Par ailleurs, des conditions d'usinage particulières sont requises comme la suppression du fluide de coupe et l'accès visuel aux zones de coupe.

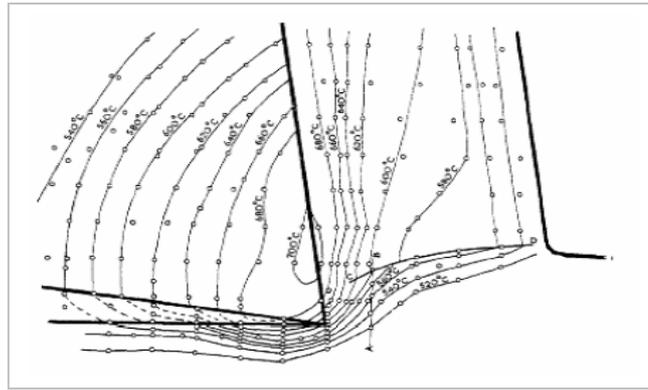


Figure I.31 : Champ de température en coupe orthogonale de l'acier AISI 1014

obtenu par mesure infrarouge, d'après [Boot\_61].

Parallèlement aux techniques expérimentales, des méthodes analytiques et numériques ont été élaborées, [Dasi\_99]. Parmi ces dernières, les méthodes des différences finies et des éléments finis sont les plus répandues. L'estimation du flux de chaleur et de la température en usinage peut être également abordé par la résolution de problème inverse de conduction de chaleur dans l'outil. Cette approche consiste à identifier les paramètres d'une loi liant le flux appliqué à l'outil et la température mesurée par des capteurs placés en un ou plusieurs points proches de l'arête de coupe, [Bata\_02].

## **I.10 Contact à l'interface outil copeau :**

L'interface outil copeau représente un système tribologique unique caractérisé par le frottement d'une surface fraîchement générée (copeau) sur la face de coupe d'un outil dans des conditions de très grande pression de contact et de température élevée.

### **I.10.1 Température à l'interface outil copeau :**

La température sur la face de coupe est le principal paramètre qui influe sur l'usure de l'outil à travers des phénomènes tels que l'abrasion, l'adhésion et la diffusion. Elle joue un rôle déterminant sur la nature du frottement à l'interface et change de manière significative les propriétés physiques et mécaniques des matériaux constituant l'outil. La principale difficulté provient de la petite dimension de la zone de contact qui abrite de forts gradients thermiques.

La forme du profil peut être différente selon les conditions de coupe et la nature des matériaux considérés, mais les différentes méthodes de mesure s'accordent sur le fait que le maximum de la température n'est atteint qu'à une certaine distance de la pointe de l'outil.

Récemment M'Saoubi et Chandrasekaran ont étudié le profil de la température à l'interface outil copeau à l'aide d'une caméra infrarouge, [M'Sao\_04]. Des exemples de profils sont présentés sur la figure I.32. Ils montrent logiquement que la température augmente avec la vitesse de coupe et l'avance, et que ces paramètres ont un effet opposé sur la position de la température maximale. Cette dernière se rapproche de la pointe de l'outil quand la vitesse de coupe augmente (Figure I.32 (a)) et s'éloigne quand l'avance augmente (Figure I.32 (b)).

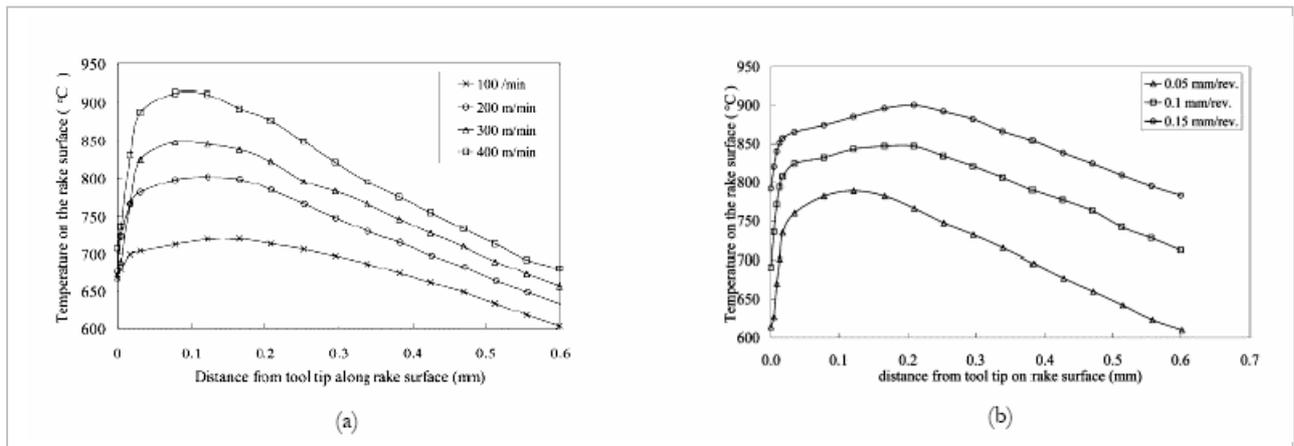


Figure I.32 : Profils de la température à l'interface outil copeau pendant l'usinage d'un acier trempé,  $\alpha=0^\circ$ .

(a) Effet de la vitesse de coupe, (b) Effet de l'avance [M'Sao\_04].

### **I.10.2 Distributions des contraintes à l'interface outil copeau :**

Les techniques expérimentales qui permettent de mesurer les contraintes à l'interface outil copeau sont principalement la photoélasticimétrie et l'utilisation d'outils coupés (Split tool) [Arse\_97].

Dans la première méthode, les distributions des contraintes sont déterminées par analyse des lignes isochromes et isoclines créées sur un outil photo élastique. La deuxième méthode consiste à utiliser un outil composé de deux parties distinctes (Figure I.33). On calcule les contraintes normales et tangentielles à partir des efforts normaux et tangentiels mesurés séparément sur les deux parties et en faisant varier la longueur  $L_1$  de la partie frontale de l'outil.

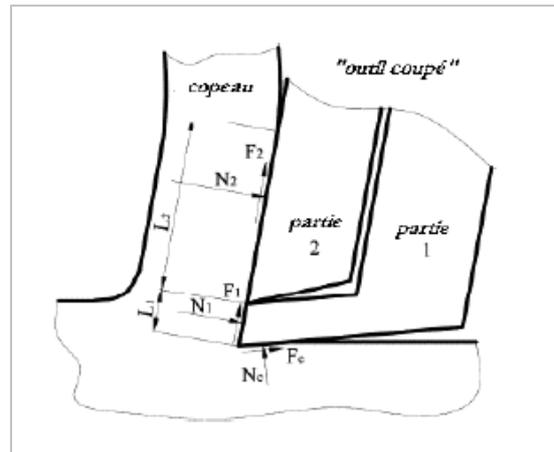


Figure I.33 : Schéma d'un « outil coupé » permettant la mesure des distributions des contraintes à l'interface outil copeau d'après [Gaut\_04].

La figure I.34 (a) illustre les distributions des contraintes sur la face de coupe proposées par Zorev en 1963 [Zore\_63]. Dans son modèle, la contrainte normale  $\sigma$  suit une loi puissance décroissante avec un maximum à la pointe de l'outil. L'aire de contact est divisée en deux régions : la région du contact collant ( $l_p$ ) et la région du contact glissant. Dans la région du contact collant, la contrainte  $\tau$  de cisaillement (ou de frottement) est constante (plateau) et égale à la contrainte d'écoulement de cisaillement  $k$  dans le copeau. Dans la zone de glissement la contrainte de cisaillement suit de façon proportionnelle la même tendance que la contrainte normale. Cette représentation du contact a pendant longtemps servi de modèle de référence et a été largement employée dans différentes études. Quelques expériences basées sur la méthode de photoélasticimétrie ont appuyé le modèle de Zorev, [Chan\_65]. Mais à cause de l'élévation importante de la température, cette technique est limitée aux faibles vitesses de coupe et il n'y a aucune assurance que les résultats obtenus avec les outils photo élastiques soient également représentatifs dans le cas de l'usinage avec des outils carbure ou HSS. De plus, les distorsions locales des franges causées par le contact de la face de dépouille avec la pièce ne permettent pas de déterminer les contraintes très proches de la pointe de l'outil.

Les résultats expérimentaux qui utilisent la méthode de « l'outil coupé » montrent effectivement des distributions différentes. Elles révèlent en particulier l'existence d'un plateau pour la contrainte normale (figure I.34 (b)).

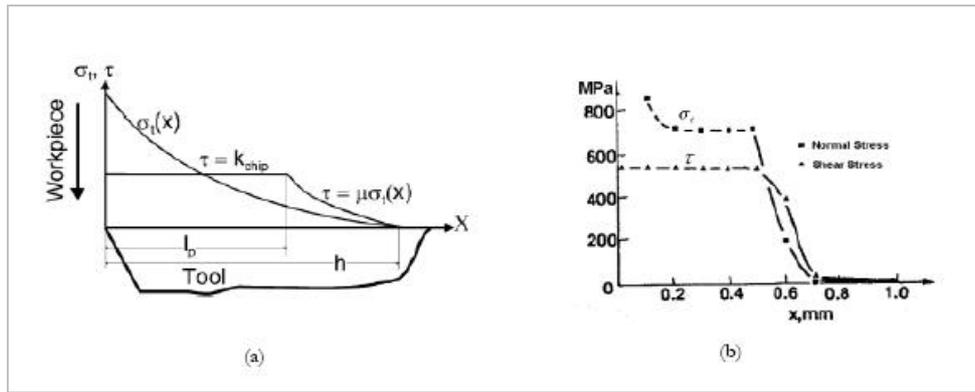


Figure I.34 : Distribution de la contrainte normale et de cisaillement le long de l’interface outil copeau.

(a) Modèle proposé par Zorev, [Zore\_63].

(b) Résultats expérimentaux obtenus par la méthode de « l’outil coupé », [Chil\_89].

Lee et al [Lee\_95] ont également proposé une méthode basée sur le principe de l’outil coupé qui permet de mesurer les contraintes très près de l’arête de coupe. Les résultats montrent que le profil des contraintes est affecté à la fois par la nature des matériaux et les conditions de coupe. La contrainte normale conserve un profil avec plateau dans le cas de l’aluminium et le cuivre mais celui-ci est moins prononcé dans le cas de l’acier. La nouveauté est que le profil de la contrainte de cisaillement est semblable au profil de la contrainte normale (augmentation de la contrainte à l’approche de la pointe de l’outil, Figure I.35).

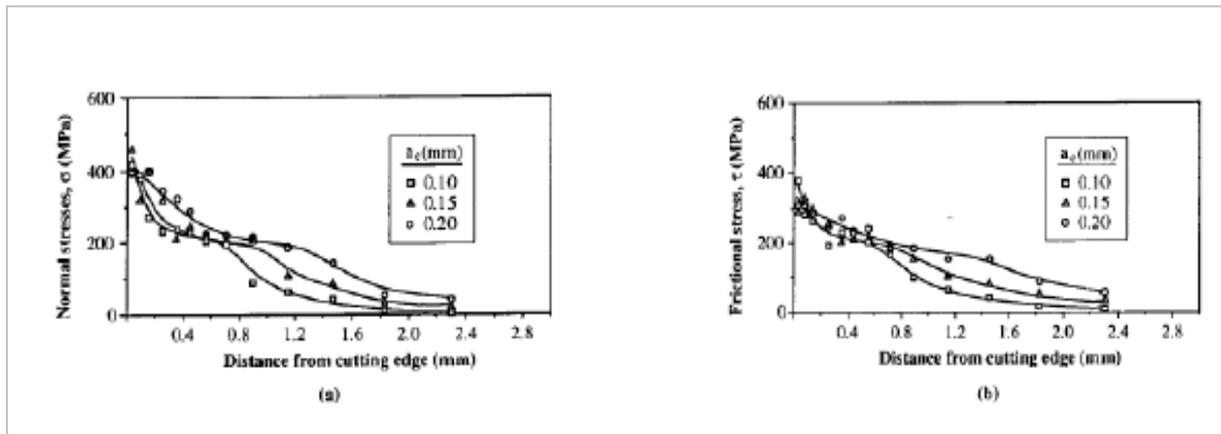


Figure I.35 : Distribution des contraintes mesurées le long de l’interface outil copeau en utilisant la méthode de l’outil coupé, Résultats obtenus pour un aluminium pour différentes avances,  $V_c=35$  [m/min],  $\alpha=0^\circ$ ,  $a_p=3$  [mm].

(a) Contrainte normale à la face de coupe. (b) Contrainte de cisaillement (ou de frottement) [Lee\_95].

Les auteurs généralisent leurs résultats en suggérant de représenter les profils des contraintes à l’interface outil copeau comme sur la figure I.36 :

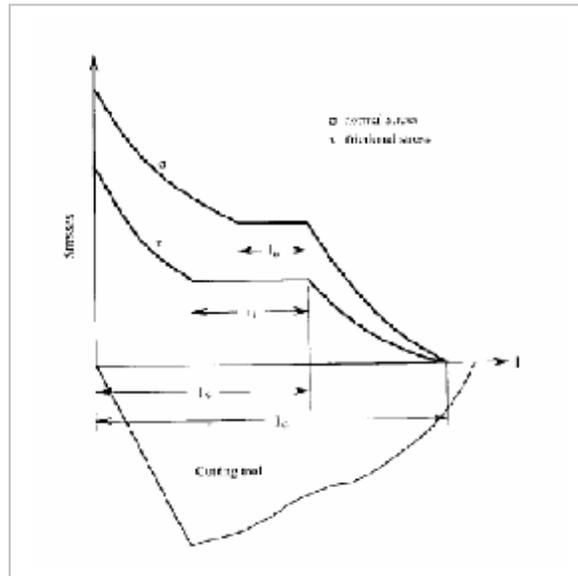


Figure I.36 : Modèle de distribution de la contrainte normale et de cisaillement

le long de l'interface outil copeau, d'après [Lee\_95].

### I.10.3 Coefficient de frottement

Les conditions de contact et de frottement sont généralement modélisées à l'aide d'un coefficient de frottement. En usinage, le contact fut d'abord regardé à travers le coefficient de frottement apparent (ou moyen)  $\bar{m}$  défini par le rapport entre la force tangentielle  $F_T$  et la force normale  $F_N$ . L'expérience montre que  $\bar{m}$  dépend à la fois de la vitesse de coupe, de l'avance et de la géométrie de l'outil. Pour s'affranchir de toutes ces dépendances, Moufki et al [Mouf\_98] proposent de représenter le coefficient de frottement apparent comme une fonction de la température moyenne à l'interface outil copeau  $T_{int}$  (Figure I.37) :

$$\bar{m} = m_0 \left( 1 - \frac{T_{int} - T_0}{T_f - T_0} \right)^q \quad (I-27)$$

Où  $T_f$  est la température de fusion,  $T_0$  et  $\mu_0$  sont des valeurs de référence. Le modèle représente bien de la chute du coefficient du frottement avec la vitesse de coupe (qui fait augmenter la température), ce qui permet aux auteurs de retrouver à travers leur modèle de coupe la forte baisse des efforts dans le domaine des grandes vitesses de coupe. Le coefficient de frottement apparent est une notion très globale puisqu'il est défini à partir des efforts qui résultent non seulement des interactions à l'interface outil copeau mais également des actions

sur l'arrondi d'outil et des phénomènes de frottement entre la face de dépouille et la surface de la pièce, [Wang\_03].

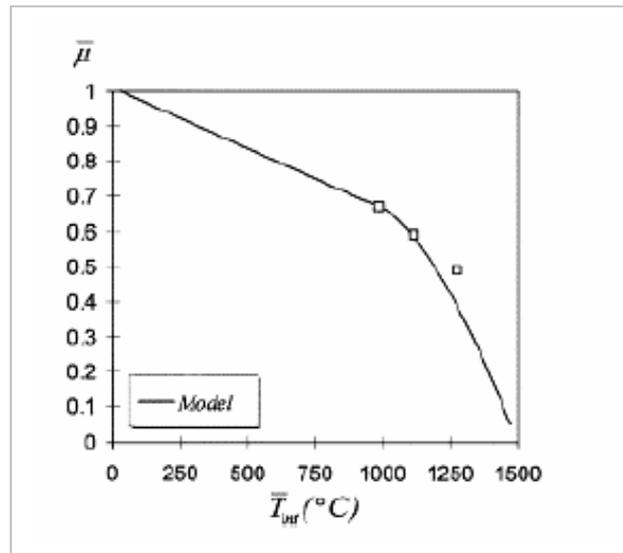


Figure I.37 : Coefficient de frottement apparent  $\mu$  comme une fonction de la température moyenne à l'interface outil-copeau  $T_{int}$  [Mouf\_98].

C'est une notion plus locale du coefficient de frottement qui doit permettre une analyse plus fine des phénomènes à l'interface outil-copeau. Certaines approches tentent alors à travers le coefficient de frottement  $\mu$  ( $\mu \neq \bar{m}$ ) d'exprimer la contrainte de cisaillement  $\tau$  en fonction de la contrainte normale à l'interface outil-copeau  $\sigma_n$ . Parmi ces expressions, on trouve la relation de type Coulomb :

$$t = m s_n \quad (\text{I-28})$$

D'autres relations plus sophistiquées ont été proposées pour se rapprocher davantage des profils expérimentaux, [Chil\_97]. A titre d'exemple on peut citer les équations (I-29) et (I-30) utilisées dans certains modèles numériques de la coupe :

$$t = K (1 - \exp[-m s_n / K]) \quad (\text{I-29})$$

$$t = (m.K)(1 - \exp[-m s_n / m.K])^{1/n} \quad (\text{I-30})$$

Où  $k$  est la contrainte d'écoulement en cisaillement,  $m$  et  $n$  sont des paramètres d'ajustement. Quand  $\sigma_n$  tend vers l'infini (équation I-30), ce qui correspond au voisinage de la pointe de l'outil,  $\tau$  prend la valeur de  $k$  comme dans le modèle de Zorev.

### **I.11 Etat de surface :**

L'acier à l'état durci est aujourd'hui fini dans des conditions qui conduisent à des surfaces comparables à celles de finition précise ( $R_a$  de 0.2 à 0.4 [ $\mu m$ ]). Ceci est dû à la disponibilité de céramiques et de CBN de qualité et à des machines outils 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 :

$$R_t = f^2 / 8.r_e \quad (I-31)$$

Une bonne approximation de la rugosité arithmétique moyenne est :

$$R_a = f^2 / 32.r_e \quad (I-32)$$

Pour des vitesses de coupe importantes, le profil de la pièce est très voisin de l'enveloppe théorique de l'outil, alors que des arrachements sont courants aux vitesses de coupe traditionnelles. En effet, l'état de surface s'améliore avec une augmentation de la vitesse de coupe. On observe une vitesse optimale pour divers couples outils matières. Pour des vitesses inférieures, il se produit des adhérences de copeaux, le détachement se produit de façon irrégulière et diminue la qualité de la surface obtenue. Pour des vitesses supérieures, on constate soit une stagnation, soit une légère diminution des qualités de surface [Schu\_97].

Ces quelques points permettent de penser qu'en usinage à grande vitesse des matériaux durs, l'obtention de l'état de surface souhaitée n'est pas un problème. Les défauts obtenus sont plutôt des défauts dimensionnels provenant des déformations locales de la pièce au voisinage de l'outil.

### **I.12 Conclusion :**

Ce premier chapitre, donne un aperçu général sur l'usinage des métaux, ainsi que les principales procédures d'usinage, leur définition et leur principe de fonctionnement. Les notions indispensables de la mise en forme par enlèvement de matière sont développées. Un rappel de la définition des paramètres de coupe, les matériaux utilisés pour les outils de coupe et l'état de surface des pièces usinées.

### II.8.1 Modèle de Remadna Mehdi [Rema\_01] :

Il a proposé un modèle d'usure de différentes nuances de plaquettes CBN.

Dans un premier temps, l'évolution des efforts de coupe spécifiques en fonction de l'usure a été relevée. Ensuite, un contrôle géométrique des plaquettes CBN a été effectué en relevant les profils.

Pour une observation précise, il n'a pas voulu se limiter à la mesure de la seule usure en dépouille VB. Il a choisi d'effectuer un relevé du profil dans la zone où le cratère en demi-lune (sur la face de coupe) présente sa plus grande largeur (figure II.19). Pour les conditions de coupe fixées, il a considéré le plan de symétrie de l'insert (figure II.20). Le relevé a été effectué avec un rugosimètre équipé d'un palpeur sans patin.

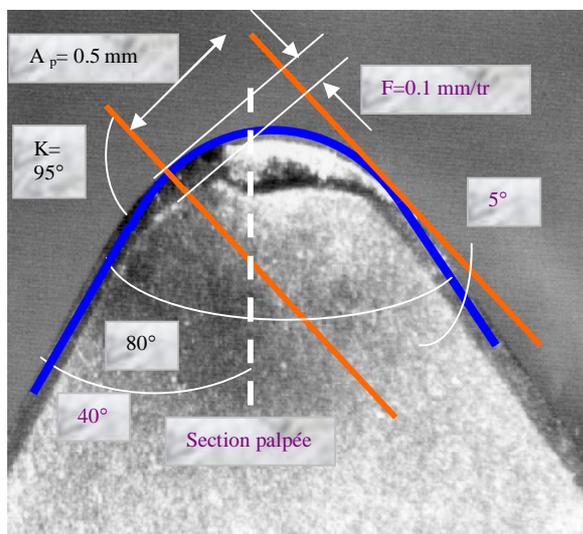


Figure II.19 : Angles et paramètres [Rema-01].

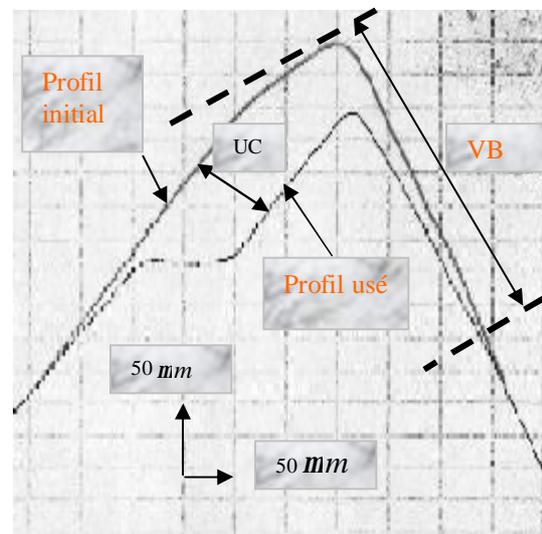
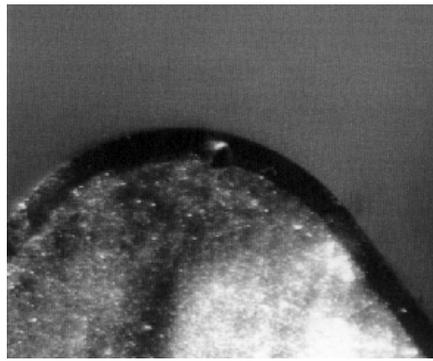
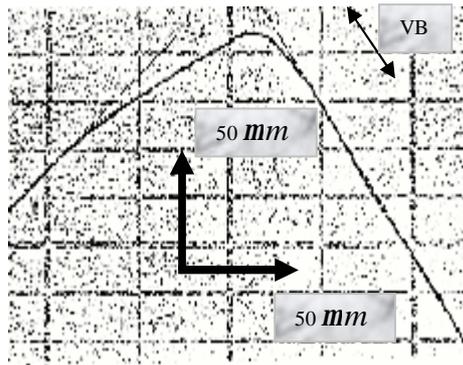
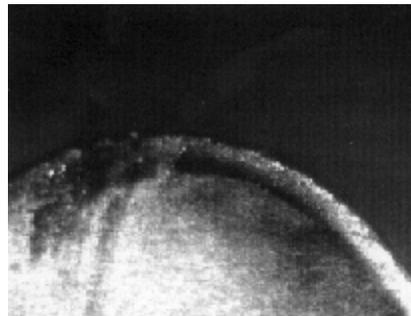
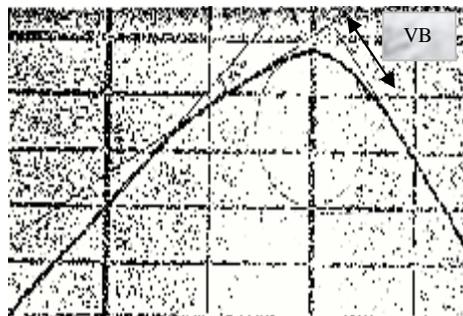


Figure II.20 : Mesure du profil usé [Rema\_01].

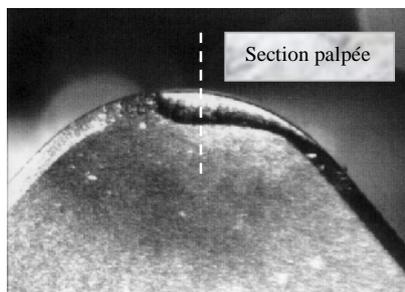
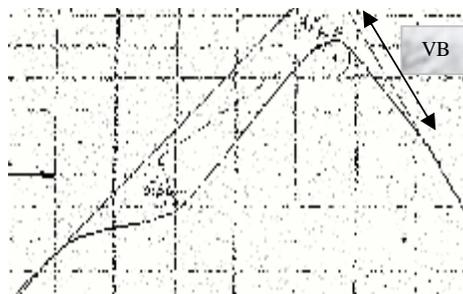
Pour contrôler la géométrie des outils de coupe, il a pris deux types de plaquettes (Sa et Su) et avec un palper, il a étudié leur profil géométrique. La figure suivante représente ses profils testés.



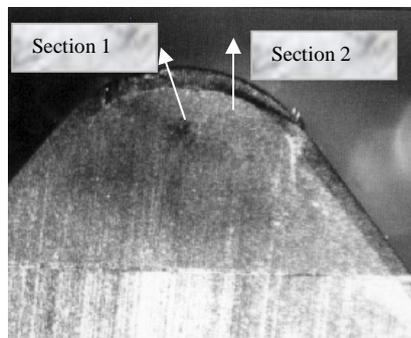
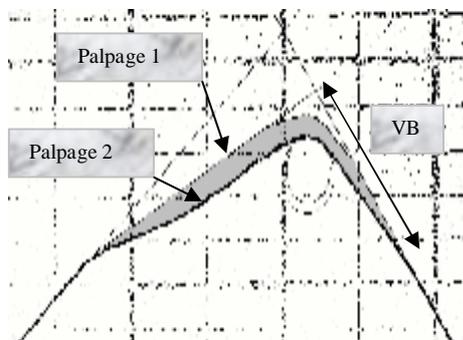
**Plaquette Sa 08 T**  
 Profil très peu usé, angle du chanfrein  $-13^\circ$   
 $8 \mu\text{m} < \text{rayon de coupe} < 15 \mu\text{m}$   
 (Après 2 passes),  
 $T_{\text{usinage}} = 1.12 \text{ min}$   
 $R_m = 1900 \text{ MPa}$   
 $V_c = 200 \text{ m/min}$   
 $a = 0.5 \text{ mm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/tr}$



**Plaquette Sa 08 S**  
 Profil en bon état, angle du chanfrein  $-14^\circ$   
 Rayon de coupe  $= 18 \mu\text{m}$   
 (Après 2 passes),  
 $T_{\text{usinage}} = 1.13 \text{ min}$   
 $R_m = 1900 \text{ MPa}$   
 $150 < V_c < 400 \text{ m/min}$   
 $a = 0.5 \text{ mm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/tr}$



**Plaquette Su 12 T**  
 Usure très marquée du chanfrein  
 Rayon de coupe  $= 12.5 \mu\text{m}$   
 (Après 6 passes)  
 $T_{\text{usinage}}$  (temps de coupe cumulé)  $= 2.75 \text{ min}$   
 $R_m = 1900 \text{ Mpa}$   
 $V_c = 200 \text{ m/min}$   
 $a = 0.5 \text{ mm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/tr}$



**Plaquette Su 12 T eco**  
 Rayon d'arête  $= 3.1 \mu\text{m}$   
 (palpage 1, profil théorique)  
 Rayon de coupe :  $[4.4 \text{ à } 6.9 \mu\text{m}]$  (palpage 2)  
 $T_{\text{usinage}}$  (temps de coupe cumulé)  $= 0.93 \text{ min}$   
 $R_m = 1900 \text{ Mpa}$   
 $150 < V_c < 400 \text{ m/min}$   
 $a = 0.5 \text{ mm}$   
 $f = 0.1 \text{ mm/tr}$

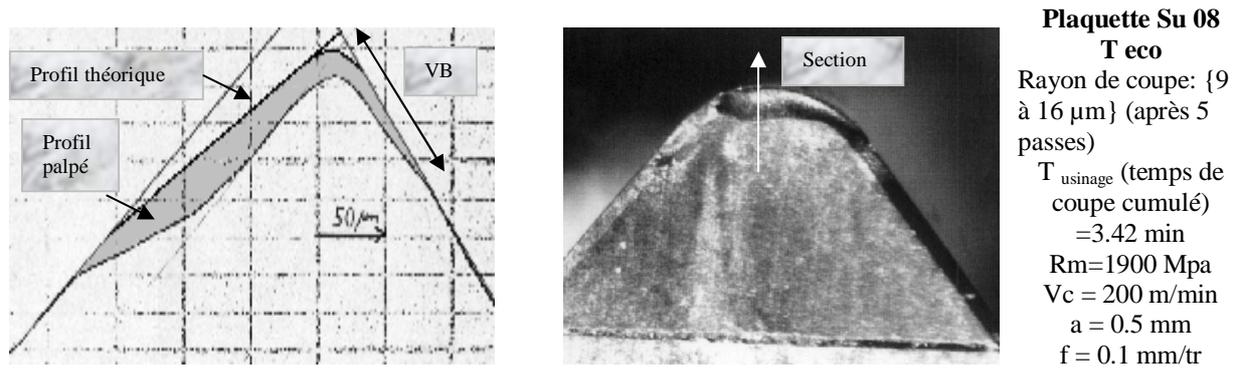


Figure II. 21 : Profil géométriques des plaquettes testées [Rema\_01].

L'évolution de l'usure en cratère sur la face de coupe au cours du temps est donnée par la figure suivante :

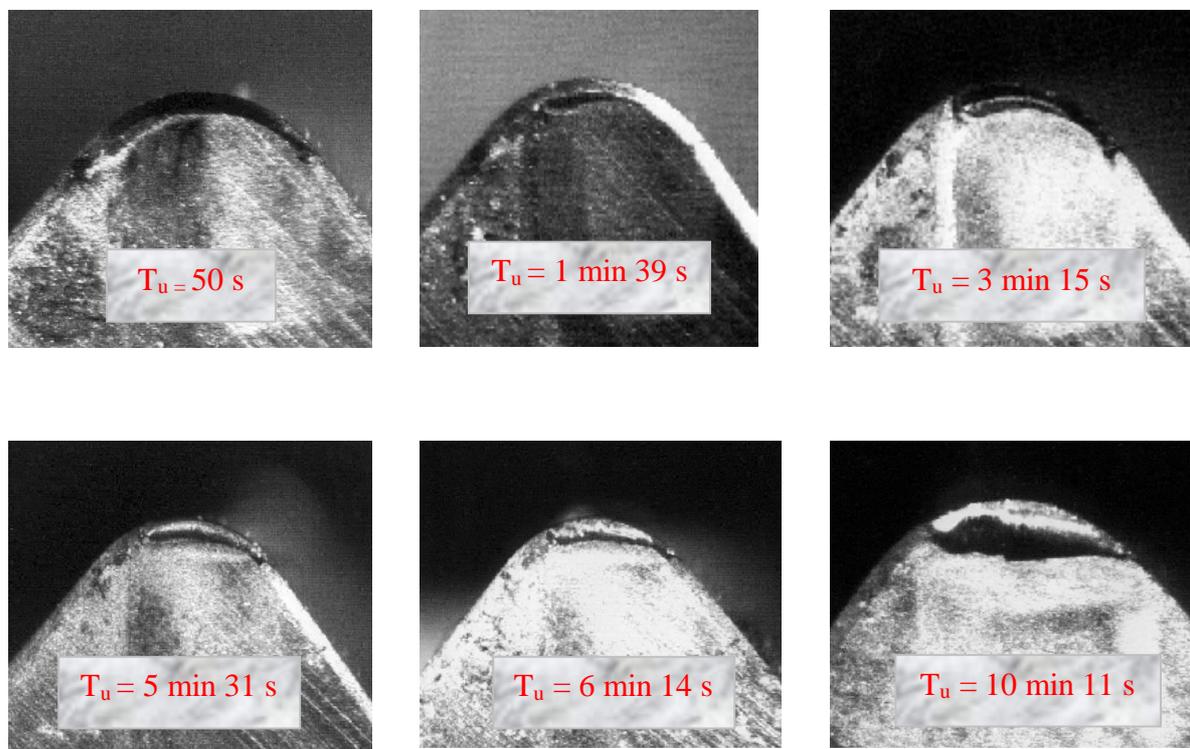


Figure II.22 : Evolution de l'usure en cratère [Rema\_01].

On peut également observer l'état d'usure en dépouille des arêtes de coupe après essai dans la figure II.23 sur la face en dépouille. On a noté une forte usure en VB sur l'arête ayant usiné à 400[m/min] l'arête de coupe a nettement reculée. Dans ce cas, le risque de cote non respectée est grand.

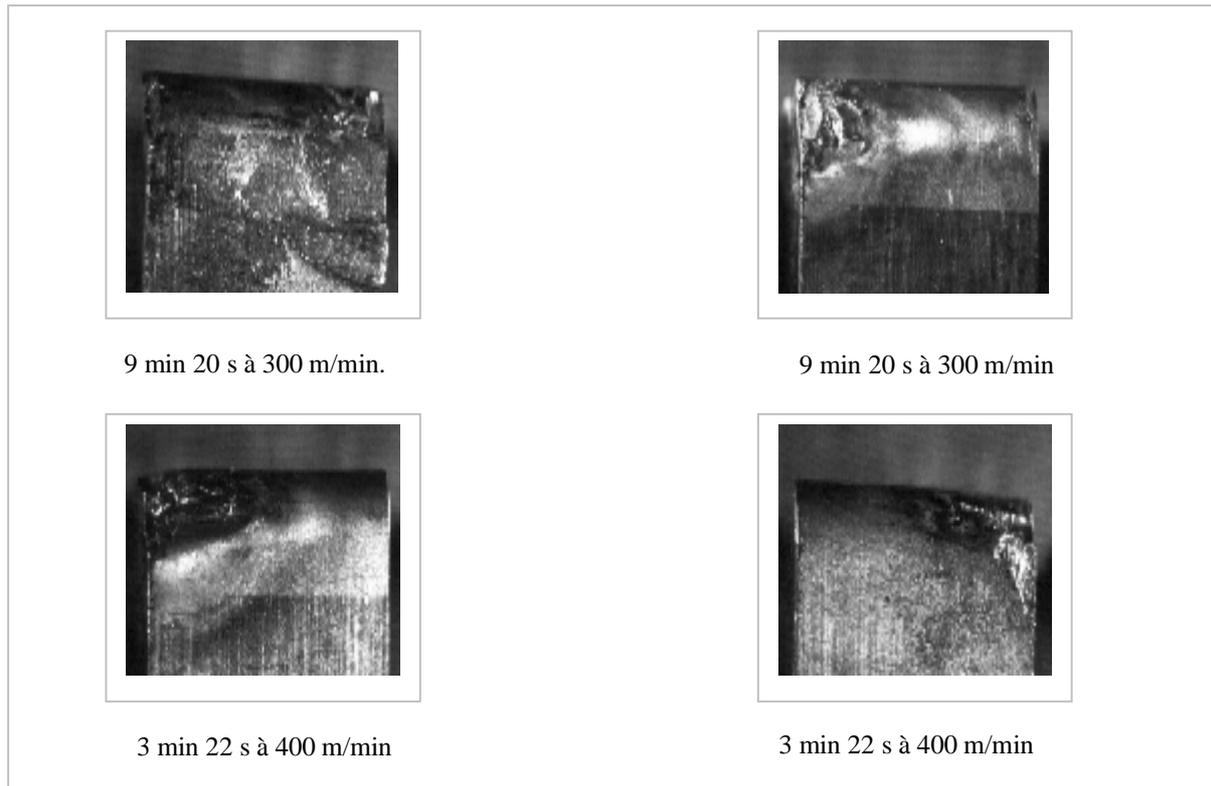


Figure II.23 : Etat d'usure des plaquettes [Rema\_01].

Pour la comparaison, il a testé 4 nuances de plaquettes CBN, dont 2 nuances revêtues. Il a choisi des essais à vitesse de coupe continûment variable pour 2 valeurs d'avance et de pénétration pour limiter le nombre d'essais et ainsi tenter de réduire les coûts aussi bien en terme de matière à usiner que de plaquettes utilisées pour les essais. Cependant, l'objectif général qu'il poursuit à travers ces essais est la réduction de cette durée de vie.

Les essais sont réalisés comme suit :

Les trois composantes de l'effort résultant et la vitesse de rotation de la broche en fonction du temps de coupe sont mesurées et enregistrées. Les différentes composantes sont proportionnelles aux tensions portées sur l'axe des ordonnées (100 N/V pour les efforts). La vitesse de coupe varie de 100 à 300 [m/min]. La durée d'une passe (à vitesse de coupe variable) est de 30 secondes environ. A la fin de chaque passe, la plaquette est démontée et observée au microscope.

Pour chaque essai, l'usure en dépouille obtenue à la fin des 8 passes est notée  $VB_{\xi}^i$ . Elle est obtenue pour un temps de coupe de 4 minutes et pour des vitesses variant de 100 à 300 [m/min].

Nous avons exprimé cette usure frontale  $VB_{\xi}^i$  à partir de  $a_p$  et de  $f$  par la relation :

$$VB_{\text{g}}^i = K f^x a^y \quad (\text{II-10})$$

Les exposants  $x$  et  $y$  permettent de quantifier les influences respectives de  $a_p$  et de  $f$ .

### II.8.2 Modèle de Christian Pagés [Pagé\_03]:

Il a étudié le comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition.

Afin de vérifier la possibilité d'enregistrer l'influence et la variabilité des revêtements sur la coupe, une première série d'essais a été faite pour connaître la sensibilité et la capacité des systèmes de mesure et analyser les efforts de coupe.

Il a utilisé deux matériaux : 100 C6 et 42 CD4, et une plaquette **CNMG 12-08-08 GM**. Le type d'usinage utilisé est le chariotage.

Pour ces essais, trois revêtements différents de la société Balzers ont été utilisés.

Ces premiers essais ont mis en évidence un mode d'usure en cratère de l'arête de coupe avant rupture de l'outil.



Figure II.23 : Usure en cratère de la plaquette [Pagé\_03].

Au vu des pressions et de l'angle de contact, le phénomène d'usure de la face de dépouille est aisément compréhensible.



Figure II.25 : Usure de la face en dépouille de l'outil [Pagé\_03].

L'étude directe de l'état des arêtes de coupe et de leur voisinage immédiat illustre de profondes différences de comportement entre les différents revêtements. Ces différences se manifestent dès les premières passes, avec des effets de rayure et d'emportement de matière céramique par les copeaux.

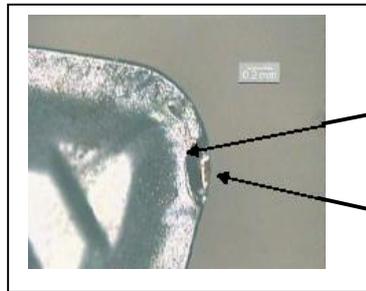


Figure II.26 : Plaquette revêtue en N°2 après usinage avec du 100C6 [Pagé\_03].

Usure en cratère:

- Le copeau formé élimine successivement les différentes couches du revêtement : le cratère se forme plus doucement.
- lorsque la profondeur du cratère est supérieure à l'épaisseur du revêtement la formation du cratère reprend sa vitesse normale.

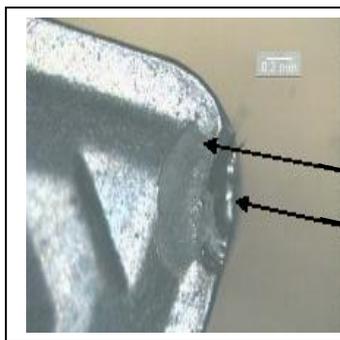


Figure II.27 : Plaquette revêtue en N°1 après usinage avec du 100C6 [Pagé\_03].

Usure en cratère très importante jusqu'à rupture de l'arête de coupe :

- le revêtement ne résiste pas à l'effort qui crée un cratère.
- lorsque le cratère est important, l'arête se rompt.

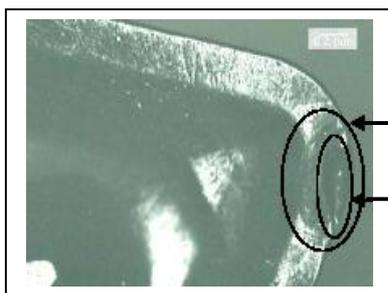


Figure II.28 : Plaquette revêtue en N°3 après usinage avec du 100C6 [Pagé\_03].

Usure en cratère en 2 temps :

- sur le revêtement l'effort est mieux réparti et la chaleur mieux évacuée. On enregistre moins d'usure.
- lorsque le copeau attaque le carbure sous jacent, l'usure est rapide et localisée.

Les phénomènes de dégradation de la zone de coupe par cratérisation puis effondrement du matériau céramique s'accroissent ensuite, approfondissant davantage les différences de comportement des revêtements céramiques.

La validation des essais est le premier travail à effectuer avec les données mesurées. Elle implique deux vérifications :

- Le calcul de  $a_p$  réel, à partir des diamètres avant et après usinage et sa comparaison avec la valeur prévue. Si l'écart dépasse 5 %, l'essai est à refaire,

- Le calcul du  $R_a$  théorique et de l'écart tel que:

$R_a$  réel –  $R_a$  théorique  $\leq$  écart (fixé pour cette étude à  $< 0.5 R_a$ ).

La détermination des variables de sortie qui permettra l'analyse des grandeurs intéressantes et leur interprétation dans le cadre fixé à ce travail. Elle s'effectue généralement par le calcul, à partir des données mesurées et concerne notamment :

• Le volume usiné parti en copeau (entre deux points de mesure d'usure) et le cumul du volume usiné  $V_u$ , entre deux points de mesure d'usure de la plaquette, évalué par la formule :

$$V_u = L \cdot \frac{3.14}{4} \cdot \left[ (\Phi_{av})^2 - (\Phi_{ap})^2 \right] \quad (\text{II-11})$$

Avec :

- $L$  : longueur de passe,
- $\Phi_{av}$  : diamètre de l'éprouvette avant usinage,
- $\Phi_{ap}$  : diamètre de l'éprouvette après usinage.

• La durée de l'usinage, et le cumul de temps d'usinage  $T_u$  : entre deux points de mesure d'usure de la plaquette, évalué par la formule :

$$T_u = (L \times 3.14 \times N_p) \times (\Phi_{av} - a_p \text{ réel} (1 + N_p)) / (1000 \times V_c \cdot f) \quad (\text{II-12})$$

• Le module des efforts de coupe  $E_{ff}$ , à partir des valeurs enregistrées des efforts de coupe orthogonaux  $F_c, F_p, F_f$ , évalué par la formule :

$$E_{ff} = \left[ (F_c)^2 + (F_p)^2 + (F_f)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{II-13})$$

• Les angles de la direction d'éjection du copeau / pièce (figure II.20):

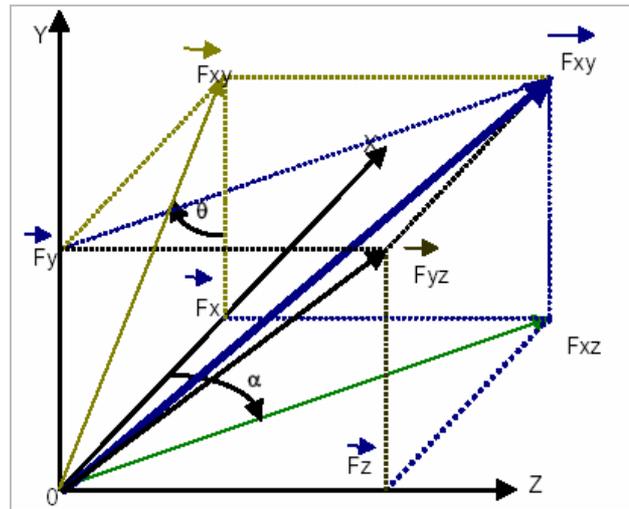


Figure II.29 : définition des angles d'éjections de copeaux [Pagé\_03].

- Angle de déviation  $a$  : C'est l'angle que fait le copeau par rapport à l'axe OX :

$$a = \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{F_x^2}}{\sqrt{F_x^2 + F_z^2}} \right) \quad (\text{II-14})$$

- Angle d'incidence  $q$  : C'est l'angle que fait le copeau par rapport à la face de coupe OYZ:

$$q = \cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{F_y^2}}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (\text{II-15})$$

ü Le coefficient de frottement outil/ pièce évalué à l'aide de la relation :

$$\text{Coef. frot} = \frac{\sqrt{F_c^2 + F_f^2}}{F_p} \quad (\text{II-16})$$

Il a déduire les expressions prédictives suivantes, pour les trois paramètres étudiés, qui permettent de connaître en fonction des valeurs des paramètres d'entrées la valeur du paramètre de sortie (pour une usure de  $VB=0,2$  [mm], puisque c'est notre critère d'arrêt).

- **Pour le paramètre Volume :**

$$Y = 11973319 + [-1963156 \ 1963156] \times f + [1857944 \ -1857944] \times V_c + \begin{bmatrix} -1022881 & 1022881 \\ 1022881 & -1022881 \end{bmatrix} \times V_c \times f \quad (\text{II-17})$$

- **Pour le paramètre Effort de coupe :**

$$Y = 285,88 + [-56,88 \ 56,88] a_p + [-28,12 \ 28,12] f + [20,00 \ -20,00] V_c + \begin{bmatrix} 4,88 & -4,88 \\ -4,88 & 4,88 \end{bmatrix} a_p \cdot f + \begin{bmatrix} 4,75 & -4,75 \\ -4,75 & 4,75 \end{bmatrix} V_c \cdot f \quad (\text{II-18})$$

- **Pour le paramètre Durée de vie :**

$$y = 42380 + [12313 \quad -12313] \cdot a_p + [11576 \quad -11576] \cdot V_c + \begin{bmatrix} 54,68 & -54,68 \\ -54,68 & 54,68 \end{bmatrix} \cdot V_c \cdot a_p + \begin{bmatrix} -31,36 & 31,36 \\ 31,36 & -31,36 \end{bmatrix} \cdot V_c \cdot f + [-10,21 \quad 10,21] \cdot f \quad (\text{II-19})$$

## **II.9 Conclusion :**

Les mécanismes d'usure des outils de coupe telles que l'adhésion, l'abrasion et la diffusion sont déterminés par les propriétés mécaniques et physico-chimiques de la pièce et de l'outil ainsi que par les conditions de coupe. Les sollicitations sévères qui apparaissent dans les zones de contact outil copeau et outil pièce déterminent la qualité de l'usinage et la durée de vie des outils.

La formation d'une couche adhérente et d'une arête rapportée sur la face de coupe l'outil de coupe modifie la géométrie des arêtes de coupe, et par conséquent dégrade la qualité de surface et des tolérances géométriques du produit fini. Des phénomènes de diffusion peuvent également se produire, mais n'aboutissent pas à la formation de cratère comme pour les aciers.

Dans le cas des aciers, l'analyse et la modélisation des mécanismes d'usure sont très complexes en particulier pour les raisons suivantes :

- Les dépôts (couche adhérente et arête rapportée) formés sur la face de coupe des outils sont de nature instable,
- La présence de ce troisième corps modifie sans cesse les conditions tribologiques à l'interface outil copeau,
- L'adhésion peut être provoquée simultanément par des phénomènes mécaniques et physico-chimiques qui sont encore mal connus,
- Il est impossible de proposer des critères directs de durée de vie par observation directe des outils.

Pour optimiser les opérations d'usinage à sec, il est nécessaire de bien identifier les modes d'usure, de déterminer les conditions de contact qui conduisent à ces mécanismes d'usure et de connaître la relation entre les paramètres de contact et les conditions de coupe.

### **III.1 Introduction :**

L'objectif de ce chapitre est d'appréhender, du mieux possible, la dynamique d'usure des revêtements. Il s'intègre dans une préoccupation plus large de l'industrie, pour parvenir à mettre en place un protocole d'essais permettant la caractérisation de l'usure des revêtements.

Actuellement, il existe de nombreuses méthodes de caractérisation des revêtements :

- Compositions chimiques, structurale et texture,
- Propriétés mécaniques : dureté, module, etc....,
- Coefficient de frottement,
- Etc.....

Mais les essais sur lesquels sont fondés ces modes de caractérisation sont, trop souvent, de nature statique. Or le comportement des revêtements est très différent en dynamique. En conséquence, nous nous sommes efforcés d'utiliser des techniques permettant d'enregistrer les variations dynamiques du comportement des revêtements et si possibles de caractériser le mode de détérioration de ce dernier.

### **III.2 Détermination des paramètres d'entrée :**

Les paramètres d'entrée à définir se rapportent :

- Aux outils et revêtements retenus,
- Aux matières usinées dont les propriétés mécaniques d'usinabilité viseront à différencier le comportement des revêtements en carbures métalliques.
- Aux conditions de coupe adoptées sur une machine outil mieux adaptée à un plan d'expérience.

#### **III.2.1 Outils et revêtements :**

Pour définir un outil, un grand nombre de données géométriques entrent en compte :

- Le choix du substrat (comportement mécanique de l'outil),
- La forme de l'arête de coupe,
- L'angle de coupe : angle de pression sur la pièce,
- La forme du brise copeau destiné à atténuer l'usure de l'outil en limitant la surface de frottement du copeau sur l'outil.

L'objectif de notre étude est l'analyse de l'usure des revêtements en carbure métallique. Il est donc indispensable de se fixer des conditions opératoires aussi reproductibles que possible et simple. C'est pourquoi, il a été choisi :

- Une forme d'outil porte plaquette fixe et adapté aux conditions de tournage (référence **CTGPL 16 16 K16**),

- Une forme de plaquette ne comportant pas de brise-copeaux, car celui-ci introduit une variabilité supplémentaire dans l'écoulement du copeau sur l'outil et doit être adapté au revêtement.

### **III.2.1.1 Description du porte plaquette :**

Le rôle du porte plaquette est important à plusieurs titres :

- Il permet de maintenir l'outil (ici la plaquette) en position rigide pendant l'usinage,
- Il oriente la plaquette dans l'espace. En effet, il contribue à la géométrie de coupe de l'outil. Dans le cas de cette étude, la plaquette comporte un angle de coupe ( $0^\circ$ ) et un angle de dépouille ( $11^\circ$ ) (voir paragraphe suivant). Les angles de coupe et de dépouille sont donc directement dépendants de la position de l'outil dans l'espace, donc du porte-outil (voir paragraphe géométrie de la coupe).



Figure III.1 : Porte plaquette **CTGPL 16 16 K16**.

### **III.2.1.2 Description des plaquettes :**

La plaquette (figure III. 2) choisie est réversible, de marque **Sandvik** (référence : **TPMN 16 03 08**) comportant **3** arêtes de coupe par plaquette. Sa caractéristique est répertoriée dans le tableau suivant (tableau III-1).

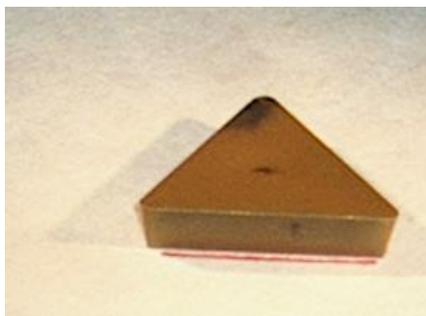


Figure III.2 : Vue d'ensemble de la plaquette Sandvik **TPMN 16 03 08**



Figure III.3 : Vue de détail de la plaquette Sandvik **TPMN 16 03 08**

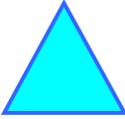
Indice	Information	Schéma	Pour en savoir plus
T	Indication la forme de la plaquette.		Voir Annexe N° 1
P	Angle de dépouille de la plaquette: ici égale à 11°.		
M	Classe de tolérance ici : <ul style="list-style-type: none"> <li>• +50 à -150 [ <i>m m</i> ] sur le cercle inscrit <b>d</b>,</li> <li>• +80 à -200 [ <i>m m</i> ] sur la cote dur pige <b>m</b>,</li> <li>• +50 à -130 [ <i>m m</i> ] sur l'épaisseur <b>s</b>.</li> </ul>		
N	Type de fixation de la plaquette sur le corps ainsi que l'indication d'aucun brise copeau.		
16	Indication de la longueur d'arête de coupe.		
03	Indication de l'épaisseur de la plaquette : 03 ⇒ épaisseur égale à 3,18 [mm].		
08	Rayon de la pointe de l'outil : ici égale à 0,8 [mm].		

Tableau III-1 : Descriptifs des plaquettes TPMN 16 03 08.

### III.2.2 Géométrie de la coupe :

La géométrie de la coupe est influencée par plusieurs paramètres :

- Le type d'usinage : ici le chariotage,
- L'orientation de la plaquette dans l'espace par rapport à la matière usinée. Ici, la porte plaquette donne à cette dernière les angles suivants :

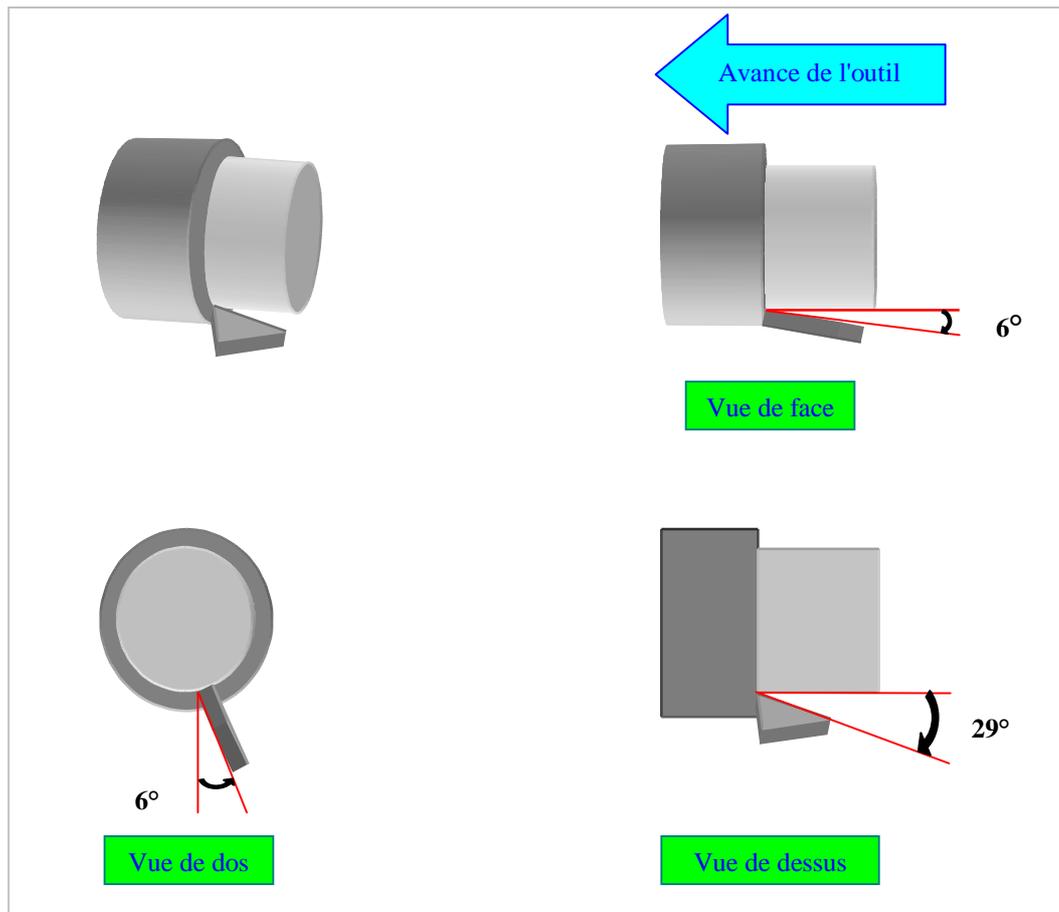


Figure III.4: Géométrie de coupe de l'outil.

### III.2.3 Matière usinée :

Le comportement des revêtements et leur usure dépendent de la matière usinée et de son état cristallin, parce que les conditions mécaniques de coupe dépendent des caractéristiques de la matière. Il est donc important de tenir compte de cet effet.

#### Ø F<sub>k</sub>20 Mn Cr 5 :

C'est un acier faiblement allié trempé avec des grains fins fréquemment utilisé dans l'industrie. Cet alliage permet donc de se placer dans des conditions d'usinage représentatives de la réalité industrielle. Leurs propriétés en usinage sont les suivantes (tableau III-2) :

Symbole	Composition				traitement	Re	R	A	Kcu	HB	Emplois
	C	Si	Mn	Cr							
20 Mn Cr 5	0.17 ÷ 0.22	≤ 0.40	1.10 ÷ 1.40	1.00 ÷ 1.30	TH 850	≥ 80	95	≥ 12	≥ 4	269	Pignon
					Rv 550		÷ 115				
					TH 850	≥ 90	115	≥ 8	≥ 4	341	Arbres de tour
					Rv 200		÷ 145			444	

Tableau III-2 : Caractéristiques du matériau utilisé.

Avec :

- **R** : Résistance à la rupture (essai de traction) en  $[\text{Da N} / \text{mm}^2]$ .
- **Re** : Limite élastique ou limite apparente d'élasticité en  $[\text{Da N} / \text{mm}^2]$ .
- **A** : Allongement en % de l'éprouvette de traction après rupture.
- **HB**: Dureté Brinell en  $[\text{Da N} / \text{mm}^2]$ .
- **Kcu** : Résilience sur éprouvette à entaille en U en  $[\text{Da J} / \text{cm}^2]$ .

Une éprouvette a été utilisée durant ces essais. Le diamètre initial était de 50 [mm], avec une longueur de 500 [mm] (figure III.5).

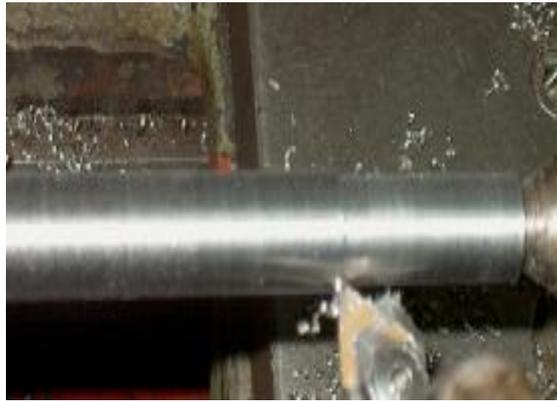


Figure III.5 : Eprouvette servant aux essais.

### III.2.4 Paramètres de coupe :

Le cadre général retenu pour tester nos revêtements est le chariotage. Il en résulte que l'on peut schématiser la configuration de la coupe par le schéma suivant :

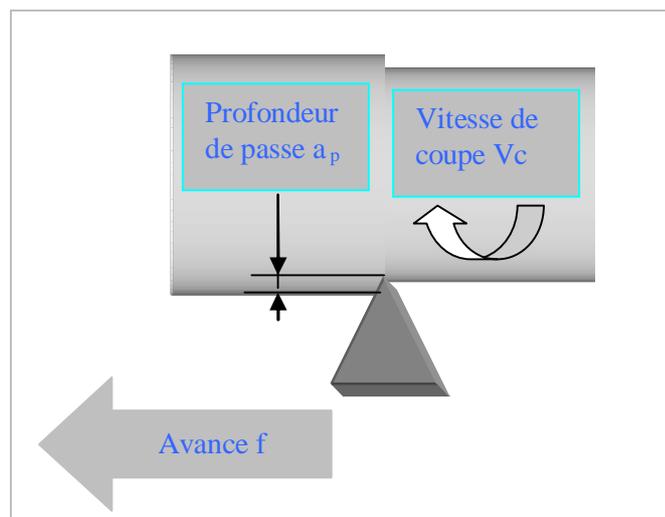


Figure III.6 : Configuration d'usinage.

Il faut définir les paramètres d'usinage, afin de ne pas se placer d'entrée dans les conditions de dégradation des arêtes de coupe trop rapides.

Pour définir ces paramètres, il est nécessaire de délimiter dans un premiers temps le domaine d'entrée. Ce dernier à été défini afin de limiter les phénomènes d'usure : un ébauche légère.

Une fois le domaine fixé, il convient de fixer les conditions de coupe.

**a. Vitesse de coupe :**

La plaquette utilisée durant cette essai (**P 40**) est fournie par Sandvik, et nous savons que les fabricants de matériaux à outils fournissent des valeurs de vitesse de coupe pour chaque type de plaquette en fonction du matériau de pièce, et ce pour une durée de vie standard de la partie active de l'outil (15 [min]).

Selon [Sand\_00] pour une opération d'ébauche légère, pour usiner un acier faiblement allié avec un revêtement carbure métallique (le cas de notre matériau et plaquette utilisé) dans des conditions industrielles, les vitesses de coupe sont limitées à 85 [m/min] (voir Annexe N°2).

Pour déterminer les vitesses de coupe que nous allons utiliser durant cette essai, on applique la loi de Taylor pour une durée de vie souhaitée  $T = 30$  [min].

$$T = C \cdot V^n \quad (\text{III-1})$$

Cette loi nous permet d'écrire :  $V = V_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{1}{n}}$  (III-2)

D'où :

- $V_0$  : Vitesse type égale à 85 [m/min],
- $T_0$  : Durée de vie à la vitesse type égale à 15 [min],
- $n$  : Coefficient de Taylor,
- $C$  : Constante de Taylor,
- $T$  : Durée de vie de l'outil,
- $V$  : Vitesse de coupe employée.

Soit :  $V = 85 \cdot \left( \frac{30}{15} \right)^{-\frac{1}{4.5}} = 72.87$  [m/min].

$$V = \frac{p \cdot D \cdot N}{1000} \Rightarrow N = \frac{1000 \cdot V}{p \cdot D} \quad (\text{III-3})$$

$D = 25$  [mm], d'où :  $N = 929.55$  [tr/min].

Pour cela, on a pris le nombre de rotation de la broche égale à 900 [tr/min], ce qui donne des vitesses de coupe variant de 49 à 71 [m/min].

**b. Avance de l'outil de coupe :**

L'avance est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée.

L'avance influence non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la matière dont il se brise.

Afin de situer, autant que possible, ces essais dans des conditions industrielles, selon [Sand\_00] la valeur d'avance est 0.1 [mm/tr] (voir annexe N° 2). Pour notre cas la valeur d'avance est 0.11 [mm/tr].

**c. Profondeur de passe :**

En chariotage, la profondeur de passe  $a_p$  est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée.

Selon [Sand\_00] pour une opération d'ébauche légère, les profondeurs de passe varient de 1.5 à 4 [mm]. Pour notre cas la profondeur de passe est 1.5 [mm].

**III.2.5 Détermination de l'effort de coupe :**

L'effort de coupe  $F_c$  dépend de la résistance spécifique à la rupture par compression  $R$  de la matière travaillée et de son usinabilité, des dimensions du copeau, de l'outil utilisé et du mode de travail.

Pour la commodité des calculs et lorsqu'on ne peut se livrer à des mesures précises pour chaque cas particulier, on admet la relation suivante pour l'effort de coupe :

$$F_c = K \cdot S \cdot R \quad (\text{III-4})$$

- Ou :
- $R$  : Résistance spécifique à la rupture par compression,
- $S$  : Section du copeau définie par l'avance  $f$  et la profondeur de passe  $a_p$ , soit :

$$S = a_p \cdot f \quad (\text{III-5})$$

- $K$  : Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière, de l'épaisseur du copeau et de la géométrie de l'outil de coupe. On adopte généralement les valeurs suivantes,  $K= 2.5$  à 4 pour les aciers et  $K= 4$  à 5 pour les fontes.

Pour notre cas, on a les données suivantes :

- $R = 1150$  [N/mm<sup>2</sup>]
- $S = 0.165$  [mm<sup>2</sup>]
- $K = 3.25$

Alors:

$$F_c = 616.69$$
 [N]

### III.3 Présentation de l'expérience :

Pour réaliser cette expérience, deux phases ont été faits :

1. La première phase est un usinage par enlèvement de matière réalisée au niveau des ateliers de fabrication du Génie Mécanique de l'Université de Badji Mokhtar à Annaba,

L'usinage se fait sur un tour parallèle, et la mesure directe de l'usure de l'outil durant cette phase se fait grâce à un microscope **L 2000 A** (figure III.7). L'acquisition d'image se fait à l'aide d'une **digital camera power shot G5** de marque Canon.

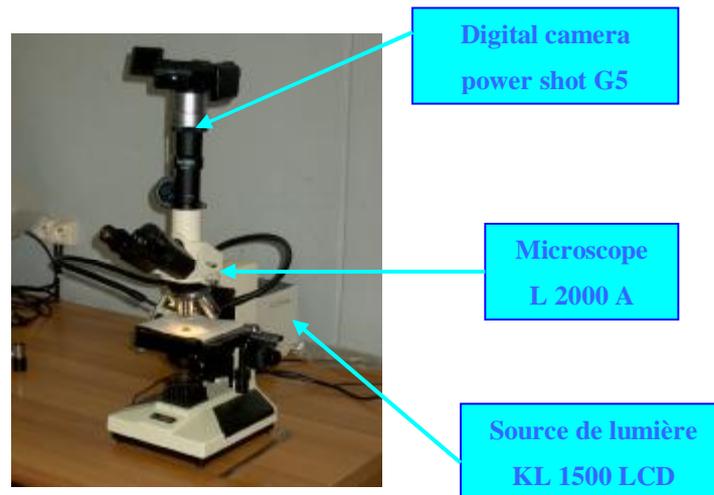


Figure III.7 : Microscope L2000A.

Les caractéristiques du microscope sont les suivant :

- Pouvoir grossissant : x 4 à x 400,
- Focal 1, 10 et 100 au choix de l'utilisateur.

Les caractéristiques de la caméra G5 son les suivantes:

- Pouvoir grossissant : x 4,
- Norme vidéo : Pal ou NTSC,
- Résolution 5 millions de pixel,
- Equilibrage des blancs : automatique ou manuel.

2. La deuxième phase est une phase d'acquisition par relevés topographiques des surfaces usées de la plaquette réalisée au laboratoire de l'L.U.T d' Aix en Provence France.

Durant cette phase, nous avons utilisé une machine à mesures tridimensionnelles à capteur à haute résolution (CHR).

#### III.3.1 Micromesure 2 :

La version de **MICROMESURE 2** a été conçue afin de proposer une réelle métrologie 3D de chaque point mesuré par l'adjonction sur chaque axe (X, Y et Z) de règles optiques synchronisées avec le capteur CHR.

Les dynamiques de mesures allant de 20 [mm] à 10 [mm] autorisent différentes échelles d'analyse afin de s'adapter à tous types de caractérisations. Equipées du sélecteur automatique de capteur, elle donne un confort d'utilisation optimum, une minimisation des risques de manipulation et surtout une automatisation complète des mesures.

La prise en compte du temps permet l'analyse de phénomènes dynamiques par la mesure d'un point, d'une ligne ou d'une surface à intervalles de temps paramétrables.



Figure III.8 : Machine à Mesurer : Micromesure 2.

**a. Caractéristiques techniques :** (tableau III-3)

<b>Ensemble Microstep</b>				
<b>Translations</b>				
	Course	Motorisation	Résolution	Vitesse max
Axes X et Y	100 mm en standard	Pas à pas avec règle micropas	[mm]0.1	20 [mm/s]
Axe Z	50 [mm]	Pas à pas avec règle optique	[mm]0.01	
<b>Matériel informatique</b>				
Ordinateur PC		PC Pentium IV sous Windows et écran plat 17''		
Logiciel de pilotage		Surface Map		
<b>Options</b>				
Sélecteur automatique		Changement automatique de voie de mesure		
Post-Traitements		MountainsMap		
<b>Capteurs Optiques</b>				
<b>Cofrets Optoélectroniques</b>				
CHR 150	Jusqu'à 1[KHz]	1, 2, 3ou 4 voies	Carte DSP embarquée	
CHR 450	Jusqu'à 4[KHz]	1 ou 2 voies	PC embarqué	

Crayons optiques				
Profondeurs de champ microscopiques	[mm]20	[mm]80	[mm]300	[mm]350
Profondeurs de champ millimétriques	1 [mm]	3 [mm]	10 [mm]	
Caméras				
X 50	Caméras CCD avec visualisation et pilotage par logiciel			
X 250	Caméras CCD avec éclairage intégré, visualisation et pilotage commandés par logiciel			

Tableau III-3 : Caractéristique techniques de la machine Micromesure 2.

### III.3.4 Logiciel CHR Monitor : (Pour le capteur CHR 150 et CHR 450)

Le programme CHR Monitor permet de visualiser, imprimer et enregistrer les mesures effectuées par le CHR. Avec un simple clic de souris vous pouvez lancer une acquisition du Dark (signal parasite) et sélectionner :

- Le crayon optique connecté au CHR,
- Le paramètre physique à mesurer (altitude, épaisseur, intensité),
- La cadence d'acquisition et la fréquence d'échantillonnage,
- Le moyennage temporel des mesures.

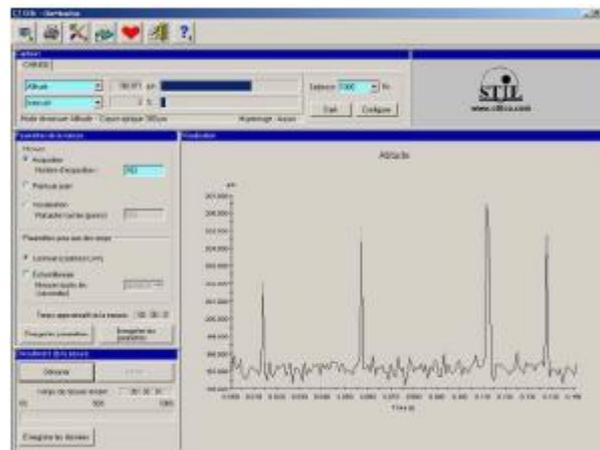


Figure III.9 : Logiciel CHR Monitor.

## III.4 Procédure d'exécution :

### III.4.1 Méthodologie d'exécuter l'expérience :

#### a. Pour la 1<sup>ère</sup> phase :

L'organigramme suivant résume les différentes étapes de réaliser la 1<sup>ère</sup> phase de l'expérience :

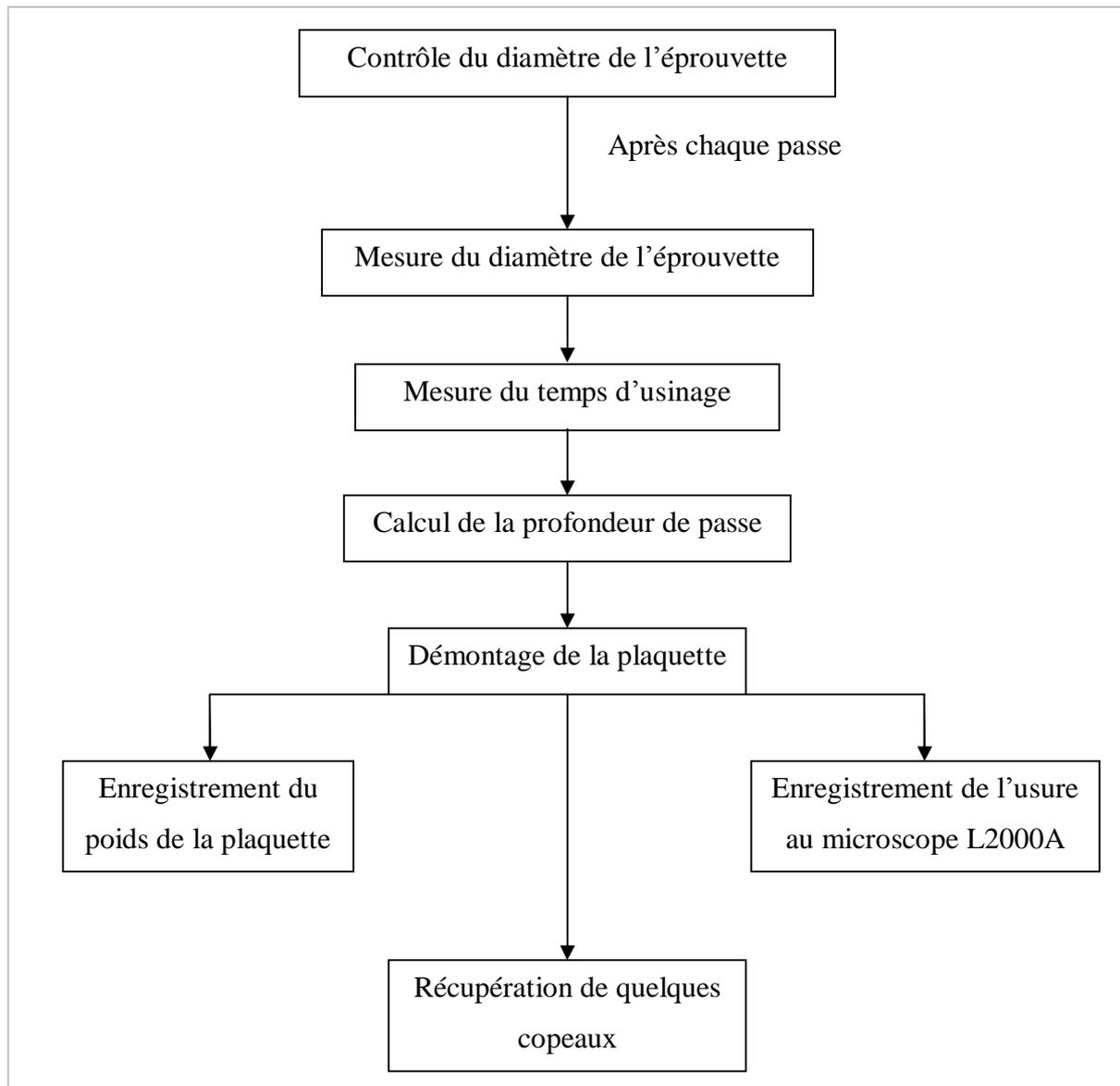


Figure III.10 : Organigramme de la réalisation de la 1<sup>ière</sup> phase de l'expérience.

Il est important de signaler que l'on doit poursuivre les passes d'usinage jusqu'à l'obtention du critère d'arrêt d'usure de l'arête de coupe utilisée. Lorsque le seuil d'usure est atteint, on effectue :

- Démontage de l'éprouvette,
- Changement d'arête de coupe.

▼ **Remarques :**

1. Pour chaque essai, une éprouvette et une arête neuve sont utilisées. Afin d'avoir un usinage dans de bonnes conditions dès le départ de l'essai, un usinage préliminaire était effectué avec plaquette spéciale dédiée à cette passe. Cette opération a pour objectif d'éliminer le défaut de circularité,

2. Lors du démontage de la plaquette pour mesurer l'usure, et du remontage de celui-ci, une attention particulière doit être apportée au bon repositionnement de cette dernière. En effet, il n'est pas possible de contrôler l'usure de l'arête de coupe sans démontage ce qui peut provoquer une erreur éventuelle de re-positionnement. L'enregistrement des diamètres après usinage et le calcul de la profondeur de passe réelle ont montré que pour chaque essai, nous avons un remontage acceptable,

3. Lors de la succession des passes, le diamètre minimal de l'éprouvette ne doit pas descendre en dessous de 15 [mm]. En effet, on doit éviter les risques de flexion longitudinale des pièces usinées de longueur 500 [mm], ce qui aurait faussé les résultats,

**b. Pour la 2<sup>ème</sup> phase:**

L'organigramme suivant résume les différentes étapes de réaliser la 2<sup>ème</sup> phase de l'expérience.

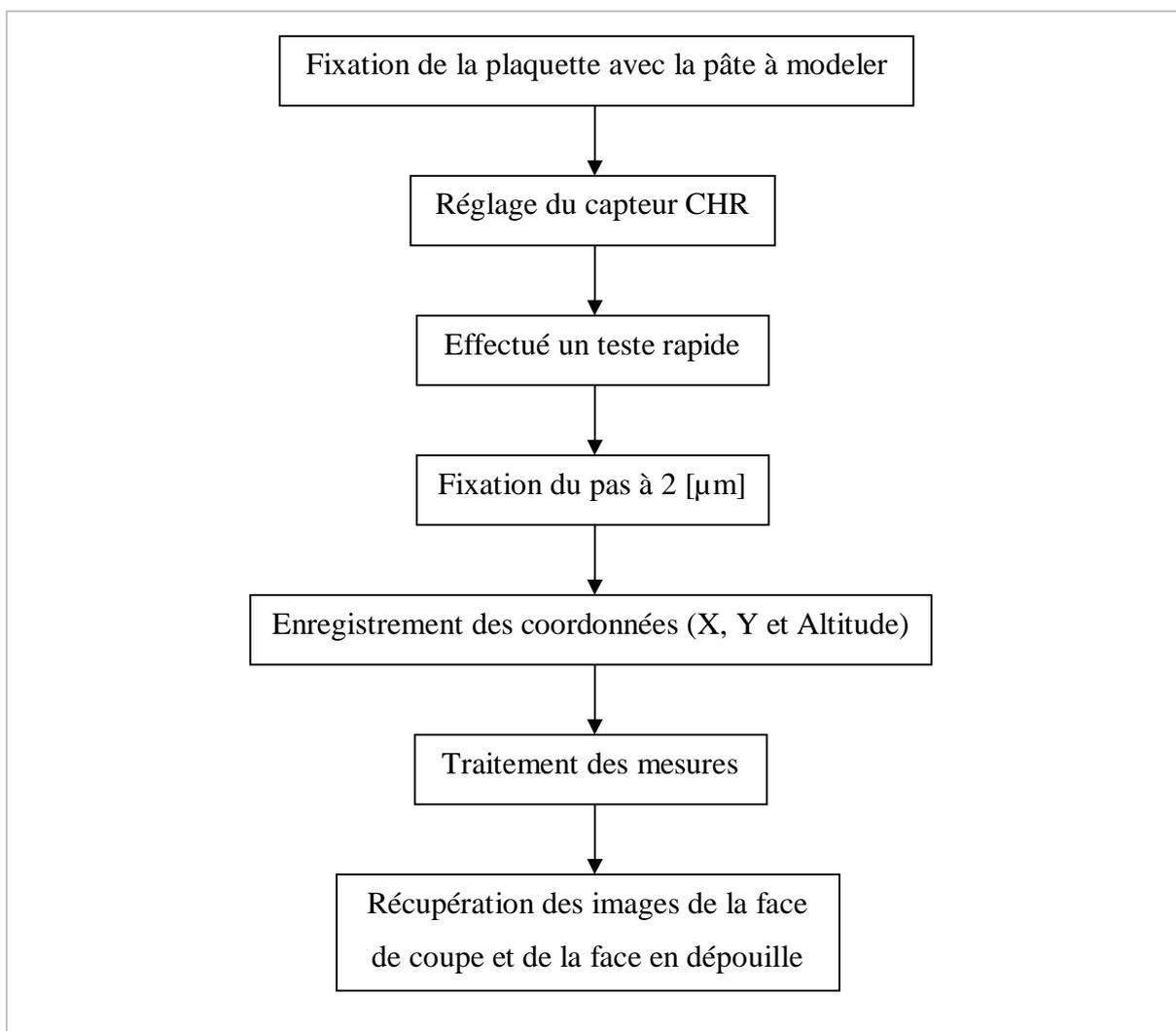


Figure III.11 : Organigramme de la réalisation de la 2<sup>ème</sup> phase de l'expérience.

Durant cette expérience, nous avons constaté une variation de la topologie de rayon de la plaquette, comme le montre le tableau III-4.

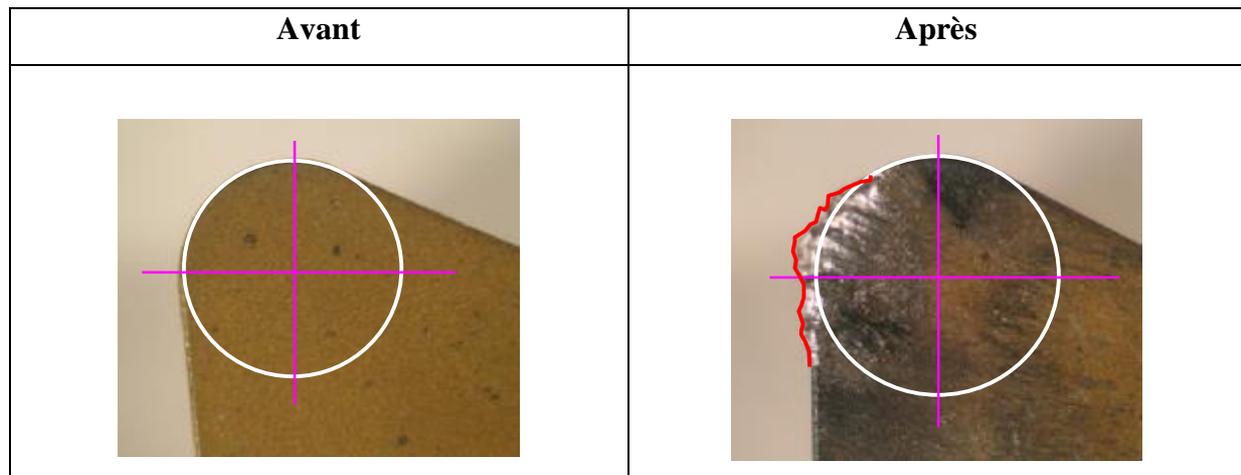


Tableau III-4 : Variation de la topologie du rayon de la plaquette.

Il est important de signaler que pour chaque passe du déplacement du capteur, nous obtenons 1001 points de mesure, le nombre de passe effectuée est 65 passes, ce qui signifie qu'on a plus de 65000 points qui représentent la vue globale de la face de coupe (figure III.12).

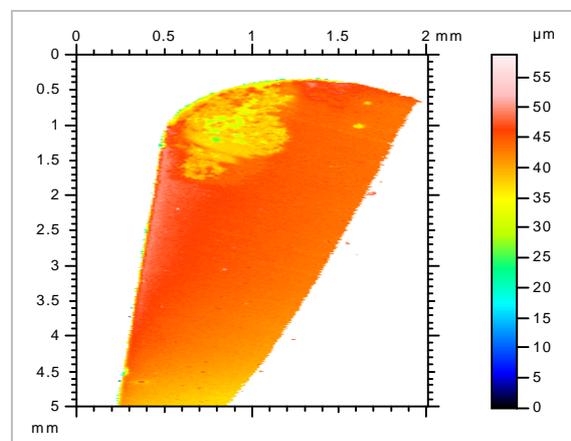


Figure III.12 : Vue de la face de coupe pris avec CHR.

Mais pour la suite des calculs, nous prendrons en considération que 64 points, qui représentent l'allure réelle de la variation du rayon de bec (figure III.13). Pour cela, nous avons procédé à la division de la topographie de l'arête en pas réguliers ayant comme variation :

$$\Delta x = 50 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$\Delta y = 100 \text{ } [\mu\text{m}].$$

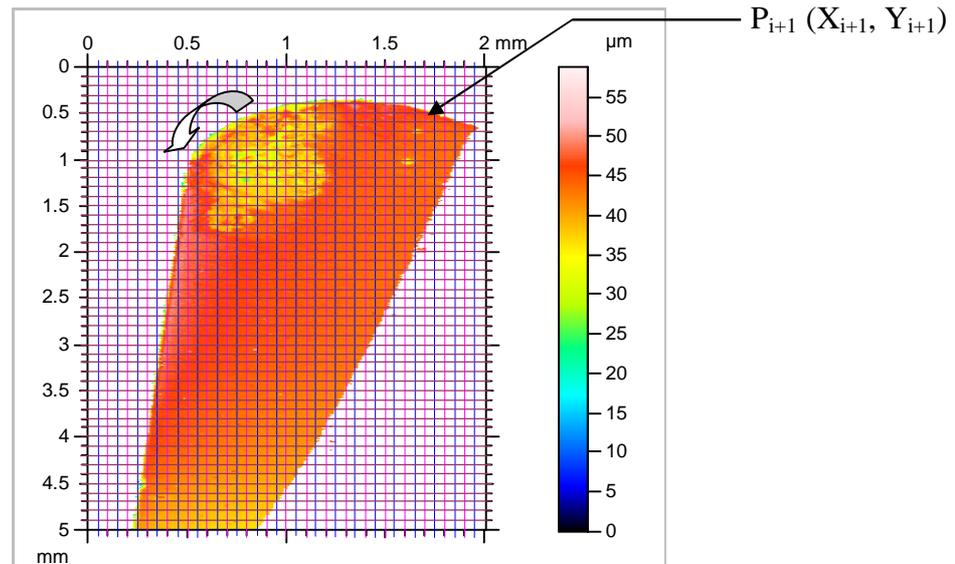


Figure III.13 : La procédure d'obtenir les 64 points constituant la variation du rayon de bec.

Les points obtenus sont donnés par le tableau III-5.

PT	X [mm]	Y [mm]	PT	X [mm]	Y [mm]	PT	X [mm]	Y [mm]
<b>1</b>	1.95	0,660	<b>23</b>	1.400	0.403	<b>45</b>	0.850	0.535
<b>2</b>	1.925	0.640	<b>24</b>	1.375	0.385	<b>46</b>	0.825	0.560
<b>3</b>	1.900	0.625	<b>25</b>	1.350	0.370	<b>47</b>	0.800	0.575
<b>4</b>	1.875	0.595	<b>26</b>	1.325	0.385	<b>48</b>	0.775	0.570
<b>5</b>	1.850	0.575	<b>27</b>	1.300	0.395	<b>49</b>	0.750	0.625
<b>6</b>	1.825	0.580	<b>28</b>	1.275	0.400	<b>50</b>	0.725	0.675
<b>7</b>	1.800	0.550	<b>29</b>	1.250	0.370	<b>51</b>	0.700	0.685
<b>8</b>	1.775	0.545	<b>30</b>	1.225	0.377	<b>52</b>	0.675	0.700
<b>9</b>	1.750	0.520	<b>31</b>	1.200	0.410	<b>53</b>	0.650	0.765
<b>10</b>	1.725	0.505	<b>32</b>	1.175	0.400	<b>54</b>	0.625	0.800
<b>11</b>	1.700	0.490	<b>33</b>	1.150	0.430	<b>55</b>	0.600	0.835
<b>12</b>	1.675	0.470	<b>34</b>	1.125	0.435	<b>56</b>	0.575	0.865
<b>13</b>	1.650	0.450	<b>35</b>	1.100	0.455	<b>57</b>	0.550	0.950
<b>14</b>	1.625	0.443	<b>36</b>	1.075	0.475	<b>58</b>	0.525	1.010
<b>15</b>	1.600	0.437	<b>37</b>	1.050	0.500	<b>59</b>	0.500	1.055
<b>16</b>	1.575	0.420	<b>38</b>	1.025	0.505	<b>60</b>	0.475	1.375
<b>17</b>	1.550	0.425	<b>39</b>	1.000	0.490	<b>61</b>	0.450	1.775
<b>18</b>	1.525	0.435	<b>40</b>	0.975	0.480	<b>62</b>	0.425	1.900
<b>19</b>	1.500	0.415	<b>41</b>	0.950	0.495	<b>63</b>	0.400	2.275
<b>20</b>	1.475	0.412	<b>42</b>	0.925	0.500	<b>64</b>	0.375	2.620
<b>21</b>	1.450	0.405	<b>43</b>	0.900	0.510			
<b>22</b>	1.425	0.400	<b>44</b>	0.875	0.520			

Tableau III-5 : Les valeurs des 64 points constituant la variation de rayon de bec.

#### III.4.2 Contrôle de l'usure de l'outil de coupe :

Notre paramètre d'arrête est l'usure de l'outil. Il est donc primordial de définir parfaitement ce dernier de façon à assurer la pertinence de l'ensemble de nos essais.

### III.4.2.1 Modes d'usure étudiés :

Selon la normalisation française NFE 66-505 [Afnor], issue des testes d'usinage industriel, l'usure d'un outil se détermine de la façon suivante (figure III.14).

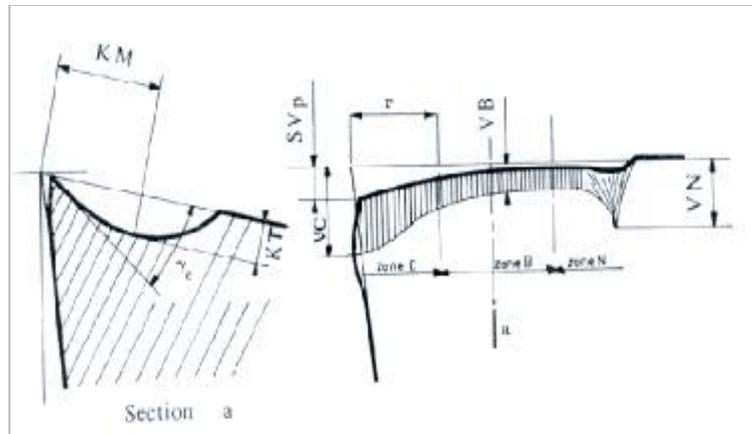


Figure III.14 : Forme d'usure des outils de coupe selon la norme NFE 66-505 [Afnor].

Avec :

- **KM** : Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil,
- **KT** : Profondeur d'un cratère,
- $g_c$  : Angle de cratérisation,
- **VB** : Hauteur de l'usure en dépouille,
- **VN** : Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale,
- **VC** : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée,
- **SV<sub>p</sub>** : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée.

L'usure en dépouille est prédominante. Comme elle modifie la rhéologie de contact outil pièce, et comme elle est relativement facile à contrôler par des moyens usuels, elle sera suivie en priorité.

Un autre critère d'usure à suivre tout particulièrement est le recul d'arête qui empêche le respect des côtes après usinage. Mais, les essais ont montrés qu'il y a une rupture de l'arête générée par une usure en cratère de la plaquette ou par un phénomène de déformation plastique.

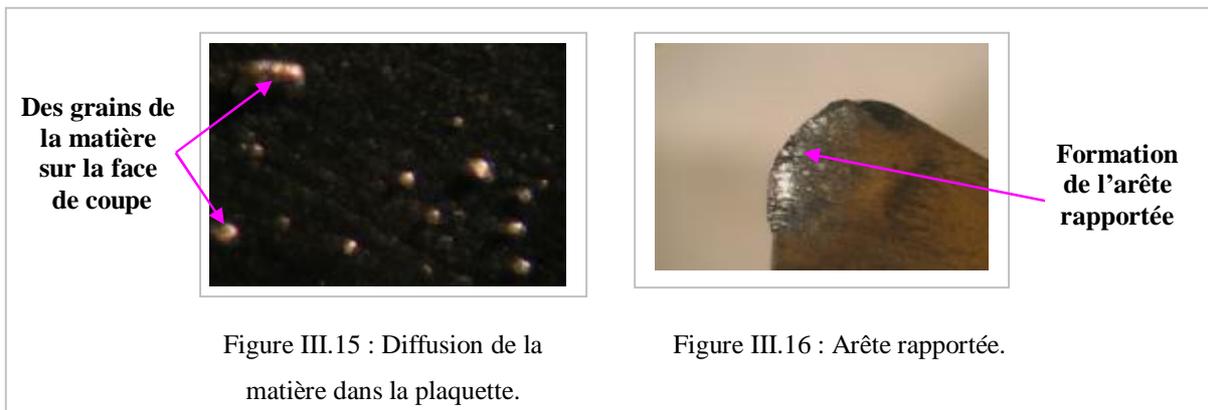
Outre les mécanismes d'usure précédents, on se doit d'identifier la présence éventuelle d'arête rapportée.

### III.4.2.2 Procédure de contrôle :

Le contrôle de l'usure des zones de coupe et plus particulièrement des arêtes de coupe est effectué après les passes d'essai. Il se rapporte aux mécanismes d'usure cités, ainsi qu'à la reconnaissance éventuelle d'arête rapportée. Il a été réalisé avec un microscope L 2000 A.

#### a. Arête rapportée :

Le mécanisme d'arête rapportée est d'une grande importance pratique, elle est due à une usure par adhésion, puisque la rupture se produit dans la masse du copeau et des fragments de ce dernier viennent adhérer sur l'outil (Figure III.15), ce qui constitue une arête rapportée, qui modifie les côtes de la pièce usinée ainsi que l'état de surface (Figure III.16).



On arrive à éliminer l'arête rapportée en augmentant la vitesse de coupe et en diminuant l'avance c'est à dire en réduisant le rendement de l'usinage, parfois l'emploi de lubrifiants appropriés permet d'éviter cette réduction.

#### b. L'usure en dépouille :

L'usure de la face en dépouille est la conséquence d'une usure par abrasion, qui se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce, ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe, (Figure III.17).

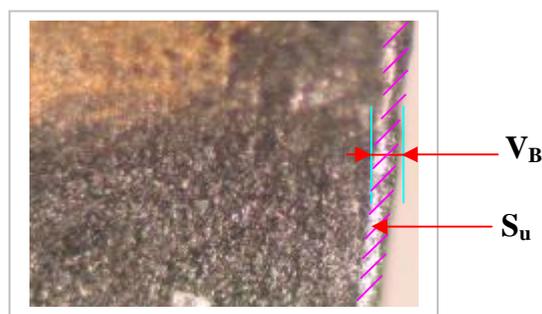


Figure III.17 : Usure en dépouille.

L'usure en dépouille est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil copeau est essentiellement du glissement. Selon la bibliographie, ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure, elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage.

**c. L'usure en cratère :**

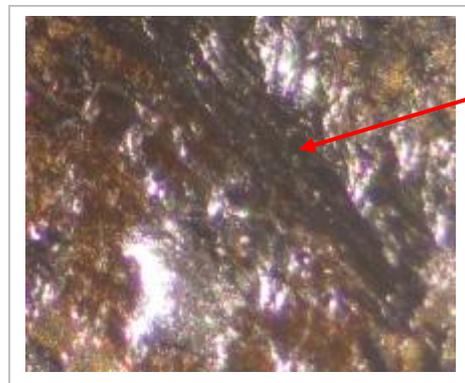
C'est une usure en creux sur la face de coupe due aux phénomènes de diffusion, sur l'effet de la température et de la pression, les atomes diffusent de l'outil vers le copeau ou vice-versa. Selon la bibliographie, l'usure par diffusion a été expérimentalement mise en évidence par l'existence de gradients de concentration des différents éléments de l'outil dans les copeaux et par l'observation de la formation rapide d'un cratère sur la face de coupe de l'outil (Figure III.18).



**Formation du cratère**

Figure III.18 : Usure en cratère.

Après un agrossissement de la figure III.15 X 400, pour bien observer l'usure en cratère, nous avons obtenue la figure suivante qui nous montre la profondeur de cratérisation  $K_T$ .



**Profondeur de cratérisation  $K_T$**

Figure III.19 : Microscopie d'usure en cratère.

**III.5 Conclusion :**

Après avoir fait une présentation détaillée du matériel utilisé lors de nos travaux, une approche expérimentale a été décomposée en une observation de la plaquette utilisée, l'étude de l'usure, l'étude de copeaux ainsi que la mesure de différents points constituant l'allure réelle de l'usure de la face de coupe.

### IV.1 Introduction :

Cette partie présente les résultats de l'expérimentation, ainsi qu'une analyse spécifique portera sur :

- L'étude de contact outil-pièce,
- La durée de vie et le volume de copeau usiné,
- L'évolution de la forme d'usure,
- L'évolution de la forme des copeaux.

### IV.2 Analyse de l'expérience :

#### IV.2.1 Validation des essais :

C'est le premier travail à effectuer avec les données mesurées. Elle implique le calcul de  $a_p$  réel, à partir des diamètres avant et après usinage et sa comparaison avec la valeur prévue. Si l'écart dépasse 5% du diamètre, l'essai est à refaire.

#### IV.2.2 La détermination des variables de sortie :

Ces variables permettront l'analyse des grandeurs intéressantes et leur interprétation dans le cadre fixé à ce travail. Elle s'effectue généralement par le calcul, à partir des données mesurées et concerne notamment :

##### a. Le volume usiné :

C'est le cumul du volume usiné  $V_u$ , entre deux points de mesure d'usure de la plaquette évalué par la formule :

$$V_u = L \cdot \frac{p}{4} \cdot \left[ (\Phi_{av})^2 - (\Phi_{ap})^2 \right] \text{ [mm}^3\text{]} \quad (\text{IV-1})$$

Avec :

- $L$  : longueur usinée,
- $\Phi_{av}$  : diamètre de l'éprouvette avant usinage,
- $\Phi_{ap}$  : diamètre de l'éprouvette après usinage.

#### IV.2.3 Analyse de l'expérience :

L'objectif de ces essais étant de réaliser un plan d'expérience, en passant d'un ensemble de données ponctuelles mesurées dans un processus de suivi l'usure et de courbe d'analyse représentant l'évolution de paramètres en fonction de critères.

En effet, de nombreux paramètres ont été mesurés ou calculés. L'ensemble de ces paramètres permet de faire une succession d'analyse.

Le plan est constitué :

∅ Des données d'entrées qui sont les variables explicatives (3 variables) :

- Vitesse de coupe  $V_c$ ,
- Profondeur de passe  $a_p$ ,
- Avance  $f$ .

∅ Des données de sorties qui sont les variables expliquées :

- Volume de copeau,
- Durée d'usinage,
- Usure.

∅ Un critère d'arrêt : la hauteur d'usure  $V_B$ .

La mesure de la durée de vie de l'outil est un élément difficile à évaluer en temps réel. Elle dépend du critère d'usure  $V_B$  qui varie au cours de l'expérience en même temps que cette durée que l'on veut mesurer. Une estimation par échantillonnage s'impose donc. Elle est réalisée autour de la valeur de 0.3 [mm] valeur utilisée industriellement en usinage d'ébauche.

Une étude qualitative est donc nécessaire pour la poursuite des développements, sur l'ensemble des paramètres, le choix de ceux qui semblaient être le plus significatif a été fait a priori :

- La courbe P - T,
- La courbe  $S_u - V_B$ ,
- La courbe  $V_u - V_B$ ,
- La courbe  $V_B - T$ ,

Les résultats de l'expérience concernant : Le poids de la plaquette, l'usure en dépouille  $V_B$ , le temps d'usinage et le volume de copeaux usiné sont donnée par le tableau suivant :

<b>Passe</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Poids de la plaquette [g]</b>	4.50	4.46	4.49	4.50	4.51	4.50
<b>L'usure en dépouille <math>V_B</math> [mm]</b>	0	0.030	0.050	0.065	0.100	0.190
<b>Temps d'usinage [min]</b>	0	4.04	8.08	12.12	16.16	20.20
<b>Volume de copeaux [mm<sup>3</sup>]</b>	0	22843.5	44274.0	64291.5	82896.0	100087.5
<b>Section usée de la face en dépouille [mm<sup>2</sup>]</b>	0	0.05	0.075	0.100	0.145	0.230

Tableau IV-1 : Les résultats obtenus durant l'expérience.

Pendant l'essai, nous avons remarqué que les valeurs de  $V_B$  varient de 0 à 190 [ $mm$ ] (voir la figure IV.9), tandis que les valeurs de  $K_T$  varient de 0 à 15 [ $mm$ ] (voir la figure IV.12), donc le critère d'usure  $V_B$  permet de mieux voir et suivre cette évolution d'usure. C'est pour cette raison que pour la suite de l'essai, nous prendrons comme critère d'usure : l'usure en dépouille  $V_B$  seulement.

**a. La courbe P – T :**

La figure IV.1 représente l'évolution du poids de la plaquette par rapport au temps d'usinage :

Après la 1<sup>ière</sup> passe, le poids de la plaquette diminue ; c'est la conséquence de l'élimination des couches superficielles constituant le revêtement durant le premier contact avec la pièce. Pendant les trois autres passes, le poids de la plaquette augmente puisqu'il y a diffusion de la matière enlevée (copeaux) vers la plaquette, ainsi que des micro soudures qui se forment sur la face de coupe constituant l'arête rapportée. A la 5<sup>ème</sup> passe, le poids a diminué ; c'est la conséquence de l'évacuation de l'arête rapportée.

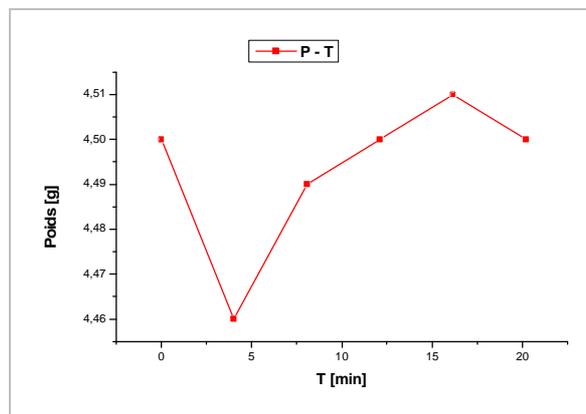


Figure IV.1 : Evolution du poids de la plaquette par rapport au temps d'usinage.

**b. La courbe  $S_u$  -  $V_B$  :**

La figure IV.3 représente l'évolution de section usée de la face en dépouille par rapport à la hauteur d'usure  $V_B$  : Le contact, sous forte pression, de l'outil sur la pièce crée une usure de l'outil sur la face en dépouille qui peut se caractériser, par  $V_B$  et  $S_u$  d'où :

- $V_B$  représente la hauteur d'usure de la face en dépouille. Cette hauteur est unidimensionnelle et n'est pas représentative du contact outil-pièce.
- $S_u$  représente la section de l'usure causée sur toute la surface de contact outil-pièce.

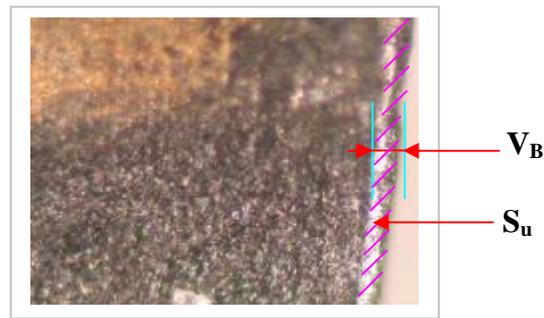


Figure IV.2 : Usure en dépouille.

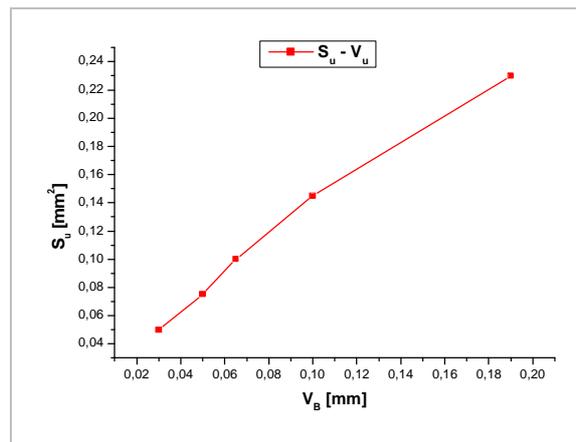


Figure IV.3 : Evolution de section usée par rapport à la hauteur d'usure de la face en dépouille.

### c. La courbe $V_u - V_B$ :

La figure IV.4 représente l'évolution du volume de copeaux enlevé par rapport à la hauteur d'usure  $V_B$  :

Pendant l'usinage, une certaine quantité de matière est enlevée de la pièce (sous forme de copeaux) et cela provoque une usure de l'outil. Cette usure n'est pas proportionnelle à la quantité de matière enlevée.

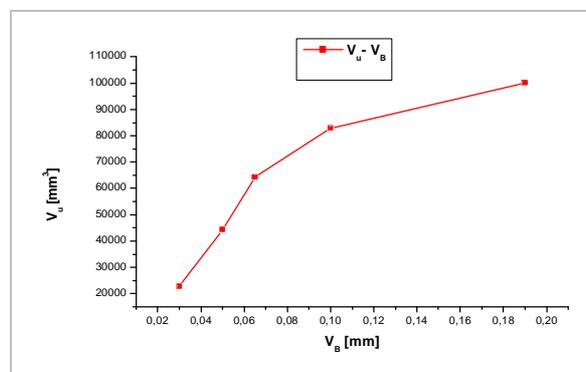


Figure IV.4 : Evolution du volume de copeaux par rapport à la hauteur d'usure.

**d. Analyse  $V_B - T$  :**

La figure IV.5 représente l'évolution de la hauteur d'usure  $V_B$  par rapport au temps d'usinage :

On obtient une faible détérioration au début de l'usure pour atteindre un palier plus ou moins long pendant lequel, la rugosité n'évolue pas avant la mort de l'arête.

L'usure n'est pas proportionnelle à la durée d'usinage, car plusieurs stades d'usure se succèdent : On observe une 1<sup>ère</sup> zone de rodage de l'arête avec uniquement l'usure en dépouille qui évolue rapidement. Par la suite, l'usure est maîtrisée et c'est l'usure en cratère qui est observée sur la face de coupe de l'outil. Ensuite, l'outil se trouve dans une usure catastrophique ou l'usure mesurée par  $V_B$  n'est plus maîtrisable. Si l'usinage est prolongé, on arrive à l'arrachement de l'arête de coupe.

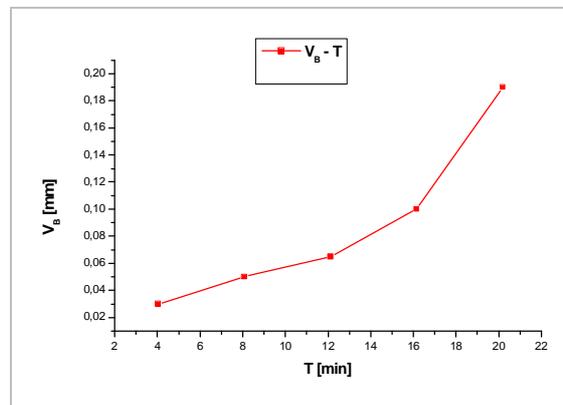


Figure IV.5: Evolution de la hauteur d'usure par rapport au temps d'usinage.

**IV.3 Etude du contact outil-pièce :**

La quasi-totalité des essais a été réalisée dans le cadre du plan d'expérience. L'étude du contact outil-pièce a donc été faite à travers les plans d'expérience en suivant l'évolution des variables de sortie fortement dépendantes de ce contact. Usure en dépouille et usure en cratère.

**IV.3.1 Usure en dépouille :**

La variable de sortie décrivant l'usure en dépouille de l'outil est :  $V_B$  qui représente la hauteur maximum de l'usure en dépouille et qui sera un critère d'arrêt.

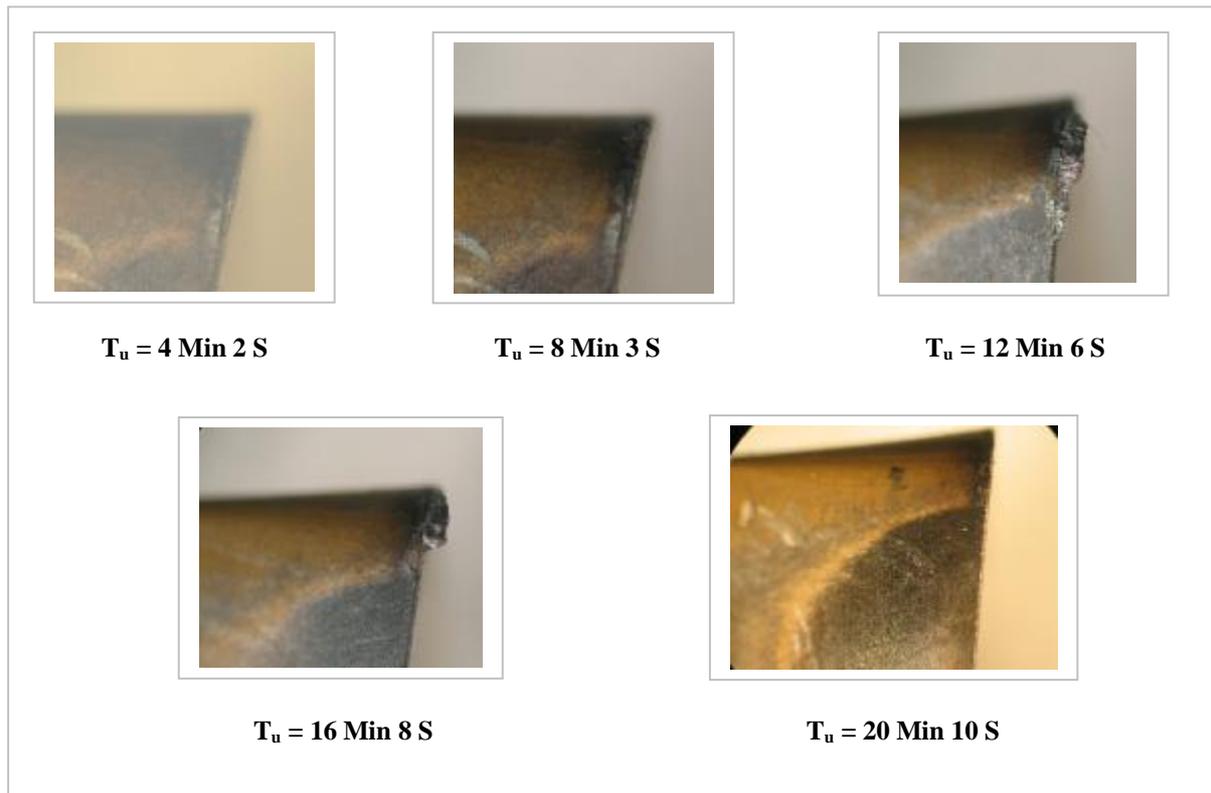


Figure IV.6 : Evolution de l'usure en dépouille.

Si nous analysons les faciès d'usure sur la face en dépouille, nous constatons deux mécanismes d'usures différentes :

**a. Arête rapportée :**

Les surfaces de l'outil et du copeau ont une micro géométrie qui comporte des aspérités. Compte tenu des effets de coupe imposés, des jonctions métalliques, véritables microsoudures se forme. Celles-ci sont rompues en continu puisqu'il y a mouvement relatif du copeau et de l'outil. Ces jonctions sont plus résistantes que le métal voisin du copeau, donc les ruptures se produisent dans la masse du copeau et des fragments du copeau viennent adhérer sur l'outil, ce qui constitue une arête rapportée.

**b. Usure par abrasion :**

Elle est caractérisée par la formation de bandes striées dans la direction du copeau le long de la face de coupe. Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. Cette usure est dominante quand le contact à l'interface outil copeau est essentiellement du glissement (le cas de notre étude).

### IV.3.2 Usure en cratère :

La variable de sortie mesurée décrivant l'usure en cratère de l'outil est :  $K_T$  qui représente la profondeur maximum de l'usure en cratère sur la face de coupe.

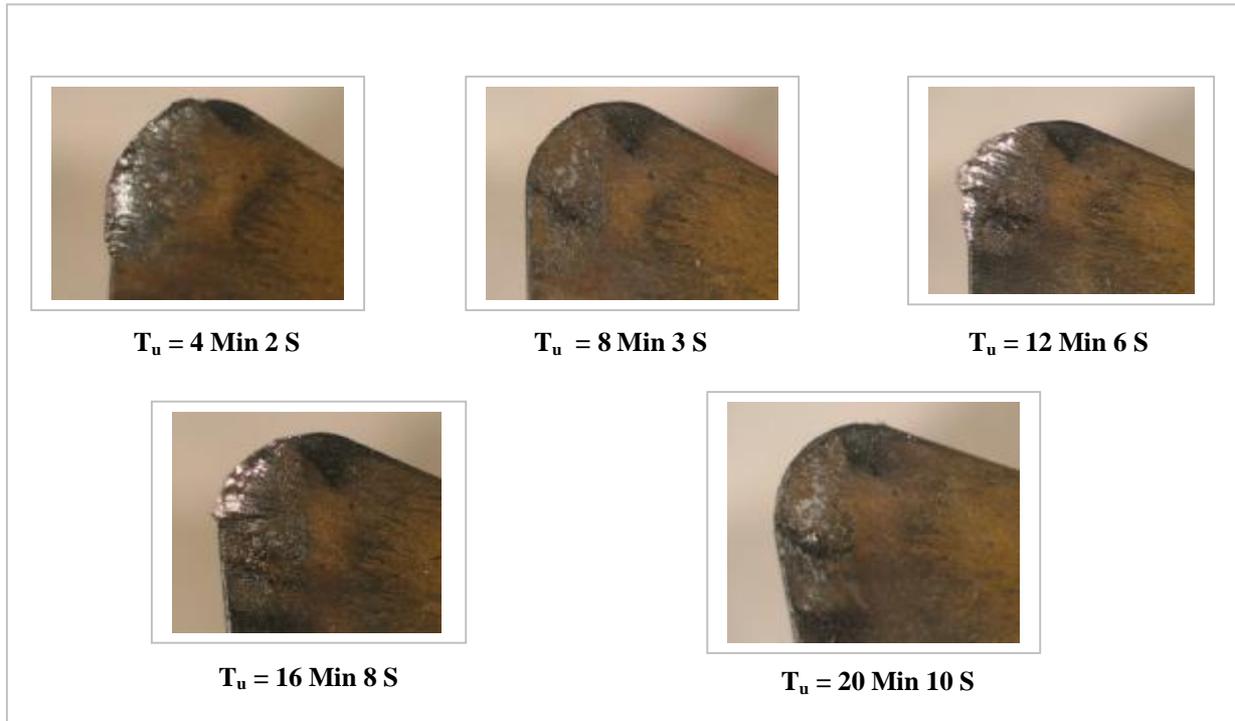


Figure IV.8 : Evolution de l'usure en cratère.

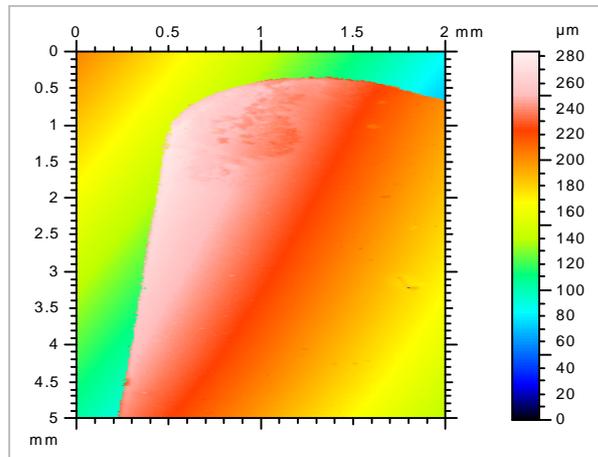
Si nous analysons les faciès d'usure sur la face de coupe, nous constatons que pendant le début d'essai, l'usure dominante est l'arrête rapportée tandis que l'usure en cratère est presque nulle. C'est seulement qu'au début de la 2<sup>ème</sup> passe qu'apparaît cette usure qui est due à la diffusion de la matière enlevée (copeaux) vers la face de coupe de l'outil, cette usure est caractérisée par la profondeur de cratérisation  $K_T$  qui vaut 15 [ $\mu\text{m}$ ] après 20Min10S d'usinage (Figure IV.7).

### IV.3.3 Forme de l'arête de coupe après usinage :

Pour mieux voir la forme de l'arête de coupe après usinage, nous avons fait l'analyse de nuage de points pris sur une machine à mesure tridimensionnelle à capteur à haute résolution (CHR). Ces différents points donneront la forme réelle de l'usure.

**a. L'usure en dépouille :**

La figure IV.9 représente la forme réelle en 2 D de l'usure en dépouille de la plaquette. Cette figure est la combinaison de 65250 points obtenus par une analyse par CHR.



FigureIV.9 : Vue en 2D de la plaquette.

Si nous prendrons en considération les altitudes mesurées de chaque point, on obtient la figure IV.10 qui représente la vue réelle en 3 D de l'usure en dépouille.

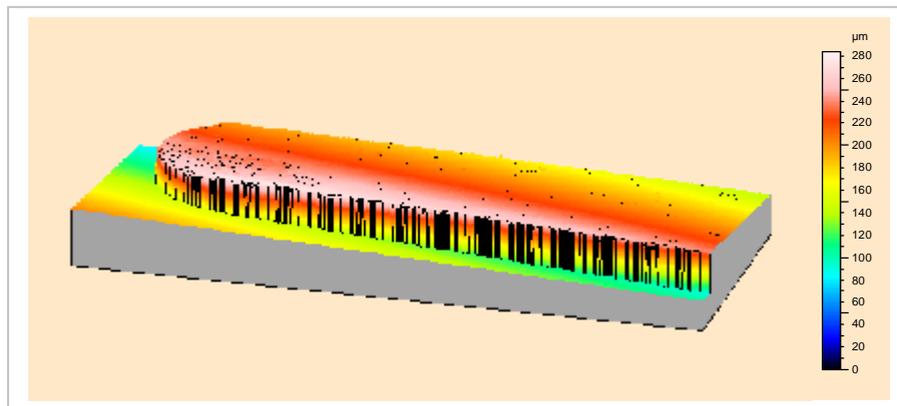


Figure IV.10 : Vue en 3D de la plaquette après 20 Min 10 S d'usinage.

Cette figure nous permet de mesurer la hauteur d'usure de la face en dépouille  $V_B$  qui vaut 190 [ $\mu\text{m}$ ] après 20Min 10S d'usinage, ce qui valide les résultats obtenus durant la 1<sup>ière</sup> phase de l'expérience.

Notre but est de définir l'équation d'usure d'une courbe uniforme passant par les 64 points de contrôle qui représente l'allure réelle de la variation du rayon de bec (figure IV.11).

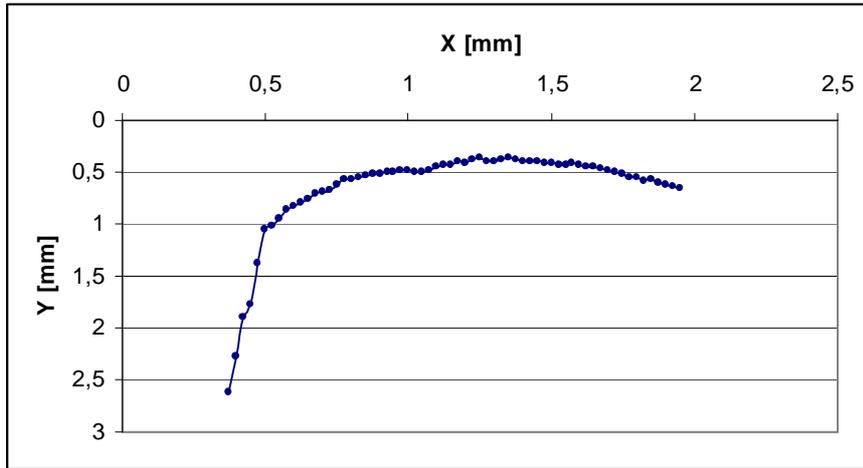


Figure IV.11 : Allure de la variation du rayon de bec.

Pour définir l'équation de cette usure, nous avons utilisé la méthode des B Spline exprimée par la relation suivante :

$$P_i(t) = (t^3 \ t^2 \ t \ 1) \cdot M_{B\ Spline} \cdot (M_{i-1} \ M_i \ M_{i+1} \ M_{i+2})^t \tag{IV-2}$$

Avec :

- $M_i$  : les coordonnées des points de contrôle,
- $M_{B\ Spline}$  : La matrice des B Spline donnée par :

$$M_{B\ Spline} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{IV-3}$$

Nous avons trouvez 16 équations, chacune d'eux est l'interpolation de 4 points avec la méthode des B Spline. Les résultats obtenus sont :

$$\begin{aligned} P_1(x) &= -0.0133x^3 + 0.01x^2 - 0.04x + 0.4402 \\ P_2(x) &= 0.04x^3 - 0.03x^2 + 0.01x + 0.3835 \end{aligned} \tag{IV-4}$$

D'où la dernière équation est :

$$P_{16}(x) = -0.1868x^3 + 0.5003x^2 + 0.2501x + 1.1839$$

La forme suivante est représentative de l'allure réelle de la variation du rayon de bec après interpolation avec la méthode des B Spline (Figure IV.11).

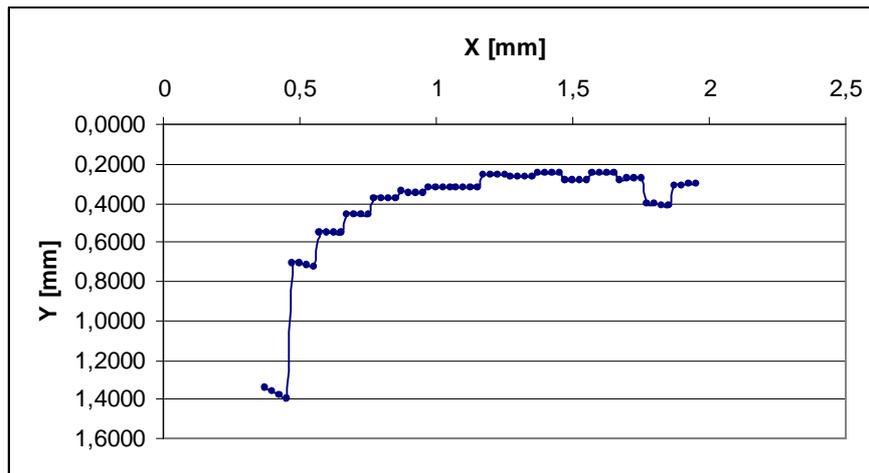


Figure IV.12 : Allure de la variation du rayon de bec après interpolation avec la méthode des B Spline.

### b. L'usure en cratère :

La figure IV.13 représente la forme réelle en 2D de l'usure de la face de coupe, la zone jaune indique l'usure en cratère. Cette figure est prise à l'aide d'une machine à mesure tridimensionnelle à capteur à haute résolution (CHR).

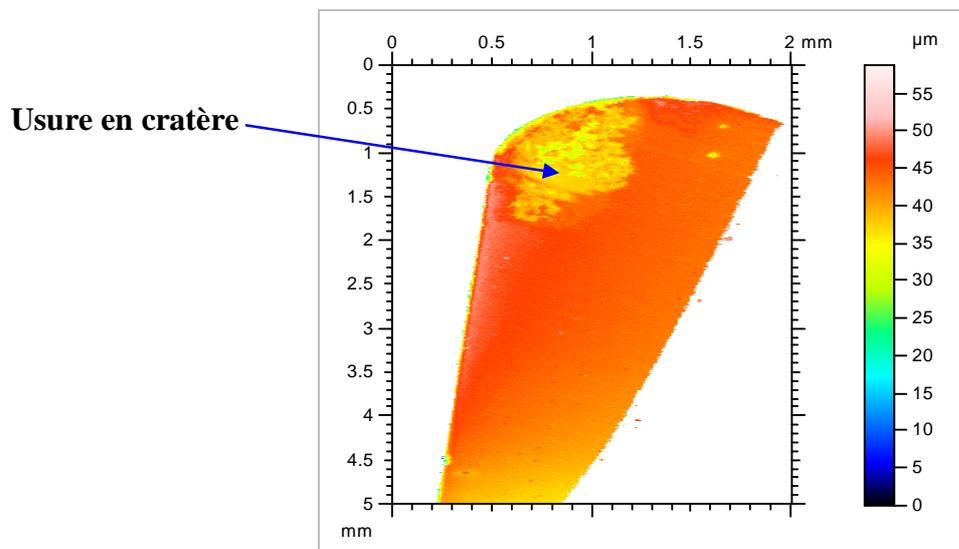


Figure IV.13 : Vue en 2D de l'usure de la face de coupe.

Si nous prenons en considération les altitudes mesurées de chaque point, on obtient la figure IV.14 qui représente les profondeurs réelles dues à l'usure en cratère.

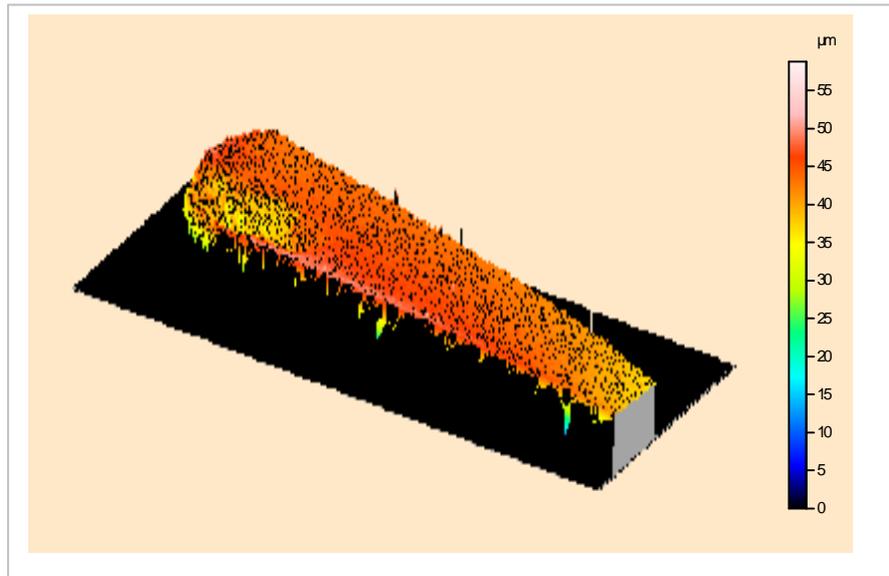


Figure IV.14 : Vue en 3D de l'usure de la face de coupe.

De cette figure on peut calculer la profondeur de cratérisation  $K_T$  qui est la différence entre la zone verte et la zone orange. Ce qui nous donne une valeur de  $K_T$  égale à 15 [ $\mu\text{m}$ ].

#### IV.5 Evolution des copeaux :

Le copeau est la conséquence de la rupture de la matière sous la pression de l'outil.

Pendant un usinage le copeau évolue. Il est la conséquence de l'évolution de la contrainte provoquée par l'outil sur la matière.

La forme traditionnelle du copeau, constatée en usinage, est une hélice de pas et de diamètre relativement constants. Cette forme en hélice est la conséquence des conditions d'usinage (contrainte résiduelle, plastification, température) qui contraignent le copeau, car le processus normal de formation de ce dernier devrait en faire un copeau filant. Il n'y a aucune raison que la rupture des liaisons crée un copeau de forme hélicoïdale. La forme dépend du phénomène de plastification secondaire à la formation du copeau.

Les copeaux de l'essai ont été systématiquement récupérés et analysés.

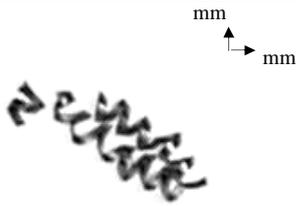
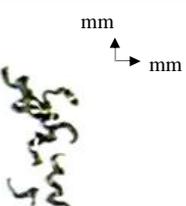
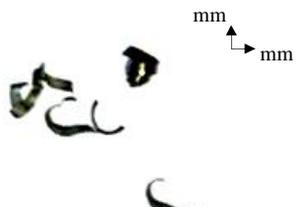
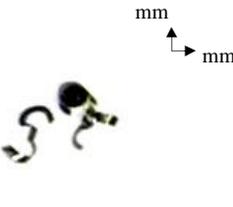
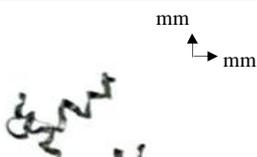
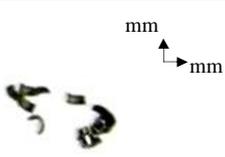
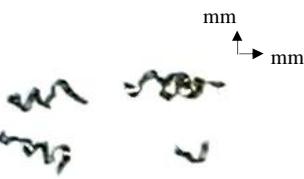
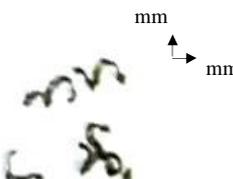
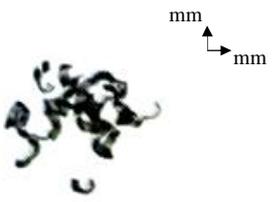
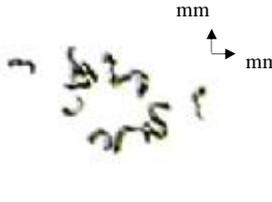
Passe	Début	Milieu
1		
2		
3		
4		
5		

Tableau IV.2 : Evolution de la forme des copeaux en fonction de l'usure de l'outil.

Plusieurs formes de copeaux ont été observées pendant l'essai pour en savoir plus voir Annexe N° 3 :

- Copeaux hélicoïdaux en rondelles court (la 1<sup>ère</sup> et la 3<sup>ème</sup> passe),
- Copeaux hélicoïdaux coniques court (2<sup>ème</sup> passe),
- Copeaux en arc attaché (4<sup>ème</sup> passe) et détaché (5<sup>ème</sup> passe).

Nous pouvons ainsi résumer nos observation : le pas et l'amplitude apparente de l'hélice du copeau, à tendance au cours de l'usinage à diminuer.

## **Conclusion générale :**

Le travail présenté ici visait à comprendre le rôle des revêtements de carbures métalliques des outils de coupe, dans l'opération de chariotage d'une ébauche, en tournage à sec et à analyser leur usure et leurs modes de détérioration. Il est fondé sur l'application d'un plan d'expérience et inclut le contrôle de l'usure de la face de coupe.

Dans les zones de forte pression sur l'arête de coupe, la détérioration est manifeste dès la première passe. Les revêtements qui ont une épaisseur de dépôt très faible, de l'ordre de quelques microns, sont donc éliminés de l'arête initiale de l'outil dès les premières secondes d'usinage. Malgré cette altération des conditions de travail qui tendrait à uniformiser les comportements des revêtements et à le rapprocher de celui de l'outil non revêtu, ceux-ci gardent leurs caractéristiques et leurs apports distinctifs dans l'usinage. Mais, nous avons toujours observé l'émergence des revêtements sur la face de dépouille, aux limites des zones d'usure. On doit en déduire que cette présence suffit à modifier les conditions de coupe.

La formation de cratère, sur la face de coupe de l'outil, en arrière de l'arête de coupe, n'a pu être vraiment observée à la première passe de l'essai, mais dès la deuxième passe cette usure se manifeste, la détérioration effective des arêtes de coupe et la durée de vie sont atteintes, avant que se manifeste la cratérisation par frottement du copeau sur l'outil. Par contre, nous avons identifié plusieurs modes de détérioration des revêtements de carbures métalliques : abrasion, diffusion, échauffement superficiel, déformation plastique, fissuration, etc., ainsi que la formation d'une arête rapportée.

Nous avons utilisé un dispositif expérimental, en particulier, un capteur de mesure à haute résolution (CHR), qui nous permet de mieux voir l'allure réelle d'usure de la face de coupe. Pour interpoler ce résultat, nous avons proposé un modèle mathématique qui nous permet de déduire cette allure ont utilisons la méthode des B Spline.

Au cours d'un usinage, le copeau évolue, conséquence de l'évolution de la contrainte de l'outil sur la matière qui elle-même dépend de la dégradation de la zone de coupe. La forme traditionnelle en hélice, observée fréquemment dans ce travail, est la marque des contraintes exercées par l'usinage :

- Contrainte résiduelle de rupture des liaisons,
- Contraintes de plastification secondaire générée par le changement de direction imposé par l'outil.
- Contrainte thermique.

Le copeau est la conséquence de l'usinage. Mais si l'on fait le raisonnement inverse, le comportement du copeau est une source d'information sur les conditions de coupe. Progresser dans sa connaissance est peut être la meilleure voie pour maîtriser la coupe. C'est un défi à relever dans l'avenir.

# *Nomenclature*

$a_f$  : engagement de l'arête,

$a_p$  : Profondeur de passe [mm].

$C_p$  : La chaleur spécifique du matériau [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$D$  : Le diamètre de l'éprouvette [mm].

$E_{ff}$  : Le module des efforts de coupe [N].

$f$  : avance [mm/tr]

$f_{bat}$  : Avance par battement [mm/bat].

$F_c$  : L'effort de coupe [N].

$f_{min}$  : Avance par minute [mm/min].

$F_N$  : L'effort normal [N].

$F_{ns}$  : L'effort normal au plan de cisaillement [N].

$F_S$  : L'effort de cisaillement [N].

$F_T$  : L'effort tangentiel [N].

$f_Z$  : Avance par dent [mm/dent].

$K_T$  : La profondeur de cratérisation [ $mm$ ].

$K_{re}$  : L'angle de direction d'arête en travail [ $^{\circ}$ ].

$K_r$  : L'angle de direction de l'arête secondaire de l'outil [ $^{\circ}$ ].

$L$  : longueur de passe [mm].

$L_C$  : La longueur de contact de la partie rectiligne de l'arête [mm].

$L_{CT}$  : La longueur de contact totale [mm].

$Ma$  : Le mouvement d'avance.

$Mc$  : Le mouvement de coupe.

$Mp$  : Le mouvement de pénétration.

$N$  : la vitesse de rotation [tr/min].

$P_b$  : Le plan orthogonal à la face de dépouille.

$P_f$  : Le plan de travail conventionnel.

$P_{fe}$  : Le plan de travail.

$P_g$  : Le plan orthogonal à la face de coupe.

$P_p$  : Le plan vers l'arrière de l'outil.

$P_{pe}$  : Le plan vers l'arrière en travail.

$P_{re}$  : Le plan de référence en travail.

$P_s$  : Le plan d'arête de l'outil.

$P_{se}$  : Le plan d'arête en travail.

$R$  : Le rayon d'acuité [mm].

$R_a$  : La rugosité arithmétique moyenne [mm].

$R_t$  : La rugosité théorique totale [mm].

$r\epsilon$  : Le rayon de bec [mm].

$S_u$  : L'usure causée sur toute la surface de contact outil-pièce [mm<sup>2</sup>].

TD: Tournage dur.

$T_f$  : Temps fréquentiel [C min].

$t_f$  : La température de fusion [°C].

$t_{int}$  : La température moyenne à l'interface outil copeau [°C].

$T_m$  : Temps manuels [C min].

$T_s$  : Temps série [C min].

$T_t$  : Temps technologique [C min].

$T_{tm}$  : Temps technico-manuels [C min].

$T_z$  : Temps masqué [C min].

UGV : Usinage à grande vitesse de coupe.

$V_B$  : L'usure en dépouille [mm].

$V_c$  : La vitesse de coupe [m/min].

$V_{cop}$  : La vitesse du copeau [mm/min].

$V_f$  : La vitesse d'avance [mm/min].

$V_u$  : Le volume usiné entre deux points de mesure [mm<sup>3</sup>].

$W$  : La vitesse angulaire [rad/s].

$\alpha$  : Angle de dépouille [°].

$a_c$  : L'angle de cratérisation.

$\beta$  : Angle de taillant [°].

$\gamma$  : Angle de coupe [°].

$\Gamma$  : L'angle de contact [°].

$\phi$  : L'angle de cisaillement du copeau [°].

$\emptyset$  : Angle de direction d'avance.

$\Phi_{ap}$  : Le diamètre de l'éprouvette après usinage [mm].

$\Phi_{av}$  : Le diamètre de l'éprouvette avant usinage [mm].

$I_s$  : L'angle d'inclinaison de l'arête de l'outil [°].

$I_{se}$  : L'angle d'inclinaison d'arête en travail [°].

$\mu$  : Le coefficient de frottement.

$\rho$  : La masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>]

$\Psi$  : L'angle complémentaire de contact sur la face de dépouille secondaire [°].

$\Xi$  : L'angle d'éjection du copeau [°].

$e_r$  : L'angle de pointe de l'outil [°].

$v_e$  : Le mouvement résultant de coupe.

$\sigma_n$  : La contrainte normale à l'interface outil-copeau.

$\tau$  : La contrainte de cisaillement.

$\frac{\partial t}{\partial T}$  : L'adoucissement avec la température.

$\frac{\partial t}{\partial g}$  : L'écrouissage du matériau.

$\frac{\partial t}{\partial \dot{g}}$  : La sensibilité à la vitesse de déformation.

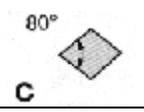
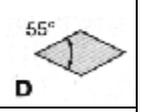
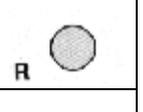
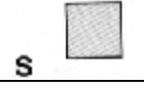
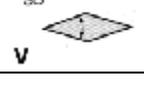
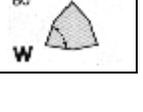
# Annexe N° 1

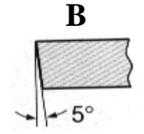
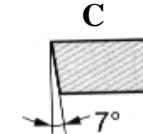
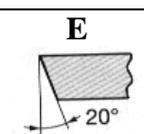
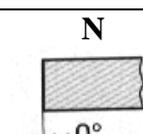
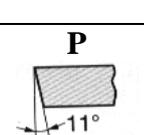
Désignation normalisée des outils plaquettes d'après Sandvik.

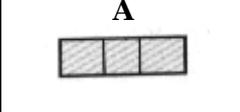
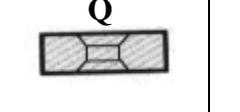
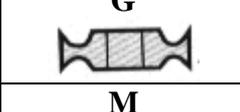
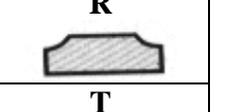
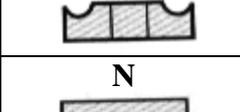
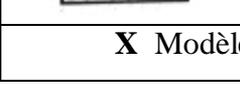
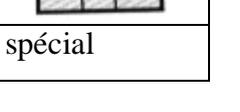
<b>T</b>	<b>P</b>	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>16</b>	<b>03</b>	<b>08</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>

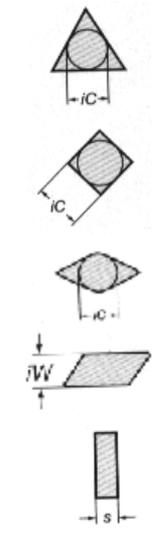
<b>F</b>	<b>N</b>	<b>PR</b>
<b>8</b>	<b>9</b>	<b>12</b>

<b>8</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
----------	-----------	-----------

1. Formes de plaquettes	
 <b>C</b>	 <b>D</b>
 <b>K</b>	 <b>R</b>
 <b>S</b>	 <b>T</b>
 <b>V</b>	 <b>W</b>

2. Angle de dépouille de la plaquette	
 <b>B</b>	 <b>C</b>
 <b>E</b>	 <b>N</b>
 <b>P</b>	<b>O</b> Description spécifique

4. Types de plaquettes	
 <b>A</b>	 <b>Q</b>
 <b>G</b>	 <b>R</b>
 <b>M</b>	 <b>T</b>
 <b>N</b>	 <b>W</b>
<b>X</b> Modèle spécial	

3. Tolérance sur S et iC / iW		
Classe S	iC / iW	
<b>G</b>	± 0,025	
<b>M</b> ± 0,13	± 0,05 – ± 0,15 <sup>1)</sup>	
<b>U</b>	± 0,08 – ± 0,25 <sup>1)</sup>	
1) Varie selon la valeur de iC. Voir tableau ci-dessous.		
Cercle inscrit iC mm	Classe de tolérance	
	M	U
3.97 -5.0-6.0-6.35-8.0-9.525- 10.0	± 0,05	± 0,08
12.0 - 12.7	± 0,08	± 0,13
15.875-16.0-19.05- 20.0	± 0,10	± 0,18
25.0- 25.4	± 0,13	± 0,25
31.75-32.0	± 0,15	± 0,25
		
Pour les plaquettes positives, iC est valable pour une pointe vive. Voir état d'arête de coupe F (symbole 8).		

5. Taille de plaquette = longueur d'arête, L[mm]									
Ic mm	iC pouces	C	D	R	S	T	V	W	K
3.97	5,32					06			
5.0				05					
5.56	7/32					09			
6.0				06					
6.35	1/4	06	07			11	11		
8.0				08					
9.525	3/8	09	11	09	09	16	16	06	16*)
10.0				10					
12.0				12					
12.7	1/2	12	15	12	12	22	22	08	
15.875	5/8	16		15	15	27			
16.0				16					
19.05	3/4	19		19	19	33			
20.0				20					
25.0	1	25		25					
25.4				25	25				
31.75				31					
32				32					

\*) Pour les plaquettes de forme K(KNMX, KNUX), seule la longueur utile de l'arête de coupe est indiquée.

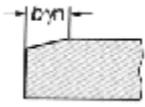
6. Epaisseur de plaquette S mm	
	<b>01</b> S = 1.59
	<b>T1</b> S = 1.98
	<b>02</b> S = 2.38
	<b>03</b> S = 3.18
	<b>T3</b> S = 3.97
	<b>04</b> S = 4.76
	<b>05</b> S = 5.56
	<b>06</b> S = 6.35
	<b>07</b> S = 7.94
	<b>09</b> S = 9.52
	<b>10</b> S = 10.00
	<b>12</b> S = 12.00

8. Etat de l'arête de coupe	
<b>F</b>	Arête de coupe vive
<b>E</b>	Arête traitée ER
<b>T</b>	Chanfrein négatif
<b>K</b>	Double chanfrein négatif
<b>S</b>	Arête chanfreinée et traitée ER

7. rayon de bec, $r_e$ mm	
	<b>00</b> $r_e$ = Plaquette ronde.
	<b>04</b> $r_e$ = 04
	<b>08</b> $r_e$ = 08
	<b>12</b> $r_e$ = 1.2
	<b>16</b> $r_e$ = 1.6
	<b>24</b> $r_e$ = 2.4

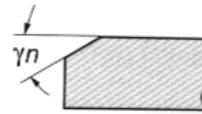
9. Sens de coupe	
<b>R</b>	Avance
<b>L</b>	Avance
<b>N</b>	Avance

### 10. Largeur du chanfrein, mm



<b>010</b>	$b_{\gamma n} = 0,10$
<b>025</b>	$b_{\gamma n} = 0,25$
<b>070</b>	$b_{\gamma n} = 0,70$
<b>150</b>	$b_{\gamma n} = 1,50$
<b>200</b>	$b_{\gamma n} = 2,00$

### 11. Angle du chanfrein



<b>15</b>	$\gamma n = 15^\circ$
<b>20</b>	$\gamma n = 20^\circ$

### 12. Symbole facultatif propre au fabricant

Le code ISO comprend neuf symboles. Le 8<sup>ème</sup> et le 9<sup>ème</sup> symboles ne sont utilisées que si nécessaire. Le fabricant peut en outre ajouter deux symboles supplémentaires, par exemple :

PF = ISO P finition,

PR = ISO P ébauche.

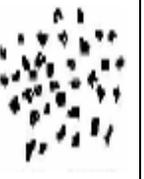
## Annexe N° 2

**Tableau de conditions de coupe en tournage générale selon [Sand\_00]**

ISO	CMC N°	Matière	Force de coupe spécifique <b>Kc 0.4</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	Dureté Brinell	← Résistance à l'usure		Ténacité →
					CT525	GC4025	<b>GC235</b>
					Avance f [mm/tr]		
					0.05-0.1-0.2	0.1-0.4-0.8	<b>0.1-0.4-0.6</b>
					Vitesse de coupe Vc [m/min]		
<b>P</b>	01.1	Acier non allié	2000	152	605-500-410	475-325-225	185-135-110
	01.2		2100	150	535-450-360	430-290-205	165-120-100
	01.3		2180	170	465-395-320	410-275-195	155-115-95
	02.1	<b>Acier faiblement allié</b>	2100	180	420-355-280	450-300-210	155-110-85
	02.2		2775	275	215-180-145	290-205-155	110-70-55
	<b>02.3</b>		<b>2775</b>	<b>350</b>	175-145-115	240-170-130	<b>85-55-45</b>
	03.11	Acier fortement allié	2500	200	280-235-190	285-195-145	145-100-80
	03.21		3750	325	165-130-105	130-90-70	65-45-35
	06.1	Acier coulé	1800	180	250-205-160	230-170-125	100-80-65
	06.2		2100	200	190-155-115	200-135-95	95-65-55
	06.3		2500	225	150-120-95	175-120-85	80-60-45
	06.33		3600	250	- -	- -	- -

# Annexe N° 3

Tableau de référence copeaux d'après la norme NFE 66-505

Tableau G.1 - Formes de copeaux							
1 Copeau ruban <sup>1</sup>	2 Copeau tubulaire <sup>1</sup>	3 Copeau en spirale	4 Copeau hélicoïdal en rondelle <sup>1</sup>	5 Copeau hélicoïdal conique	6 Copeau en arc <sup>2</sup>	7 Copeau élémentai re	8 Copea aiguil
1.1 Long 	2.1 Long 	3.1 Plat 	4.1 Long 	5.1 long 	6.1 Attaché 		
1.2 Court 	2.2 Court 	3.2 Conique 	4.2 Court 	5.2 Court 	6.2 Détaché 		
1.3 Enchevêtré 	2.3 Enchevêtré 		4.3 Enchevêtré 	5.3 Enchevêtré 			

# Annexe N° 4

## Caractéristiques du revêtement GC235 de type CDV

Les informations fournies par Sandvik.

### GC235 (P40) :

Nuance carbure à revêtement CDV. Nuance très tenace à bonne sécurité d'arête. Pour ébauche des aciers et aciers coulés avec des vitesses de coupe faibles à modérées.

### Les techniques CDV :

Mis au point vers 1968, le CVD est un procédé basé sur une série de réactions chimiques dans une enceinte placée à haute température de l'ordre de 950 à 1000 °C. Le dispositif se compose de la façon suivante :

- Un générateur de gaz porteurs (Figure A.1), une centrale de régulation des gaz comprenant un mélangeur (Figure A. 2), des débitmètres volumiques ou massiques, et un système de purification des gaz, forme de tamis moléculaires et des sécheurs chimiques,
- Une enceinte de dépôt à parois chaudes en acier réfractaire inoxydable (Figure A. 3),
- Un dispositif de chauffage régulé en plusieurs zones afin d'obtenir un contrôle et une homogénéité parfaite en température dans le réacteur de traitement (Figure A. 4),
- Un ensemble de distribution des gaz qui permet un écoulement laminaire sur la totalité des surfaces à revêtir (Figure A. 5),
- Un système de neutralisation des gaz corrosifs, ces produits pour la plupart chlorés sont issus des réactions chimiques. Ces gaz polluants sont piégés par des absorbants se trouvant à la sortie de l'installation (Figure A. 6).

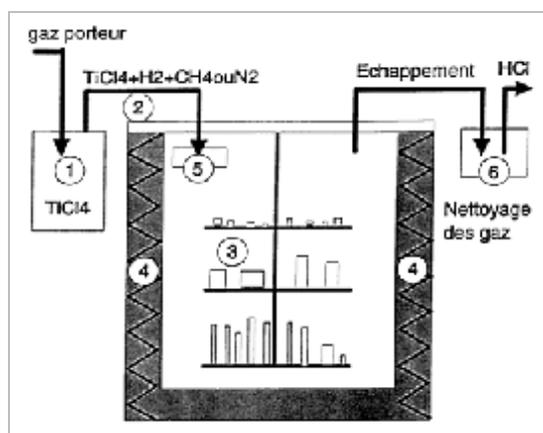


Figure A : Principe d'installation CDV d'après [Geti\_94].

Ce procédé permet de réaliser une très grande variété de couches, ainsi que des couches à gradient de composition (passage continu d'une couche de TiC à une couche de Ti (C, N) et enfin une couche de TiN), et des revêtements multicouches en faisant varier dans le temps la composition des gaz (figure B).

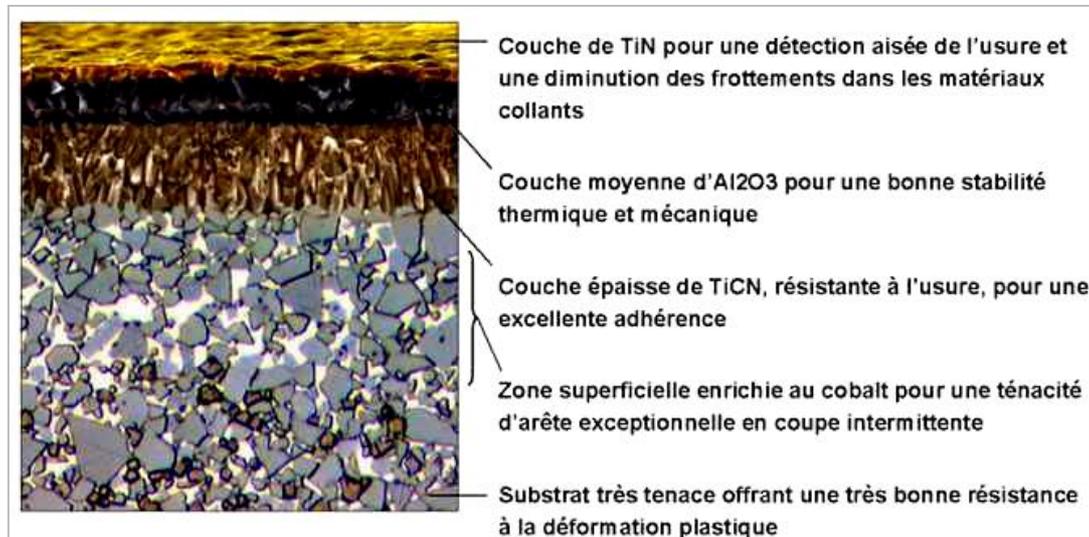


Figure B : Exemple de couche déposée par CVD sur un substrat carbure (Nuance GC235 de Sandvik).

La première couche déposée sur les substrats carbures est souvent du TiC, car il possède une très grande affinité avec le carbure (même nature chimique que les composés du substrat fritté).

Ce procédé est extrêmement utilisé pour le dépôt sur des outils en carbure, mais n'est quasiment pas utilisé pour le revêtement d'outils en acier rapide. En effet, les très hautes températures provoquent un revenu de l'acier rapide, ce qui lui fait perdre ses propriétés mécaniques.

Les hautes températures sont également dommageables à la fragilité de la couche externe des outils carbures, ainsi qu'à l'adhésion des couches. Ceci est dû à la formation d'un composé externe  $Co_x W_y C_z$  [Kloc\_99]. Cela est compensé partiellement en dopant la couche externe du substrat en cobalt (figure B).

Les dépôts CVD ont généralement des épaisseurs de 5 à 12 [ $\mu$  m].

Les films déposés par CVD possèdent fréquemment un état de contraintes résiduelles en tension, ce qui les rend sensibles à la fissuration. Cela explique que ces revêtements aient tout d'abord été employés dans des applications à coupe continue (tournage).

## الملخص :

الأدوات الحديدية تستخدم كما يدل اسمها في جميع المسائل المتعلقة بحالة المواد في ميدانها العام. بالفعل ، في حالة أداة ذات نوعية نبحث عن أقصى استعمال بدون أن نحدد القيمة الحدية، الاشتغال و الأهمية التي تتحملها خلال دور ترموميكانيكي من التصفيح أو معالجة حرارية ذات نوعية أثناء صناعتها. قطع المواد الحديدية هو فعل ترموميكانيكي و الذي من خلاله التشوه البلاستيكي، الحرارة و ظواهر الاحتكاك تلعب دور حرج فيما يخص التآكل. من جهة أخرى، الأداة محروضة في اغلب الحالات في مستوى سطحها الذي يتحمل الاجهادات القاسية. من خلال ما ذكر، فان أدوات القص الحديدية لا يمكنها أن تكون معرفة بقوانين بسيطة و انه يجب أن نمتلك معرفة دقيقة لشروط التحريض حتى يمكننا جلب الحجج للاختيارات المجسدة. دراسة ظواهر قص المواد الحديدية دفعتنا للبحث عن العلاقات بين خصائص المواد المصنعة، التي تخص الأداة و تلك التي تخص الثوابت الجوهرية لشروط القص.

## Abstract :

The tool steels are used, as their name indicates it, in all the problems of materials working of to the full extent.

Efficiency, in the case of a quality tool, the maximum performances are researched, without fixing higher limit, the workability and the aptitude to undergo a thermomechanical cycle of forging or a quality heat treatment during the implementation.

The cutting metals being a thermomechanical process in which the plastic deformations, the heat and the friction phenomena play a critical part in term of wear.

Otherwise, the tool is requested in the majority cases on its surface level which must support the most severe constraints.

It results from it that the tool steels cannot be defined by simple behaviour laws and that it is necessary to have the most precise possible knowledge conditions of requests to bring realistic selection criteria.

The study of these cutting materials phenomena pushed us to research the relations between the machined material characteristics, those of the tool and the fundamental parameters characterizing the cutting conditions.

## **Résumé :**

Les aciers à outils sont utilisés, comme leur nom l'indique, dans tous les problèmes de mise en forme des matériaux au sens le plus large.

En effet, dans le cas d'un outil de qualité, on recherche les performances maximales, sans fixer de limite supérieure, l'usinabilité et l'aptitude à subir un cycle thermomécanique de forgeage ou un traitement thermique de qualité au cours de la mise en oeuvre.

La coupe des métaux étant un processus thermomécanique dans lequel les déformations plastiques, la chaleur et les phénomènes de frottement jouent un rôle critique en terme d'usure.

Par ailleurs, l'outil est sollicité dans la plupart des cas au niveau de sa surface qui doit supporter les contraintes les plus sévères.

Il en résulte que les aciers à outils ne peuvent pas être définis par des lois de comportement simples et qu'il est nécessaire d'avoir une connaissance la plus précise possible des conditions de sollicitations pour apporter des critères de choix réalistes.

L'étude de ces phénomènes de coupe des matériaux nous a poussé à rechercher les relations entre les caractéristiques du matériau usiné, celles de l'outil et les paramètres fondamentaux caractérisant les conditions de coupe.