

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mentouri - Constantine
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique

N° d'ordre : 41/TE/2006
Série : 03/GM/2006

THESE

Soutenu pour l'obtention du diplôme de Doctorat d'Etat
En Génie Mécanique

Option
CONSTRUCTION MECANIQUE

**ETUDE DU COMPORTEMENT EN USURE
DES OUTILS DE COUPE
EN FONCTION DU REVETEMENT**

Par
ACHOUR Ali

Soutenu le :

Devant le jury :

Président :	Prof. BOUCHOUCHA Ali	Université Mentouri Constantine
Rapporteur :	Prof. MEZIANI Salim	Université Mentouri Constantine
Examineurs :	Prof. HELLAL Fateh	Ecole Nationale Polytechnique Alger
	Dr. ZIDANI Kamel (M.C.)	Université Hadj Lakhdar Batna
	Dr. TALBI Kamel (M.C.)	Université Mentouri Constantine

Sommaire

Introduction	01
Chapitre I Fondements Théoriques du Mécanisme de Coupe	06
I.INTRODUCTION	06
II. CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LES MECANISMES D'USURE ET DE RUPTURE DES OUTILS DE COUPE.....	07
II.1. Différentes formes d'usure des outils	07
II.2. Phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau	08
II.3. Formation de la couche blanche	09
II.4. Diffusion à la surface des outils en carbure	15
II.5. Analyse des contraintes et de la rupture	16
III. LE FROTTEMENT ET L'USURE	18
III.1. Généralités	18
III.2. Notions sur le piégeage et la séparation	19
III.3. Notion de troisième corps	21
IV. LES SURFACES ET QUANTIFICATION DES PROFILS DE SURFACES	26
IV.1. Généralités	26
IV.2. Quantification	26
Chapitre II Matériaux pour outils de coupe et tribologie des contacts	31
I. Généralités	31
II. Matériaux utilisés	33
II.1. Aciers rapides	33
II.2. Carbures métalliques	45
II.3. Céramiques	48
II.4. Cermets	50
II.5. Diamant	50
II.6. Nitrure de bore cubique	53
III. SELECTION DES MATERIAUX ET VITESSES DE COUPE	55
III.1. Matériaux	55
III.2. Vitesses	55
IV. TRIBOLOGIE DES CONTACTS COPEAU-OUTIL ET PIECE-OUTIL ..	57

Chapitre	III	Réalisations	Expérimentales	
.....				70
	I.	CONDUITE DE L'ESSAI		70
		I.1. Machine outil		70
		I.2. Appareil de mesure		71
		I.3. Paramètres de coupe		75
	II.	LA MICRO-PHOTOGRAPHIE		76
	III.	CARACTERISTIQUE DE LA MATIERE ET DES OUTILS		77
		III.1. Outil de coupe		78
Chapitre	IV	Etude du comportement en usure		79
.....				
	I.	INTRODUCTION		79
	II.	Mécanisme de la formation du 1er corps		81
	III.	Rupture prématurée des arêtes de coupe		84
	IV.	Fracture par déformation plastique		91
	V.	Rupture physico-chimique due à la perte localisée d'éléments d'alliage vitaux pour l'outil		101
	VI.	Usure par fatigue physico-chimique		106
	VII.	ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES DES REVETEMENTS TiN ET TiC		110
		CONCLUSION		113
Chapitre	V	Analyse expérimentale des états de surfaces		114
.....				
	I.	MESURE DES DEFAUTS		114
	II.	USURE VOLUMETRIQUE CARACTERISEE PAR LA PERTE EN POIDS DE L'OUTIL		117
	III.	ANALYSE EXPERIMENTALE DES ETATS DE SURFACE PAR PERTOGRAPHIE		121
	IV.	ANALYSE ET DISCUSSIONS DE RELEVES PROFILOMETRIQUES A 3D		142
	V.	ANALYSE ET DISCUSSIONS DE RELEVES PROFILS A 2D		147
	IV.	COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES REVETEMENTS		152
		CONCLUSION		158
Chapitre	VI	Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe		159
.....				
	I.	INTRODUCTION		159
	II.	MISE EN EVIDENCE DU TROISIEME CORPS		161
	III.	EVALUATION QUANTITATIVE DE L'APPORT DU TROISIEME CORPS		176

CONCLUSION		193
Conclusion	Générale	194
Références	Bibliographiques	200
Annexes I		206
MESURE DE LA RUGOSITE A L'AIDE DES METHODES OPTIQUES		206
1. Introduction		206
2. Techniques de mesure optique non paramétriques		206
3. Performances		210
Annexes II		211
- Valeurs des pics à un pas de 1mm et écart moyen arithmétique correspondant		211
Annexes III		211
- Mesure des éléments analysés à travers une droite d'un outil de coupe		225

Avant-Propos

Selon l'usage, je vais dans cet avant-propos adresser mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé au cours de ce travail. Mais, je tiens, pour faire comprendre le sens que je veux donner à ces remerciements, à préciser les conditions dans lesquelles j'ai effectué cette étude.

Je remercie tout d'abord mon Directeur de thèse, Monsieur MEZIANI Salim, Professeur à l'Université Mentouri Constantine, pour son soutien scientifique, sa confiance, ses encouragements tout au long de cette thèse.

Je remercie tout le personnel de l'EN.PMA EL KHROUB, en particulier les départements usinage et outillage ainsi que les laboratoires de mesures qui ont bien voulu m'apporter leur soutien technique et matériel.

Je remercie Monsieur Y. BERTHIER, Directeur de recherche, CNRS au laboratoire de mécanique des contacts à Lyon, où j'ai réalisé une partie expérimentale de cette étude, pour les discussions que nous avons eu au cours de cette période et les fructueuses remarques qui m'ont été faites.

Je tiens à remercier Madame ANNE-MARIE Colin du laboratoire de mécanique des contacts à Lyon pour m'avoir facilité l'apport matériel mis à ma disposition.

Je remercie le département de physique Université Mentouri Constantine, qui m'a permis d'analyser mes échantillons.

Je remercie le département de physique de l'Université de Jijel d'avoir mis à ma disposition le MEB pour l'analyse des différents échantillons.

Je remercie Monsieur A. BOUCHOUCHA, Professeur à l'Université Mentouri Constantine, pour m'avoir suivi durant la réalisation de ce travail et en acceptant la présidence de mon jury.

Je remercie Monsieur HELLAL Fateh, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique Alger, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de participer au jury.

Je remercie le CRNA, Centre de Recherches Nucléaires Alger, pour leur apport matériel et en particulier Mr. SOUAMI Nassim, Maître de recherche, pour avoir accepté de participer comme membre de jury.

Je remercie Mr. ZIDANI Kamel, Maître de conférence Université Hadj Lakhdar Batna, pour avoir accepté de participer comme membre de jury.

Je remercie Mr. TALBI Kamel Maître de Conférence Université Mentouri Constantine, pour avoir accepté de participer comme membre de jury.

Je ne saurai oublier d'exprimer cordialement à l'ensemble des collègues, les corps administratifs et techniques du département de génie mécanique Université Mentouri Constantine, ma haute et sincère gratitude pour leur soutien moral et leur constante sympathie.

Introduction

La tribologie, science de la lubrification, du frottement et l'usure, joue un rôle important dans les sciences "carrefour" initiées par les développements récents de l'industrie. Son caractère pluridisciplinaire renforce son intérêt scientifique.

Elle a un rôle prépondérant dans les économies de matière et d'énergie, la fiabilité et la dégradation des mécanismes, et le contrôle du frottement. Les progrès en tribologie sont stimulés par les besoins industriels et économiques. En 1977 aux USA, une étude a montré que 11% de l'énergie consommée peut être économisée à travers la tribologie [1]. En France, on estime que les pertes de matière et d'énergie représentent 2% du P.N.B. [1].

Elle recouvre toutes les sciences qui traitent du contact entre deux solides chargés et en mouvement relatif. Elle est ainsi l'un des carrefours de nombreuses disciplines plus clairement établies, comme par exemple la mécanique des solides et celle des fluides, la rhéologie, la thermique, la science des matériaux et la chimie. Quant à son approche expérimentale, elle repose sur la physique et le traitement des signaux et des images [1].

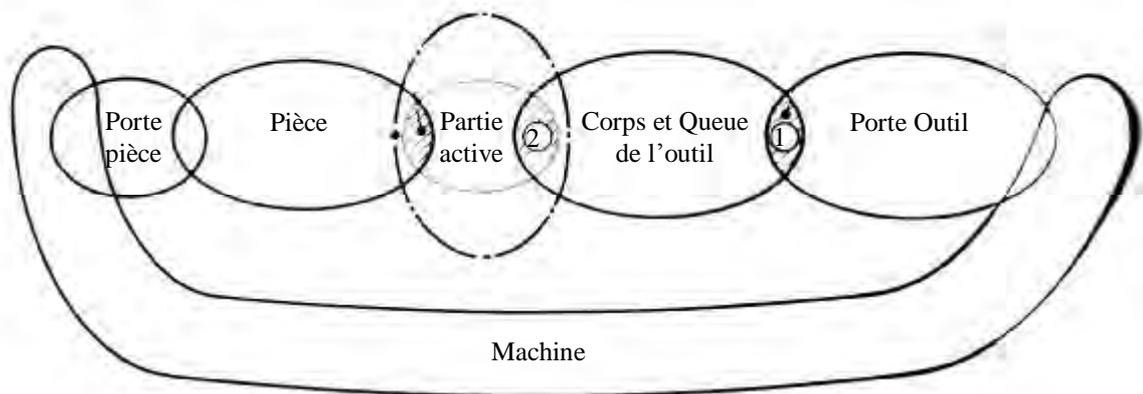
L'optimisation des conditions opératoires par outil coupant doit contribuer largement au développement et à la productivité des techniques avancées d'automatisation de l'usinage, car leur mise en œuvre nécessite une maîtrise suffisante du déroulement du processus et en particulier de l'évolution de l'usure des outils. De plus, les progrès techniques, ont développé l'emploi de matériaux très durs ou réfractaires d'usinabilité difficile, nécessitant des matériaux à outils très résistants.

Parallèlement, ces progrès font apparaître de nouveaux matériaux susceptibles d'être utilisés pour réaliser des outils coupants répondant à ces exigences. C'est pourquoi, bien que les études entreprises, jusqu'à présent, dans le domaine de la coupe (mécanisme de la formation du copeau, comportement des outils aspect thermique) aient permis des progrès importants pour la connaissance du processus, il est nécessaire de les réactualiser et de les poursuivre, afin de répondre à ces conditions nouvelles du contexte industriel. Il apparaît, en particulier, que la complexité et les interactions des nombreux facteurs impliqués dans les phénomènes de la coupe, nécessitent des expérimentations spécifiques à chaque matériau, afin de définir le meilleur choix des outils et les conditions de coupe optimales correspondantes.

L'étude des phénomènes de coupe des matériaux consiste à rechercher des 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 déterminent les performances du procédé.

Dans l'absolu, on pourrait imaginer dissocier l'effet de l'environnement (mécanisme 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 le système de la figure suivante. Par exemple, pour un tour, 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.



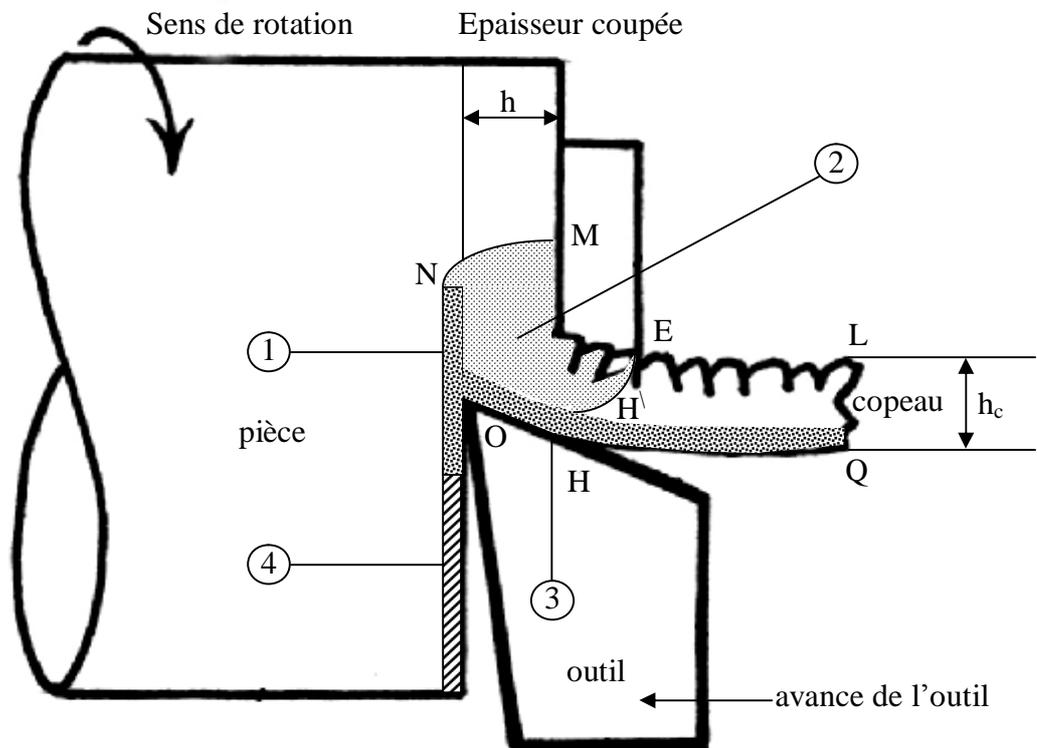
Définition du système usinant

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

De ce fait, le sujet de cette thèse rentre dans cette perspective et étudie l'une des préoccupations actuelles du problème de la coupe des matériaux. Il s'agit en l'occurrence du revêtement des outils de coupe et notamment des revêtements de TiN et TiC.

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage. Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre.

Afin de décrire les sollicitations induites sur un outil de coupe, il faut se ramener à l'étude de la formation du copeau. Il est nécessaire de distinguer 4 zones sollicitant différemment l'outil.



*Mise en situation des 4 zones caractérisant le contact
du triplet pièce-outil-copeau*

Zone 1 : Il s'agit de la zone de séparation du métal en deux. Dans cette zone, qui entoure de manière étroite l'arête de l'outil, il y a une déformation intense par refoulement du métal. Cette zone peut donner naissance à des phénomènes de soudures locales de la matière usinée sur l'outil dès lors que l'on travaille à des vitesses de coupe trop basses, ou que l'on usine à sec et avec des fraises en acier rapide non revêtu

Zone 2 : Zone de glissement plastique (zone de formation du copeau). La ligne MN est le front où la limite élastique est atteinte. La ligne EH' est celle de fin de déformation plastique. Cette zone est couramment dénommée Zone de Cisaillement Primaire (ZCP). Cette zone n'étant pas en contact direct avec l'outil, elle n'influence pas directement l'usure de celui-ci.

Zone 3 : Les phénomènes, qui se produisent à l'interface copeau/outil, sont d'une extrême complexité et ont depuis longtemps interpellé les chercheurs. Il semble que cette interface soit le siège de cohabitations et/ou d'alternances entre des phénomènes locaux d'adhésion et d'intenses frottements de glissement.

Cette zone donne lieu à divers phénomènes d'usure : une usure par abrasion et une usure par diffusion. L'usure par abrasion vient de la présence de particules dures dans la matière usinée, issues notamment du traitement de désoxydation des aciers (grains d'alumine : Al_2O_3).

De plus, lorsque les températures de coupe à l'interface outil/copeau augmentent, des phénomènes de diffusion des composés du substrat vers le copeau peuvent se produire. L'ensemble de ces deux phénomènes d'usure par abrasion et par diffusion sont responsables de l'apparition d'un cratère dans la zone de cisaillement secondaire.

Zone 4 : La zone interface entre la surface usinée et la face en dépouille est une zone clef de l'usure en dépouille des outils. Cette interface est principalement le siège d'un frottement à grande vitesse (= vitesse de coupe).

Les phénomènes associés aux quatre zones caractéristiques de la formation du copeau donnent une bonne représentation des sollicitations d'un outil.

L'intérêt de déposer un revêtement sur un outil va donc être de limiter l'influence des sollicitations suivantes :

- .Adhésion entre la matière usinée et l'outil ;
- .Abrasion;
- .Oxydation; dûe au fluide de refroidissement
- .Diffusion des composés de l'outil vers la matière usinée ;
- .Limitation de la fissuration; dûe à une fatigue thermo-mécanique

En plus de ces propriétés, il est également possible de demander aux revêtements de :

.Limiter la quantité de chaleur transmise dans le coeur de l'outil (barrière thermique en vue du maintien des caractéristiques mécaniques) ;

.Rendre le mode d'usure en dépouille prépondérant afin de faciliter la maîtrise et la prédétermination des opérations d'usinage.

Parmi les 4 zones de formation du copeau, le revêtement est concerné par les zones 1, 3 et 4. Les phénomènes mécaniques, chimiques, thermiques et tribologiques se produisant à ces interfaces ont fait depuis longtemps l'objet d'études importantes.

Ce qui ressort de ces études est que les opinions sont divergentes quant au mécanisme de ces interfaces. Force est de constater qu'il est difficile de trancher parmi ces interprétations du fait de la très grande difficulté d'analyse des phénomènes locaux. En fait, il n'existe aujourd'hui aucun dispositif de laboratoire qui soit capable de simuler des phénomènes similaires en vue de les comprendre et de les modéliser. Le problème devient encore plus complexe lorsqu'un revêtement intervient à ces interfaces. En effet, la très large majorité des études passées se sont réalisées avec des outils en acier rapide ou en carbure non revêtus. Or les revêtements sont aujourd'hui une réalité industrielle d'où la nécessité de mener des études plus approfondies sur la question de l'influence des revêtements sur le comportement thermique et tribologique des revêtements à l'interface pièce/outil/copeau et cela en dehors de toutes considérations d'usure.

Notre étude se subdivise en six chapitres. Dans le premier chapitre, on donne les notions fondamentales de la théorie de coupe. On introduit notamment le problème de l'usure est l'endommagement des outils. On termine ce chapitre par l'analyse de l'état de surface dont les défauts sont principalement dûs à l'usure.

Dans le second chapitre, on fait un tour d'horizon sur les matériaux utilisés en coupe depuis l'outil élémentaire en acier rapide jusqu'aux outils modernes en carbure métallique revêtus et céramiques.

Dans le troisième chapitre, on décrit l'appareillage utilisé pour nos expérimentations sur la caractérisation des outils revêtus.

Dans le quatrième chapitre, on aborde, l'aspect expérimental de notre travail sur l'étude qualitative de l'usure par microscopie électronique. On cherche dans ce cas à matérialiser les différents cas d'usure prévus par la théorie.

Dans le cinquième chapitre, on aborde l'étude quantitative de l'état de surface par l'analyse profilométrique. On cherche dans ce cas à montrer l'intérêt d'un revêtement en vue d'améliorer la rugosité.

Le chapitre six est consacré à l'étude du troisième corps. On cherche essentiellement dans cette expérimentation à étudier par micro-sonde le phénomène de diffusion des constituants de l'outil et la formation du troisième corps.

Chapitre I

Fondements Théoriques Du Mécanisme de Coupe

I. INTRODUCTION

L'expérimentation et l'interprétation des essais d'usure ont été élaborées de diverses manières depuis les premiers travaux de TAYLOR. Par ailleurs, le développement de nouvelles variétés d'outils et l'évolution de la gamme des matériaux usinés ont très nettement élargi les conditions opératoires, bien au-delà du domaine des expérimentations antérieures [7, 8]. Il en est résulté un regain d'intérêt de l'étude des phénomènes d'usure, orientée vers l'amélioration des conditions d'exploitation des essais permettant d'apprécier les performances optimales des outils et l'usinabilité relative des matériaux.

L'étude de l'usure doit être abordée suivant une démarche progressive et systématique, alors qu'au contraire, poussés par les nécessités de la pratique industrielle, les expérimentateurs l'envisagent dans une perspective souvent très particulière. Les conclusions qui s'en dégagent sont alors soumises à des conditions de validité forcément restrictives.

Il convient donc, tout d'abord, de recenser systématiquement les multiples manifestations de l'usure et d'observer leurs évolutions respectives; ensuite, de déterminer jusqu'à quel stade de cette évolution l'outil pourra conserver des qualités de coupe suffisantes pour une bonne exécution du travail en fonction des qualités exigées.

A cet effet, plusieurs auteurs [15, 20] ont travaillé sur les couches de diffusions à la surface des outils en carbure et sur la rupture de ces derniers.

Les limites ainsi appréciées seront alors matérialisées sous la forme de critères quantitatifs, applicables à diverses manifestations macroscopiques de l'usure.

Ainsi, les relations de causes à effet sont assez difficiles à définir si l'on considère simultanément dans l'interaction copeau-outil les aspects physiques-chimiques et métallurgiques des phénomènes. Par ailleurs, on ne peut dissocier totalement l'aspect mécanique de la formation du copeau, car les caractéristiques mécaniques des matériaux durant la coupe sont étroitement liées aux phénomènes structuraux qui peuvent se présenter.

II. CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LES MECANISMES D'USURE ET DE RUPTURE DES OUTILS DE COUPE

II.1. Différentes formes d'usure des outils

Il est nécessaire de rappeler les modalités d'usure des outils de coupe, c'est à dire les différents mécanismes de l'usure et les différentes formes d'usure des outils.

a/ Usure en dépouille :

Elle se produit sur l'arête de coupe elle-même, ainsi que le rayon du bec. Généralement, elle est plus prononcée soit sur l'arête, soit sur le rayon. Les forces de coupe et par conséquent les vibrations augmentent avec le degré de l'usure en dépouille. La température de l'arête, donc les risques de déformations plastiques, croissent également avec cette usure. D'une usure en dépouille concentrée sur le rayon du bec, résulte un mauvais état de surface (figure 1-a).

b/ Usure en cratère :

Le frottement du copeau produit le plus souvent sur la face supérieure de l'outil un cratère plus ou moins accentué. Une forte usure en cratère a une influence sur la formation du copeau (figure 1-b).

c/ L'écaillage :

Se constate quand la fragilité de la nuance employée est trop grande en égard au travail à exécuter, quand l'outil subit des chocs thermiques. Des criques se forment perpendiculairement à l'arête de coupe et des particules de carbure sont arrachées progressivement de cette arête. Ce phénomène est parfois appelé formation de fissure en peigne (figure 1-c).

d/ Déformation plastique :

Sous l'effet des hautes températures et des hautes pressions dans la zone de coupe, la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente. Cette forme d'usure détermine la précision dimensionnelle de la pièce usinée et présente un mode de détérioration de l'outil (figure 1-d).

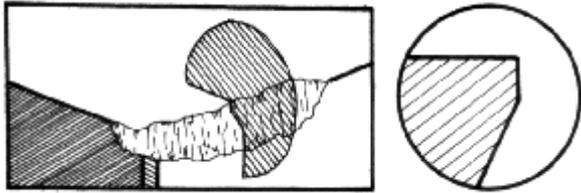


Figure 1-a : Usure en dépouille

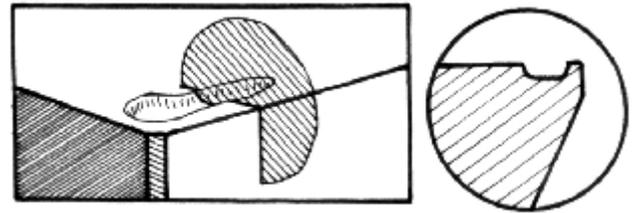


Figure 1-b : Usure en cratère

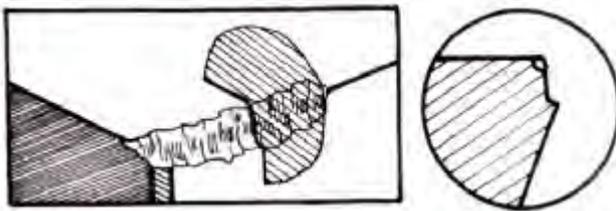


Figure 1-c : Usure en dépouille irrégulière

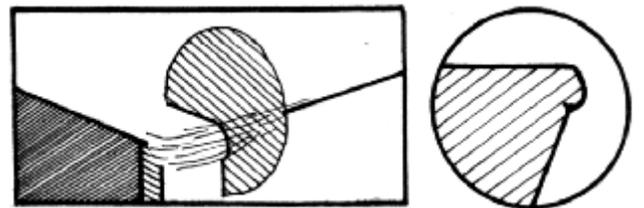


Figure 1-d : Déformation plastique

II.2. Phénomènes physico-chimiques à l'interface outil-copeau

La mise hors de service d'un outil peut être provoquée par les différents mécanismes d'usure que sont :

- L'effritement
- L'abrasion.
- L'adhésion.
- La diffusion.
- La déformation plastique.

a/ Usure par effritement

Actuellement, la destruction d'un outil par effritement local doit être considérée comme anormale, malgré qu'on la rencontre fréquemment. Plusieurs causes peuvent entraîner cet effritement :

- Une grande fragilité du matériau constituant l'outil (mauvaise composition chimique ou mauvais traitement thermique).
- Des chocs provoqués par des discontinuités ou par des vibrations importantes.
- Des fissures microscopiques formées à l'arête de l'outil.
- Mauvais choix des paramètres géométriques de l'outil, les pentes d'affûtage devant être d'autant plus faibles que l'outil est plus fragile.

b/ Usure par abrasion

L'usure par abrasion est consécutive à l'enlèvement de matière sur l'outil par des constituants durs dans le matériau usiné. On rencontre ce genre d'usure dans le cas de l'écroûtage des pièces coulées. L'emploi des outils en carbure limite ce genre d'usure.

c/ Usure par adhésion

Cette usure est aussi une usure par arrachement mécanique de particules d'outil, mais après formation d'une microsoudure entre le copeau et l'outil.

Les microsoudures sont favorisées par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et de l'outil entraînant des déformations importantes et une élévation de chaleur provoquant la soudure.

L'usure par adhésion est ainsi observée sur les outils en carbure. En effet, ce mode d'usure peut être entretenu lorsque les surfaces frottantes ne sont en contact que sur une partie de leurs surfaces apparentes de frottement, soit à cause de l'état de surface des faces d'attaque et en dépouille, soit à cause de vibrations, soit à cause de la présence d'arête rapportée.

L'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'à une vitesse critique au delà de laquelle se poursuit une usure par diffusion.

d/ Usure par diffusion

L'usure par diffusion est une usure continue pour laquelle les éléments de l'outil sont extraits par le copeau par quantités très petites. Elle est due aussi bien à la diffusion des constituants de l'outil dans le copeau qu'à celle des constituants de la matière usinée dans l'outil.

e/ Usure par déformation plastique

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente et un effet de fluage, sous l'action des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de contact outil-copeau.

Ces divers mécanismes d'usure se manifestent par les types d'usures cités au préalable.

f/ Arête rapportée

L'arête rapportée est un phénomène que l'on rencontre souvent dans la coupe et qui a des répercussions favorables ou défavorables sur l'usure des outils.

Au cours de l'usinage de nombreux métaux et alliages, il se dépose sur l'arête de l'outil un petit amas métallique séparé du copeau et de la pièce en forme de "coin" très caractéristique. L'observation micrographique d'une section droite d'arête rapportée montre qu'elle est constituée de strates superposées d'épaisseur d'ailleurs inégales.

II.3. Formation de la couche blanche

Les dernières observations mentionnées sur l'arête rapportée montrent que celle-ci joue, par évidence un rôle important dans l'usure des outils, soit par sa présence proprement dite, modifiant plus ou moins l'écoulement du copeau et surtout sa portée effective, soit par son évacuation par le copeau, ou par le copeau et par la face de dépouille de l'outil.

Par ailleurs, il est intéressant de connaître aussi les phénomènes qui peuvent exister entre l'outil et l'arête rapporté.

On observe notamment une modification assez nette de la surface abrasée de l'outil à l'endroit du frottement. Cette modification apparaissait sous la forme d'une couche qui résiste aux attaques métallographiques classiques et qu'on appelle couche blanche.

Les figures 2 et 3 montrent un exemple de formation de couche blanche.

Parfois, cette couche blanche semble détachée de l'outil mais la plupart des cas elle lui est soudée. Il y a formation de couche blanche pour les outils contenant ou non du Cobalt, ce

dernier semblant avoir seulement une légère influence sur la continuité ou la discontinuité de la couche.

La couche blanche est en relation directe avec le travail d'abrasion à l'interface outil-copeau et elle agirait comme un élément atténuant l'usure de l'outil. La couche blanche n'est pas constituée par un carbure ou un oxyde mais elle serait plutôt une ferrite alliée surtout au chrome, formée en partie aux dépend de l'outil par suite de la diffusion du chrome mais aussi du carbone. D'après VENKATESH [30] cette couche blanche n'est pas un composé mais une solution solide

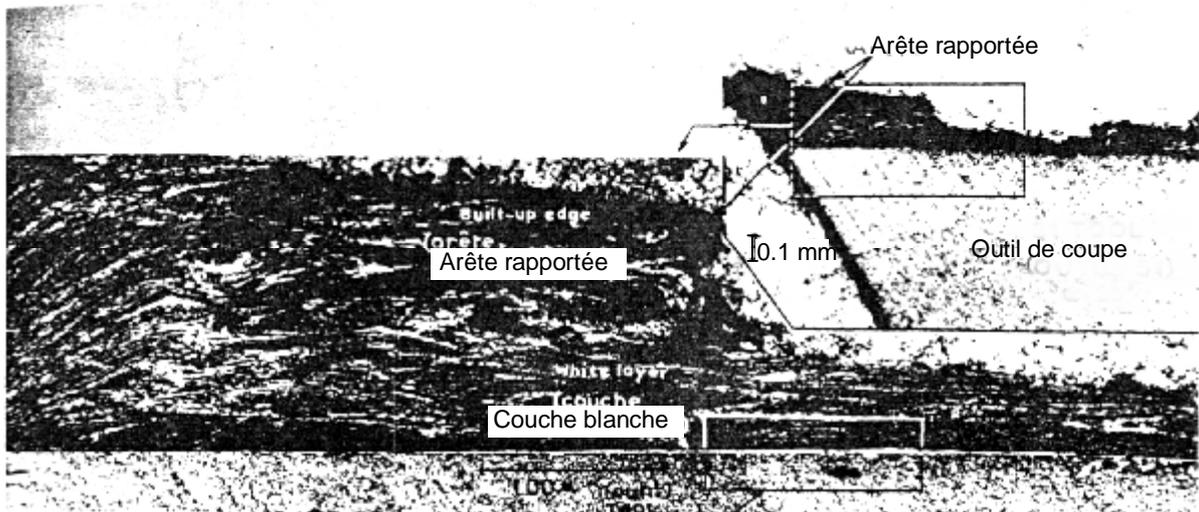


Figure 2 : L'outil de coupe en prise avec la matière usinée d'après VENKATESH

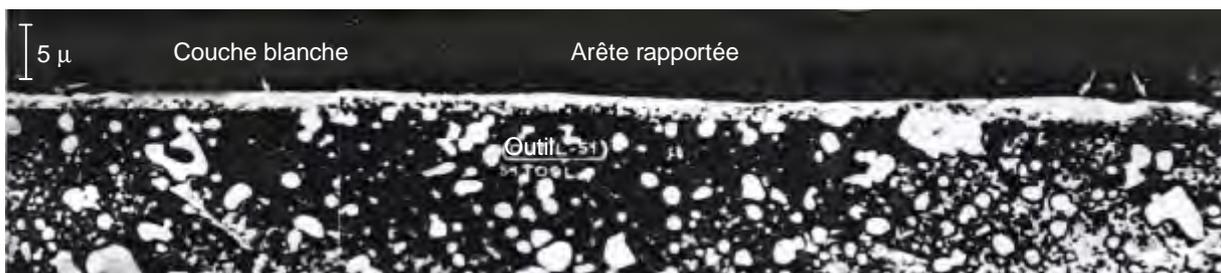


Figure 3 : Formation de la couche blanche

II.4. Diffusion à la surface des outils en carbure

Les conditions d'écoulement à la surface de l'outil jouent un rôle important dans le phénomène de diffusion en favorisant l'enlèvement de matière quand les vitesses sont élevées mais en la diminuant lorsqu'il se forme des couches limites à des vitesses plus réduites.

En fait, il est nécessaire de porter une grande attention au rôle joué par la vitesse de coupe pour distinguer deux aspects de l'usure : l'usure par adhésion et l'usure par diffusion, modalités que nous avons mentionnées précédemment.

La diffusion augmente rapidement avec la vitesse et la température interfaciale, la diminution de l'usure par adhésion avec la vitesse est possible du fait de l'augmentation de la résistance à l'arrachement de particules de l'outil due à une capacité de déformation plus élevée avec la température.

Du fait du rôle de la température dans ces modes d'usure, les paramètres de coupe comme l'avance et les lubrifiants sont à choisir différemment selon qu'il s'agit de réduire l'usure par adhésion ou l'usure par diffusion. Plusieurs chercheurs ont étudié les phénomènes de diffusion entre les outils carbures et les aciers.

DAWIHL [9] a étudié le collage entre des cylindres de carbure et des cylindres d'acier portés à haute température dans un four. Il a observé que le collage est plus facile en atmosphère neutre ou d'hydrogène que dans l'air et il a conclu que la coupe est très favorable à la diffusion et que l'augmentation de la vitesse pouvait diminuer cette diffusion, le temps de contact outil copeau étant réduit. En fait, pour avoir une diffusion, il suffit d'avoir des surfaces propres et une température suffisante. On a remarqué que l'addition de carbure de titane diminuait la tendance du collage.

TRENT [10] a conclu à une usure chimique qui se produisait à des températures de 1300°C par l'intermédiaire de la formation d'une phase liquide entre carbure et acier, la fusion se produisant dans le copeau, dans l'outil ou dans une combinaison des deux.

Par ailleurs, le carbure de titane ne se dissout pas, ce qui explique la meilleure tenue en coupe des carbures mixtes tungstène-titane. En fait, il n'a pas été observé en coupe de phase liquide si ce n'est la fusion de phases eutectiques.

C. SKIDAR et ALL [14] ont étudié expérimentalement le comportement à l'usure des outils en carbure lors de l'engagement et du retrait des outils à des vitesses de coupe élevées. Ils ont conclu que la géométrie du tranchant avait une grande importance sur la durée de vie de l'outil.

LOLADZE [15] a utilisé une méthode analogue en chauffant artificiellement la zone de coupe pour accélérer la diffusion.

En coupe, la diffusion commence immédiatement après mise en température sans incubation, le temps n'intervenant plus comme dans les essais de plaquettes portées dans le four. Par ailleurs, la déformation plastique de la coupe favorise la diffusion.

En faisant les essais avec du fer Armco et différents carbures d'une seule ou de plusieurs nuances, il a mis en évidence vers 1000-1200°C une couche blanche non attaquée par les réactifs usuels métallographiques.

En travaillant à ces températures, l'interface a vu sa dureté augmenter notablement de 100 à 800 HV. A ces températures, il ne peut s'agir d'écrouissage, l'augmentation de dureté provient donc de transformation métallurgique. Après attaque chimique on voit, en effet, une couche sombre dans le fer qui n'est autre que le résultat d'une cémentation sur une vingtaine de microns. A l'interface, il a été aussi observé une mince couche blanche et dans le carbure des taches sombres révélant une transformation de ce dernier.

Sur la face en dépouille de l'outil, des transformations analogues ont été observées, soit une couche cémentée et une couche blanche.

La dureté (800-900HV) et les micrographies permettent de conclure que la couche blanche est formée de tungstène et de carbone diffusé dans le fer. Les couches sombres du carbure sont dues à la perte d'éléments et l'entrée du fer dans le carbure. La dissociation des carbures métalliques dépend de leur nature, ceux des métaux réfractaires (TiC, TaC, ZrC, NbC) étant très résistants.

Il faut toutefois tenir compte de la variation de stabilité des carbures en fonction du milieu. En effet, le mélange de carbures, ou la présence de certains éléments d'addition, modifie la température de dissociation.

Ces différentes études ont le grand avantage, qu'avec ces connaissances approfondies sur les phénomènes de diffusion dans la coupe, on peut prévoir le comportement des outils de différentes nuances en fonction du matériau usiné. Entre autres, tant que les phénomènes de diffusion ne sont pas prépondérants, les carbures de tungstène se comportent aussi bien que les carbures complexes sur les aciers traités ou non. Sur la fonte en particulier, ils sont les meilleurs parce que la température n'est pas très élevée, et les alliages de titane s'usent mieux avec les carbures de tungstène purs, car les carbures de titane sont attaqués par ces alliages.

Aussi, LOLADZE [19] a étudié les différentes zones de contraintes dans l'outil. Ces différentes zones de contraintes se situent dans la partie active de l'outil. La distribution des contraintes se fait suivant deux zones, une zone de compression et une zone de tension.

Par ailleurs, l'université d'Aix-La chapelle [16] a étudié les couches d'oxydes qui se forment à la surface de l'outil et qui retardent les phénomènes d'usure.

On a remarqué en différentes circonstances que les aciers ayant les plus fortes teneurs en oxyde paraissent s'usiner le plus facilement.

Il a été remarqué que les aciers qui s'usaient le moins entraînaient la formation d'une couche d'apparence noire sur l'outil, couche d'épaisseur de 20 à 30 μ et différente d'une arête rapportée normale.

Cette couche apparaît surtout avec des outils en carbure contenant du carbure de titane, toutefois, la présence de carbure de titane ne suffit pas exclusivement pour former la couche protectrice, cette dernière dépend aussi de la température de coupe.

L'analyse de la couche protectrice a montré qu'il s'agissait d'une couche peu attaquable aux acides, non conductrice analogue à un oxyde ou un mélange d'oxyde. L'analyse

spectrographique a mis en évidence du calcium, du silicium, du chrome, du manganèse, de l'aluminium et du fer.

Une analyse à la sonde de Castaing a montré que les éléments essentiels étaient : le calcium, l'aluminium et le silicium.

L'explication du mécanisme de protection de la couche de dépôt a été faite de deux façons. D'une part, on a invoqué la formation d'une couche visqueuse qui agit comme lubrifiant et d'autre part, on a pensé à des soudures à l'état solide qui constituent une couche jouant le rôle de pseudo-outil.

COLDING [17] a étudié les phénomènes d'usure des carbures revêtus et leurs tenues d'usure

I. HAM [18] a étudié la diffusion du Cobalt dans les revêtements TiC, au cours de l'usinage.

KALS [20] attire l'attention sur "l'importance des paramètres structuraux sur la rupture des carbures"... L'étude montre que le pourcentage de Co est d'une grande importance pour la contribution des mécanismes à la détérioration des outils de coupe en carbure et engendre le développement et la propagation de fissures. La rupture due à la force de compression est facilitée par la diminution du Co et inversement (la déformation plastique étant possible par déplacement relatif des grains les uns par rapport aux autres).

J.L.CHERMANT et ALL [21] proposent des méthodes et des tests de rupture, dans le but de connaître l'énergie d'initiation des fissures et la ténacité du carbure, ce qui est très important pour déterminer les limites d'utilisation des matériaux soumis à des contraintes données. En effet, les essais mécaniques classiques ne permettent pas d'expliquer le comportement des structures et particulièrement les ruptures catastrophiques de plaquettes. Par contre, l'application de la mécanique de la rupture peut permettre de calculer le facteur d'intensité de contraintes et la taille critique des défauts des matériaux étudiés.

II.5. Analyse des contraintes et de la rupture

J.L CHERMANT [21] étudie de façon statistique, par tracé des droites de Henry, la variation de la contrainte à la rupture des Wc-Co avec la fraction volumique en Co et par tracé des droites de WEILBULL, la probabilité pour que la rupture intervienne pour une valeur donnée de la contrainte. De ce test et de ces méthodes, CHERMANT fait les remarques suivantes :

"... Lorsque le trajet de fracture est observé sur un matériau Wc-Co, on peut avoir passage du trajet de fracture soit dans la phase carbure, soit dans la phase cobalt;

"... La rupture de matériau Wc-Co passe de façon privilégiée dans la phase cobalt, on doit donc trouver une fraction de cobalt plus importante sur le trajet de fracture que sur la face polie ..." ;

"... Les valeurs du critère de rupture pour une granulométrie donnée , augmentent avec la fraction volumique en cobalt ; pour une composition en cobalt donnée , elles augmentent également avec la granulométrie et ceci de façon de plus en plus sensible avec l'augmentation de la teneur en cobalt.

"... Augmentation de la ténacité avec le diamètre moyen des cristaux de carbure. Cette augmentation est d'autant plus marquée que la composition en cobalt est plus élevée...".

H.E.HINTERMANN [29] a montré que les revêtements présentent de nombreux avantages par rapport aux matériaux massifs ou composites. D'autres techniques modernes peuvent être employées facilement pour réaliser des couches sur des pièces utilisables en micromécanique. Il s'agit des dépôts chimiques et physiques en phase gazeuse.

Selon ces méthodes, il est possible d'obtenir des couches dures, telles que le TiC et le TiN qui donnent aux pièces traitées une très grande résistance à l'usure et des frottements modérés. Ces couches dures peuvent être employées pour augmenter la durée de vie d'outils et de pièces frottantes devant résister à l'usure, aussi bien pour augmenter la résistance à l'abrasion tout en les rendant plus esthétiques. Des couches tendres permettent d'obtenir une lubrification sèche efficace sous vide ou sous gaz inerte.

T.KITAGAWA [22], a traité l'usinage à grande vitesse des alliages d'Inconel 718 et de Ti- Al-6V-2Sn d'un point de vue thermique. La température et l'usure des outils de coupe sont étudiées au moyen d'expériences de coupe jusqu'à une vitesse de coupe d'environ 600m/min. Ces facteurs contribuent à la réduction de la température d'outil.

SLAVKO DOLINSEK [24], a fait l'étude d'outils de coupe modernes, utilisés pour l'usinage à grande vitesse (HSC) et faits sur la base des carbures cémentés, micro-granuleux avec un revêtement multicouche protecteur, ils tiennent compte de l'usinage efficace des aciers durcis et trempés d'une dureté supérieure à 50 HRc. L'article présente quelques recherches originales sur les types d'usures, comme les phénomènes qui se produisent dans la zone de coupe et leurs rapports avec les causes et les principaux mécanismes d'usure (adhérence, abrasion et diffusion) pour les outils utilisés dans l'HSC.

REZA YOUSEFI [25], a étudié le mécanisme de coupe avec ultra-grande-vitesse pour l'alliage d'aluminium, des expériences de coupe utilisant une machine-outil équipée d'un axe de roulement magnétique actif ont été exécutées sur une gamme de vitesses de coupe très élevée. Dans l'ensemble, la surface finie tend à s'améliorer avec la vitesse de coupe. Cependant, la formation de métal soudé sur le bord d'outil dans la gamme de vitesse de 100 à 200 m/s favorise l'écoulement latéral du matériau sur la surface finie, qui fait augmenter la rugosité extérieure.

B.VICENZI [26], a démontré que dans certaines applications, la coupe interrompue limite les matériaux de coupe utilisable aux matériaux durs et aux cermets. Particulièrement, des essais de fraisage avec une insertion de cermet et l'usinage à grande vitesse (jusqu'à 500 m/min) d'engrenages avec une fraise-mère contenant du cermet sont discutés.

J. PAULO DAVIN [27], a fait l'étude du rapport qui existe entre les forces de coupe et l'usure d'outil en diamant polycristalin (PCD), mesurées en usinant le composite A356/20/sicp-t6 (aluminium contenant 7% de silicium, 0,4% de magnésium et 20% de carbure de silicium ayant subi un traitement thermique de diffusion et de vieillissement pendant 5h à la température de 154°C). Le travail expérimental a été développé considérant les opérations de perçage et de tournage, par la mesure continue des efforts de coupe avec des dynamomètres piézoélectriques appropriés.

YUKIHIRO SAKAMOTO [28], a travaillé sur l'usinage à grande vitesse et à rendement élevé, souvent demandés dans le secteur de production. Une investigation a été effectuée sur l'amélioration des propriétés d'outil tels que le film dur de revêtement et le traitement de surface. La nitruration radicale est l'une parmi beaucoup de méthodes de traitement de surface, et il est possible d'améliorer la dureté extérieure en maintenant la rugosité de la surface initiale par le contrôle du plasma. Pour améliorer les performances de coupe de l'outil, on a étudié la fabrication des outils avec nitruration radicale et leurs performances de coupe pour des aciers de Cr-Mo.

S. Y. LUO [23], a étudié le comportement de l'usure en tournage des outils en acier allié durci ainsi que les outils en céramique. Les résultats expérimentaux ont prouvé que le mécanisme principal d'usure pour ces outils était l'abrasion du matériau de liaison par les particules de carbure de la pièce à usiner. Pour les outils en céramique, il y avait l'usure adhésive et abrasive.

III. LE FROTTEMENT ET L'USURE

III.1. Généralités

La compréhension des phénomènes qui gouvernent le frottement et l'usure est en pleine évolution. Les travaux ne se limitent plus à la simple étude des matériaux massifs mais se focalisent sur les interfaces souvent appelés troisième corps c'est à dire sur les matériaux créés au contact, pendant l'opération de frottement. Si, sur le plan mécanique, les schémas pour l'usure et le frottement présenté depuis quelques années présentent moins d'incohérence qu'auparavant, ils ne sont, toutefois, pas complets et ne peuvent être exprimés, théoriquement.

Il existe plusieurs lois d'usure qui reposent sur des concepts partiels et ne rendent donc pas compte de la réalité expérimentale.

Il existe, par contre, une seule loi de frottement qui est couramment utilisée, c'est la loi de Coulomb qui traite des conditions aux limites et qui n'a jamais été vérifiée expérimentalement.

Le frottement et l'usure sont gouvernés par plusieurs phénomènes dont l'importance relative varie d'une application à l'autre et qu'il ne sera pas possible de formuler des lois avant d'avoir explicité ces phénomènes.

L'approche qui se focalise sur les interfaces ou sur le troisième corps est, par contre, très utile car elle nous permet de comprendre certains comportements industriels qui nous

échappaient, il y a seulement trois ou quatre ans. Il est donc important d'inscrire la compréhension des phénomènes dans cette nouvelle voie.

III.2. Notions sur le piégeage et la séparation

La notion d'écran est utile pour comprendre pourquoi deux surfaces métalliques quelconques peuvent être mises en contact sans "coller" l'une à l'autre. Elle n'est pas suffisante pour décrire le processus de frottement en dynamique. Rappelons, en effet, que le mouvement peut détruire les surfaces et que les débris sont formés et déposés dans un espace confiné (le contact) dont il n'est pas toujours facile de sortir.

La notion de PIEGEAGE apparaît clairement si l'on tient compte de l'échelle du contact. En effet, une particule d'usure au moment de sa formation mesure nettement moins que le micron. Par ailleurs, la dimension minimale d'un contact est rarement inférieure à 100 microns (figure 4). La particule détachée est donc piégée à l'intérieur du contact où son rôle est complexe. Nous verrons que ce rôle conditionne les aspects mécaniques et que la notion d'échelle est capitale pour les comprendre. Etudions deux cas représentatifs :

a) La figure 5a montre une particule métallique qui a adhéré à l'une des surfaces frottantes, au cours d'une expérience d'usure destructrice conduite avec des éprouvettes d'acier. La surface antagoniste présente la concavité correspondante. Si avant d'être ouvert un déplacement relatif important était imposé, un blocage se serait produit. Dans le cas de faibles débattements, toutefois, ($d < 0.1\text{mm}$), cette particule s'écrouit, se fragilise, se fragmente pour former un lit de débris piégés dans le contact. Ces débris sont ensuite broyés, ils s'oxydent et le lit, à l'origine brillant, devient noir (Fe_3O_4) puis rouge (Fe_2O_3). Ce lit sépare et par la même protège les deux surfaces en évitant leur interaction (Figure 5b).

b) La figure 6a montre des particules produites en faisant frotter une plaque de verre contre une gomme de dessinateur. Les rouleaux formés s'agglomèrent, le frottement qui est très élevé, au départ, tend vers zéro à mesure que la taille des rouleaux augmente, que l'interaction des surfaces diminue et que leur séparation devient effective. La figure 6b schématise le processus de formation des rouleaux et la façon dont la séparation se produit.

Les figures 6 et 7 suggèrent que la notion d'écran dynamique doit être ajoutée à la notion d'écran abordée dans le cas statique. Des vérifications effectuées avec des combinaisons très diverses de matériaux et dans de nombreux cas de figures confirment cette hypothèse. Notons au passage que le film d'huile constitue un écran dynamique très efficace et relativement bien connu.

Afin de nous aligner sur le vocabulaire ambiant, nous appellerons troisième corps cet écran, qu'il soit dynamique ou statique, et premiers corps les volumes des pièces en contact.

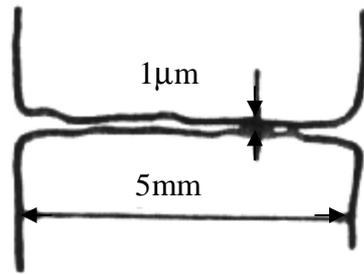


Figure 4 : Echelle du contact (taille relative des particules d'usure)

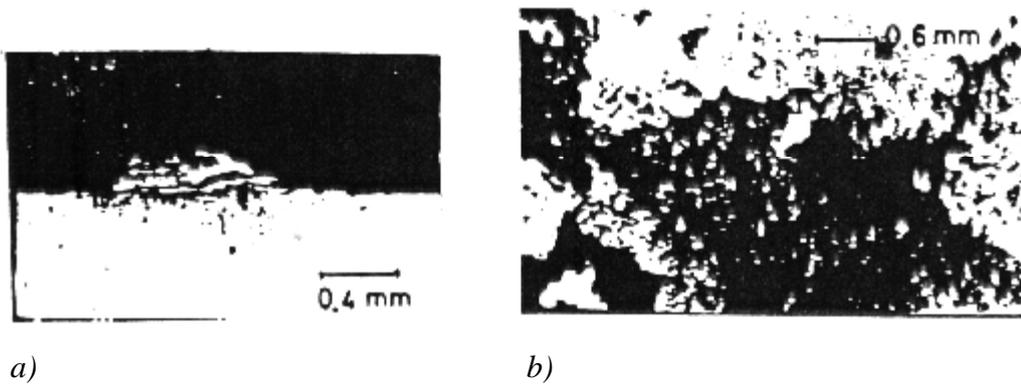


Figure 5 : Particules adhérentes (a) et lit de débris (b)

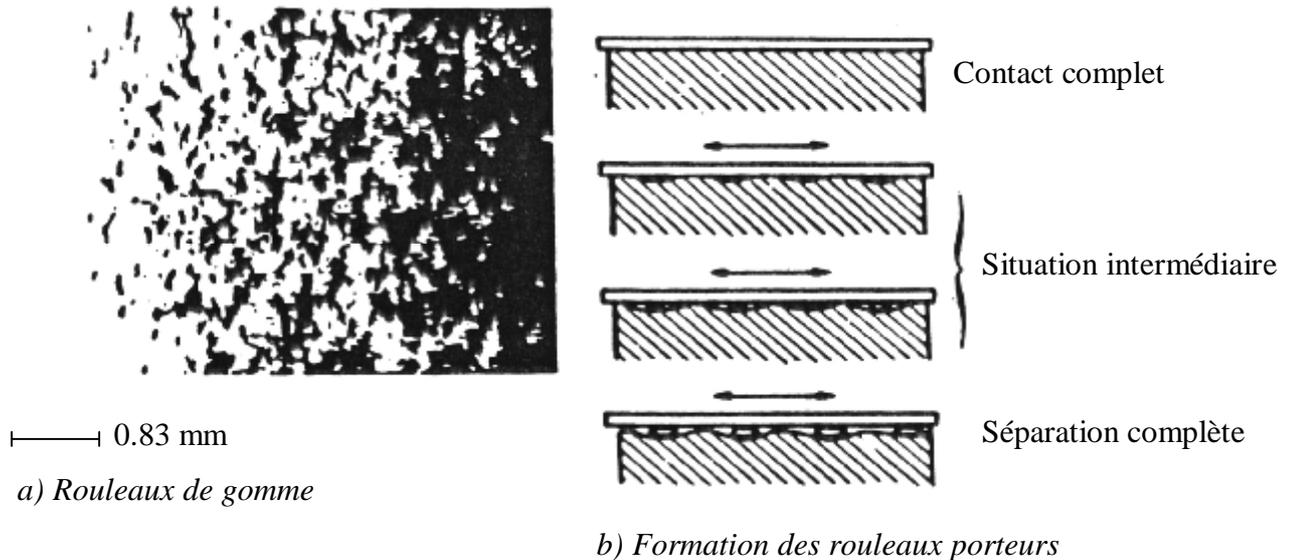


Figure 6 : Contact gomme - verre

III.3. Notion de troisième corps

La discussion précédente indique qu'en dehors d'ambiances très particulières le contact à deux corps ne se rencontre pas et qu'il n'est pas possible de rendre compte de la réalité en se limitant à deux corps.

Cette affirmation limite la portée des études à deux corps sans toutefois en supprimer tout l'intérêt. A titre d'exemple, la figure 7 montre la différence notée dans une étude de deux et de trois corps dans le cas de deux cylindres pressés l'un contre l'autre avec et sans lubrifiant. On note que la présence d'un troisième corps, ici un film d'huile piezo-visqueux, modifie légèrement la distribution de pression mais ne change pas l'ordre de grandeur des résultats. Nous verrons plus tard que les modifications ne sont pas toujours aussi minimes.

S'il paraît aisé de comprendre le rôle du troisième corps en tant qu'écran statique, son action dans le cas dynamique est moins évidente et demande à être éclairci. Ceci a été montré en faisant frotter une éprouvette de craie fixe contre un plan de verre semi-opaque mobile. Cette combinaison a été choisie car l'expérience fournit un troisième corps épais dont le comportement peut être suivi par visualisation (figure 8).

Cet examen indique que :

- L'extrémité du pion est divisée en deux zones, l'une grise à l'avant l'autre très blanche à l'arrière.

- Les particules d'usure détachées de l'avant sont transportées vers l'arrière.
- Les vitesses des particules ne sont pas égales entre elles et ne sont pas égales à la vitesse du disque en verre.

Le talon du pion de craie se rompt au cours des essais effectués à forte charge. Par ailleurs, si au cours d'un deuxième tour, la craie repasse sur sa propre trace, on note que (figure 9) :

- Une part de la trace est éliminée du contact par effet de proue tandis que l'autre, recirculée dans le contact se mêle aux particules formées au cours de ce deuxième passage.
- Le taux d'usure est plus faible au deuxième qu'au premier tour.
- Le taux d'usure au deuxième tour diminue encore si l'on taille un biseau à l'entrée du contact.

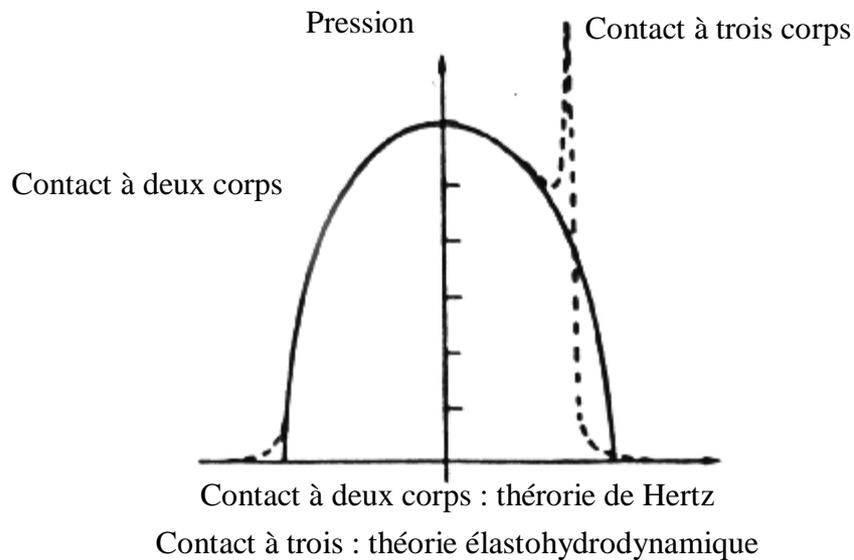


Figure 7 : Effet du troisième corps (lubrifiant newtonien) sur La répartition des contraintes normales [11].

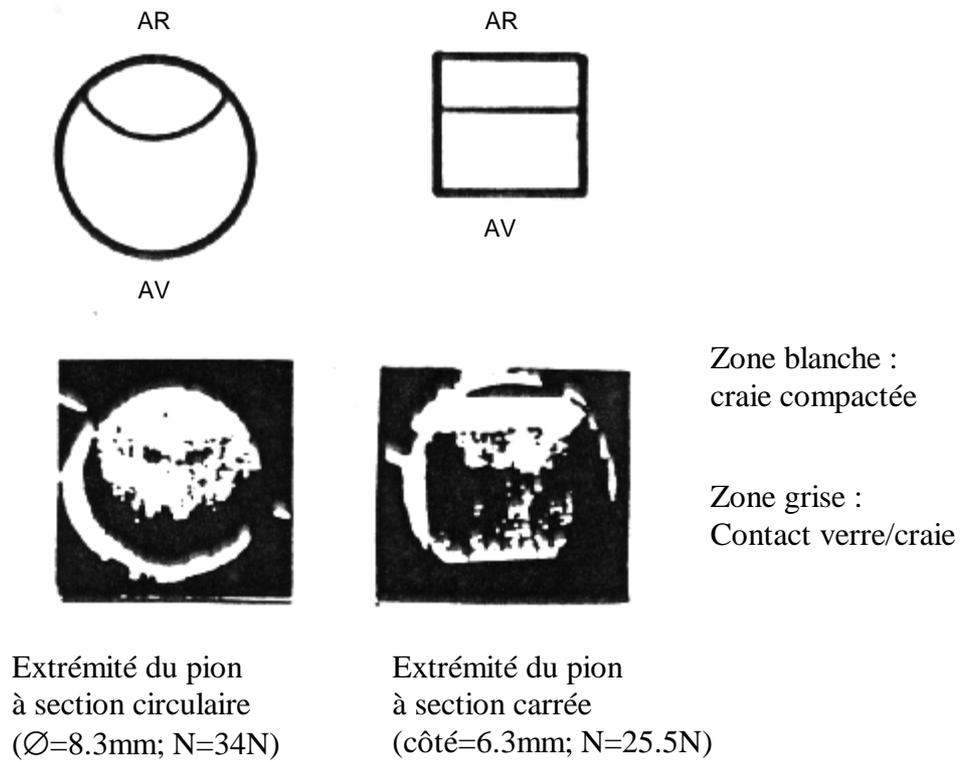


Figure 8 : Extrémité des pions de craie [11]

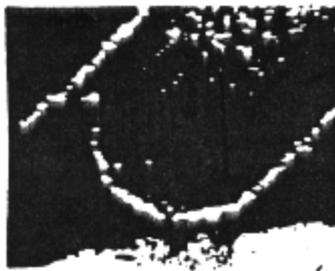


Figure 9 : Vue du contact après 10 passes [11]

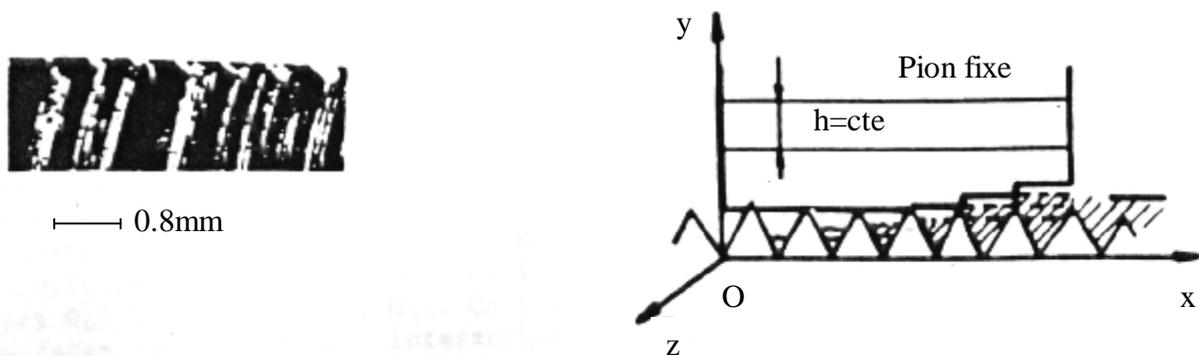


Figure : Formation des troisièmes corps (craie verre)[11]

III.3.1. Le contact à trois corps

La figure 10 présente un schéma de troisième corps tiré de publications antérieures [6]. La figure distingue les deux premiers corps ou éléments de machines et le troisième corps. Ce dernier est défini de deux façons :

- Au sens des matériaux, comme étant la zone qui marque une nette discontinuité de composition très près de la surface.
- Au sens cinématique, comme étant l'épaisseur au travers de laquelle la différence de vitesse entre les deux premiers corps est accommodée.

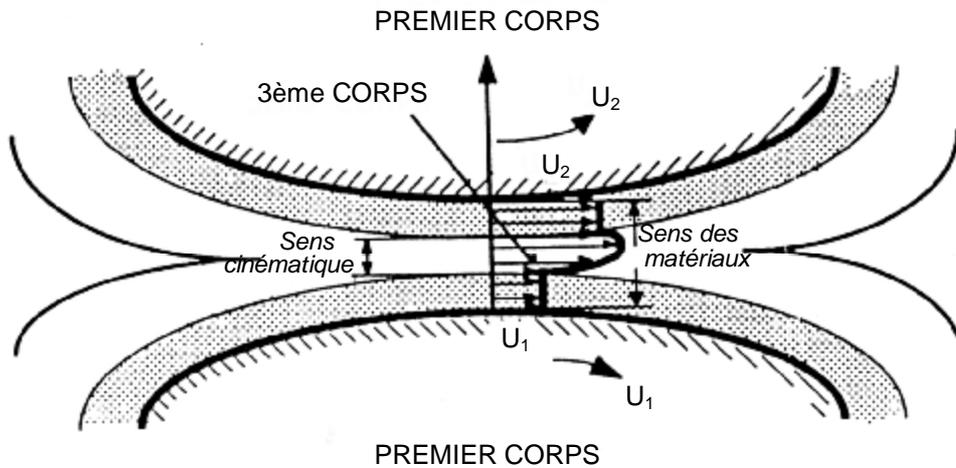


Figure 10 : Troisième corps

Les modes d'accommodation de déplacement

Chaque site présente quatre modes d'accommodation de déplacement (figure 11)

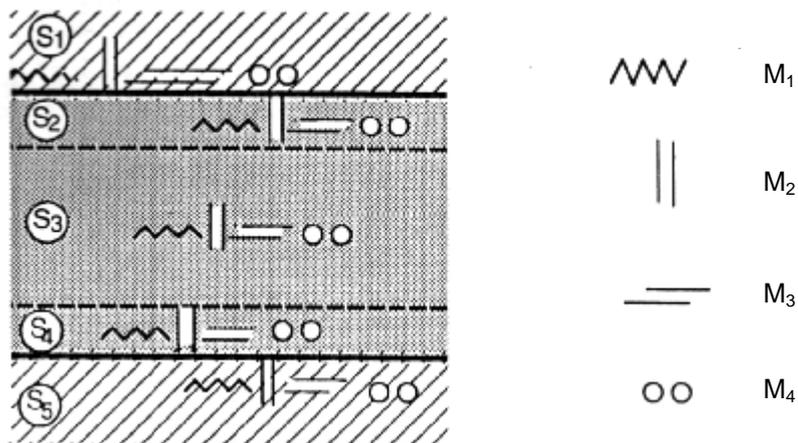


Figure 11 : Site et modes d'accommodation de déplacement

III.3.2. Conclusion

Nous nous bornerons à constater qu'au cours des 40 dernières années, la tribologie est passée[5] :

- De la tribologie des volumes qui consistait à faire frotter un corps contre un autre et à en tirer des lois de frottement et d'usure,

- Par la tribologie des surfaces qui a vu l'introduction de la physique des surfaces dans cette discipline[4].

- A la tribologie des interfaces qui se focalise sur le rôle de l'interface, ou troisième corps qui sépare les deux éléments frottant ou premiers corps [2, 3].

Ce constat nous indique que toute étude mécanique moderne fondamentale ou appliquée, et qui s'inscrit dans la finalité énoncée ci-dessus, doit être centrée sur l'action du troisième corps. Par ailleurs, pour passer de l'aspect statique à l'aspect dynamique du problème, elle doit également s'interroger sur la façon dont ces troisièmes corps participent à l'accommodation de la différence de vitesse entre les deux premiers corps. Elle se rapproche ainsi de la démarche utilisée en lubrification qui déduit des équations de Navier-Stokes le champ de vitesse parabolique caractéristique des films minces, champ qui nous apprend comment le film d'huile accommode lui-même une différence de vitesse.

IV- LES SURFACES ET QUANTIFICATION DES PROFILS DE SURFACES

IV.1- Généralités

Les surfaces industrielles ne sont ni absolument planes ni absolument lisses. Leur planéité et leur rugosité dépendent de leur mode de génération. Ce qui revient à dire que les défauts surface se situent à différentes échelles. Toute norme ou classification est arbitraire mais on retrouve souvent la classement suivant qui a le mérite d'attribuer à chaque classe de défaut une origine physique ou mécanique, sinon une gamme de dimensions [12, 13].

- Ecart de forme (défaut du premier ordre)

Il s'agit d'un défaut global de la pièce. Il s'exprime en terme des dimensions principales de cette pièce. Il peut être dû à un manque de précision de la machine-outil, à une erreur de positionnement etc.

- Ondulation (défaut du deuxième ordre)

Ce défaut possède un caractère périodique dû par exemple au procédé d'usinage, ou introduit par une perturbation vibratoire.

- Rugosité (défauts du troisième au cinquième ordre)

Ce défaut est directement lié à la méthode d'usinage de pièce et à l'état des outils employés.

- Défaut cristallographique (défaut du sixième ordre)

Ce défaut est lié aux défauts d'arrangement cristallin.

Les trois premiers défauts intéressent le mécanicien, et en dernier lieu le physicien.

Retenons que la topographie d'une surface est aussi complexe que celle de la terre et que seule une vue tridimensionnelle telle qu'elle est présentée dans le chapitre IV, est fidèle. Malheureusement, l'obtention d'une telle vue est d'abord très coûteuse et difficile à exploiter une fois obtenue. Il faut toutefois quantifier ces défauts pour à terme obtenir une vue plus précise des contacts mécaniques. Nous verrons qu'un contact lisse est en effet très différent d'un contact rugueux [32].

IV.2. Quantification

Il existe plusieurs techniques de quantification de surfaces. On comprend facilement que le "rendu" numérique d'une surface représentative du type de celle présentée dans la figure 12 soit à l'origine d'un nombre impressionnant de chiffres dont le bon usage n'est pas évident. Nous aborderons d'abord les techniques de mesures, puis le traitement des données obtenues.

Mesures profilométriques

Nous nous limiterons uniquement aux mesures profilométriques. Le profilomètre est forme d'un bras de pick-up qui comprend un guide et une pointe. Comme dans un pick-up, la pointe suit les infractuosités de la surface. Le mouvement du bras est amplifié électroniquement, ce qui fournit le signal qui peut ensuite être traité de différentes façons. Rappelons toutefois quelques limitations de cette technique qui :

- Fournit une vue bidimensionnelle $h=f(x)$ (figure 12) de la surface. Cette limitation peut être contournée en faisant faire au palpeur à intervalles réguliers de la surface des passes parallèles.
- Ne reconnaît pas un pic donné par le signal, d'un sommet d'aspérité. Le palpeur en effet enregistre la hauteur du point de l'aspérité qui se trouve sur sa trajectoire et pas nécessairement la point le plus haut (ou sommet) de l'aspérité.
- Introduit une filtration mécanique du signal lié entre autres au diamètre de la pointe de palpeur.
- Ne peut s'appliquer qu'aux surfaces "dures" à cause de pressions exercées par la pointe sur la surface.
- Déforme le profil de la surface car l'amplification verticale est sensiblement plus élevée que l'amplification horizontale.

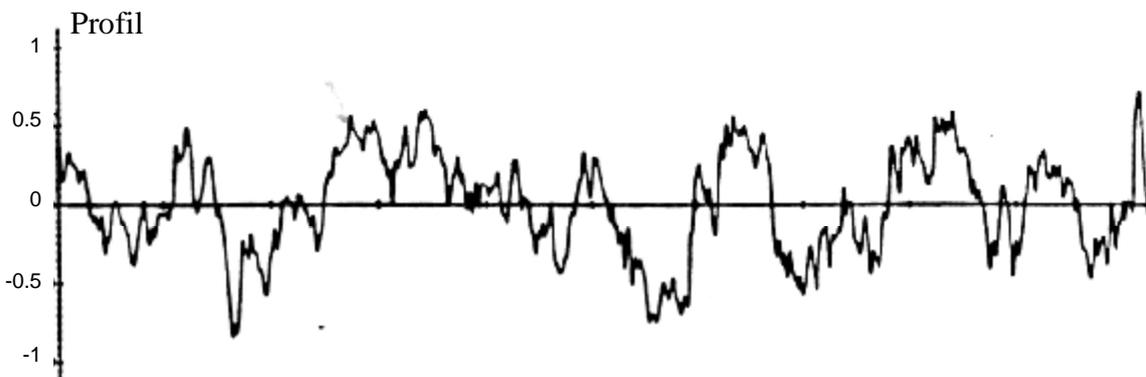


Figure 12 : Profil bidimensionnel

IV.2.1. Statistique des hauteurs

Soit un profil représenté par la fonction $y=f(x)$ qui, discrétisé, devient $y_i=f(x_i)$. Nous appelons "ligne moyenne" une droite telle que les intégrales du profil au dessus et au dessous de cette ligne soient égales [13]. Si l est la longueur du profil étudié, l'ordonnée y de cette ligne par rapport au repère de mesure est :

$$y_o = \frac{1}{l} \int_0^l y \, dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

On peut donc calculer les nouvelles valeurs de y par rapport à la moyenne :

$$y_i(1) = y_i(0) - y_0$$

Et l'on définit :

La moyenne arithmétique (R_a ou C.L.A.) :

La hauteur maximale ou plus grande distance entre crête et creux (R_t)

$$R_t = y_{\max} - y_{\min}$$

L'écart-type (R_{ms} ou moment d'ordre 2) :

$$R_{ms} = \sqrt{s^2} = s \quad \text{où} \quad s^2 = \frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y^2|$$

Les moments d'ordre n

$$m_n = \frac{1}{l} \int_0^l y^n dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y^n$$

Les symboles R_{ms} , R_a et R_t sont souvent utilisés soit seuls soit deux à deux (R_a et R_t ou R_{ms} et R_t) pour caractériser une surface. On dira par exemple d'une surface rectifiée très courante ou elle a un R_a et un R_t respectivement de 0.8 et de 4 microns. Rappelons que ces trois critères sont établis uniquement à partir de hauteurs et que les mêmes valeurs "caractérisent" des surfaces bien différentes (figure 13).



Figure 13 : Surfaces dont les R_a sont identiques

IV.2.2. Courbes d'Abbott et Firestone

Il importe donc de distinguer entre les courbes dites en u et en m illustrées respectivement dans la figure 13 par les dessins, qui représentent des cas limites. Cette distinction se fait à partir de la courbe d'Abbott et de Firestone qui est construite comme indiqué dans la figure 14. Cette figure donne à gauche un profil quelconque, et à droite la courbe d'Abbott correspondante.

La figure 15 donne l'allure des courbes d'Abbott déduites de surfaces en u et en m. Notons au passage que le volume de la surface, ou volume délimité par les rugosités est beaucoup plus important dans les surfaces en u qu'en m et que cette distinction est importante dans les problèmes de frottement sec qui sont contrôlés par la rétention par la surface des débris d'usure. Notons également que la distribution des pressions de contact sera très différente dans les deux cas. L'information fournie par la courbe d'Abbott est distincte de celle donnée par les différents critères R. Elle ne donne toutefois aucune information sur les pentes des aspérités.

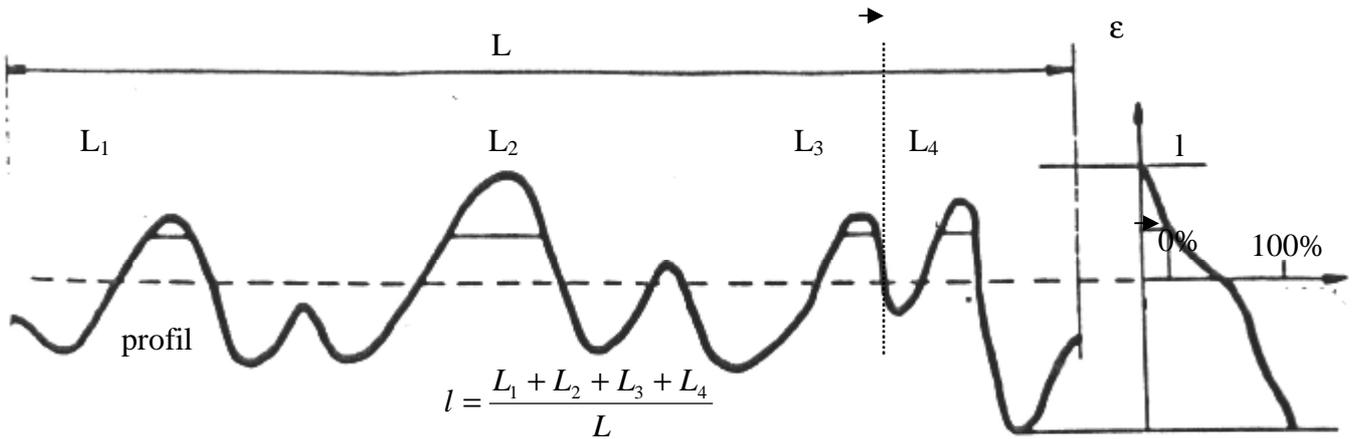


Figure 14 : Courbe d'Abbott et de Firestone

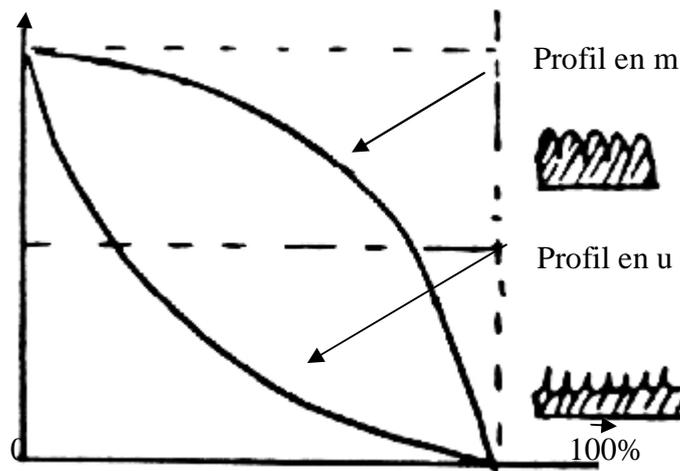


Figure 15 : Courbes en u et m

IV.2.3. Statistiques des pentes

On sait que les pentes des surfaces conditionnent largement le bon fonctionnement des mécanismes et que ceci est particulièrement vrai en lubrification où l'effet d'entraînement (coin d'huile) est gouverné entre autres par la variation d'épaisseur du film. Les pentes peuvent être calculées en chaque point du profil par dérivation d'une interpolation parabolique. Ce calcul se fait en utilisant les matrices d'interpolation de Lagrange. Les valeurs obtenues peuvent, ensuite, être traitées statistiquement comme les hauteurs.

IV.2.4. Statistiques des pics

Les pics doivent être identifiés. Ils peuvent l'être en calculant la dérivée seconde de la parabole d'interpolation définie ci-dessus et en notant les abscisses correspondant au changement de signe de cette dérivée.

Une fois identifiée, on peut faire la statistique de la hauteur des pics qui est forcément différente de celle du profil. Enfin, les rayons de courbure des pics peuvent être déduits des fonctions d'interpolation. Ils gouvernent évidemment les pressions au contact [11].

IV.2.5. Transformée de Fourier

Cette transformée assure le passage d'une représentation amplitude-espace à une représentation amplitude-fréquence (ou longueur o onde), elle s'écrit :

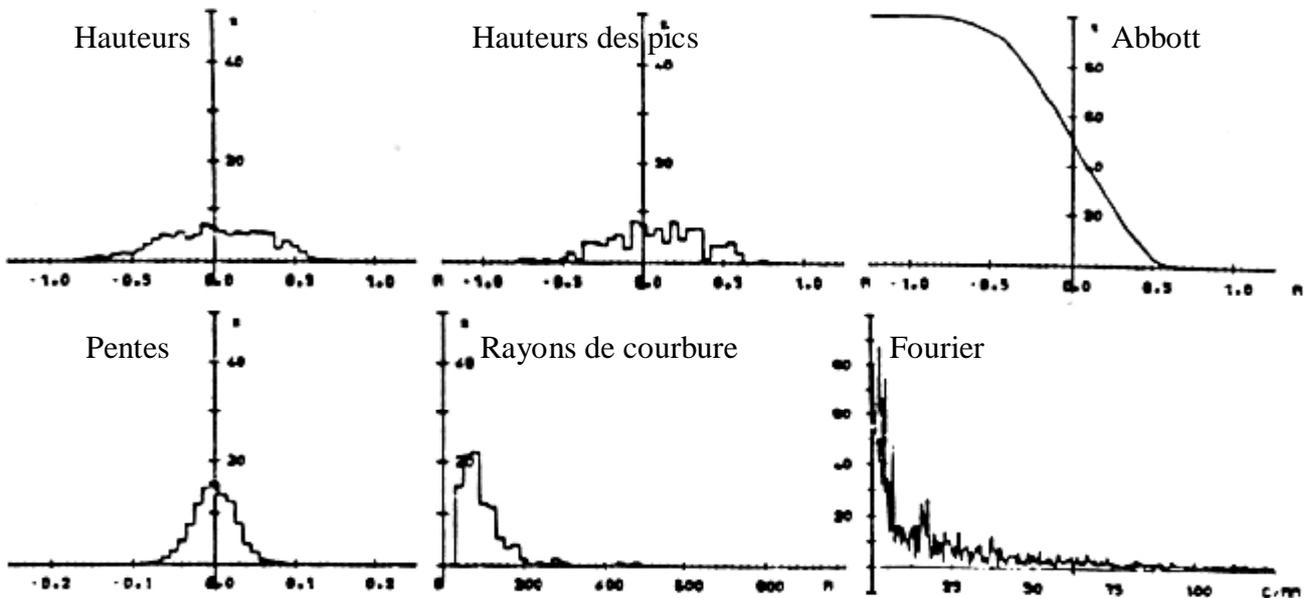
$$y(f) = \int_{-a}^{+a} y(x) e^{-2ipf(x)} dx$$

Et permet de décomposer le signal dans ces composantes fondamentales et d'en étudier ultérieurement les effets individuels.

IV.2.6 Exemple

Les figures suivantes représentent le profil de la figure 12 :

- La distribution des hauteurs.
- La distribution des hauteurs des pics.
- La courbe d'Abbott.
- La distribution des pentes.
- La distribution des rayons de courbure.
- La distribution en fréquence.



Chapitre II

Matériaux pour outils de coupe et tribologie des contacts.

I. GENERALITES

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau qui constitue l'arête de coupe : ténacité et résistance à l'abrasion [71].

D'une manière générale, un matériau est d'autant plus tenace que les contraintes, statiques ou dynamiques (chocs), provoquant sa rupture sont plus élevées. Plus précisément, on caractérise cet aspect des matériaux de coupe par leur ténacité K_{Ic} , facteur critique d'intensité de contrainte, provoquant la propagation de fissure, leur contrainte de rupture en flexion σ_{rf} ou leur résilience (rupture par chocs) (tableau 1).

Tableau N°1 : Propriétés physiques de quelques matériaux de coupe

Propriété	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la rupture en flexion (Mpa)	Dureté Vickers (HV ₃₀)	Coefficient de dilatation linéique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Conductivité thermique à 20°C (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Ténacité K_{Ic} (MPa. m ^{1/2})
Aciers rapides HS 6-5-2 HS 2-9-1-8	8 160 8 000	217 217		800 à 920 950 à 1100	12,5 12	19 19	
Carbures métalliques WC+Co K10 WC+TiC+Ta(Nb)C+Co P10	14800 à 15000 10000 à 11500	630 à 650 530 à 550	1500 à 1600 1000 à 1500	1600 à 1800 1500 à 1700	5,5 6	80 35	13 10
Céramiques Alumine Al ₂ O ₃ Alumine+zircone Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ Alumine+Whiskers SiC Al ₂ O ₃ +SiC Alumine+carbure de Ti Al ₂ O ₃ +Tic Nitre de silicium Si ₃ N ₄	3900 4100 3700 4200 3200	400 365 390 410 310	400 à 600 600 à 800 700 à 900 700 à 900 800 à 1000	2400 1700 1800 à 2000 2200 à 2600 1500 à 1600	8 9 à 10 7 à 8 8 à 8,5 3	25 à 30 15 à 25 35 25 à 30 20 à 30	4 à 6 5 à 7 6 à 9 5 à 7 5 à 7
Cermets TiCN+Mo ₂ C+WC+VC+TaC+NbC+(Ni,Co)	6000 à 8000	390	1500 à 2000	1500 à 1700	7 à 8	18	
Diamants Diamant naturelmonocristal Diamant synthétique .. PCD polycristallin(2) Nitre de bore cubique CBN polycristallin(2)	3520 3860 3100	1140 920 680	(1) 920 570	>9000 5000 à 8000 2500 à 4000	3,1 3,6 à 6 5	600 à 2000 560 80 à 120	3 à 4 8 à 9 6

Mesures effectuées à 20°C sur outil.

(1) Valeur non disponible sur outil de coupe.

(2) Pour les matériaux polycristallins, les caractéristiques sont fonction du taux de liant présent dans le compact.

A noter que les contraintes auxquelles sont soumis les outils de coupe ont une double origine : contraintes mécaniques (effort de coupe) et contraintes thermiques (dilatation, évolution des caractéristiques intrinsèques, chocs ou fatigue thermique).

La ténacité et la résistance à l'abrasion sont des qualités contradictoires.

La résistance à l'abrasion est toutefois prépondérante pour le travail à grande vitesse de coupe. Elle dépend de la composition chimique du matériau – qui, avec le mode d'arrosage, détermine la valeur du frottement – et surtout de sa dureté à chaud (figure 2) qui limite les effets de celui-ci et qui doit être, à la température de coupe, de HRC 50 à 55 pour l'usinage de l'acier.

Plusieurs matériaux conservant cette dureté à des températures de plus en plus élevées (figures 2a) ont été successivement introduits depuis 1900 (figure 3), permettant chaque fois des vitesses plus grandes et nécessitant des machines-outils plus puissantes et plus rigides.

On emploie donc, pour l'arête de coupe des outils des machines-outils, les matériaux suivants classés en six groupes par ordre de dureté croissante (figure 2b) : aciers rapides, carbures, céramiques, cermets, diamants et nitrure de bore cubique polycristallin.

Avant d'aborder les matériaux constituant la partie coupante des outils, rappelons que certains aciers de construction sont souvent utilisés, pour des raisons d'économie, pour réaliser la partie non coupante des outils : queue de forets ou d'alésoirs, corps d'outils, etc. Si cette partie ne subit pas de frottement, elle peut être exécutée en acier mi-dur 2 C 45 (XC 48) non traité ou en acier 38 CrMo 4 traité à une dureté d'environ 300 HB (soit 315 HV ou $R = 1000$ Mpa). En revanche, si la partie non coupante est soumise à un frottement, comme par exemple le guide d'un alésoir à plaquettes brassées en contact avec le canon de guidage, le corps de l'outil est réalisé en acier 16 NiCr 6 cémenté-trempé. L'acier 30 CrMo 12 trempé-revenu et nitruré peut être utilisé pour la réalisation de corps de fraises à plaquettes amovibles.

II. MATERIAUX UTILISES

II.1 Aciers rapides

II.1.1 Différentes familles

Le mérite de l'invention des aciers rapides revient aux Américains Taylor et Whites en 1903 [35].

Il est important de souligner que pour chaque nuance d'acier rapide, il existe une limite à la qualification à la matière (par exemple, un outil de fraisage en nuance HS 6-5-2 ne pourra pas usiner dans des conditions d'usinage industriellement viable un acier de dureté supérieure à 350 HB). Malheureusement, il est très difficile d'établir des règles par défaut car ces valeurs dépendent du type d'outil (foret, fraise, alésoir ...) entre autres; seuls les essais couple outil/matière peuvent mettre en évidence ces limites.

II.1.1.1 Aciers rapides au tungstène

Le tungstène a été le premier élément d'addition principal utilisé. L'acier de base HS 18-0-1 a été longtemps le plus employé.

C'est en 1912 que l'Allemand Becker proposa l'addition de 5 % de cobalt et créa la nuance HS 18-1-1-5. Le rôle du cobalt est de stabiliser les carbures à chaud. La dureté à chaud s'en trouve donc améliorée et, par conséquent, la capacité à supporter les vitesses de coupe plus élevée.

II.1.1.2 Aciers rapides au molybdène

Bien que découverts vers 1910, les aciers rapides au molybdène n'ont connu leur développement qu'à partir de 1945, en raison de la pénurie de tungstène durant la seconde guerre mondiale.

Ce développement tardif est dû au risque de décarburation et de démolybdénisation de ces aciers, tant au cours de leur fabrication qu'au cours des traitements thermiques, ainsi qu'à leur susceptibilité à la surchauffe due à un domaine de température d'austénitisation très étroit.

Alors que les aciers rapides au tungstène peuvent être traités dans des fours à air, les aciers rapides au molybdène nécessitent des traitements thermiques en bains de sel ou en four sous vide.

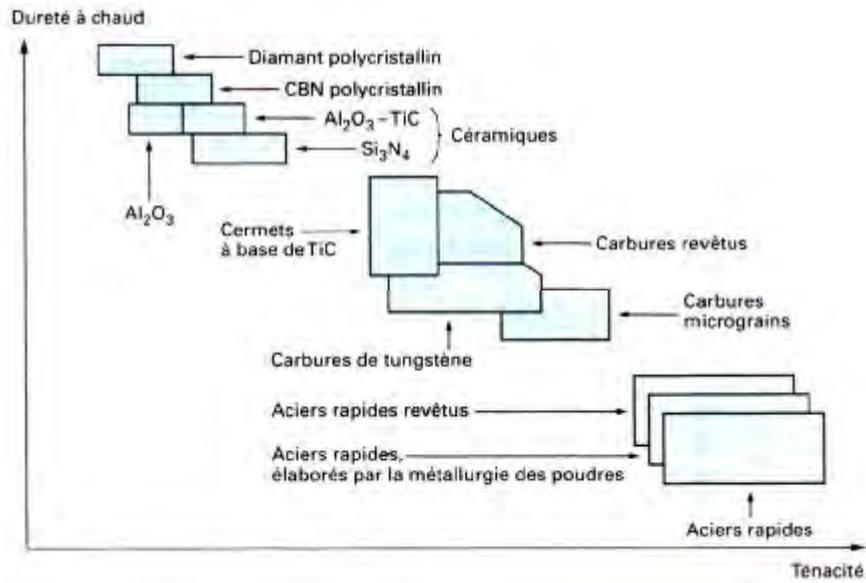
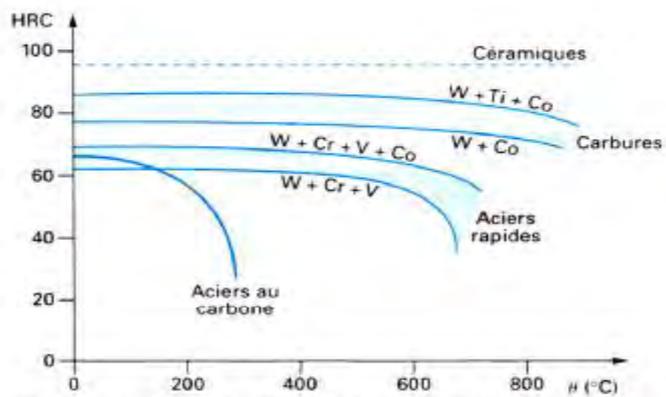
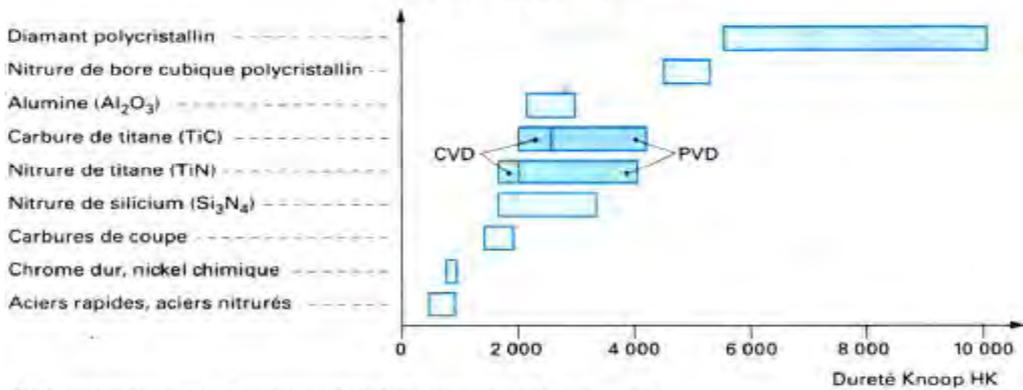


Figure 1 : Comparaison de matériaux de coupe



(a) diagramme de Saint-Clair : influence de la température sur la dureté des matériaux



CVD *chemical vapor deposition* (dépôt chimique en phase vapeur)
 PVD *physical vapor deposition* (dépôt physique en phase vapeur)

(b) échelle de dureté Knoop à 20 °C

Figure 2 : Dureté des matériaux constituant l'arête de coupe

Matériaux pour outils de coupe et tribologie des contacts.

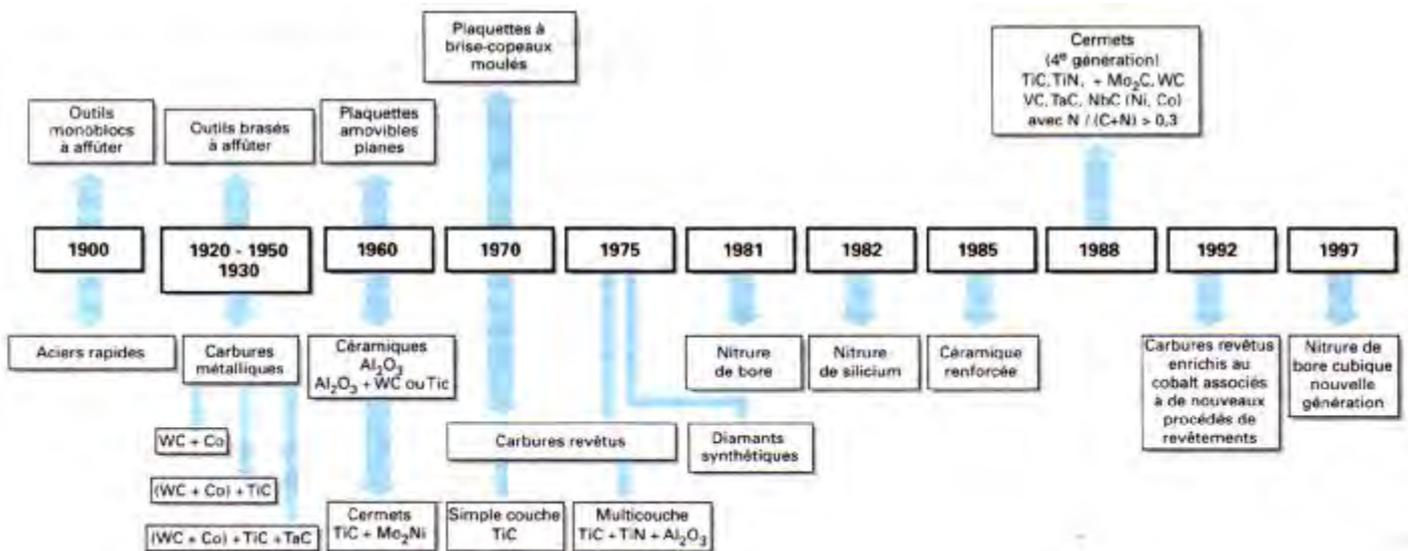


Figure 3 : Dates d'apparition des matériaux de coupe sur le marché européen

Les avantages des aciers rapides au molybdène par rapport à ceux au tungstène sont importants :

- le molybdène est plus abondant dans la nature que le tungstène;
- le molybdène a une influence double de celle du tungstène sur les capacités de coupe de l'acier : 1 % de molybdène remplace 2 % de tungstène;
- il est possible d'obtenir des duretés plus élevées avec les aciers au molybdène et, à dureté égale, leur résistance aux chocs est supérieure à celle des aciers au tungstène;
- le prix de revient des aciers au molybdène est sensiblement inférieur à celui des aciers au tungstène.

La nuance HS 2-9-1-8 est, actuellement la plus employée des nuances d'aciers rapides à l'exception des outils pour opérations axiales (foret, taraud) pour lesquels la nuance HS 6-5-2-5 est également très employée.

II.1.1.3 Aciers rapides surcarburés :

Les aciers rapides surcarburés, c'est-à-dire ceux dont la teneur en carbone est supérieure à 1 %, permettent d'obtenir des duretés allant jusqu'à 70 HRC soit environ 1035 HV (figure 4). La limite de dureté des matériaux usinables a par suite été reculée. C'est ainsi que l'on peut usiner des aciers jusqu'à 52 HRC (soit environ 550 HV).

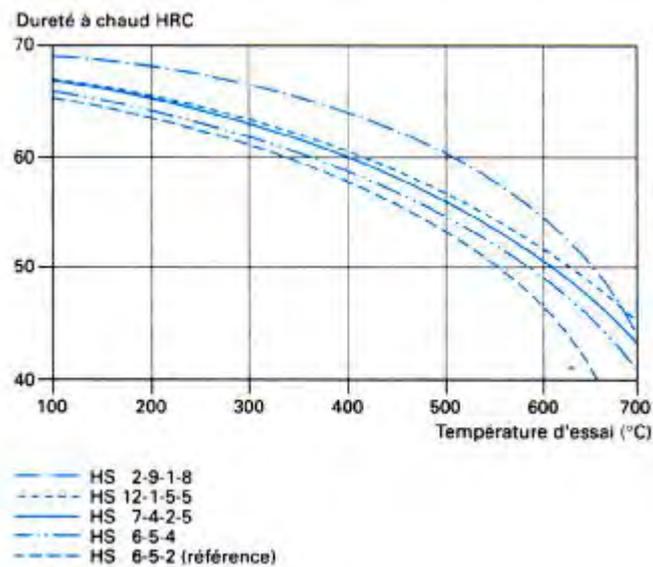


Figure 4 : Dureté de quelques aciers rapides surcarburés en fonction de la température

Parmi les nuances d'aciers rapides surcarburés les plus employées, citons :

HS 6-5-4 ou M4 (AISI)

HS 7-4-2-5 ou M41 (AISI)

HS 2-9-1-8 ou M42 (AISI)

HS 12-1-5-5 ou T15 (AISI)

A noter que les aciers à teneur en vanadium supérieure à 3% (HS6-5-4 et HS 12-1-5-5) sont très difficiles à rectifier ou à affûter. Les meules au nitrure de bore (type Borazon) se révèlent toutefois efficaces dans ce cas.

**Tableau N° 2 : Composition chimique des principales nuances d'aciers
rapides normalisées**

Désignation de la nuance	Composition chimique (%)						
	AISI	C	Cr	W	Mo	V	Co
EN 10027-1							
Aciers de base							
HS 18-0-1	T1	0,80	4	18		1,1	
HS 6-5-2	M2	0,85	4	6	5	2	
HS 2-8-1	M1	0,85	4	2	8	1,2	
HS 2-9-2	M7	1,00	4	2	9	2	
Aciers surcarburés							
HS 6-5-3	M3 type2	1,20	4	6	5	3	
HS 6-5-4	M4	1,30	4,5	6	5	4	
Aciers au cobalt							
HS 18-1-1-5	T4	0,80	4	18	0,8	1,3	5
HS 18-0-2-10	T5	0,80	4	18		1,5	10
HS 6-5-2-5	M35	0,85	4	6	5	2	5
Aciers au cobalt à haute teneur en carbone							
HS 7-4-2-5	M41	1,10	4	7	4	2	5
HS 2-9-1-8	M42	1,10	4	1,6	9	1,1	8
Aciers sur carburés au cobalt							
HS 12-1-5-5	T15	1,60	4,5	12	0,8	5	5
HS 10-4-3-10	-	1,30	4	9,5	3,6	3,2	10
HS 7-6-3-12	M44	1,30	4	7	6	3,2	12

Le tableau N°2 fournit les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'aciers rapides normalisées en France.

Le tableau N°3 compare les propriétés d'emploi des nuances d'aciers rapides les plus courantes. Avec l'aide du tableau 2, on observe l'influence sur les propriétés de l'acier des divers éléments d'alliage, notamment du cobalt et du vanadium.

Tableau N°3 : Comparaison des caractéristiques d'emploi des nuances les plus courantes d'aciers rapides (en unités arbitraires)

Désignation de la nuance (en 10027-1)	Résistance à l'usure	Ténacité	Dureté à chaud	Aptitude au meulage
HS 6-5-2	5	7	4	8
HS 6-5-4	8	5	7	2
HS 6-5-2-5	5	5	7	6
HS 2-9-1-8	8,5	5	9	5,5
HS 18-0-1	4	6,5	4	8
HS 18-1-1-5	5	4	7	6
HS 12-1-5-5	9	2,5	8	1
La caractéristique considérée est notée de 1 (médiocre) à 10 (excellente).				

II.1.1.2 Aciers rapides resulfurés :

Alors que le soufre résiduel est considéré comme une impureté et maintenu à des teneurs inférieures à 0,03% dans les aciers de base, il peut parfois être ajouté dans certaines nuances d'aciers rapides pour en améliorer l'aptitude à l'usinage et au meulage. Il s'agit, en général, d'une addition comprise entre 0,10 et 0,20%. Cette resulfuration permet d'améliorer considérablement l'état de surface après usinage des outils. En revanche, la ténacité s'en trouve défavorablement affectée, surtout dans le sens transversal au fibrage.

Les aciers rapides resulfurés sont utilisés pour la fabrication d'outils à profil constant, pour lesquels un bon état de surface est exigé sans rectification (molettes de tournage, fraises mères à denture non rectifiée, fraises pour entrées de denture, etc...)

II.1.1.5 Aciers rapides élaborés par métallurgie des poudres :

Cette technique permet d'obtenir des compositions chimiques et des finesses de structure non réalisables par les méthodes d'élaboration conventionnelles.

Ce type d'acier rapide est actuellement largement développé. Certaines nuances surcarburées fortement alliées en cobalt et en vanadium comblent le domaine d'application qui séparait les aciers rapides conventionnels des carbures de coupe.

Par rapport aux nuances conventionnelles, les aciers rapides élaborés par la métallurgie des poudres présentent les avantages suivants :

- moindre déformation au cours du traitement thermique en raison de l'absence totale de ségrégation :
- très bonne aptitude à la rectification grâce à la finesse de la structure, notamment des carbures ;
- grande résistance à l'usure et haute dureté à chaud par la possibilité de réaliser des nuances à haute teneur en vanadium et en cobalt impossibles à élaborer ou à transformer par les procédés conventionnels ;
- très bonne ténacité et bonne isotropie, même pour des produits de forte section, grâce à la finesse et à l'homogénéité de la structure.

Le tableau 4 résume les compositions chimiques moyennes des principales nuances d'aciers rapides élaborées par la métallurgie des poudres actuellement disponibles. Ces nuances sont désignées par leurs appellations commerciales car, à ce jour, elles ne font l'objet d'aucune norme particulière.

II.1.2 Traitements de surface (diffusion et revêtements durs) :

Différents types de traitement des surfaces sont applicables aux outils en aciers rapides. Ces traitements consistent généralement à accroître la dureté superficielle de l'outil soit par diffusion d'un élément durcissant l'acier, soit par dépôt d'un matériau dur. Ils se pratiquent toujours sur des outils entièrement finis d'usinage.

Le but des traitements de surface est d'améliorer les performances des outils et donc d'abaisser le prix de revient des pièces usinées :

- soit par une meilleure tenue de l'outil permettant de réaliser davantage de pièces entre affûtages ;
- soit par un accroissement de la productivité en augmentant les conditions de coupe (avance, vitesse) tout en conservant une même tenue d'outil ;
- soit en diminuant l'usure, ce qui, à nombre de pièces usinées égal, permet un plus grand nombre de raffûtages en réduisant la quantité de matière enlevée à chaque affûtage.

Nous citons ici des traitements de surface qui représentent 95% des applications industrielles.

**Tableau N°4 : Composition chimique moyenne des principales nuances d'aciers rapides
élaborés par la métallurgie des poudres commercialisées en France**

Appellation commerciale (1)	Désignation type EN 10027-1	Composition chimique (%)					
		C	Cr	W	Mo	V	Co
ASP 23 (2)	HS 6-5-3	1,30	4	6	5	3	
ASP 30 (2)	HS 6-5-3-9	1,30	4	6	5	3	9
ASP 60 (2)	HS 7-7-7-11	2,30	4	6,5	7	6,5	10,5
CPM REX M4	HS 6-5-4	1,35	4,2	6	4,5	4	
CPM REX T15	HS 12-1-5-5	1,55	4	12		5	5
CPM REX 76	HS 10-5-3-9	1,50	3,7	10	5,2	3,1	9
S 390	HS 11-2-5-8	1,60	4,7	11	2	5	8
S 690	HS 6-5-4	1,35	4	6	4,5	4	

II.1.2.1 Nitruration

C'est un traitement thermochimique de diffusion consistant à enrichir, superficiellement l'acier en azote. L'azote diffuse dans l'acier et forme, avec les éléments d'alliage, des nitrures très fins qui produisent un durcissement structural. La dureté de base des aciers rapides, généralement de l'ordre de 800 à 900 HV, s'accroît alors superficiellement pour atteindre des valeurs supérieures à 1200 HV.

Les propriétés des couches nitrurées dépendent dans une large mesure de leur épaisseur et, pour conserver une ténacité convenable aux outils en aciers rapides, il ne faut pas que la profondeur durcie excède 50 µm.

Les deux principaux procédés de nitruration appliqués aux outils en aciers rapides sont la nitruration en bain de sels et la nitruration ionique.

II.1.2.1.1. Nitruration en bain de sels (parfois appelés cyanuration)

Ce procédé consiste à plonger les outils à nitrurer dans un bain à base de cyanures alcalins fondus à la température de 560°C. Ce traitement provoque la formation d'une couche extrême de combinaison de quelques micromètres d'épaisseur, riche en nitrures et en carbonitrures, et d'une couche sous-jacente de diffusion d'azote. La couche formée possède une excellente résistance à l'usure, au collage de copeaux et au grippage.

Des procédés brevetés, dérivés du principe général mentionné ci-dessus, ont pour appellation commerciale : Tenifer ou TF1 (Leybold Durferrit), Sulfunuz ou Sursulf (Hydromécanique et Frottement), etc.

II.1.2.1.2. Nitruration ionique

Ce procédé consiste à développer autour des pièces à traiter un plasma contenant des ions d'azote actifs qui viennent bombarder la surface des pièces. Ce bombardement se traduit pas un double effet :

- chauffage des pièces par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie calorique ;
- implantation d'ions dans l'acier, fournissant l'azote nécessaire à la formation des nitrures métalliques.

Les avantages de la nitruration ionique par rapport à la nitruration en bain de sels, pour le traitement d'outils coupants en aciers rapides, résident surtout dans la possibilité de traiter des outils de très grandes dimensions (certaines installations de nitruration ionique permettent de traiter des pièces jusqu'à 6 m de longueur), et de conserver l'état de surface initial des outils, même les plus fins (poli spéculaire par exemple).

Par ailleurs, il est possible, par le procédé de nitruration ionique, d'éviter la formation de la couche de combinaison fragile en surface.

II.1.2.2 Steam Homo

C'est un traitement d'oxydation superficielle dans la vapeur d'eau surchauffée. Pour les outils en aciers rapides, ce traitement se pratique à une température d'environ 560°C. A cette température, il se forme à la surface de l'acier, par réaction avec la vapeur d'eau, une couche adhérente d'oxyde de fer magnétique ($F_{e_3}O_4$) d'environ 2 μm d'épaisseur, conférant une couleur bleu noir aux outils.

Ce film d'oxyde ($F_{e_3}O_4$) peut améliorer la tenue des outils par deux effets :

- les microporosités de la couche d'oxyde qui produisent une rétention de liquide de coupe.
- La nature particulière de cet oxyde qui favorise le glissement du copeau et évite son adhérence sur l'outil.

Le traitement Steam Homo peut aussi se pratiquer sur des outils nitrurés. Il produit dans ce cas, outre ses caractéristiques propres décrites ci-dessus, une diffusion complémentaire de la nitruration.

II.2.1.2.3 Revêtement dur

Vers 1980 se développent les techniques de dépôt ionique permettant de déposer des couches dures de 2000 à 4000 HV tel que le nitrure de titane (TiN). Depuis, les méthodes de déposition de ces couches dures ont évolué ainsi que la nature des dépôts.

Il existe trois types majeurs de dépositions.

Procédé CVD (chemical vapor depositions)

Ce procédé, peu onéreux, s'effectue à haute température (de 950 à 1050°C). On réalise la déposition sur un substrat de molécules présentés dans un gaz mis dans une enceinte chauffée (figure 5). Une grande variété de revêtement est déposable, avec un bon accrochage sur le substrat. Compte tenu des températures élevées, tous les outils ne peuvent pas être revêtus par procédé CVD. Par exemple, il est impossible de mettre des outils en aciers rapides dans un four de dépôt CVD. Ce procédé génère des couches épaisses, de l'ordre de 4 à 8 µm d'épaisseur.

Procédé PVD (Physical vapor disposition)

Ce procédé, deux à trois fois plus cher que le CVD, s'effectue à basse température de (200 à 400°C). Des molécules présentes dans un plasma vont se déposer électriquement sur un substrat (figure 6). Ce procédé permet l'obtention de couches minces, de l'ordre de 1 à 2 µm d'épaisseur. Le revêtement des carbures et des aciers rapides est possible (basse température).

Procédé MTVD (medium temperature vapor deposition)

Afin de réunir les avantages des deux techniques précédentes, on a dû procéder à une combinaison de ces deux dernières pour créer le procédé MTVD. Par exemple, le cycle de revêtement d'une plaquette de coupe en carbure se déroule de la façon suivante : la surface de la plaquette est d'abord enrichie en cobalt, puis on réalise un dépôt de carbonitrure de titane (TiCN) par CVD suivi d'un dépôt de nitrure de titane (TiN) par PVD. Ce procédé, permet, notamment, d'augmenter la ténacité des plaquettes en carbure.

D'autres types de revêtements, tel l'alumine (Al_2O_3), peuvent également être déposés.

Le tableau 5 donne, pour les principaux revêtements utilisés aujourd'hui, les duretés et épaisseurs de couches possibles.

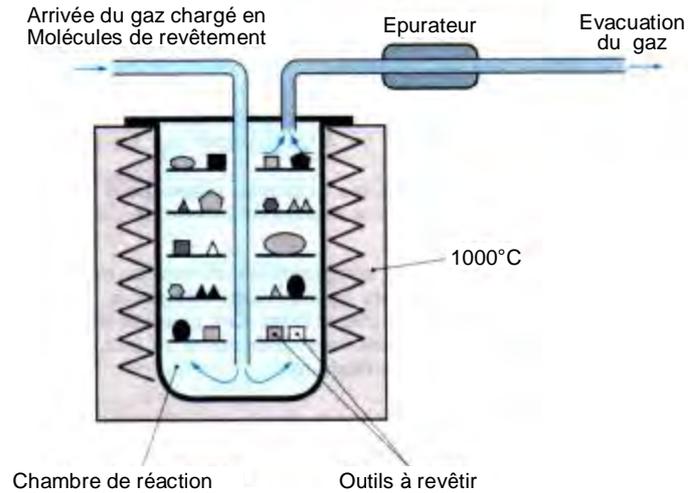


Figure 5 : Procédé CVD

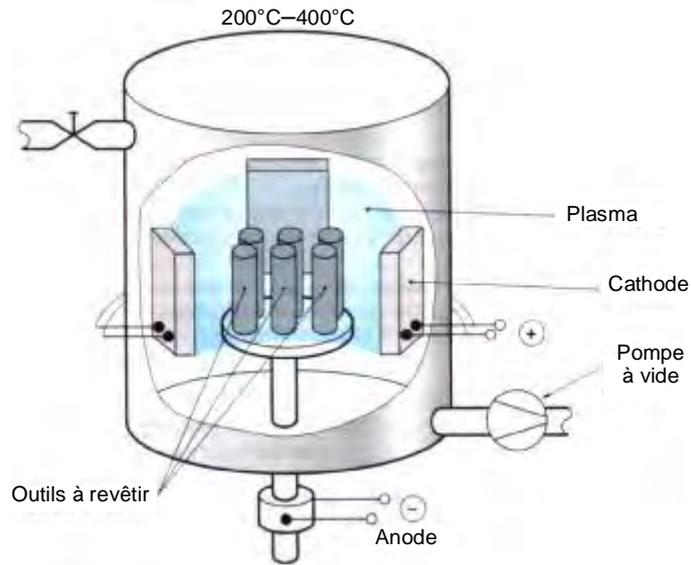


Figure 6 : Procédé PVD

De nouveaux revêtements sont en plein développement (par exemple MoS_2 , connu sous le nom commercial de MOVIC, Ti_2N , Ti_2CN).

Tous les types d'outils sont susceptibles de voir leurs performances améliorées par un revêtement. La nature du revêtement sera choisie en fonction de l'application (perçage, fraisage, tournage ...) et de la matière usinée. La démarche COM* a mis en évidence qu'il n'y avait pas de règles préétablies pour le choix d'un revêtement. Seuls les essais permettent de vérifier l'adéquation du revêtement à l'application. De plus, la comparaison des performances

* Norme NFE66-520 (concep

entre un outil non revêtu et un outil revêtu ne doit être réalisé qu'après vérification que les paramètres sont équivalents, donc comparables.

Exemple : la figure 7 montre qu'une telle comparaison qui n'a pu être menée après s'être assuré que le point $V_c = 25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (vitesse de coupe) et $f = 0,1 \text{ mm} \cdot \text{tr}^{-1}$ (avance) était autorisé pour tous les produits testés.

Tableau N°5 : Dureté et épaisseur des principaux dépôts (1)

Dépôts		Dureté HV	Epaisseur (mm)
CVD	TiN	2000 à 5000	3
	TiC	3000 à 3500	2 à 3
	Ti(C, N)	2500 à 3100	3
	Al ₂ O ₃	2500 à 3100	3
	CBN	3000 à 4000	3
	Diamant	7000 à 10000	5 à 10
PVD	TiN	2000 à 2500	3 à 5
	Ti (C, N)	3000 à 3400	3 à 5
	(Ti, Al)N	2000 à 2400	3 à 5
	CrC	1850	3
	CrN	1750 à 2900	3

(1) Le procédé MTVD est encore trop récent pour fournir de telles données numériques.

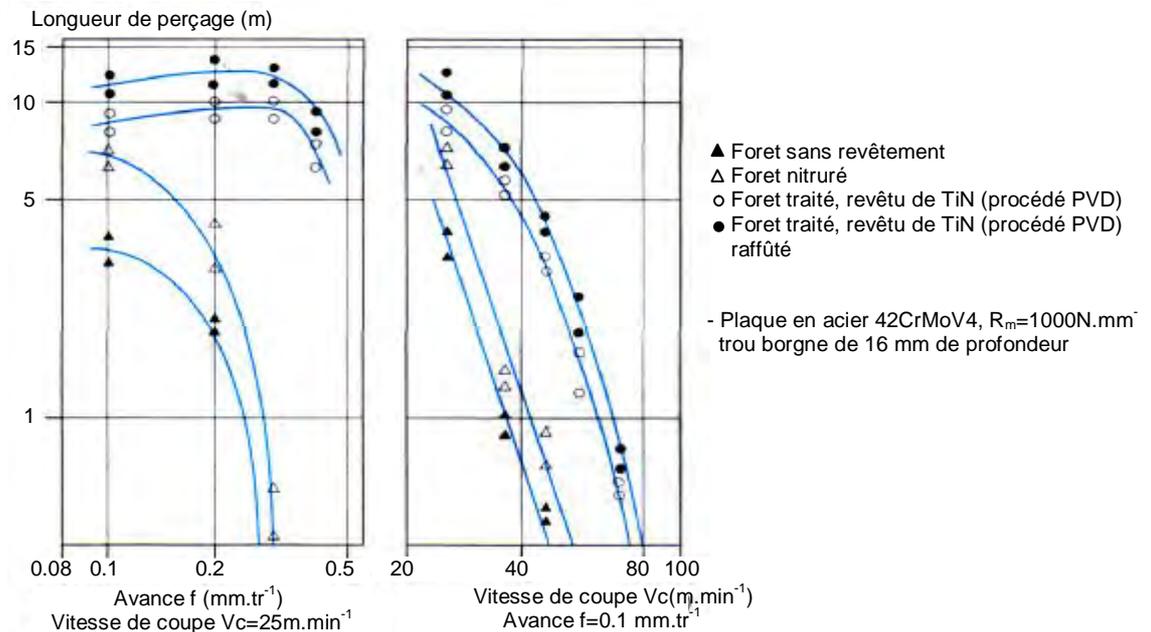


Figure 7 : Exemple de l'influence du revêtement sur la tenue d'un foret

II.1.3 Essais en laboratoire sur la capacité de coupe

Mathon [33] a comparé la capacité de coupe de huit aciers rapides suivant la méthode par dressage accéléré qu'il avait imaginée pour déterminer l'usinabilité des aciers de construction (NF A 03-654).

Cet essai "Mathon" est aujourd'hui beaucoup trop restrictif par rapport aux applications industrielles des outils. De plus, cela est très dangereux, les paramètres de coupe étant figés, rien ne garantit qu'ils soient autorisés pour l'outil testé. La seule méthode fiable de comparaison de performance des aciers rapides est la méthode couple outils / matière, une comparaison ne sera efficace que si elle est réalisée avec des données comparables. Par exemple, un des paramètres du COM est V_{cmin} , c'est-à-dire la vitesse de coupe ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) en dessous de laquelle il ne faut pas descendre sous peine d'un mauvais fonctionnement de l'outil. L'expérience montre que ce V_{cmin} dépend, entre autres, du couple nuance de coupe-matière usinée. Ce qui veut dire que deux nuances d'acier rapide n'auront pas le même V_{cmin} dans la même matière usinée. La comparaison de ces deux nuances ne pourra donc s'effectuer qu'aux vitesses de coupe supérieures à la plus grande des deux vitesses minimale de coupe.

Il est donc impératif, avant d'effectuer des essais comparatifs de deux nuances d'aciers rapides, de s'assurer que les comparaisons seront réalisées dans des zones communes à l'emploi des deux nuances.

II.1.4 Applications

Aussi bien en fraisage que pour les opérations axiales (foret, taraud, alésoir), les aciers rapides représentent encore l'essentiel des ventes. Mais on constate depuis 1997 environ une augmentation de l'utilisation de carbure métallique monobloc. Cependant, certains outils en acier rapide ne peuvent pas être remplacés pour l'instant, tels que les forets série extralongue, ou les fraises à hauteur de coupe très importante (série longue, extralongue et au-dessus), utilisées dans l'aéronautique par exemple.

II.2 Carbures métalliques :

Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaire, la partie active de ces outils étant raffûtée au fur et à mesure de son usure.

Vers 1958 ont été créés les outils à plaquettes amovibles (figure 8). Ce type d'outil a été rapidement adopté car les avantages des plaquettes amovibles sont nombreux :

- suppression de l'affûtage;

- absence de brasure, donc une nuance plus dure peut souvent être utilisée (risque de crique éliminé);
- conditions de coupe plus sévères;
- indexage (repérage mécanique) de la plaquette, pour remplacer une arête usée ou un changement de nuance plus rapide que le changement d'un outil brasé ;
- affilage d'arête recommandé dans le tournage de l'acier, exécuté d'une façon automatique par le fabricant de plaquettes alors que, pour l'outil brasé, il est réalisé à la main par l'opérateur.

II.2.1 Carbures métalliques sans revêtement :

La dureté des carbures métalliques (environ 1500 à 2500 HV), très supérieure à celle des aciers rapides non surcarburés (HRC 66 soit environ 865 HV), jointe à une résistance importante (résistance à la flexion de 800 à 2.200 Mpa) (tableau 1) explique qu'ils sont plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1000°C.

La symbolisation des carbures a fait l'objet de la recommandation NF E 66-3.4 (ISO 513), les nuances y sont divisées en trois grandes catégories :

P : métaux ferreux à copeaux longs ;

M : métaux ferreux à copeaux longs, à copeaux courts et métaux non ferreux.

K : métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et matières non métalliques.

Dans chaque catégorie, un nombre allant de 01 à 50 indique la ténacité croissante et la diminution de la résistance à l'usure.

Les nuances modernes de carbures étant, de plus en plus, polyvalentes et performantes, il devient difficile de les classer ainsi. Cela implique des difficultés croissantes pour établir des équivalences directes entre fabricants. La notion COM est là encore indispensable pour classer et comparer les performances des différents carbures.

Il est important de noter que l'emploi de nuance de carbure non revêtu a quasiment disparu pour certaines technologies telles que les plaquettes amovibles de tournage.

Par contre, les carbures métalliques non revêtus sont de plus en plus employés pour certains types d'outils en remplacement de l'acier rapide. On peut citer : foret en carbure monobloc, forêt à insert rapporté en carbure, alésoir à plaquettes, alésoir monobloc, taraud insert brasé pour les outils de décolletage ...

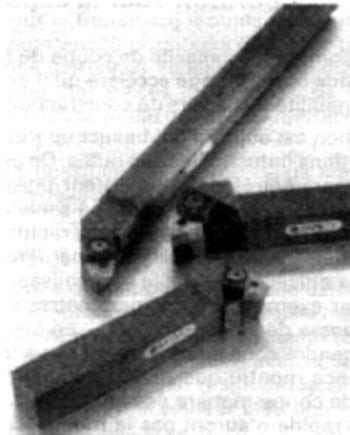


Figure 8 : Outils à plaquettes amovibles (document safety)

II.2.2 Carbures métalliques avec revêtement

A partir de 1959 apparaît un nouveau type de matériau de coupe : le carbure revêtu constitué par une plaquette en carbure métallique recouvert par un film mince (3 à 10 μm) d'un matériau de coupe (2000 à 3000 Knoop).

Les couches les plus usuelles sont le carbure de titane, le nitrure de titane, le carbonitrure de titane et l'alumine (tableau 6). Chacune de ces couches apporte à l'outil une amélioration dans un domaine particulier (résistance à l'usure, à l'oxydation, au frottement, etc.). Aussi des dépôts multicouches ont-ils été réalisés afin de combiner leurs différents avantages. Des revêtements à base de nitrure de hafnium et de carbure de chrome ont été également commercialisés.

Tableau 6 : Comparaison des propriétés de certains revêtements

Matériau revêtement	de	Résistance à l'usure	à	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC		●●●●●		●	●	●●●
TiN		●●●		●●●	●●●	●●●●●
Ti (C, N)		●●		●●	●●	●●●●
Al ₂ O ₃		●●●●		●●●●●	●●●●●	●●
HfN		●●●		●●●●	●●●●	●●●●
● Indique la valeur la plus faible et ●●●●● indique la valeur la plus forte.						

Ces couches sont obtenues généralement par CVD dans des fours entre 800 et 1100°C, ce qui permet d'obtenir des dépôts de très bonne adhérence.

Pour certaines applications comme le fraisage, ces dépôts sont parfois réalisés à basse température par PVD afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure.

Les nouvelles générations de plaquettes amovibles en carbure revêtu sont généralement très complexes. Le substrat est dit enrichi au cobalt, ce qui signifie que le taux de cobalt est différent au cœur et en périphérie de la plaquette. Cela permet d'améliorer la résistance à l'usure d'où une meilleure résistance aux fortes vitesses de coupe tout en conservant une ténacité acceptable. Ensuite, le substrat est revêtu. Le nombre de couches varie d'un fabricant à l'autre. Il peut aller de deux à dix en moyenne, généralement réalisées par procédé CVD ou MTVD. Contrairement au premiers carbures, il est maintenant impossible de dissocier le substrat du revêtement. Les substrats sont en effet conçus pour recevoir certains types de revêtements, ou au contraire pour être non revêtus.

II.3 Céramiques

Les céramiques (figure 9) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles au chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le tableau 7.

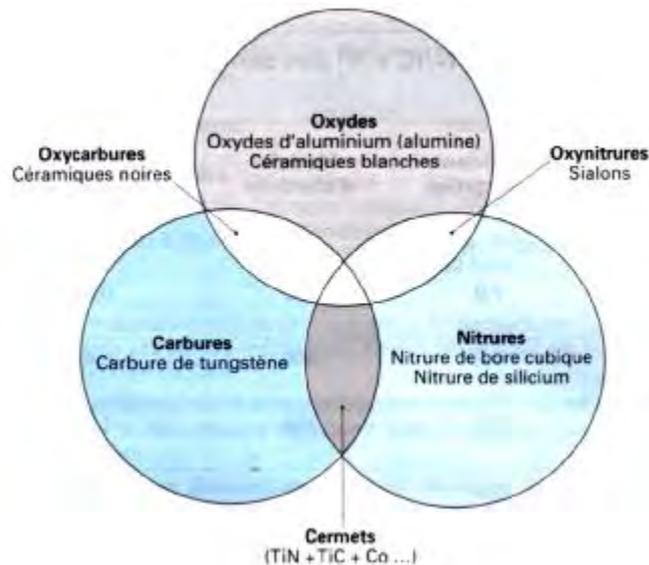


Figure 9 : Céramiques

Tableau N° 7 : Céramiques utilisées pour les outils de coupe

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes (whiskers)	Salon gris
Au début : Al_2O_3	Al_2O_3 -TiC (30%)		Base Si_3N_4
Actuellement : $Al_2O_3 + ZrO_2$	Al_2O_3 -TiN-TiC	Al_2O_3 -fibres SiC	
	Al_2O_3 -WC, TaC		
			Ténacité
←-----→			
Dureté			

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al_2O_3 . l'apparition de ce matériau sur le marché remonte aux années 1960. Dès l'origine, il s'est révélé intéressant pour la finition des fontes, à condition de disposer de machines robustes et à grandes vitesses.

Le tableau 1 et le diagramme de la figure 6 donnent quelques propriétés physiques de ce matériau et leur comparaison avec celles des aciers rapides et des carbures métalliques.

Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation.

D'autres céramiques sont également employées.

Les céramiques noires sont des mélanges de Al_2O_3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircon (ZrO₂). Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al_2O_3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.

Le nitrure de silicium Si_3N_4 permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides ...) il s'emploie à sec.

Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leurs confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.

Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes. Un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

Les outils en céramique peuvent être revêtus. Le revêtement le plus utilisé est le nitrure de titane TiN.

II.4 Cermets

Cermet, un terme formé de deux syllabes : *cer* vient de céramique et *met* de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co (tableau 1).

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport N/(C+N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. Le tableau 8 montre l'influence du rapport N/(C+N) sur les propriétés des cermets.

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bon états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige.

II.5 Diamant

II.5.1 Diamant naturel

Le diamant naturel est issu de la transformation, du carbone sous très haute pression (environ 7 GPa) et à température élevée (environ 2000 °C). Sa haute dureté et sa faible réactivité chimique expliquent qu'il ait pu se conserver à travers les siècles.

Les propriétés remarquables du diamant naturel en tant qu'outil de coupe (tableau 1) sont les suivantes :

- C'est le plus dur des matériaux connus
- Sa résistance à la compression est très supérieure à celles des autres matériaux

- Son coefficient de dilatation thermique ($3,1 \times 10^{-6} \cdot K^{-1}$), plus faible que celui des autres matériaux d'outils, lui confère une excellente résistance aux chocs thermiques

- Sa conductivité thermique, la plus élevée de tous les matériaux 600 à 2000 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ facilite l'évacuation de la chaleur de la zone de coupe si bien qu'un diamant qui vient d'usiner paraît froid au toucher.

Par contre, sa résilience est faible, ce qui le rend très sensible aux chocs mécaniques. Sa haute dureté, liée à sa structure atomique particulière, n'est pas la même dans tous les plans. Il se clive suivant quatre directions, ce qui le rend fragile.

II.5.2 Diamant synthétique

Les premiers furent réalisés en Suède en 1953 par Von Platen, puis en 1954 par Hall aux Etats-Unis, en soumettant du graphite à des températures et pressions très élevées. Les cristaux obtenus étaient petits (< 0,5 mm) et servaient à la fabrication de meules en diamant synthétique.

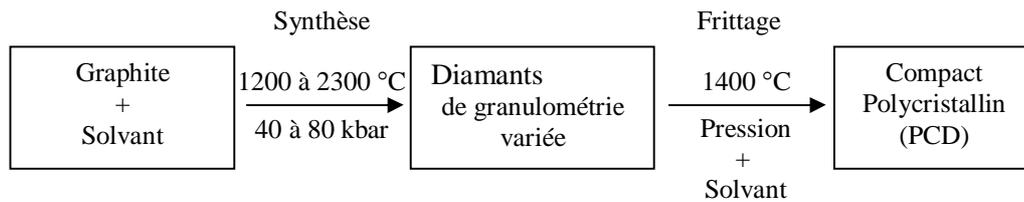
Tableau N°8 : Comparaison des propriétés physiques et du ratio N/(C+N) des cermets et des carbures de coupe [36]

Propriétés		Teneur en azote N/(C+N)	Conductivité thermique à 20°C $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Résistance à la flexion (Mpa)	Coefficient de dilatation $10^{-6} \cdot K^{-1}$	Module d'élasticité (Gpa)	Résistance relative aux chocs thermiques
Cermets	2 ^e génération	0	8	1500	7,0	390	0,4
	3 ^e génération	0,22	11	1650	7,2	400	0,6
	4 ^e génération	0,44	18	2000	7,4	390	1,2
Carbures	P 10		35	1500	6,0	550	1,2
	M10		39	2000	4,7	600	2,8

La production est actuellement forte : de 22 t/an en 1986, elle a peu évolué jusqu'en 1995, date à laquelle la production semble s'être accélérée.

Pour obtenir des cristaux plus grands, les durées de production sont excessives (> 50 h de synthèse pour créer un monocristal de 1 carat), le diamant naturel est alors plus rentable.

Aussi préfère-t-on réaliser des compacts polycristallins (PCD) en effectuant un frittage à haute pression et 1400°C pour agglomérer, sous forme de plaque, les grains de diamant.



La partie diamantée est parfois liée, lors du frittage, à un support à base de carbure de tungstène.

Contrairement au diamant naturel, le PCD est isotrope, il ne présente ni plan de clivage ni variation de dureté. Celle-ci est un peu inférieure à la valeur maximale de celle du diamant naturel. Le PCD est plus résilient (non propagation de criques) et donc plus résistant aux chocs mécaniques. Il est bon conducteur thermique et électrique.

Le PCD, comme le diamant naturel, commence à s'oxyder vers 600°C à l'air et, à partir de 1000 °C sous atmosphère protectrice, on assiste à un début de déstabilisation de la structure du diamant qui redevient graphite (graphitisation du diamant).

Selon la compatibilité physico-chimique métal usiné/diamant, la conductivité thermique élevée peut favoriser une réactivité chimique qui en limitera les applications.

II.5.3 Mise en œuvre des diamants

Diamants naturels

Ils sont utilisés sertis (brasage), en concrétion (frittage simple avec matrice métallique abondante), ou à l'état libre (poudre broyée ou boart).

Compact polycristallin (PCD)

A partir des plaques issues du frittage, on peut par usinage obtenir la plupart des formes courantes.

Selon les marques et les nuances, la taille des grains de diamant est centrée sur 1,10 et 30 µm.

Les fabricants de revêtements travaillent de plus en plus sur le revêtement diamant. Encore cher et à l'état de prévalidation industrielle, il fait également l'objet d'études dans les centres universitaires de recherche.

II.5.4 Utilisation dans l'usinage :

A base de carbone, les diamants (naturels et synthétiques) ont, de ce fait, une forte affinité pour les matériaux ferreux et sont donc, généralement, exclus pour leur usinage. On

les utilise, particulièrement pour les métaux tendres : aluminium, cuivre, magnésium, zinc et leurs alliages, ainsi que pour les matériaux antifriction.

Le diamant sert aussi à l'usinage des métaux précieux (or, platine), des matières plastiques chargées ou non, du bois.

II.6 Nitrure de bore cubique

II.6.1 Propriétés

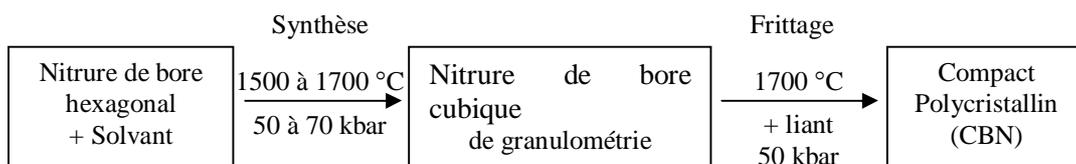
Contrairement au diamant, il ne se trouve pas dans la nature. On l'élabore donc par synthèse (première synthèse en 1957 aux Etats-unis).

Suivant les conditions, on obtient deux formes :

- nitrure de bore à structure cubique (CBN) qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;
- nitrure de bore à structure hexagonale de faible dureté (même structure que le graphite).

La forme dure est très difficile à obtenir et les techniques sont voisines de celles utilisées pour la synthèse du diamant. Les cristaux obtenus sont très petits (< 0,5 mm, plutôt vers 50 um) utilisables pour la réalisation de meules.

Pour fabriquer des outils de coupe, on réalise par frittage (premier essai vers 1972) un compact polycristallin (analogie avec le PCD) à matrice céramique ou métallique, éventuellement lié à un substrat en carbure de tungstène.



C'est le matériau connu le plus dur après le diamant (tableau 1). Il présente une résistance mécanique élevée dépendant de la nature et de la quantité de liant.

Sa dureté se maintient (jusqu'à 1000 °C), ce qui permet de travailler à des vitesses de coupe très élevées et d'usiner des matériaux durs.

Comme pour le diamant, la réactivité chimique liée au couple matériau usiné/outil de coupe en limite les applications.

II.6.2 Mise en Œuvre

- Poudre

Elle est constituée par les cristaux de synthèse de différente granulométrie.

- Compact polycristallin (CBN)

On obtient par usinage la plupart des formes désirées à partir des plaques issues du frittage (analogie avec le PCD).

Le CBN est commercialisé sous plusieurs formes :

- Directement en plaquette massive ;
- en plaquette carbure revêtue de CBN (le nom de full-face est souvent utilisé pour ces plaquettes) ;
- en plaquette carbure avec insert brasé ;
- en plaquette carbure insert directement fritté avec la plaquette.

Cela permet de trouver, en fonction de l'application, le meilleur compromis technico-économique.

Exemple : les plaquettes massives en CBN permettent des profondeurs de passe plus importantes que les plaquettes à insert mais leur coût est plus élevé.

II.6.3 Utilisations

Les CBN sont, particulièrement, adaptés aux usinages de matériaux durs (dureté HRC 55, soit environ 595 HV) tels que les aciers traités, fontes alliées (au chrome, molybdène, etc.), alliages de revêtement dur, stellites, aciers à outils, etc. ils permettent aussi l'usinage de matériaux conventionnels (fontes ordinaires par exemple) à des vitesses de coupe élevées ($>1000 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) aussi bien en tournage qu'en fraisage.

Dans l'industrie automobile, on utilise maintenant le CBN pour le fraisage finition des faces de carter cylindre en fonte dure ($V_c = 850 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) et l'alésage – finition des cylindres ($V_c = 500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$).

L'aptitude du CBN à usiner les aciers traités et la qualité des surfaces obtenues permettent d'envisager dans certains cas le remplacement de la technique d'usinage par rectification, par celle du tournage dur (disques de freins, pignons de boîte de vitesses, etc...).

La géométrie de ces outils (finition d'arête) a une influence notable sur la tenue en service. L'assise de l'outil doit être excellente, la machine très rigide de coupe doit être chargée progressivement.

L'usinage au CBN permet de travailler sans liquide de coupe, la chaleur engendrée à l'interface pièce-outil passant dans le copeau.

Les performances observées des CBN sont supérieures à celles des céramiques ou sialons. Le choix d'utiliser un outil CBN étant encore 5 à 10 fois plus coûteux à l'achat que les outils en céramique.

III. SELECTION DES MATERIAUX ET VITESSES DE COUPE

III.1 Matériaux

La très grande diversité des matériaux de coupe offerts actuellement oblige à opérer des choix. L'importance du couple outil/matière a été démontrée par de nombreuses études récentes [37] [38] [39].

En règle générale, l'usineur a peu de possibilités d'agir sur la matière de la pièce usinée. C'est donc sur l'outil, et par conséquent sur le matériau de coupe, que devra porter toute son attention.

Avant de décider des conditions de coupe, l'usineur devra vérifier l'aptitude (ou la qualification) du matériau de coupe à usiner la matière de la pièce. Pour cette première étape, l'aide du fabricant d'outils est généralement indispensable et utile. En effet, la plupart des matériaux de coupe sont vendus sous des dénominations commerciales : la connaissance exacte du matériau de coupe (y compris des revêtements s'il y a lieu) est donc parfois délicate à obtenir.

Une fois l'étape de qualification et l'aptitude assurées, il faut valider techniquement le matériau de coupe, c'est-à-dire lui associer des valeurs numériques (vitesse de coupe et avance généralement) de fonctionnement. Ces valeurs numériques sont également liées au type d'outil sur lequel est monté le matériau de coupe.

Ces deux étapes sont entièrement prises en compte par le couple outil/matière. La norme NF E 66-520 donne la méthodologie d'essais à réaliser pour aboutir au bon fonctionnement de l'outil.

Les petites et moyennes entreprises ne sont pas équipées pour réaliser des essais d'usinage. Quant aux grandes entreprises, la tendance actuelle est de réduire très fortement (voire supprimer) les services destinés aux méthodes usinage. Les usineurs doivent donc avoir accès directement à des informations techniques fiables concernant le domaine d'emploi des matériaux de coupe. La diversité des références commerciales des fabricants d'outils est telle que cette tâche est pratiquement impossible à réaliser sans l'aide de logiciels.

III.2 Vitesses

Opitz [34] a montré que, toutes choses étant égales par ailleurs, une vitesse de coupe croissante fait apparaître une usure qui augmente jusqu'à un maximum puis diminue jusqu'à un minimum et augmente à nouveau (figure 10).

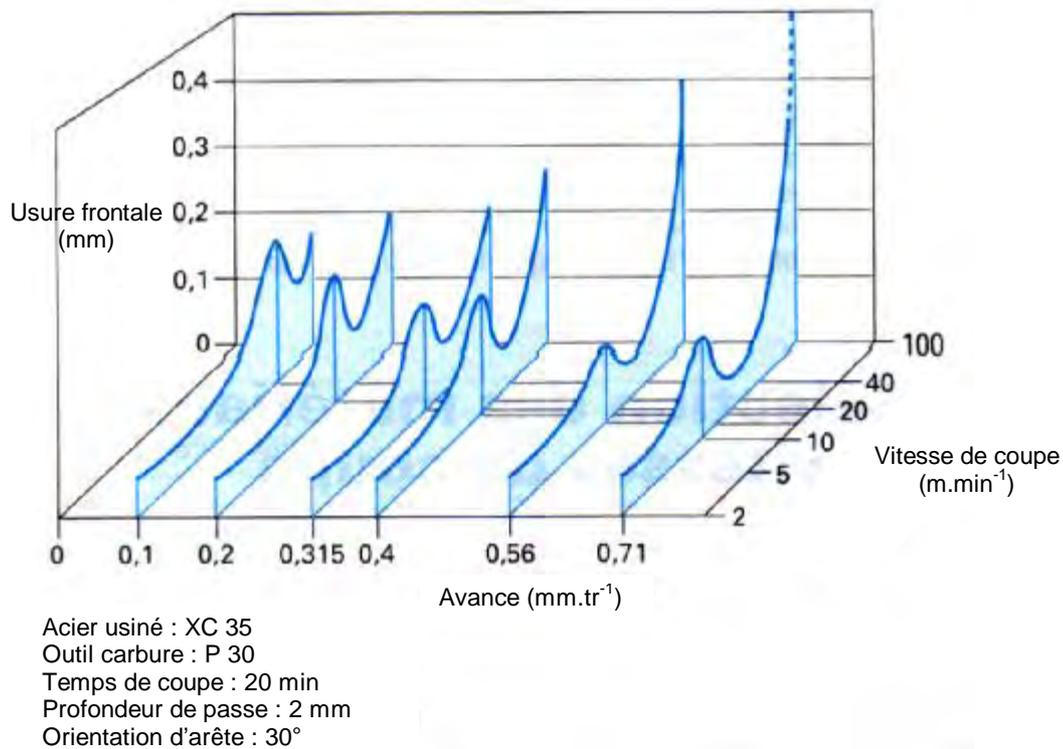


Figure 10 : Influence de la vitesse de coupe et de l'avance sur l'usure de l'outil [34]

Ce phénomène a été pleinement utilisé en brochage où, alors que la vitesse de 10m.min⁻¹ constituait un maximum, des essais ont révélé une tranche intéressante au delà de 200m.min⁻¹.

Les conditions de coupe à adopter varient suivant la tenue d'outil recherchée : celle-ci peut aller de 2 min pour une plaquette céramique usinant un acier réfractaire à plusieurs heures pour des outils montés sur des machines complexes (tours automatiques, machines transfert). Dans tous les cas, leurs calculs économiques devront être jumelés aux calculs techniques de conditions de coupe. Plusieurs critères d'optimisation sont possibles, chaque critère amenant une durée de vie d'outil différente.

Il existe certains graphiques donnant les vitesses de coupe couramment admises en fonction du matériau de coupe ; ces graphiques vont à l'encontre du concept de coupe outil/matière développé dans cet article. Il s'avère même que ces graphiques peuvent devenir faux dans certaines configurations d'usinage.

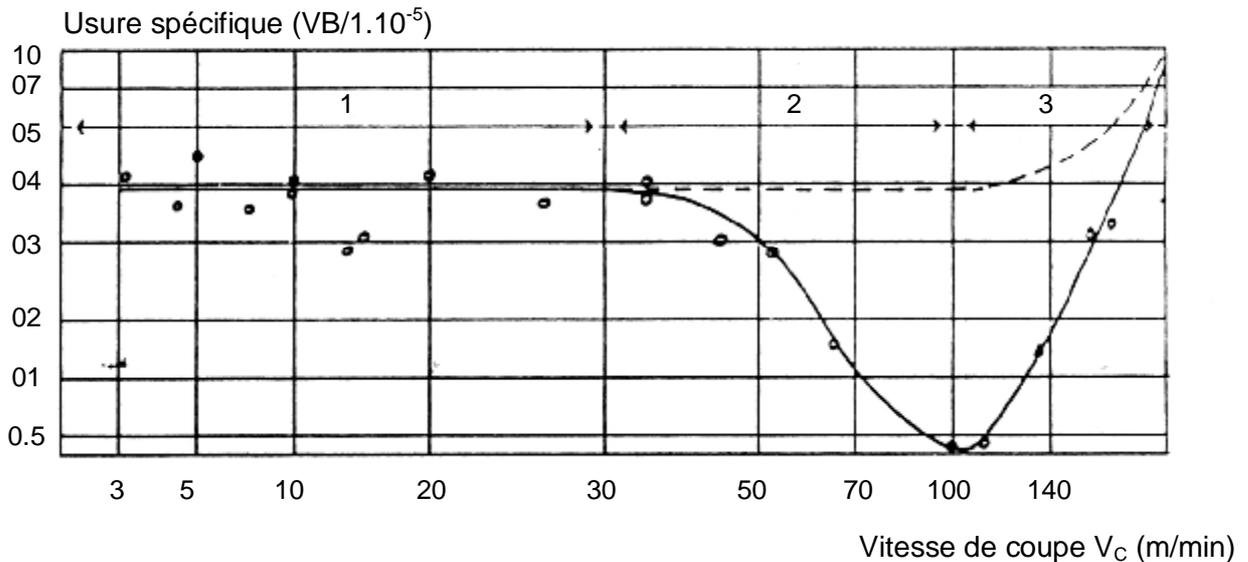


Figure 14 : Variation de l'usure spécifique en fonction de la vitesse de coupe d'après R. Weill

IV. TRIBOLOGIE DES CONTACTS COPEAU-OUTIL ET PIERCE-OUTIL :

La formation du copeau implique le triple frottement sec de deux corps pressés l'un contre l'autre (figure 15a, b) :

- le système C-O : copeau-outil côté face $A\gamma$,
- le système P-O : pièce-outil côté face $A\alpha$,
- le système P-O : pièce-outil côté $A'\alpha$.

Ces trois types de contact ne sont pas équivalents : le premier se produit à haute température en condition de confinement, le deuxième à température modérée en condition de semi-confinement et le troisième à température modérée en condition de non-confinement. Si l'on met à part les ruines d'outils par écaillages et micro-écaillages, on peut observer que les systèmes C-O ($A\gamma$), P-O ($A'\alpha$) et P-O ($A\alpha$) donnent lieu plus ou moins rapidement à trois faciés d'endommagements macroscopiques (figure 15a, b):

- une plage d'usure plane sur la face $A\alpha$ en dépouille principale, dont la hauteur moyenne est couramment désignée par le symbole VB. Quand VB croît, l'arête de coupe recule et les cotes s'écartent de la valeur visée;

- le creusement d'un cratère sur la face de coupe $A\gamma$, dont la profondeur maximale est couramment désignée par le symbole K_T . La résistance mécanique de l'outil décroît lorsque K_T augmente;

- le creusement d'un sillon sur la face $A\alpha$ en limite de zone de coupe et d'une multitude de petits sillons sur la face $A'\alpha$. l'état de la surface usinée est d'autant plus détérioré que ces sillons sont plus développés [40].

La figure 17 est la photographie d'un outil ayant foré 3m à l'intérieur d'une barre d'acier 42CD4 à la vitesse de 80 mm/min. On remarque une cratérisation profonde et une plage d'usure frontale irrégulière.

Il est nécessaire de se préoccuper de l'évolution des trois systèmes ci-dessus dont dépendent la productivité et la qualité des usinages. On se limitera à l'analyse du seul système C-O.

Le frottement sec de deux corps sous une pression de contact élevée conduit fréquemment à la constitution d'un troisième corps plus ou moins stable entre les deux premiers. Passons en revue les paramètres spécifiques de chacun des trois corps 1, 2 et 3 qui déterminent l'évolution de ce système frottant C-O.

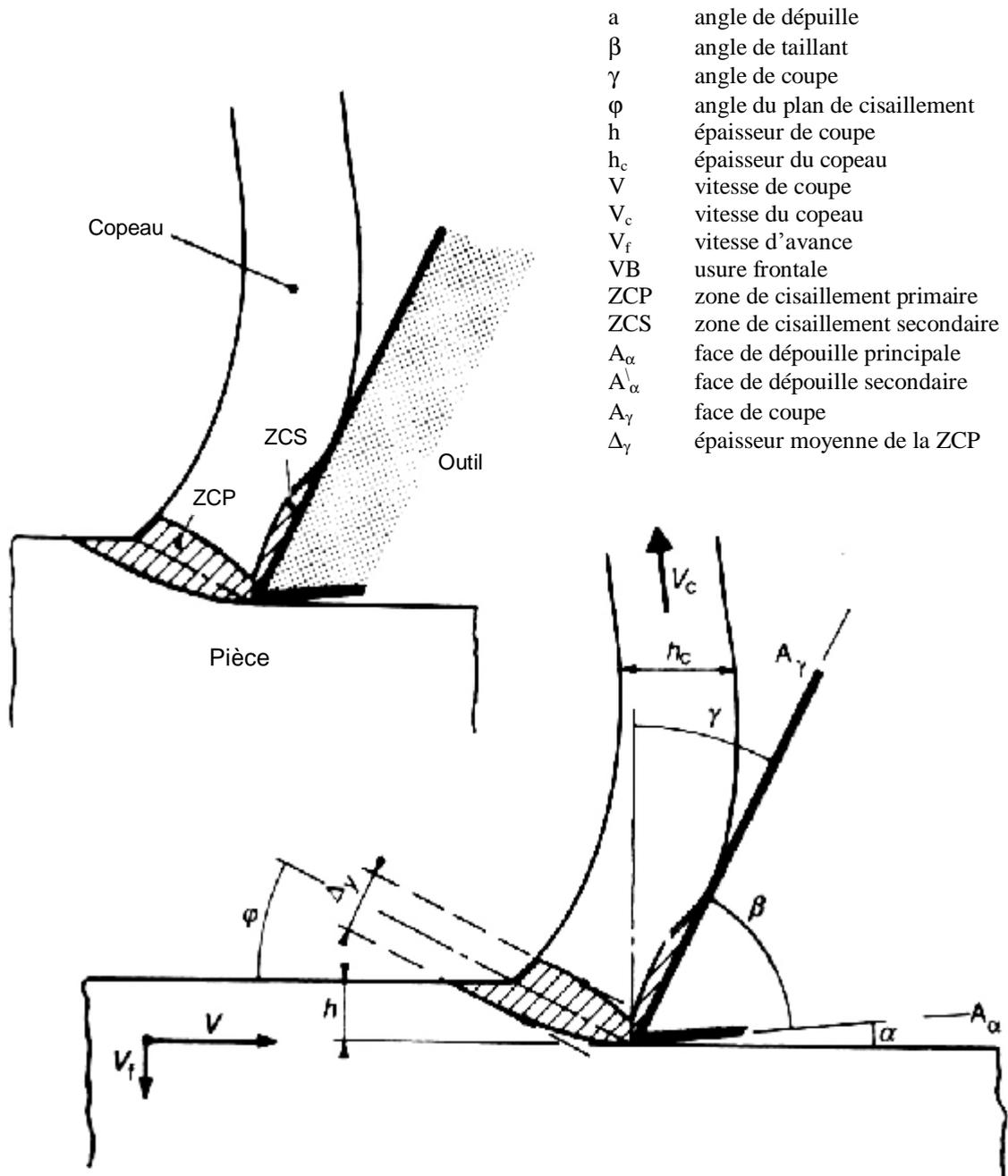
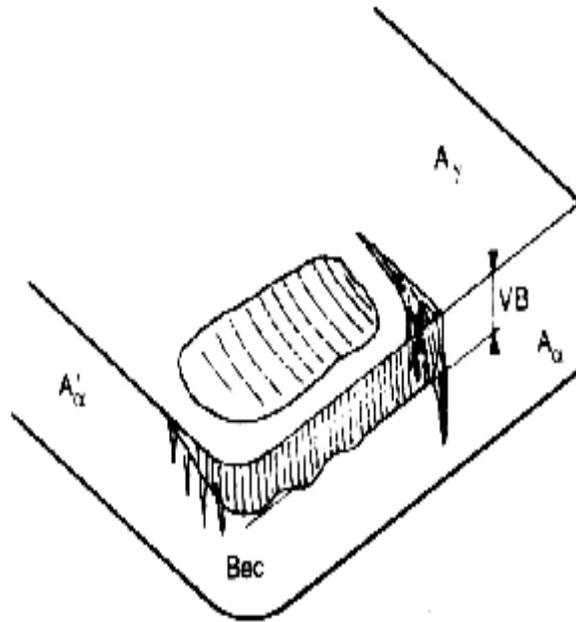


Figure 15-a : Formation du copeau



a	angle de dépuille
β	angle de taillant
γ	angle de coupe
φ	angle du plan de cisaillement
h	épaisseur de coupe
h_c	épaisseur du copeau
V	vitesse de coupe
V_c	vitesse du copeau
V_f	vitesse d'avance
VB	usure frontale
ZCP	zone de cisaillement primaire
ZCS	zone de cisaillement secondaire
A_α	face de dépuille principale
A'_α	face de dépuille secondaire
A_γ	face de coupe
Δ_γ	épaisseur moyenne de la ZCP

Figure 15-b : Usure de l'outil [41]

1) corps 1: le copeau - On trouvera, ci-après, une liste types des paramètres du corps 1 qu'il est très souhaitable de prendre en compte (figure 18).

- Le copeau se différencie du matériau usiné par l'intense déformation et par le cycle thermique subi. Ainsi, dans le cas d'un acier qui a (sauf exception) une structure cubique centrée à température ambiante, la face interne du copeau a très souvent une structure cubique face centrée.
- Le copeau est rarement monophasé ; les mécanismes endommageants vont dépendre de chaque famille de phases, et notamment :
 - de leur quantité respective et de leur dureté à chaud après écrouissage,
 - de leur répartition et notamment de leur homogénéité et de leur isotropie,
 - de leur histoire thermomécanique et notamment des étapes de la mise en forme des pièces qui précèdent l'usinage. C'est ainsi qu'il peut souvent y avoir des écarts d'usinabilité entre une barre laminée et une pièce forgée à chaud, à partir de cette même barre.
- le copeau peut contenir des particules incluses dans ces phases : les inclusions. On distingue couramment entre :
 - les particules qui ont une grande dureté dans la ZCS (à la température du contact copeau-outil). Ce sont des phases réfractaires tels que des oxydes, des nitrures ou des carbures. Généralement, leur existence est une conséquence du processus d'élaboration du matériau usiné;
 - les particules visqueuses à la température de coupe dans la ZCS. Fréquemment, elles contribuent à constituer le corps 3 et ralentissent l'endommagement. Souvent, leur existence est volontairement provoquée par celui qui fabrique le matériau usiné. Leur efficacité peut dépendre de leur composition, de leur forme, de leur taille et de leur nombre. Il faut noter que ces derniers paramètres sont dépendants de l'histoire thermomécanique de la pièce avant usinage.



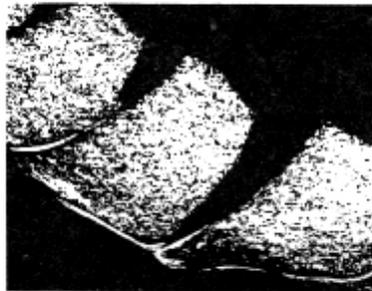
Grossissement x 1,5

a) Vue des copeaux. La face externe des copeaux a atteint 670°C



Grossissement x 25

b) Profil d'un copeau



Grossissement x 50

c) Examen métallographique après attaque chimique. Les parties blanches ont dépassé 1000°C

Figure 16 : Aspect des copeaux d'un acier 42CD4 usiné à 500 m/min par tournage avec des outils en céramique

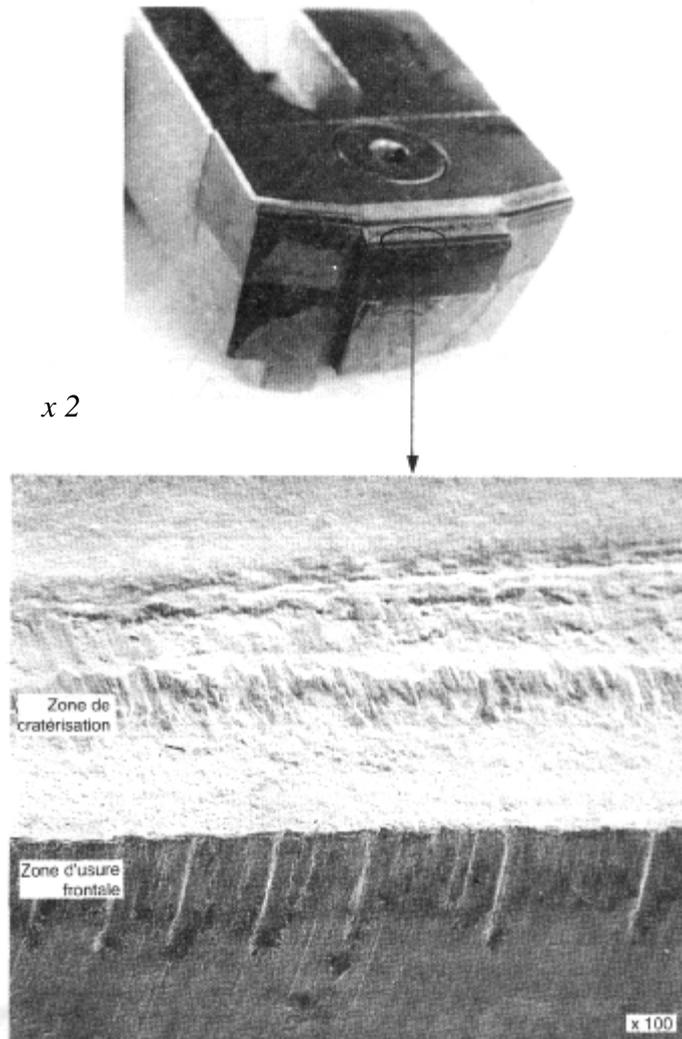


Figure 17 : Essai de forage sur acier 42CD4 : état de l'outil après forage de 3m, à la vitesse de pénétration de 80mm/min.

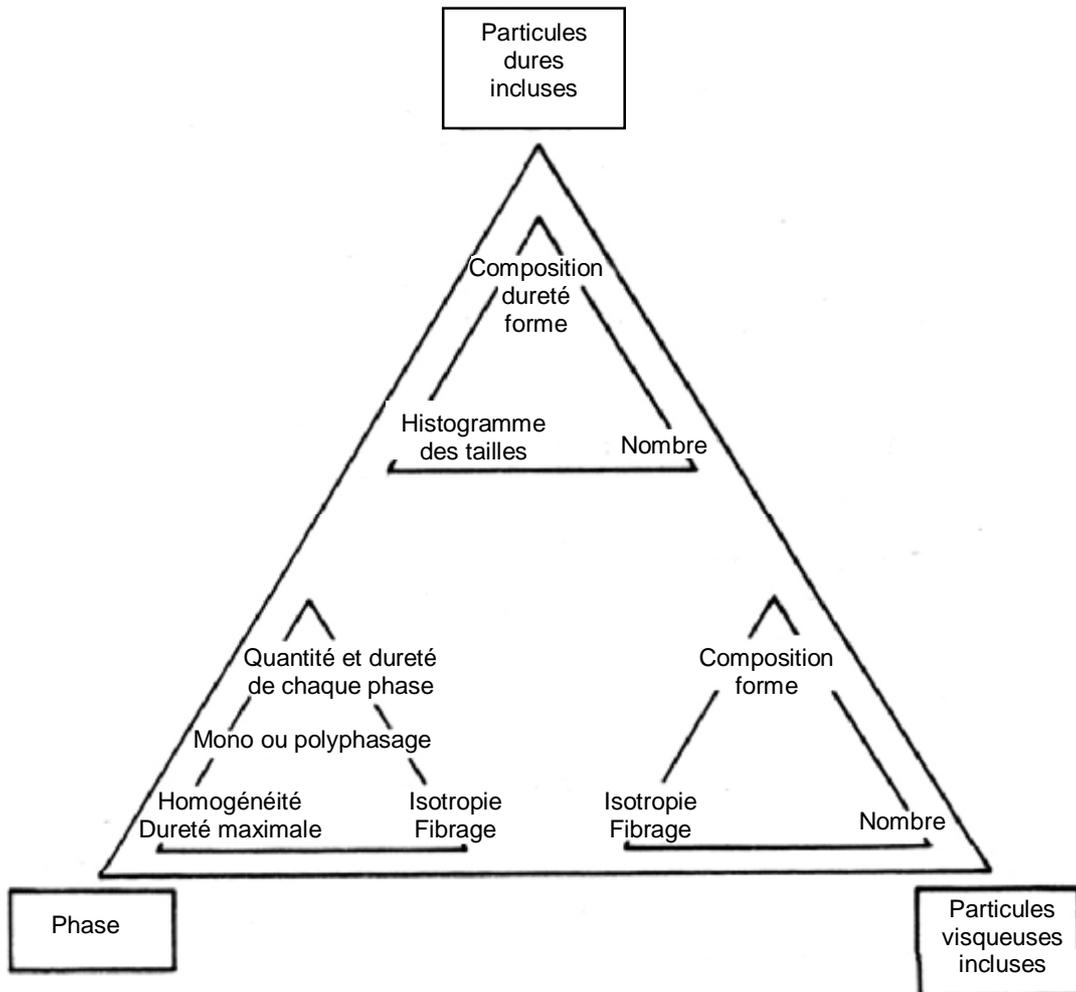


Figure 18 : Paramètres du comportement du corps 1 [40]

2) corps 2 : l'outil. – On trouvera ci-après une liste type des paramètres du corps 2 qu'il est possible de prendre en compte pour analyser son comportement (figure 19).

- l'outil est soumis à un gradient thermique important, il peut travailler en subissant des cycles thermiques fréquents soit parce que la coupe est discontinue (type fraisage), soit parce que l'efficacité de l'arrosage dépend de sa position (cas du perçage : le foret est plus refroidi hors du trou). Des phénomènes tels que la fatigue thermique vont dépendre de la conductivité du matériau de l'outil, de son coefficient de dilatation, de son module d'élasticité E, etc.
- l'outil est soumis à des sollicitations mécaniques qui dépendent des conditions de coupe, de la rigidité du contact pièce-outil, de la technique d'usinage. Des endommagements, tels que la fatigue mécanique, l'écaillage, l'attrition, dépendent de la dureté du matériau de l'outil, de sa capacité, de sa ténacité, etc.
- l'outil est en contact intime avec le copeau à haute température. A chaque dégagement, sa face de coupe est exposée au contact de l'air ambiant. Il faut donc considérer la réactivité chimique entre le matériau de l'outil et :
 - soit l'élément principal du matériau usiné,
 - soit telle ou telle phase incluse du matériau usiné,
 - soit un constituant de réaction du matériau usiné avec l'air ambiant,
 - soit l'air ambiant (résistance à l'oxydation de l'outil).
- l'outil est endommagé par les phases dures ou les inclusions abrasives du matériau usiné. Sa résistance dépend de sa dureté à chaud, de sa compacité, etc.
- Très souvent, la surface de l'outil est revêtue ou traitée. Le concept de deuxième corps doit intégrer le caractère composite ou à gradient de composition des parties superficielles des outils.

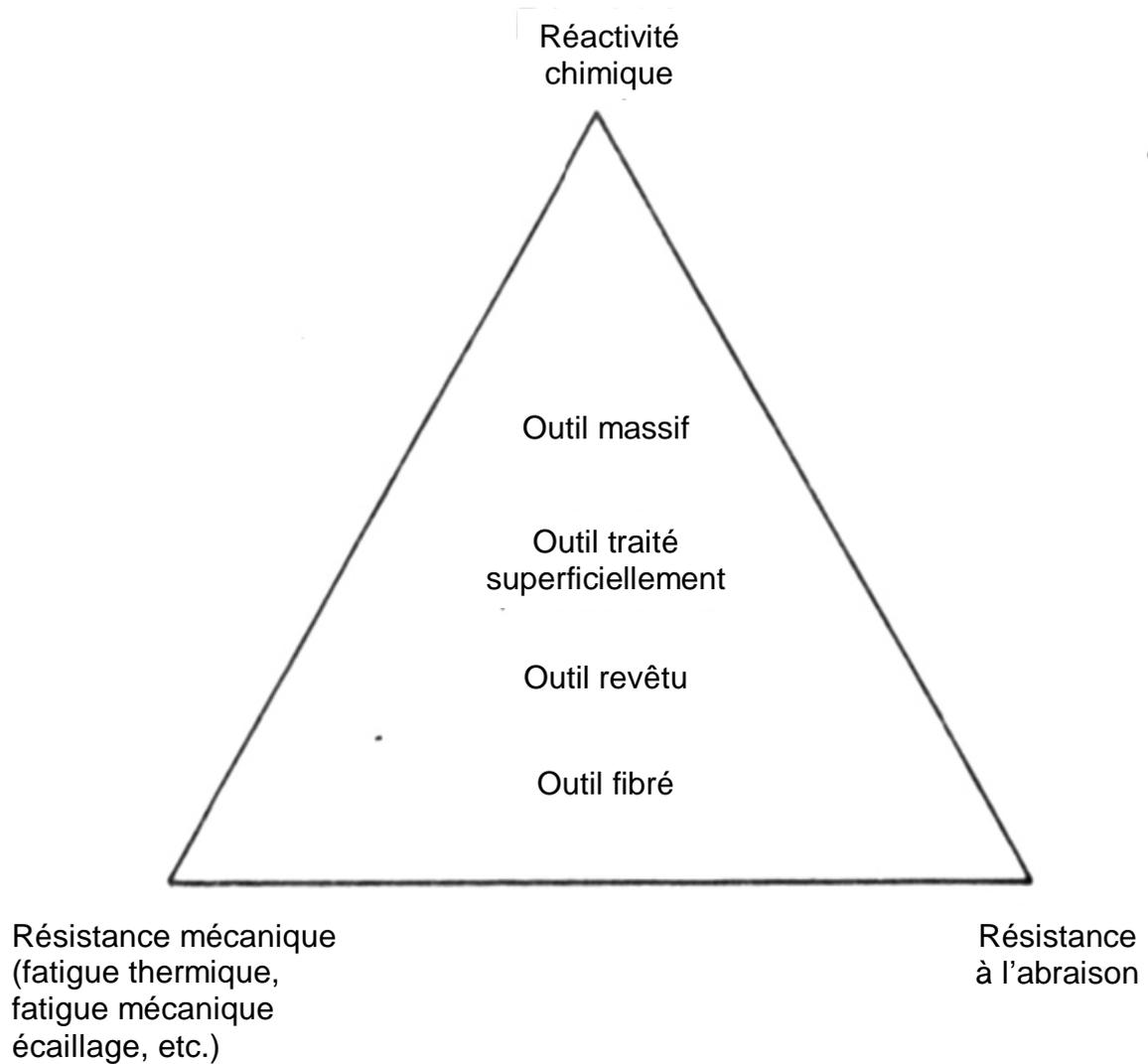


Figure 19 : Paramètres du comportement du corps 2 [40]

3) corps 3. – en coupe, on observe trois grandes familles de troisième corps (figure 20 et 21) :

- les dépôts macroscopiques qui sont constitués de particules issues du corps 1 et stabilisés sur le corps 2 ;

- les dépôts microscopiques qui peuvent être constitués de particules issues du corps 1, avec ou sans réactivité chimique entre celles-ci et le corps 2 ;

- les débris qui peuvent être des particules abrasives, préalablement, incluses dans le corps 1, des produits de réaction du corps 1 avec l'atmosphère, des morceaux du corps 2 arrachés, des morceaux du corps 3 déstabilisés, etc.

- les dépôts macroscopiques constitués à températures modeste provoquent, essentiellement, un endommagement mécanique (régime vibratoire de travail de l'outil conduisant à fissuration et rupture) ;

- les dépôts microscopiques constitués à température élevée donnent lieu à des altérations de l'outil : endommagement chimique ;

- les débris de toute nature sont cause d'une abrasion de la surface des outils : endommagement physique.

La figure 21 illustre les trois principaux mécanismes endommageants.

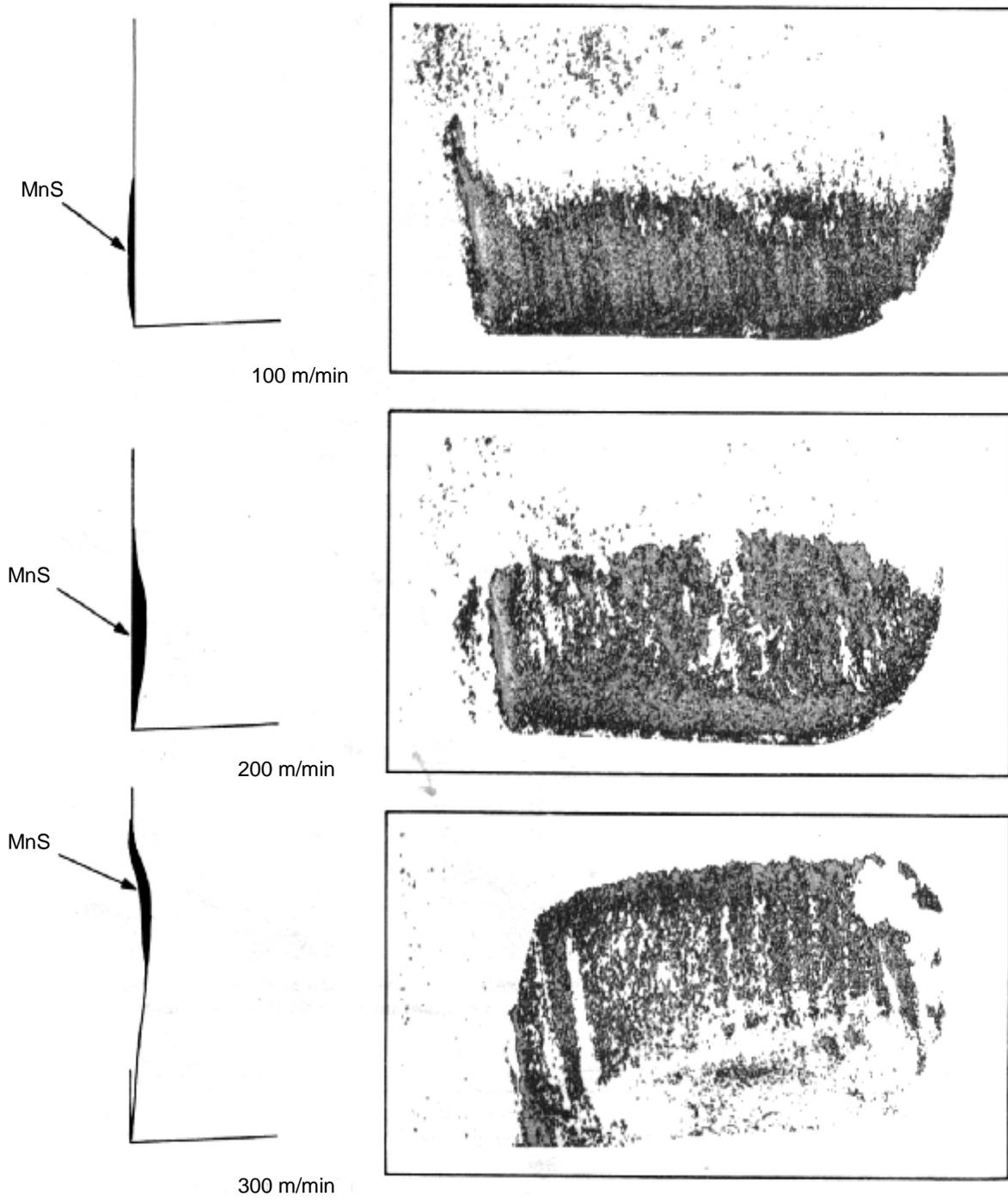


Figure 20 : Corps 3 de type sulfure de manganèse Mn S stabilisé sur la face Ag d'un outil en carbure de tungstène usinant un acier 42CD4

On observe, après usinage à 100 m/min, que le corps 3 tapisse la zone de contact copeau-outil. A 200 m/min, la zone de contact copeau-outil est plus large : elle est recouverte d'une couche discontinue de sulfure. A 300 m/min la zone de contact copeau-outil est encore plus large et le corps 3 est pratiquement éliminé. Ces dernières traces sont situées là où le copeau décolle de l'outil. L'épaisseur et la stabilité du corps 3 dépendent non seulement de la nature des corps 1 et 2, mais aussi de leur vitesse relative.

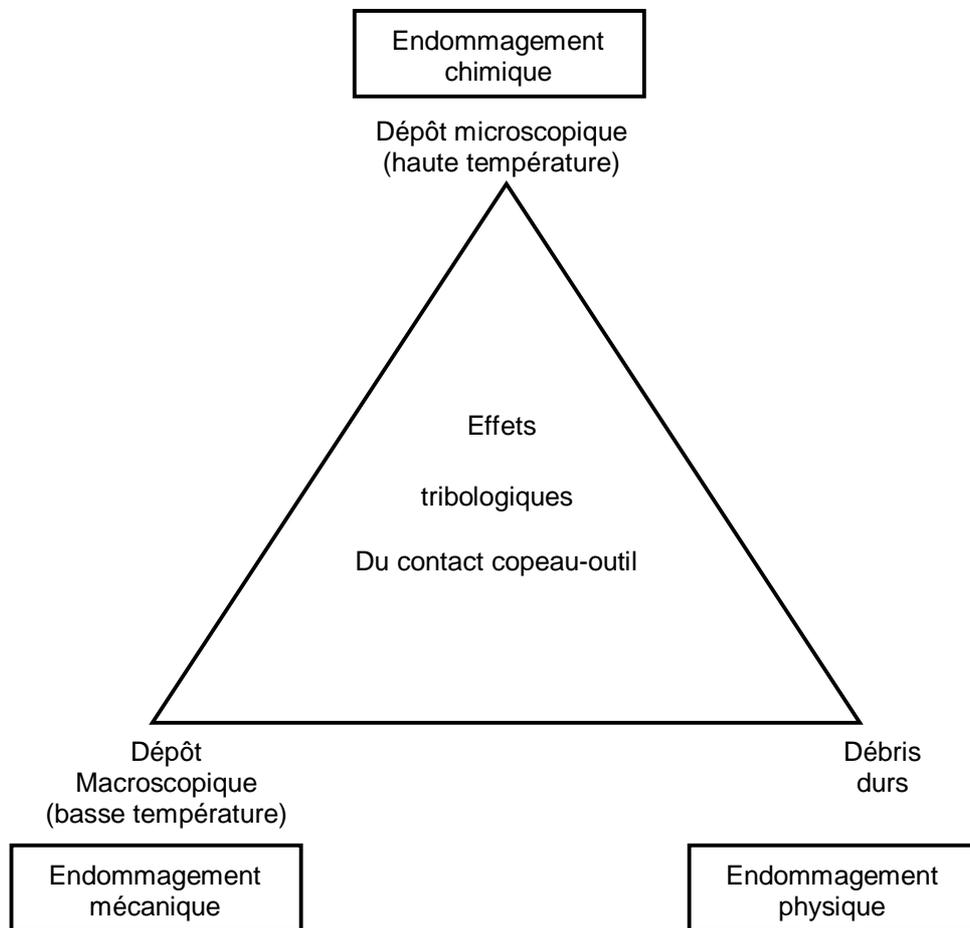


Figure 21 : Mécanisme d'endommagement des outils de coupe[40]

Chapitre III

Description des dispositifs experimentaux

I. CONDUITE DE L'ESSAI

Les essais ont été réalisés aux départements outillage et usinage de l'EN.PMA à El Khroub, au laboratoire de mécanique de contact de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, au département de physique de l'université de Jijel et au CNRA centre de recherches nucléaires Frantz Fanon d'Alger.

Le but recherché consiste à analyser la capacité de coupe des différents matériaux coupants, afin d'augmenter et de satisfaire le caractère complexe et aléatoire du processus de coupe, les essais ont été réalisés avec les spécifications relatives à la pièce à usiner, à l'outil, aux conditions de coupe, à l'usure de l'outil, à l'équipement, au mode opératoire des essais et aux méthodes d'enregistrement et de mesure [53, 54].

Les essais sont établis selon les spécifications du C.I.R.P. (Collège international pour l'étude scientifique des techniques de production mécanique).

I.1. Machine outil

Caractéristiques de la machine : Grâce à son caractère universel et à sa précision de travail, de même qu'à son exécution simple, le tour de la série SN est destiné, en premier lieu, à la fabrication en petite série ou à la fabrication par pièces séparées. Il est conforme aux exigences les plus modernes des techniques nouvelles. Il est possible de le doter d'accessoires, afin que la machine se prête à un emploi universel. Elle permet presque toutes sortes d'usinage, y compris le tournage, l'alésage, le tournage conique, le copiage hydraulique, le fraisage des rainures et le taillage des engrenages, la rectification frontale, extérieure et intérieure.

- Tour universel : SN40C, ayant une puissance de 6,6 Kw avec variateur de vitesse mécanique (Figure 1) ;

- Gamme des vitesses de coupe de 0 : 1200 m/min ;

- Gamme des avances 0,05 : 0,7 mm/tr ;

- Distance entre pointes : 800 mm ;
- Le travail a été effectué à sec (sans lubrification).

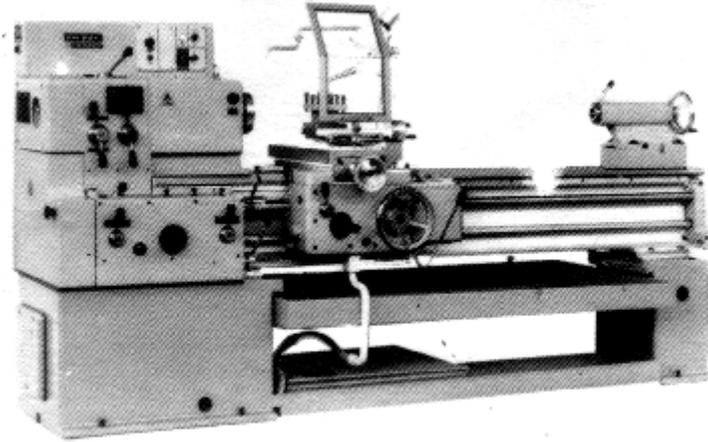


Figure 1 : Tour à charioter SN40C

I.2. Appareils de mesure

- L'usure frontale a été suivie et mesurée approximativement après chaque expérimentation à l'aide, d'un microscope optique d'atelier HAUSSER (figure 2.1) équipé d'une table croisée et d'un plateau circulaire, avec une précision de 0.01.
- L'usure en cratère a été visualisée à l'aide d'un dispositif équipé d'une comparateur à cadran et d'une pointe, avec une précision de 0,001 mm (figure 2.2).
- La dureté a été mesurée à l'aide d'un micro-duromètre (ZWIK, FRITZ WERNER).
- L'usure volumétrique a été mesurée à l'aide d'une balance SARTORIUS avec une précision de 0.01mg.
- L'évolution des revêtements a été suivie à l'aide d'un microscope optique (Carl, Zeis) équipé d'un appareil photo Polaroid. L'agrandissement peut varier de 50 à 1600 fois.
- La rugosité des surfaces en contact a été mesurée à l'aide d'un pertographe (figure 2.3) équipé d'une table à trois axes de déplacement avec une course de 0.3 à 32mm, sur chaque axe de déplacement et une précision de 0.1micron.
- Le palpeur optique (voir détails en annexe) a été utilisé pour l'obtention des topographies des surfaces usées sur trois axes.
- Les observations topographiques, l'analyse qualitative et quantitative avec l'identification de divers éléments déposés sur les faciès d'usure ont été observés sur MEB (microscope électronique à balayage) (figure 3).

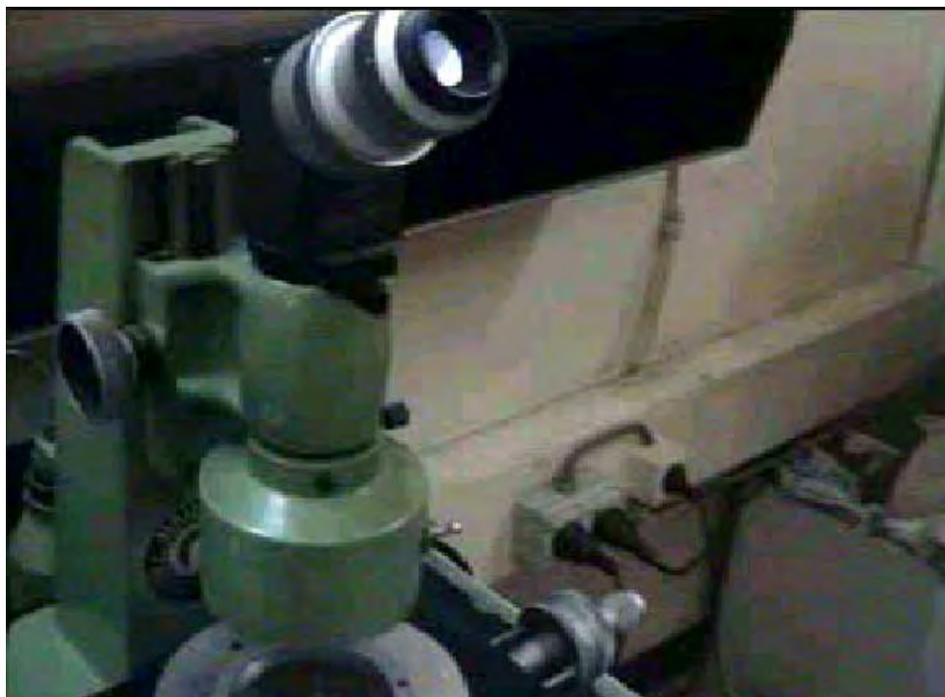


Figure 2.1 : Microscope d'atelier. Mesure de l'usure frontale



Figure 2.2 : Dispositif de mesure de l'usure en cratère

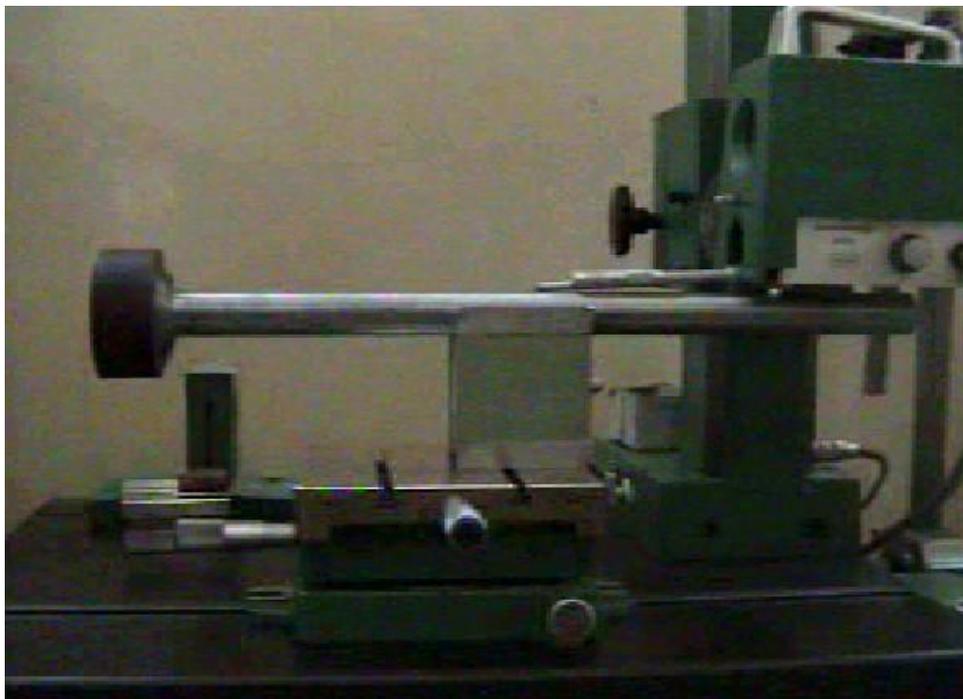


Figure 2.3 : Perthographe. Palpeur mécanique des rugosité des pièces en contact.

I.3. Paramètres de coupe

Les conditions de coupe sont choisies parmi celles recommandées par la norme ISO et CIRP, pour tous les essais de coupe, la dénomination des paramètres est la suivante :

- Avances de coupe : a en mm/tr ;
- Profondeur de coupe : p en mm ;
- Vitesse de coupe : V en m/min ;
- Temps de coupe : t en min.

Les conditions de coupe choisies sont les suivantes :

- Vitesse de coupe : $V = 0 : 450$ m/min ;
- Profondeur de coupe : $a = 1,5 : 2$ mm ;
- Avance de coupe : $S = 0,1 : 0,55$ mm/tr.

Les avances pour les essais d'usure sont choisies en fonction des applications des alliages à essayer, ceci dans le but de se rapprocher le plus possible des conditions habituelles d'utilisation (Figure 4).

La durée et le nombre des périodes d'arrêt sont identiques, dans des conditions de coupe données et ceci pour toutes les plaquettes carbure.

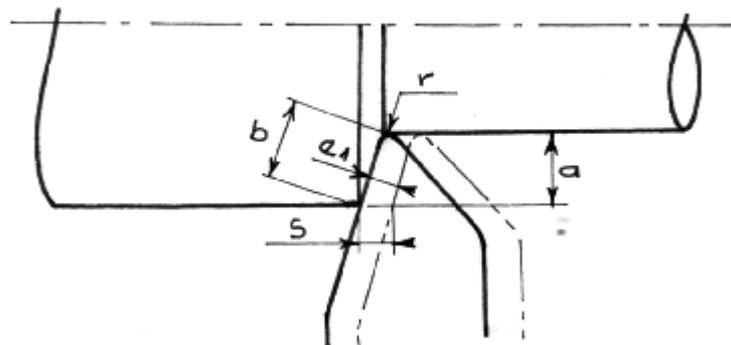


Figure 4 : Evolution de l'outil de coupe sur la pièce usinée

II. LA MICRO-PHOTOGRAPHIE

Elle a été réalisée sur microscope à balayage électronique (MEB), afin d'observer les phénomènes générant cette usure (Figure 3).

Un faisceau électronique extrêmement mince (100 à 200 Angstroems, soit 1 à 2/100 000^e mm de diamètre) balaye ligne par ligne la surface d'un objet soumis au vide (Figure 3). Sous son impact, l'objet émet des électrons secondaires (e) qui, captés par un scintillateur (s) et amplifiés par un tube photomultiplicateur (ph) sont restitués en lignes de points plus ou moins lumineux sur un ou plusieurs écrans vidéo. Les éléments en relief de l'objet émettent plus d'électrons secondaires et apparaissent en clair sur l'écran. Ces contrastes donnent une bonne impression du relief.

Fonctionnement : une haute-tension (ht) appliquée entre une cathode-filament (cf) et une anode (a) provoque l'émission d'un faisceau d'électrons (fe). Des lentilles électro-magnétiques (I1,I2) focalisent le faisceau qui est animé d'un mouvement de balayage par l'intermédiaire d'une bobine (b) dirigée par un oscillateur (os). Tombant sur l'objet (ob), le faisceau induit l'émission d'électrons secondaires (e) suivant l'angle d'incidence et le relief de la surface. La position de l'objet collé sur un porte-objet (po) est ajustée au moyen d'une vis goniométrique (g) et l'examen s'effectue soit sur un petit écran d'observation (eo) soit sur un moniteur vidéo (mv). Un écran vidéo destiné à la photographie permet de conserver des clichés (eph).

Le pouvoir de séparation est très élevé : c'est celui du diamètre du faisceau électronique sur l'objet. Les grossissements peuvent atteindre facilement 1 000 à 10 000 fois et, dans les appareils perfectionnés, jusqu'à 40 à 50 000 fois ! La profondeur de champ est exceptionnelle : la plupart des objets en 3 dimensions sont nets sur toute leur surface. Les images photographiques présentent une définition remarquable.

On introduit l'échantillon dans la colonne (Figure 3), puis on réalise le vide primaire dans la pompe à diffusion et l'enceinte de l'échantillon. La pompe à diffusion actionnée, le vide secondaire s'établit dans toute la colonne. Ensuite, le filament est chauffé sous haute tension et émet un faisceau d'électrons qui par balayage reproduit les faciès à observer sous le grossissement voulu. L'émission des rayons X permet l'analyse de surface, l'identification de divers éléments déposés sur les faciès d'usure.

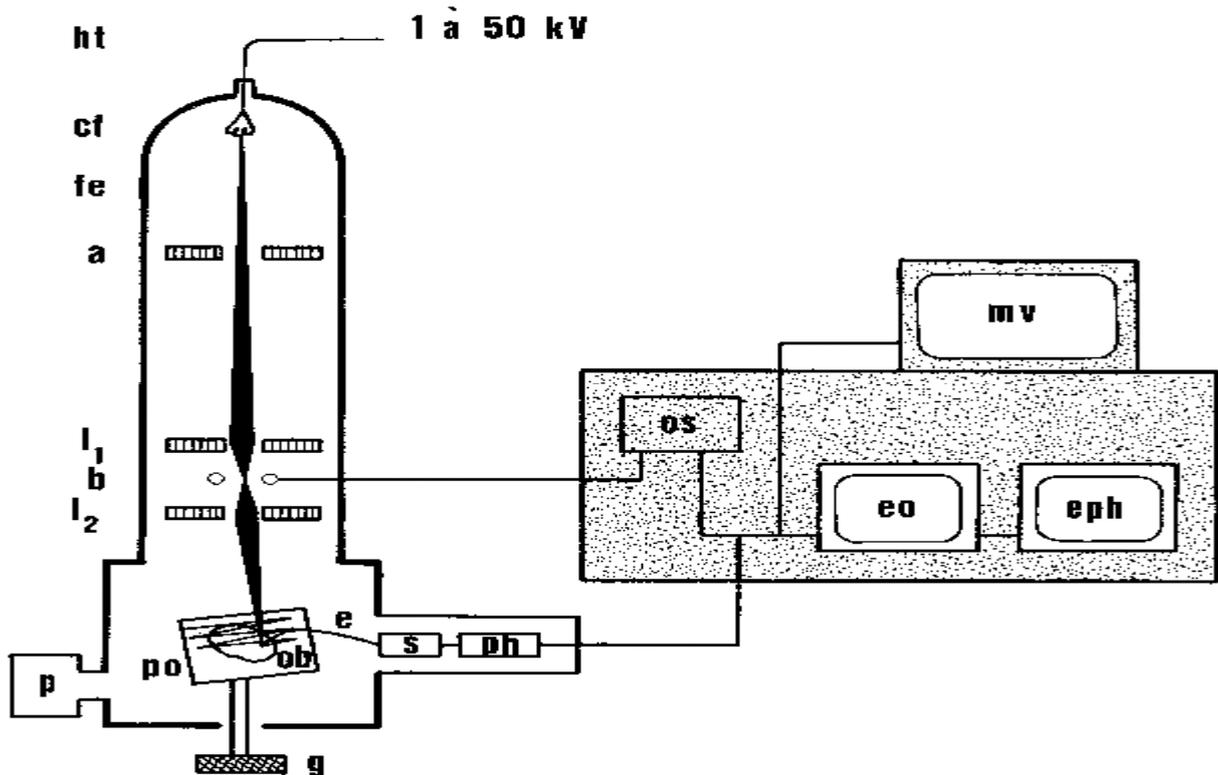


Figure 3 : Vue générale de la colonne

III. CARACTERISTIQUES DE LA MATIERE ET DES OUTILS :

Nous avons utilisé des pièces en acier faiblement allié de fabrication nationale d'un même lot. Pour l'étude de l'usure (résultats dans le chapitre IV) on a utilisé des rondins de diamètre 70 et de longueur 400, dont la nuance est le 40 NiCr6 avec $HB=304 \text{ Kg/mm}^2$ et pour l'analyse de la rugosité (résultats dans le chapitre V) et du troisième corps (résultats de l'étude dans le chapitre VI, on a utilisé des rondins de diamètre 80 et de longueur de 500 dont la nuance est le 42CrMo4V et dont les caractéristiques mécaniques sont les suivantes $HB=257 \text{ Kg/mm}^2$.

Les caractéristiques chimiques du rondin utilisé sont les suivantes :

- Carbone	à	0.38 ÷ 0.42	- Soufre	à	≤
- Silicium	à	0.15 ÷ 0.40	- Molybdène	à	0.15 ÷ 0.30
- Manganèse	à	0.50 ÷ 0.80	- Nickel	à	≤ 0.60
- Phosphore	à	≤	- Chrome	à	0.9 ÷ 1.2

Les plaquettes utilisées pour les essais sont des plaquettes carbure type P25, et plaquettes carbure de grade P25 revêtues soit TiN soit TiC – de forme triangulaire équilatérale et en forme de losange (Figure 6).

Référence TNMG220416 à Revêtement TiN

Référence KNUX160410R12 à Revêtement TiN

Référence TPUN160312 à Revêtement TiC

Les outils sont en carbure obtenus par frittage et sont essentiellement composés de carbure de tungstène WC dispersés dans le liant, le Cobalt. Les carbures proviennent de métaux qui donnent avec le carbone des composés définis à haute stabilité, haute réfractérité. Ces carbures possèdent des duretés très élevées. Des additions de nitrure de titane et de carbure de titane, sont faites pour améliorer certaines propriétés.

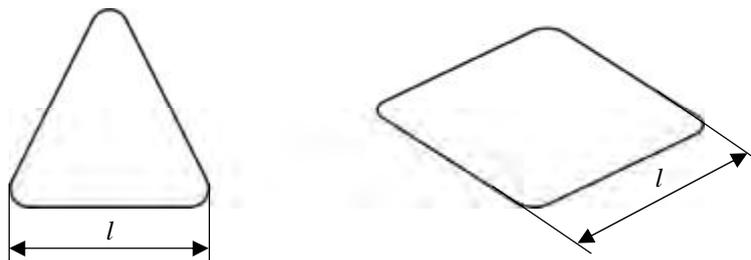


Figure 6 : Géométrie des plaquettes

Chapitre IV

Etude du comportement en usure

I. INTRODUCTION

L'introduction des plaquettes amovibles a révélé la possibilité de déposer une couche résistante à l'usure sur un cœur dur, afin de maîtriser la relation contradictoire entre la résistance à l'usure et la dureté d'un carbure fritté.

L'épaisseur par exemple d'un revêtement de nitrure de titane, ou d'un carbure de titane est un compromis entre l'adhérence, l'élasticité et la résistance à l'usure effective [68,69]. Les dépôts de TiC et de TiN sont réalisés par un procédé connu sous le nom de méthode "GC" (gamma coating).

L'analyse des phénomènes de la coupe consiste à rechercher les relations entre les caractéristiques du matériau usiné, de l'outil, les paramètres fondamentaux caractérisant les conditions de coupe (vitesse de coupe, géométrie du copeau) et les paramètres résultants : force, puissance consommée, usure d'outil et qualité de coupe qui déterminent les performances du processus.

En l'occurrence l'outil à charioter doit assurer une fonction de coupe et pour cela, remplir certaines conditions dont les plus importantes sont : la résistance de l'arête de coupe à l'usure et à la formation du premier corps [54, 55, 56].

Ainsi, le mécanisme de coupe entraîne la formation du premier corps dit en "dents de scie" comme le montre les figures 1, 2 et 3. Quand les matériaux sont usinés, le chargement local de cisaillement conduit à la formation d'une fissure à la surface libre de la pièce. Les irrégularités de la surface extérieure jouent un rôle important dans l'amorçage de la fissure. Un plan de glissement apparaît en direction de l'outil sous la propagation des dislocations jusqu'au moment où cette rupture par cisaillement évolue en déformation plastique (figure 1, 2 et 3).

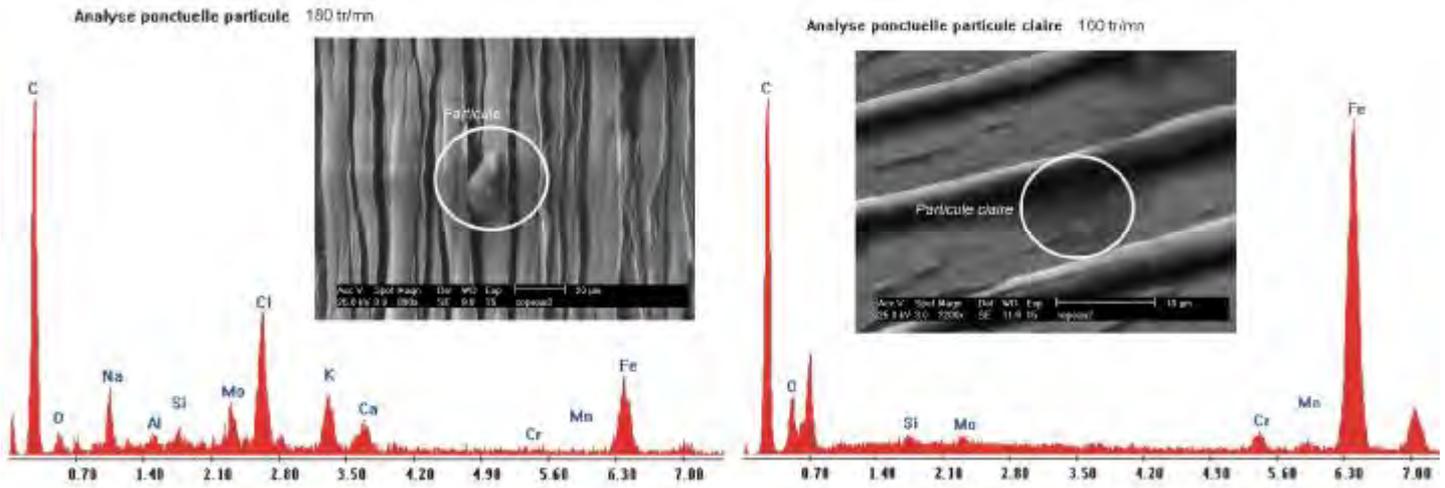


Figure 1 : Morphologies et analyses quantitatives du 1^{er} corps

II. MECANISME DE LA FORMATION DU 1ER CORPS :

Le contact entre les premiers corps (outil et matière) est le siège d'un phénomène de compression dû au contact entre le métal usiné et la face d'attaque de l'outil. L'arrachement du premier corps subit une contrainte d'une part, par la résistance à la déformation de la matière et d'autre part par le frottement sur la face d'attaque de l'outil. Cette compression génère un champ de contrainte mécanique au niveau de la matière, ce qui a pour conséquence l'apparition de déformations plastiques et de cisaillement du matériau, lorsque la limite de résistance est atteinte. Ainsi se forme le premier corps par ce mécanisme par un processus que l'on peut comparer à un glissement progressif de carte (de jeu) lorsqu'on étale celle-ci.

Ainsi chaque carte représente une tranche élémentaire de métal qui glisse l'une par rapport à l'autre sous l'effet du cisaillement (figure 3). La figure 2 montre le mécanisme de formation du 1er corps. On remarque d'abord sur la figure 2.a, qui montre la face de dépouille de l'outil que le contact outil-pièce est très réduit, lorsqu'on le compare à la zone de contact outil-copeau (figure 2.b).

On observe une usure remarquable est importante sur la face de dépouille qui se caractérise par une morphologie dégradée de l'outil (figure 2.a).

Sur la figure 2.b, on note une usure en cratère caractéristique du phénomène de contact entre les deux autres corps. Le rapport entre les dimensions des deux contacts est très voisin de 1/10 d'après les facteurs d'agrandissement utilisés.

Un agrandissement localisé dans cette zone de contact outil/copeau (figure 2.c) montre que le 1er corps présente deux zones bien distinctes (figure 2.d).

- Une zone d'adhésion qui reste liée à la pièce.
- Une zone de frottement avec l'outil.

L'apparition des deux zones est observée dans le sens d'écoulement du copeau.

Ainsi, si l'on veut évaluer la capacité de la coupe de l'outil, on adopte généralement le critère d'usure recommandé par ISO, prévoyant une valeur de l'usure frontale $V_B=0.3\text{mm}$, qui ne peut être applicable directement pour ce type de matériaux.

La formation du copeau pour les matériaux tendres est caractérisée par la présence d'une zone de déformation plastique intense.

Cette zone est le siège d'apparition de fissures qui se manifeste par une propagation de dislocations. Il apparaît ainsi un glissement de plan parallèle d'où l'appellation de cette zone de zone de cisaillement primaire (figure 2.e).

Une augmentation de la vitesse de coupe entraîne une modification de la morphologie du copeau. Lorsque la vitesse de coupe devient très élevée, un phénomène de fragmentation apparaît jusqu'à l'obtention de copeau pulvérulent (figure 3).

Les analyses quantitatives du premier corps (figure 3) montrent la diffusion de la couche protectrice qu'on retrouve sur l'outil de coupe comparable à un oxyde ou un mélange d'oxyde.

L'analyse EDAX a révélé les éléments suivants : le calcium, du silicium, du chrome, du manganèse, de l'aluminium et du fer.

Ainsi, ce dépôt peut servir à la formation d'une couche visqueuse qui joue le rôle de lubrifiant et d'autre part, à des soudures qui constituent une couche servant le rôle de pseudo-outil [16].

Fichier Graph8.cdr

Fichier Graph9.cdr

III. RUPTURE PREMATUREE DES ARETES DE COUPE

Nous avons constaté, à travers nos différentes manipulations, des ruptures prématurées des arêtes de coupe dues vraisemblablement aux chocs que subissent nos échantillons lors des engagements ou des dégagements de l'outil. Ces ruptures se produisent au début ou à la fin de la séquence de coupe (figures 4a, b) et (figures 5a, b). Nous pouvons avancer que ces essais aux chocs mettent en relief que le revêtement ne joue pas nécessairement un rôle favorable. Des fissures se sont développées (figure 6b et 7a, b) dans le seul revêtement par le biais de la propagation des ondes de surface.

Ainsi, ces fissures jouent un rôle d'amorce de rupture brutale dans la matrice et dépendent du rôle physico-chimique et mécanique du revêtement [61, 62, 68]. Lors de l'usinage discontinu, nous nous trouvons confrontés à la mise hors service, des outils de coupe dus probablement aux critères énumérés précédemment.

Néanmoins, les résultats obtenus présentent une dispersion comparable à celle observée habituellement avec ce type d'essais, sous réserve d'identifier les phénomènes de dégradation prématurée des arêtes, qui semblent être liés ici, aux conditions d'engagement ou de retrait de l'arête. Ceci accroît l'incertitude sur l'évolution de la capacité de coupe des plaquettes, si l'on ne contrôle pas, de façon suffisamment précise les conditions d'engagements et de retraits de nos échantillons. Par ailleurs, les figures 5b et 7a, b montrent d'une façon significative, la formation de particules adhésives, qui constituent le troisième corps qui apparaissent entre deux surfaces frottantes, qui se forment suite à la jonction entre deux aspérités [42, 43]. Ceci montre comment des coins ou proues de matériaux apparaissent entre deux surfaces frottantes.

Ainsi, un coin de métal écroui croît et adhère à l'avant garde de l'outil par rapport au mouvement. Le métal transféré suit la déformation plastique qui l'entoure puis se cisaille dans une direction légèrement inclinée par rapport à la direction du glissement (figures 8a, b).

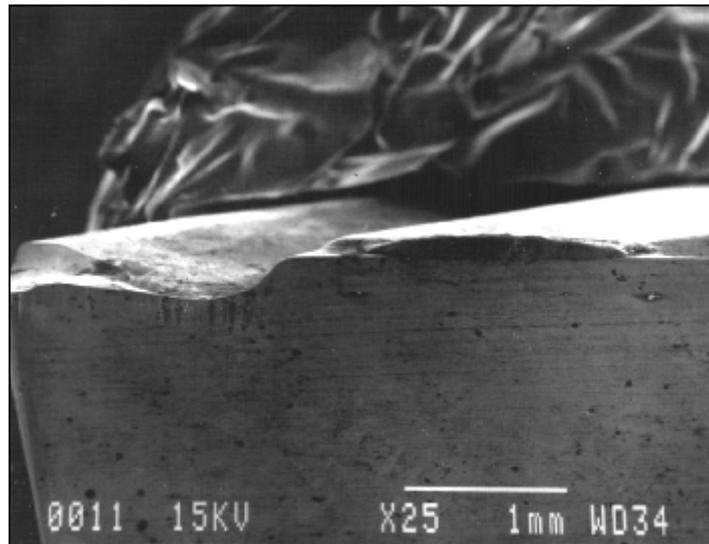
Le frottement et l'usure sont ainsi gouvernés par le comportement d'un film intercalaire ou troisième corps. Ce troisième corps se présente comme un écran fixe dans les contacts statiques, et comme un écran dynamique dans les contacts mobiles [11]. Le passage de l'écran statique au dynamique est quasi instantané, il suffit le plus souvent d'un

déplacement très faible pour détruire l'écran statique, et le redistribuer dans le contact pour le transformer en écran dynamique.

Ces transformations nous amènent à dire qu'un frottement à deux corps est une appellation impropre, car chacun des corps est revêtu d'une surface de composition différente de celle de leur volume.

En effet, le passage rapide de l'écran statique à l'écran dynamique, suite à un déplacement relatif des premiers corps suggère que la différence principale entre le frottement sec où à deux corps, et le frottement à trois corps tel que le frottement lubrifié, par exemple, réside dans le mode d'apport de troisième corps en contact.

a/



b/

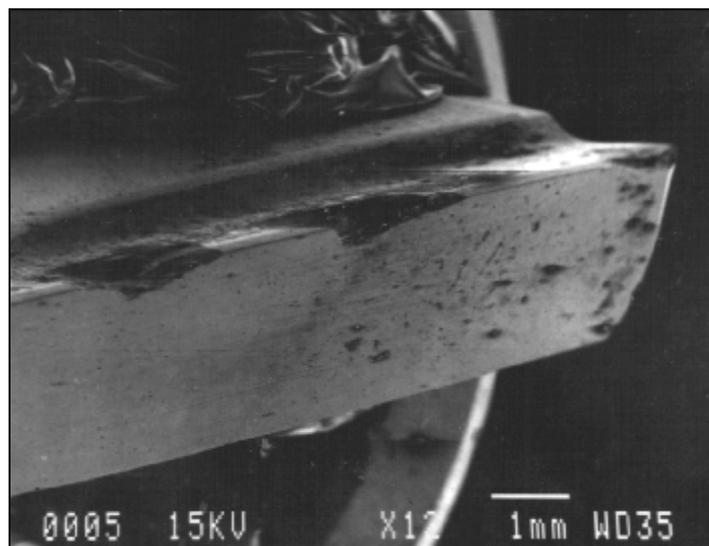
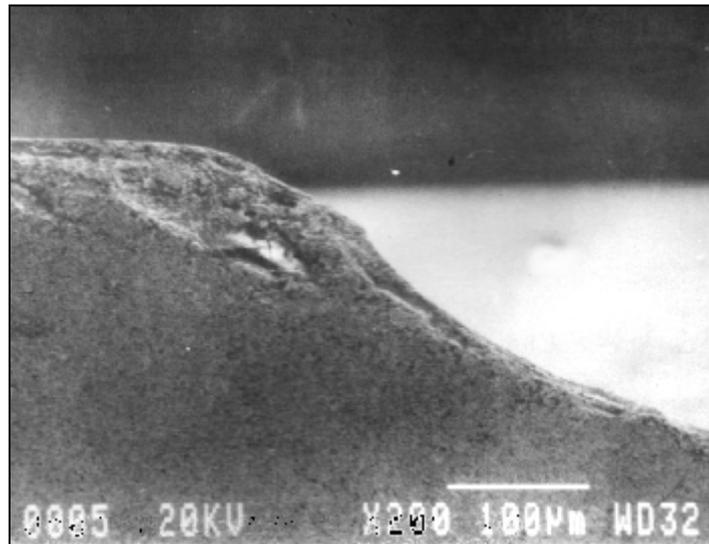


Figure 4 : Rupture prématurée des arêtes de coupe

a- Recouvert TiC ($t = 2 \text{ min } 15 \text{ sec}$); $g \times 25$
b- Recouvert TiC ($t = 4 \text{ min } 25 \text{ sec}$); $g \times 12$

a/



b/

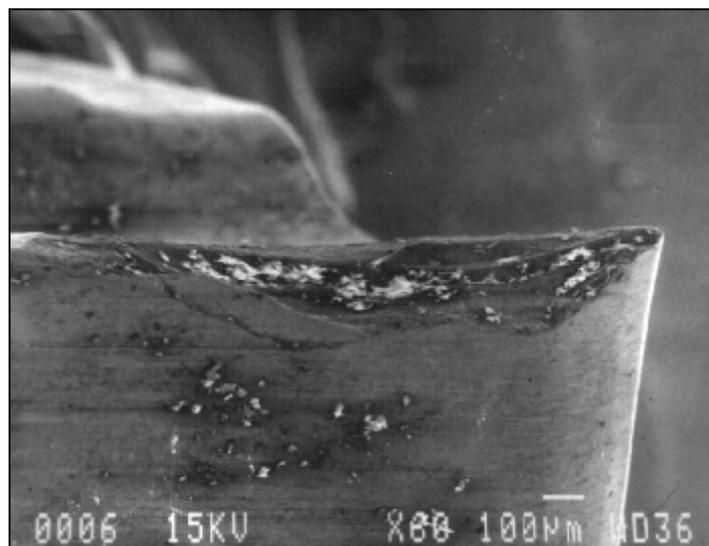
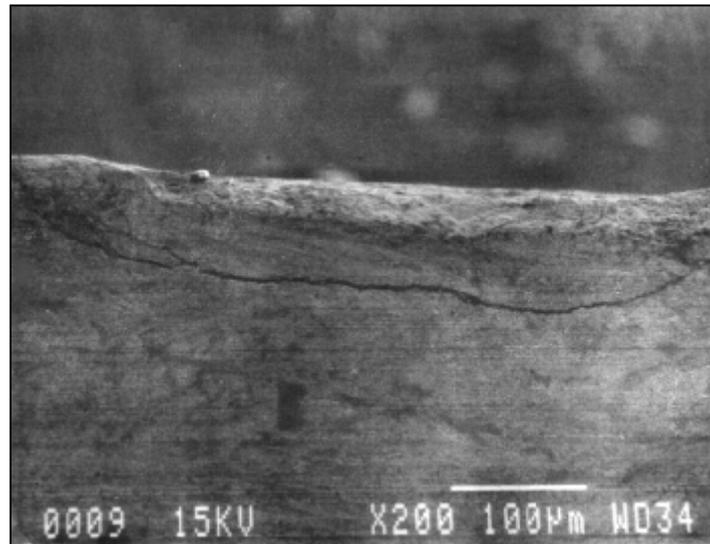


Figure 5 : Rupture prématurée des arêtes de coupe

a- Non recouvert (t = 2 min 20 sec); g x 200

b- Recouvert TiN (t = 1 min 30 sec); g x 60

a/



b/

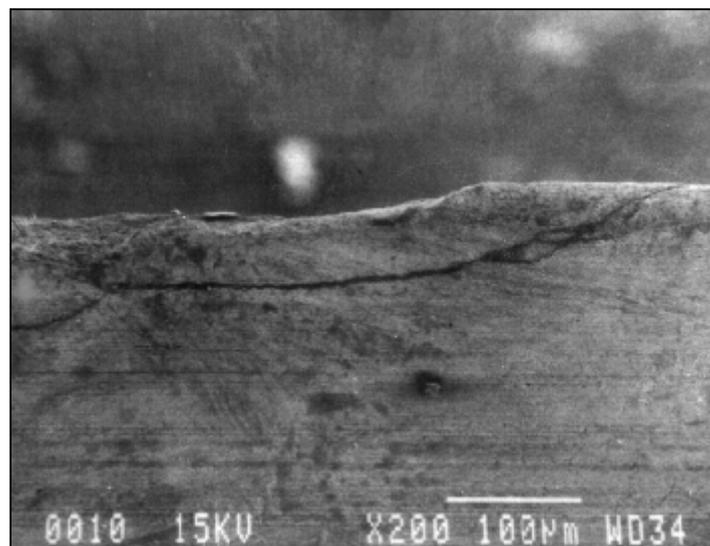
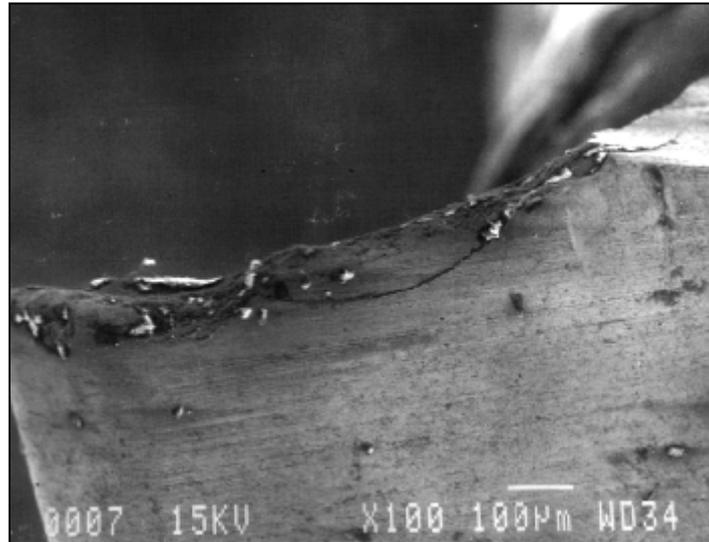


Figure 6 : Propagation de la rupture dans la matrice pour divers revêtements (substrat P25)

a- Recouvert TiN (t = 4 min 30 sec); g x 200

b- Recouvert TiC (t = 4 min 50 sec); g x 200

a/



b/

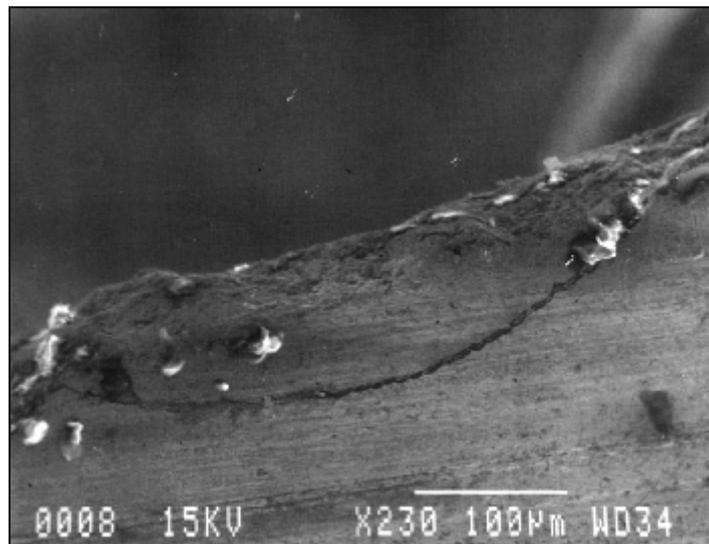


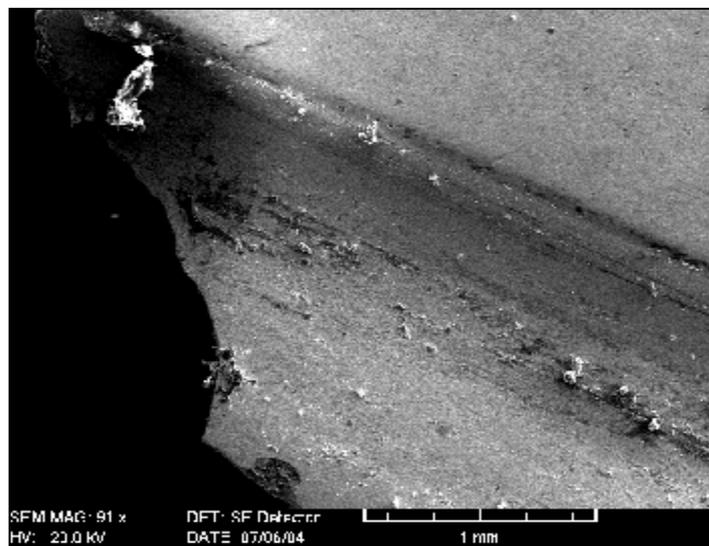
Figure 7 : Propagation de la rupture dans la matrice pour divers revêtements (substrat P25)

a- Non recouvert (t = 4 min 45 sec); g x 100

b- Recouvert TiN (t = 5 min 40 sec); g x 230



Figure 8a : Formation de micro-cavités autour du troisième corps



*Figure 8b : Ecaillage de l'arête de coupe et formation d'un lit de particules
P25 + TiN; t=3min; gx91*

IV. FRACTURE PAR DEFORMATION PLASTIQUE

Les analyses mécaniques et physiques des surfaces montrent que dans une application industrielle, les contacts s'établissent entre deux surfaces de morphologie et de composition mal connues.

Ainsi, dans notre cas, nous avons des contacts triborigueux, dans lesquelles le contact s'établit sur des zones discrètes d'étendue variable, définissant ainsi des surfaces réelles de contact que l'on oppose.

En effet, à travers nos différentes investigations, nous avons remarqué une progression significative des déformations plastiques résultantes du contact entre le copeau et l'outil et les conditions de coupe appliquées.

Ceci se manifeste dans un premier temps par la formation de micro-cavités et des micro-fractures sur les différentes faces de l'outil, dues à un processus de fatigue ou de corrosion de contact (figure 9a, b, c, d).

Les contraintes thermiques et mécaniques développent au cours du contact des rayures, des nucléations et des fissures unidirectionnelles sur les faces de l'outil en rapport avec le gradient de température qui varie en fonction de l'échauffement et du refroidissement (figure 10a, b) et (figure 11b). Ces contraintes thermiques, sont fonctions des propriétés physico-mécaniques, de la conductivité et du coefficient d'expansion [54, 70, 51].

Durant la période d'échauffement, la pression de coupe suscite des déformations plastiques considérables, en fonction de la résistance à la rupture des plaquettes et la résistance à la flexion du revêtement. Lorsque l'outil se refroidit, les contraintes de tension naissent et donnent des fissures unidirectionnelles, résultantes du déroulement du copeau sur la face de coupe.

Une caractéristique importante de la cicatrice d'usure est la formation d'amas allongés (figure 11b), dans le sens longitudinal en certaines régions de la zone usée, par un empilement successif de couches (figure 11a) analogue à un beurrage. Ces couches sont très

vraisemblablement formées par un arrachement de copeau en surface, cisaillement des premiers corps qui sont ensuite redéposés pour constituer le troisième corps [8, 55, 50].

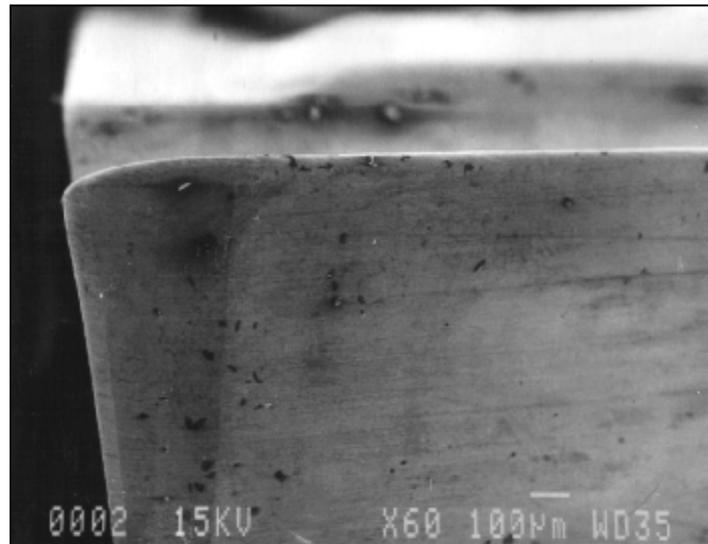
Nous avons également observé dans la zone usée des ruptures sur les rebords (figure 15a, b) et des détériorations qui portent, des traces juxtaposées de plusieurs formes d'usure ayant successivement ou simultanément affectées par fatigue, adhésion, corrosion, abrasion et cavitation.

Quant au mécanisme d'usure des outils, il semble se présenter avec la formation éventuelle d'une couche blanche et d'oxyde dans le cratère (figure 12a, b) donnant une diminution de la teneur en tungstène et l'élimination des carbures mixtes par l'écoulement du copeau [61, 63, 64].

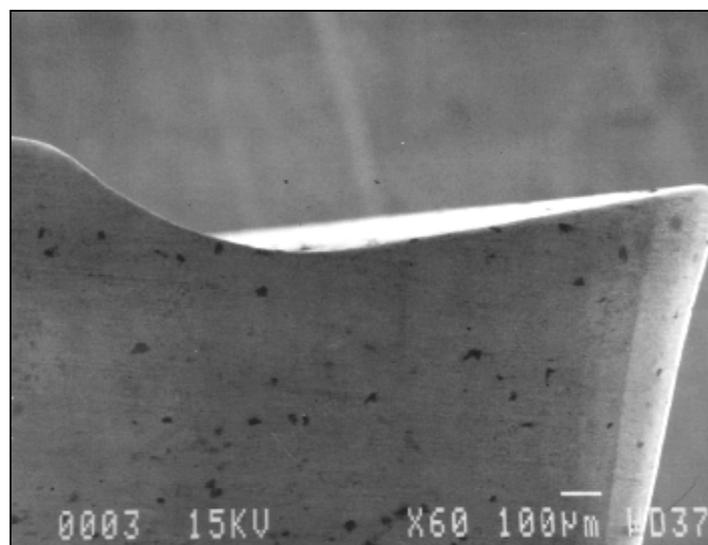
Lorsque la température dans la zone de cisaillement augmente, ou lorsque la profondeur de coupe augmente, le métal liquide est éjecté de façon significative entre l'outil et le copeau et peut éventuellement former une arête rapportée sur l'outil (figure 14a, b).

A travers cette analyse, nous pouvons suggérer ou affirmer que la déformation plastique se situe dans la région la plus chaude de l'outil, la présence de fissures implique des contraintes de tension, ceci est confirmé du fait que les fissures débutent en amont de l'arête de coupe.

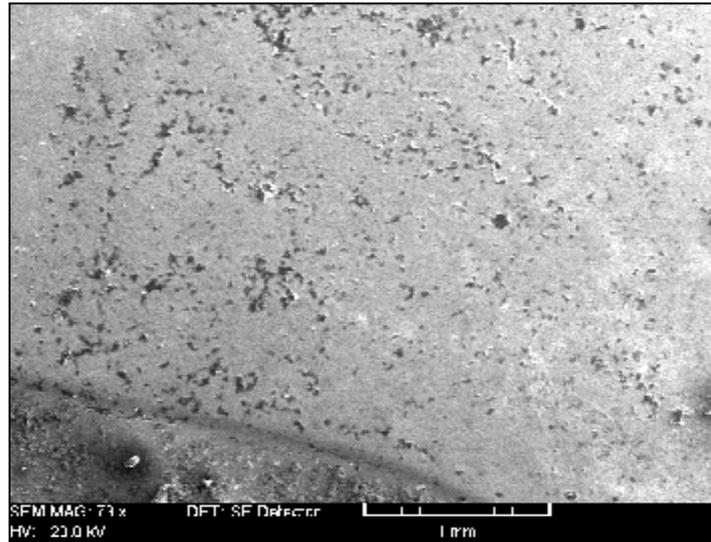
Les figures 13a, b montrent des transformations superficielles de structure, sous l'effet du frottement, ces transformations sont associées à une certaine quantité d'énergie, pouvant par exemple correspondre à l'activation de l'oxydation des surfaces et aux différents stades de dégradation du couple en contact, en induisant une accumulation de déformations plastiques puis la formation en surface d'une phase blanche très dure [44]. L'énergie dissipée supplémentaire va permettre la création des premiers débris et activer la progression en sous-couches de la structure modifiée.



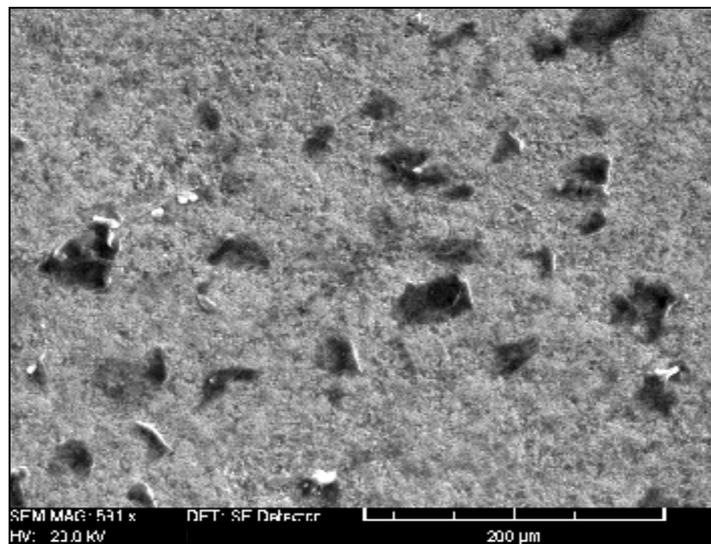
*Figure 9a : Formation de micro-fractures sur le rebord de l'arête tranchante
P25 + TiN ; t=2min 30 ; gx60*



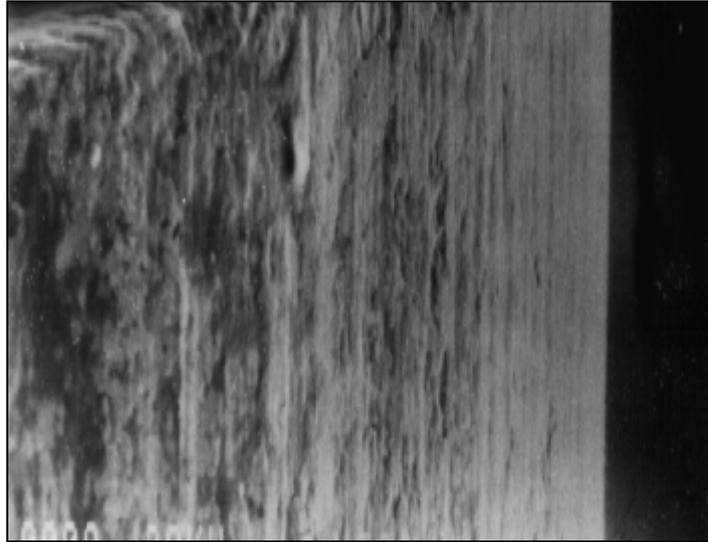
*Figure 9b : Formation de cavité ou creux sur la face en dépouille
dû à une usure par fatigue
P25 + TiC ; t=3min 15 ; gx60*



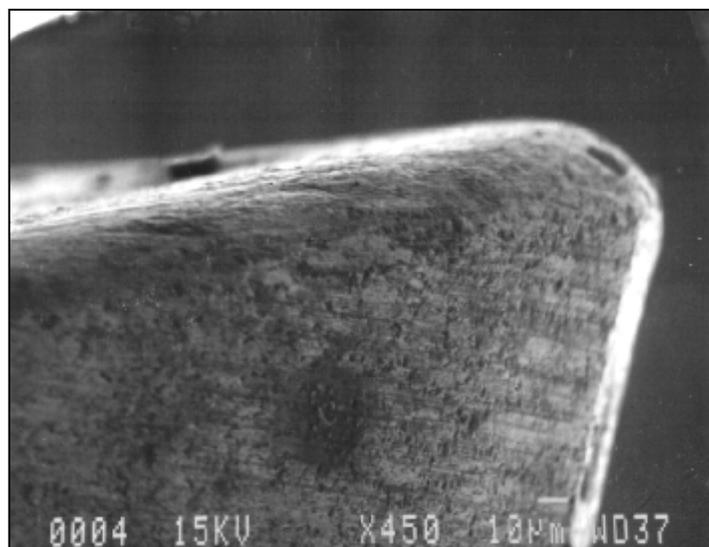
*Figure 9c : Morphologie de micro-cavité près du cratère
P25 + TiC; t=2min; gx73*



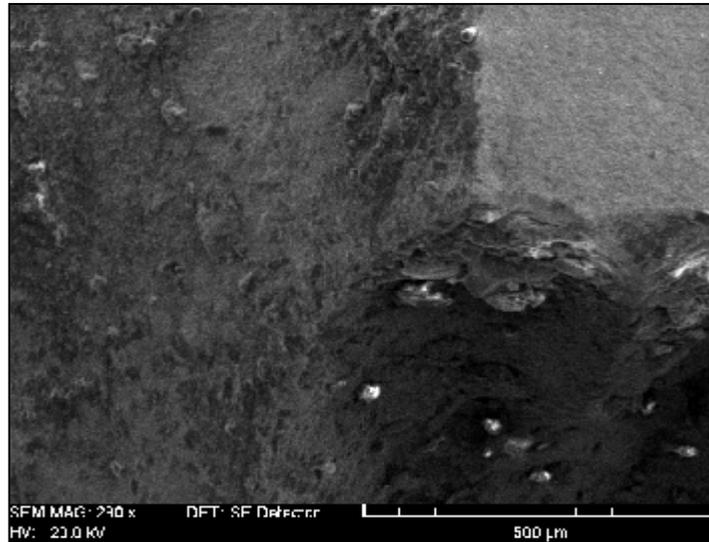
*Figure 9d : Morphologie d'un processus d'usure corrosive par écaillage
P25 + TiN; t=3min30 ; gx591*



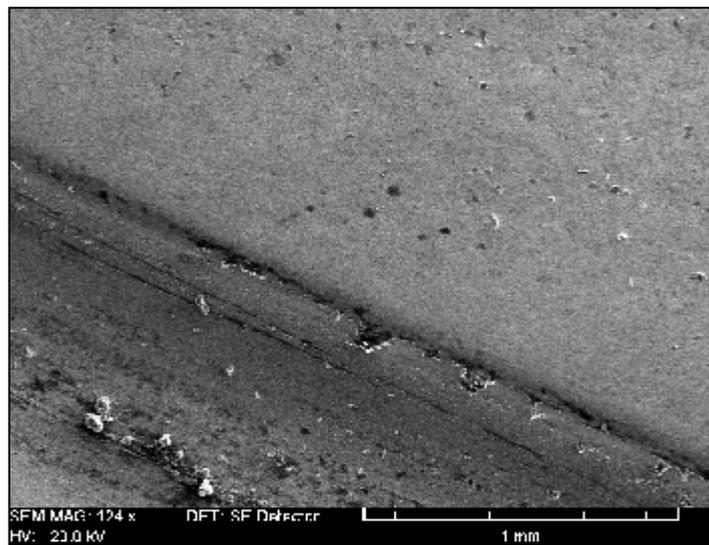
*Figure 10a : Nucléation de fissures près de l'arête
P25 + TiN, t = 5 min, 30 sec; g x 500*



*Figure 10b : Morphologie de la cicatrice d'usure en surface.
Rayure abrasive, sillons dans le sens du glissement
P25 + TiC; t = 3 min; g x 450*



*Figure 11a : Nucléation à la remontée du cratère et formation d'un lit de débris
P25 + TiC; t = 5 min; g x 280*

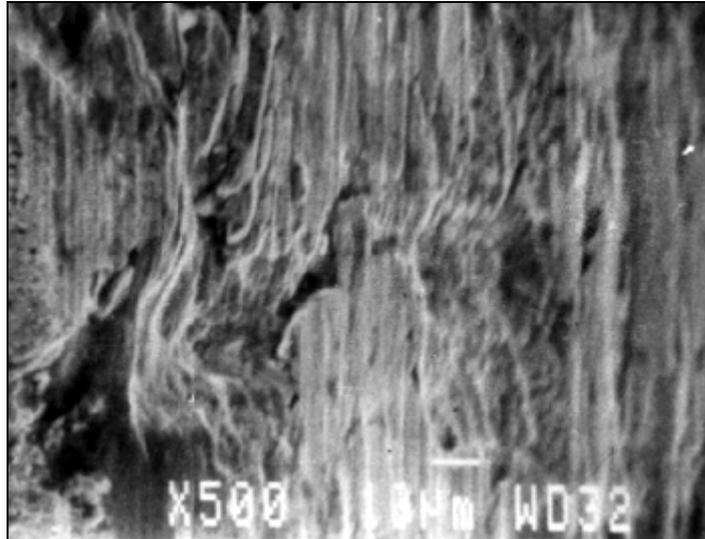


*Figure 11b : Fissuration unidirectionnelle et formation de particule
Avec des micro-cavités
P25 + TiN; t=3min; gx124*

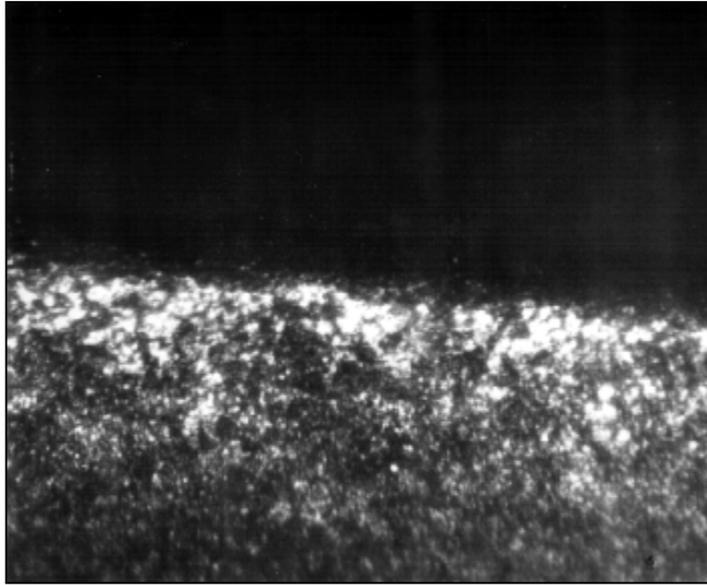
a/



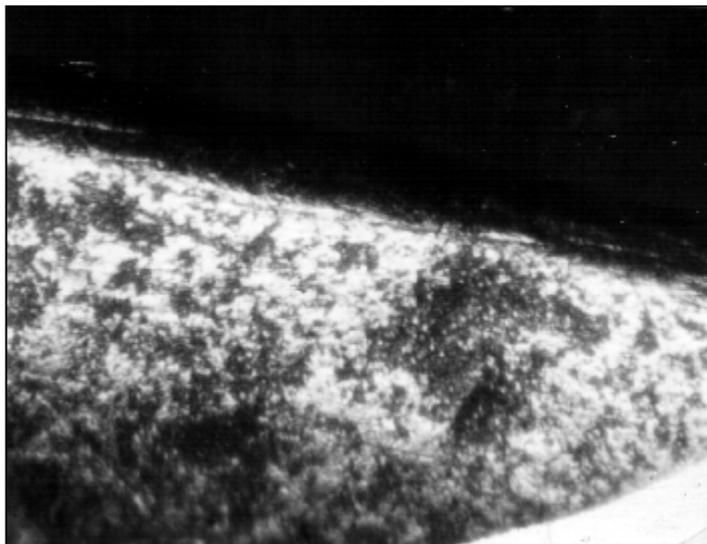
b/



*Figure 12 : Micrographie montrant la formation de la couche blanche à la remontée du cratère sur P25 + TiC
a- g x 800, montrant la matière adhérente.
b- g x 500, formation de l'oxyde dans le cratère.*



*Figure 13a : Transformation tribologique en surface
avec formation d'une couche d'oxyde, g x 200*



*Figure 13b : Formation d'une couche blanche
à la remontée du cratère, g x 800*



Figure 14a : Morphologie du cratère montrant un lit de débris de matière adhérente constituant le troisième corps P25+TiC; gx197

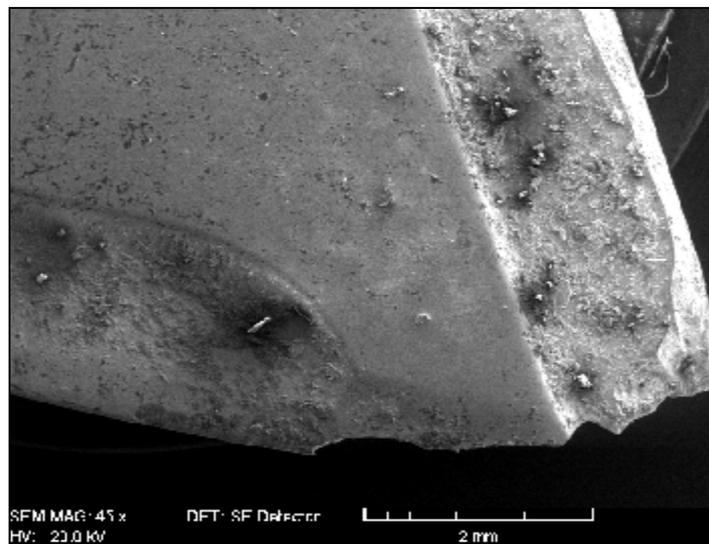
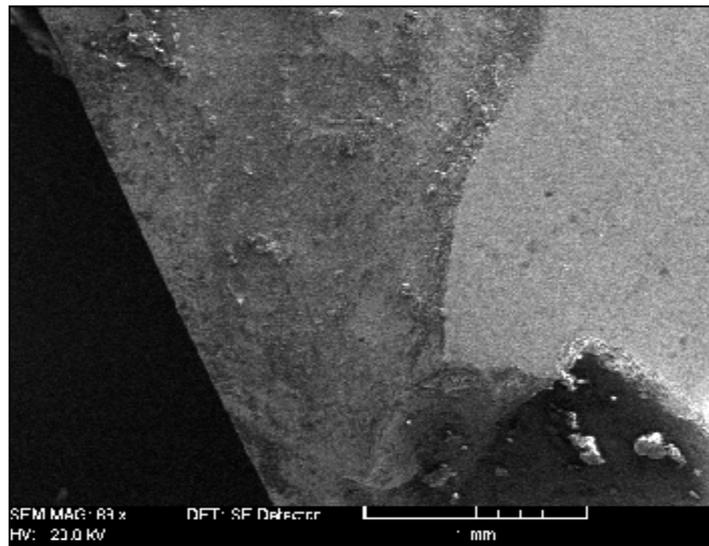


Figure 14b : Morphologie des dégradations et formation d'un amas de matière P25+TiN; gx45

a/



b/

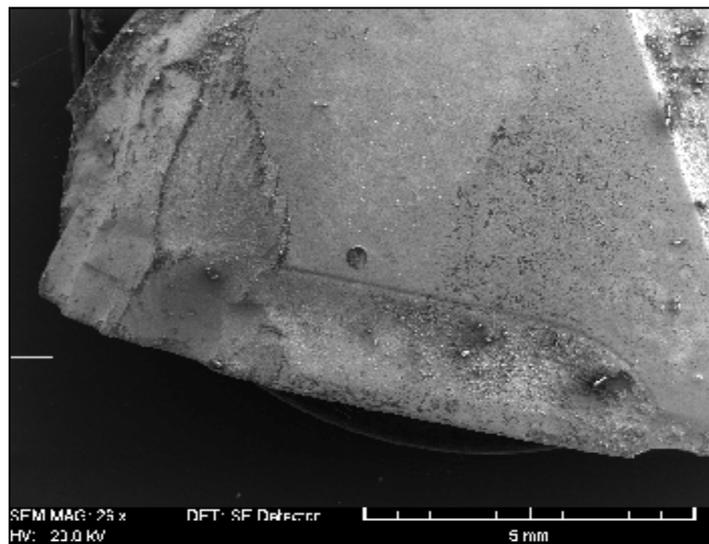


Figure 15 : Morphologie des dégradations par abrasion locale de la surface par les particules du troisième corps et traces juxtaposées de plusieurs formes d'usure

a) P25 + TiN, g x 88

b) P25 + TiC, g x 26

V. RUPTURE PHYSICO-CHIMIQUE DUE A LA PERTE LOCALISE D'ELEMENTS D'ALLIAGES VITAEUX POUR L'OUTIL

Les usures de type chimique résultent d'un travail générant une forte chaleur. Le frottement du copeau sur la surface de l'outil ainsi que celui de la pièce entraîne une augmentation locale de la température qui peut aller jusqu'à 1200°C. Cette température entraîne une prédominance des usures de type chimique. L'élévation des pressions et des températures de la plaquette entraîne une oxydation, de surface modifiant ses propriétés mécaniques. Les figures 16a, b, c, d, montrent la dispersion des carbures de tungstène et les éléments d'alliages vitaeux pour l'outil, à des endroits particuliers à une certaine distance de la surface et de l'interface enrobage-matrice du support, donnent lieu à un mécanisme spécial lié à l'affaiblissement de nature physico-chimique de certaines zones [58, 65].

Dans le cas d'un revêtement parfait et stable, celui-ci ralentira l'usure en faisant office de barrière de diffusion.

Il arrive fréquemment que le matériau usiné joue un rôle chimiquement actif et provoque la destruction rapide de l'outil (figures 17a, b) Wc + Co au contact de l'acier.

Par ailleurs, cet endommagement peut être la conséquence lorsqu'une onde de contrainte de cisaillement se propage sur une surface libre, la déformation provoquée par cette onde, s'effectue à volume constant, c'est à dire, qu'à un instant t le métal est soumis périodiquement soit à une contrainte de compression, soit à une contrainte de contraction; le cisaillement est maximal à la frontière des deux zones. [59, 65]

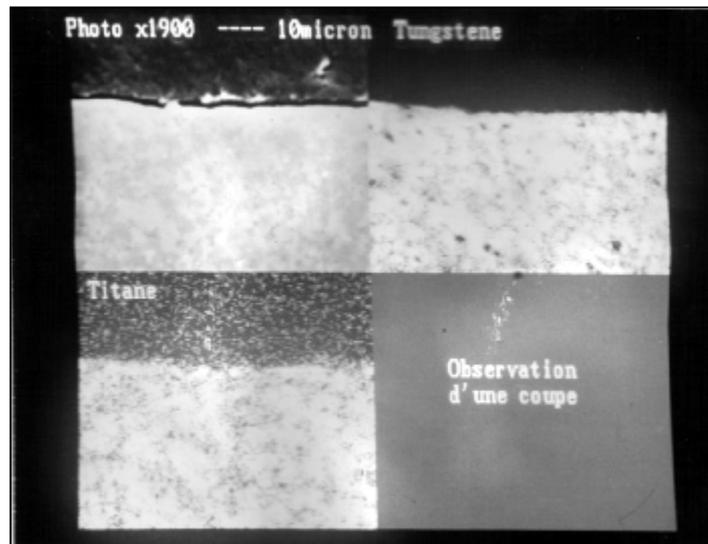
Notons que les phénomènes périodiques observés justifiant l'hypothèse de la propagation d'une onde de cisaillement, ne peuvent être attribués en raison de leur fréquence aux caractéristiques de vibrations du système pièce-machine-outil. La visualisation de l'onde de contrainte a pu être effectuée [45, 46] et sa réalité confirmée par l'observation de zone périodique de migration des carbures dans les outils carbures à revêtement, la période étant identique à celle de la fragmentation des copeaux.

Actuellement, il est encore difficile de se référer à des caractéristiques mécaniques, physiques et physico-chimiques même très bien définies, pour déterminer à priori l'usinabilité

d'un matériaux d'une manière reproductible. Toutefois, les connaissances acquises dans le domaine de l'usinage permettent de mieux prévoir les phénomènes pour améliorer la tenue des outils en service.

L'outil miracle sera inutile tant que l'on ne maîtrisera pas parfaitement les phénomènes au niveau du système complet pièces-outil-machine et ceci est fort complexe malgré les progrès apportés, mais encore insuffisant, dans la connaissance de la formation du copeau.

a/



b/



Figure 16 : Fracture physico-chimique due à la perte localisée d'éléments d'alliages vitaux pour l'outil (recouvrement TiC et TiN) gx x1900; g x 7500

c/

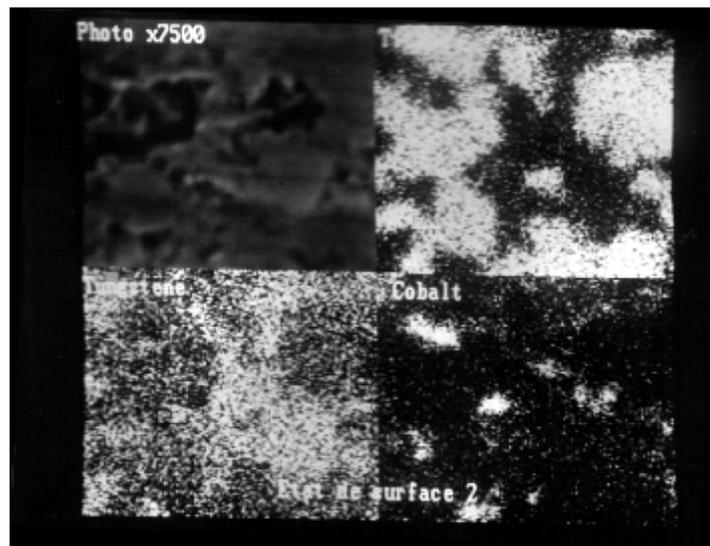


Figure 16c : Fracture physico-chimique due à la perte localisée d'éléments d'alliages vitaux pour l'outil
g x 7500

d/

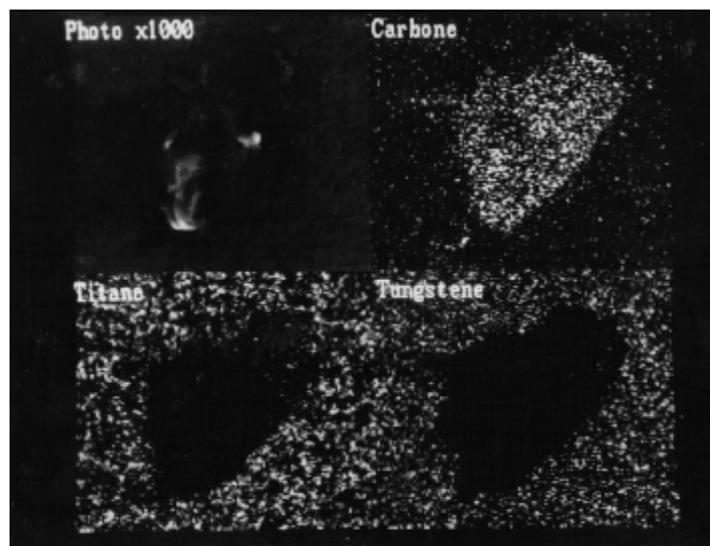
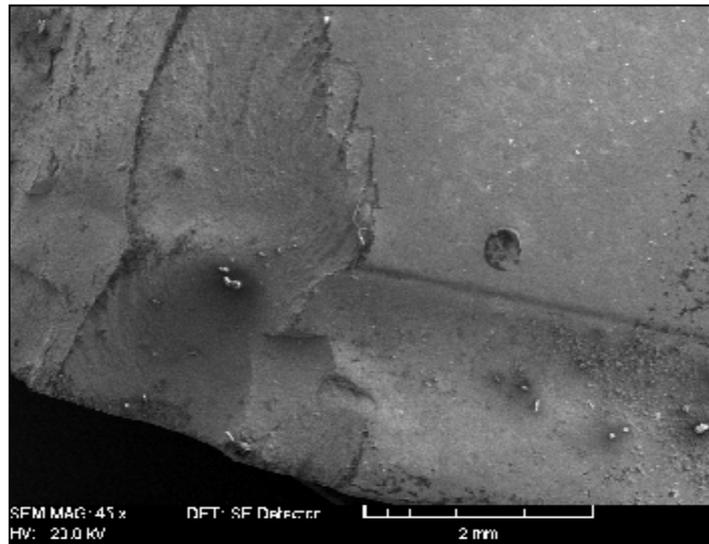


Figure 16d : Micrographie montrant la diffusion des éléments d'alliages vitaux pour l'outil
g x 1000

a/



b/

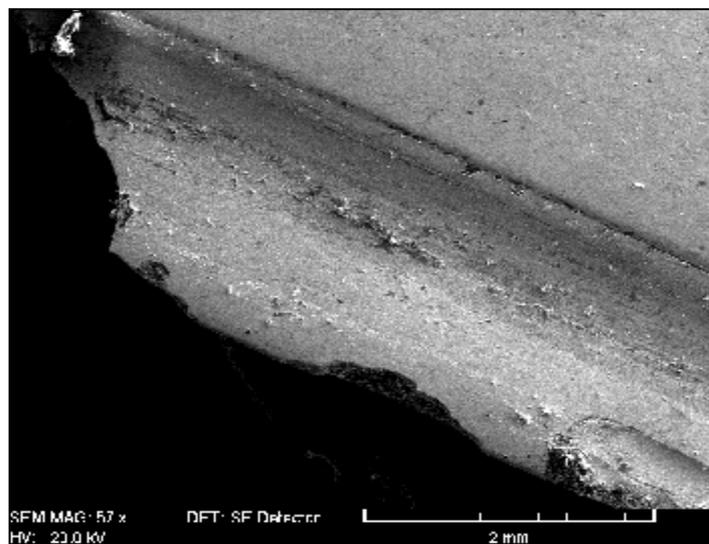


Figure 17 : Morphologie des dégradations par stratification et écaillage et répartition du troisième corps à la surface
a- P25 + TiC; g x 45
b- P25 + TiN; g x 57

VI. USURE PAR FATIGUE PHYSICO-CHIMIQUE

Le microscope à balayage électronique, reproduit les faciés à observer sous le grossissement voulu. L'émission des rayons X permet l'analyse de surfaces et l'identification de divers éléments déposés sur les faciés usés.

Cette analyse se fait à l'aide d'une microsonde qui nous permet d'analyser, à tout endroit, les éléments en déposition.

A travers nos différentes analyses (figure 19a, b) nous avons constaté le phénomène de diffusion des premiers corps dans le troisième corps et d'éléments du premiers corps dans le deuxième corps. Cette perte d'élément, les réactions et les dissociations, diminuent la résistance mécanique et thermique dont le rôle, favorise le mécanisme d'usure.

Aussi, ceci fait apparaître, une diminution de la concentration en cobalt, en fonction du taux d'usure, du fait que le cobalt de structure CFC est isomorphe. La pièce aux températures et aux pressions régnantes à l'interface se retrouve par endroit à l'état austénitique. Cette transformation favorise, la diffusion du cobalt de l'outil vers le copeau, en réduisant la résistance de l'outil en surface [58, 61, 65].

La détérioration rapide, de la phase du liant est la conséquence de la diffusion du fer, dans l'outil qui va former une solution solide avec le cobalt, due à l'importance des gradients, de température et de pression sous l'effet des conditions de coupe [66].

Toutes ces transformations vont donner une éventuelle formation de couche blanche, dont l'épaisseur variera en fonction des sollicitations de pression et température. Cette dernière va faire barrière de diffusion de l'outil vers le copeau et va minimiser la progression de l'usure par cratérisation [44, 55, 57]. L'identification à la microsonde de cette forme de couche blanche révèle que la nature des éléments provient des premiers corps.

L'aspect macro et microscopique de la zone usée (figure 18a, b) de la surface latérale se manifeste par une modification très sévère de leurs états de surface. La zone usée est caractérisée par une surface très rugueuse d'aspect fortement labouré, dont les sillons sont orientés dans le sens longitudinal de l'outil. Une caractéristique importante de la cicatrice

d'usure est d'amas allongé dans le sens longitudinal de l'outil en certaines régions de la zone usée par un empilement successif de couches.

Ces dernières sont très vraisemblablement formées par arrachement de copeau en surface (cisaillement) des premiers corps, qui sont ensuite redéposés pour constituer le troisième corps. Nous observons également au sein de la zone usée de l'outil des ruptures sur les rebords des sillons, ainsi que certaines régions d'aspect poli finement rayées.

Macroscopiquement, le phénomène d'usure qui a affecté la surface se manifeste par la formation d'une couche d'oxyde au sein de la surface de la zone usée, mais sans la recouvrir entièrement. Nous supposons que durant l'essai d'usure, cette couche d'oxyde a subi des déformations qui l'ont réduite par endroits. Le processus d'usure, qui a affecté cet outil, peut donc être caractérisé par la formation d'une couche d'oxyde partiellement décapée.

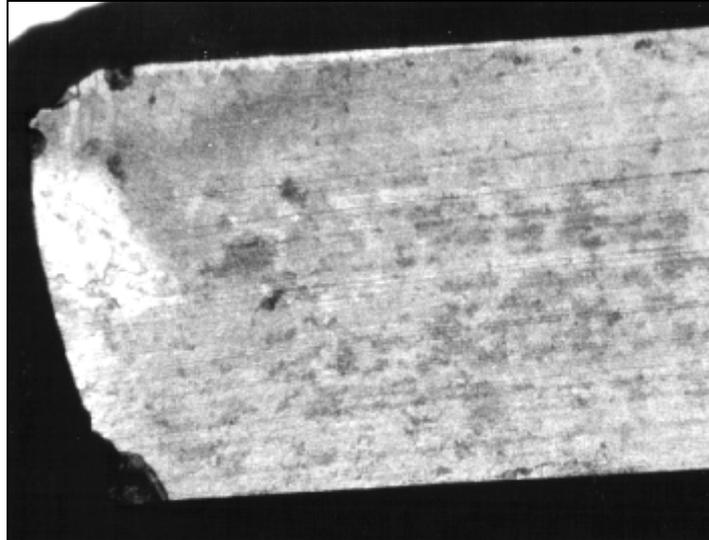


Figure 18a : Aspect macro et microscopique de la zone usée des surfaces latérales avec formation de couche d'oxyde dans le sens de la longueur P25 + TiC.

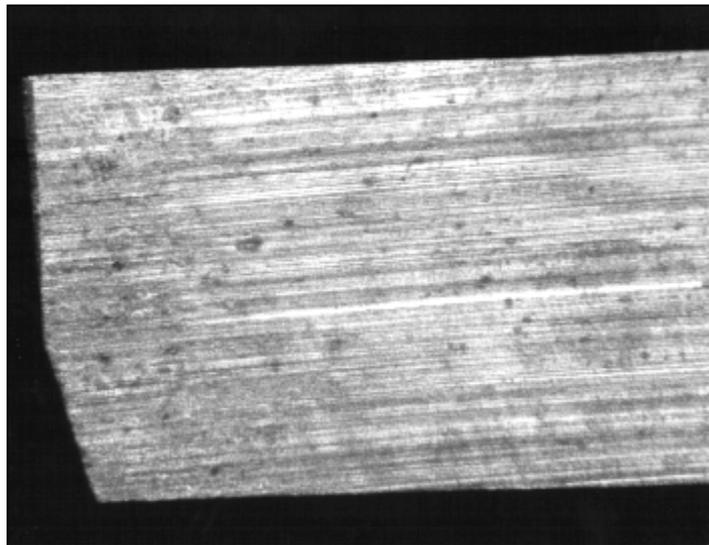
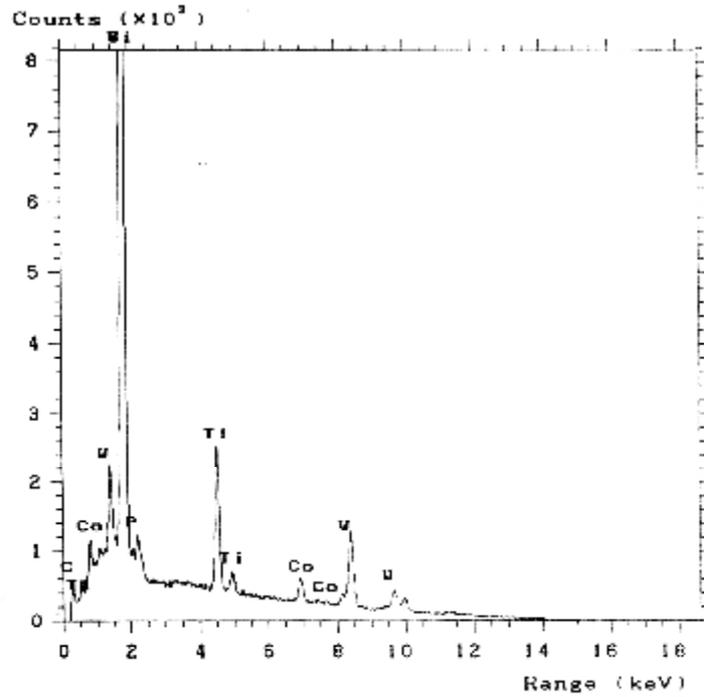


Figure 18b : Morphologie de la cicatrice d'usure en surface P25 + TiN

a/



b/

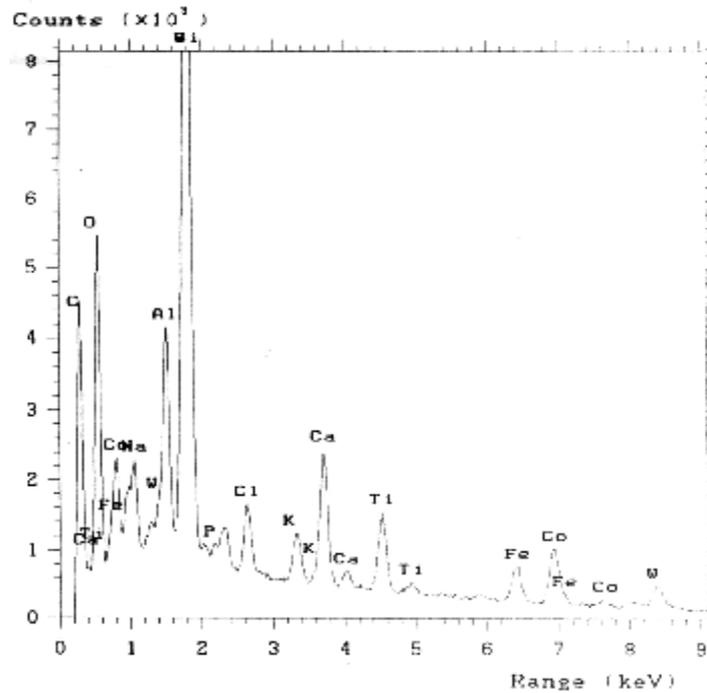


Figure 19 : Analyse de la couche blanche dans le cratère
 a/ à la frontière de la couche blanche
 b/ à l'intérieur de la couche blanche

VII. ETUDE COMPARATIVE DES CARACTERISTIQUES DES REVETEMENTS TiN et TiC

Suivant le type d'usure considéré, le choix du matériau devant constituer la surface peut être fait sur des bases différentes. Il est clair que le choix se portera sur l'élément qui couvrira la gamme la plus large des usures. Si l'on considère les usures abrasives, celles-ci n'entraînent pas nécessairement une forte augmentation de la température de l'outil. Les grains sont déchaussés ou cisailés [58, 61]. La dureté jouera alors un rôle important et plus particulièrement la densité d'énergie de formation qui, est, définie comme le rapport de l'énergie libre de formation moléculaire par le volume de la cellule unité du réseau cristallisé. Cette densité d'énergie définit une pression intérieure qui déterminera l'effort de décohésion [63, 70].

En revanche, les usures du type chimique résultent d'un travail générant une forte chaleur. Le frottement du copeau sur la surface de l'outil ainsi que celui de la pièce usinée entraîne une augmentation locale de la température qui peut aller jusqu'à 1200°C. Cette température entraîne une prédominance des usures du type chimique (Figure 20a).

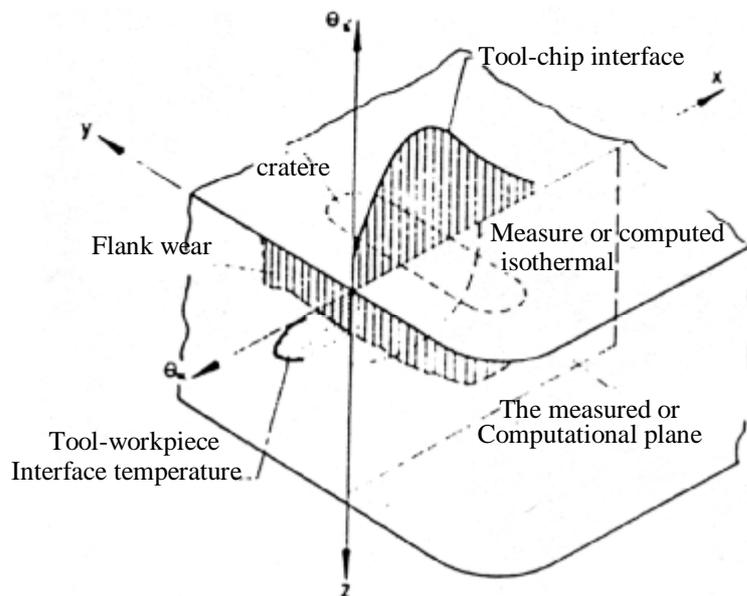


Figure 20-a

L'élévation de la température de la plaquette entraîne une oxydation de la surface modifiant ses propriétés mécaniques. La pellicule ainsi altérée est emportée par le copeau (Figure 20b).

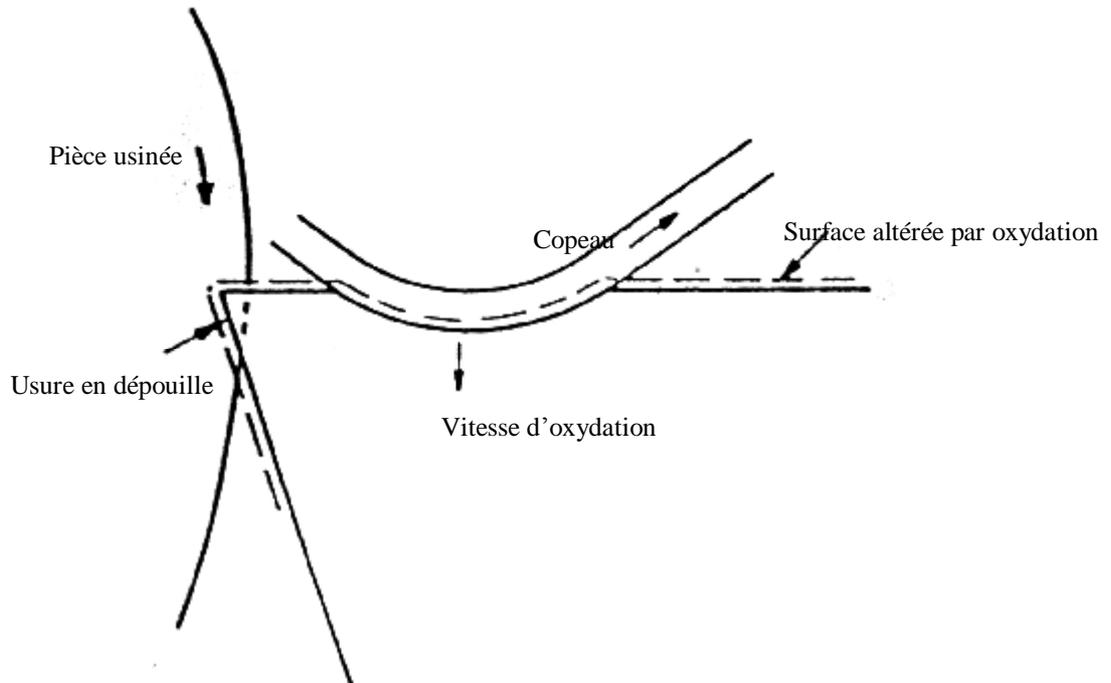


Figure 20-b

L'usure est alors déterminée par la vitesse d'oxydation. Dans ce cas, le revêtement parfait est stable et ralentira l'usure en faisant office de barrière de diffusion.

Il est clair que la stabilité chimique et la tendance à la dissociation ou à l'oxydation joueront un grand rôle dans une usure de ce type [61, 69]. Lorsque le revêtement est parfait, il joue un rôle plus sensible. Toutefois, on constate que celui-ci n'est jamais parfait mais présente un réseau de fissures (figure 6 et 7) ou éventuellement des porosités. Ces défauts sont alors des points faibles lors d'un travail à haute température (Figure 16a, b). L'oxygène pénètre à travers des imperfections de la couche et altère l'assise de la couche. L'outil périra par écaillage ou par rupture brutale.

Il arrive fréquemment que le matériau usiné joue un rôle chimiquement actif et provoque la destruction rapide de l'outil [62, 91].

Les épaisseurs des revêtements sont de l'ordre de 3 à 16 μ . Les essais indiquent que plus la couche est mince, plus elle est élastique, mais également ductile. Ce qui signifie qu'elle peut suivre, sans rupture, les déformations élastiques ou plastiques du matériau de base qui subit [58, 88] l'influence des efforts résultant de l'enlèvement des copeaux. Ceci

entraîne évidemment, une usure prématurée, une couche plus épaisse possède une longévité plus élevée, mais elle a tendance à s'écailler et à se déchirer. Les micrographies effectuées durant les essais reflètent ce type d'usure [68].

VIII. CONCLUSION

L'examen au microscope électronique à balayage a révélé quatre phénomènes d'endommagement de l'outil.

1) Le premier phénomène est l'observation de fissures dans la matrice dûes à une propagation d'ondes de surfaces. Ces ondes de surface sont le résultat de choc dûs aux engagement et déengagement de l'outil. Ces fissures peuvent créer une rupture brutale et montrent que le revêtement peut ne pas être favorable.

2) Le second phénomène est l'observation de déformations plastiques dûes au contact entre le copeau et l'outil. Elles se forment essentiellement dans la partie chaude de l'outil et se caractérisent par la formation de micro-cavités et micro-fractures. Celles-ci sont probablement le résultat d'un processus de fatigue ou de corrosion de contact.

3) Le troisième phénomène est l'observation d'une usure chimique dûe au travail de forte chaleur. En effet, celle-ci crée une oxydation qui modifie les propriétés mécaniques.

4) Le dernier phénomène est l'observation d'une usure physico-chimique de même indirectement dûe à la forte température. Celle-ci crée en effet, un phénomène physique de diffusion d'éléments vitaux soit vers le deuxième corps, soit vers le troisième corps.

Cette dispersion d'éléments vitaux est néfaste puisque le rôle de ces éléments est justement de limiter le phénomène d'usure.

Chapitre V

Analyse expérimentale des états de surfaces

I. MESURE DES DEFAUTS :

La qualité des surfaces en contact est étroitement liée au fonctionnement et à la fiabilité des machines. Les usures, les fatigues et les grippages sont en partie gouvernées par les états de surface. Une superfinition n'est pas toujours d'intérêt mécanique ni économique, elle est par exemple bénéfique sur le plan fatigue, mais désavantageuse sur le plan lubrification hydrodynamique. Ces conséquences de l'état de surface, font que l'intérêt qu'elle revêt est d'une grande importance dans l'industrie. C'est pourquoi sa caractérisation ainsi que les méthodes de mesure y aboutissant revêtent d'une grande importance.

L'usinage, opération de mise en forme par outil coupant avec formation de copeaux, a pour but la fabrication de pièces à précision de cotes macrogéométriques et microgéométriques imposées. Ceci entraîne que la solution adoptée ne peut être qu'affaire de compromis car en dehors des progrès techniques, le prix de revient croît avec la précision géométrique.

Le nombre de variable de coupe, telles que vitesse de coupe ou avance, susceptibles d'influer sur ces deux éléments prix et précision est très grand; TAYLOR en avait déjà dénombré plus de trente alors qu'actuellement il en est compté plus de cent, le problème est donc très complexe.

Jusqu'ici, trois caractères principaux, parmi d'autres, ont été principalement étudiés pour définir l'aptitude à l'usinage, ce sont :

- L'aptitude au fini de surface (fig.1) mesurée par la rugosité des surfaces en contacts.
- La résistance à la coupe mesurée par la force de coupe.
- L'usinabilité caractérisée par l'usure ou par la durée d'outil à usure définie ou par la vitesse de coupe permettant une durée d'outil fixée.

Par ailleurs, les trois aspects principaux de l'aptitude à l'usinage que nous venons d'évoquer ne présentent pas la même difficulté de l'usure. Les cotes macrogéométriques ou microgéométriques et les efforts de coupe ne demande que des mesures instantanées ne présentant pas d'autres difficultés que celles de se procurer la matériel nécessaire. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les mesures relatives à la durée d'outil, longues si elles sont faites dans les conditions industrielles, et délicates, car elles demandent un contrôle.

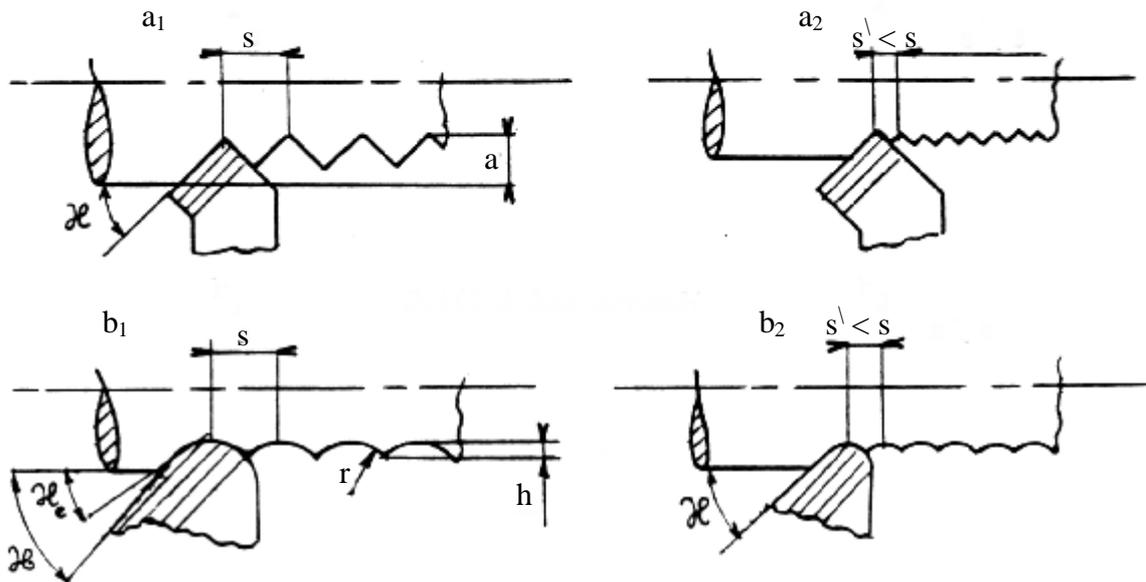


Figure 1 : Forme de la surface effectivement engendrée par le déplacement du tranchant de l'outil

Le profil d'une surface est le résultat de la superposition de ces trois types de défauts. Les défauts de forme sont facilement mesurés avec les instruments de métrologie classiques comme le micromètre ou le pied à coulisse parce que leur période en X est grande. La période des défauts d'ondulation et de rugosité étant plus petite, un palpeur capable de les détecter doit aussi être petit. L'appareil le plus utilisé pour cette tâche est le pertographe, dont le principe de fonctionnement est donné par la Figure 2. Cet appareil comprend un stylet durci (diamant), qui se déplace sur la surface à très basse vitesse (1 mm/s). Le stylet est terminé par une petite pointe (0,5 μm de rayon), qui agit un peu comme un filtre à haute fréquence : les contours plus petits que le rayon de la pointe du palpeur ne sont pas enregistrés.

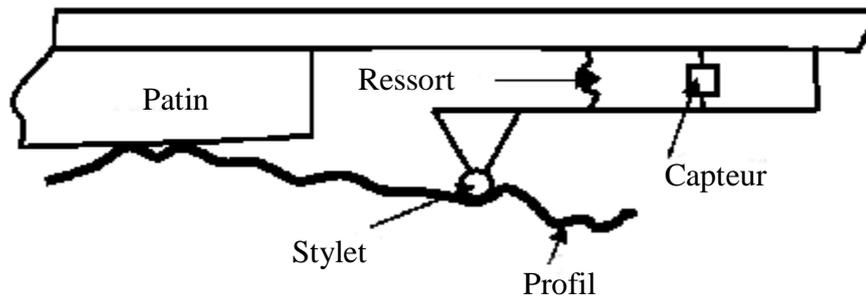


Figure 2 : Schéma du profilographe

Le déplacement du stylet sur le profil est transformé en signal électrique par le capteur. On donne dans le paragraphe III les résultats obtenus sur l'analyse des rugosités par pertographe.

L'autre manière d'étudier les rugosités est d'utiliser le profilomètre optique. C'est un appareil plus moderne, plus précis qui a en plus l'avantage de donner des topographies en 3D. Les résultats de l'analyse par profilomètre optique sont exposés aux paragraphes IV et V.

II. USURE VOLUMETRIQUE CARACTERISEE PAR LA PERTE EN POIDS DE L'OUTIL :

Le tranchant de l'outil, qui constitue l'élément actif par lequel est effectué le travail de déformation, est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques très sévères, qui entraînent son usure et sa dégradation dans un temps relativement limité. Ce sera une source de limitation en fonction de l'endurance de l'outil (figure 15, 16, 17, 19 et 20).

Aussi, l'usure de l'outil de coupe représente la variation du temps effectif de coupe en fonction des conditions géométriques et cinématique de l'usinage.

Ainsi, le temps effectif de coupe est défini comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite de l'outil par le critère de référence (figure 18, 19 et 20).

En effet, les (figures 3a et 3b) matérialisent et montrent l'allure de la variation du temps effectif de coupe des outils expérimentés en fonction du critère d'usure volumétrique ou massique caractérisée par la perte en poids de l'outil (figure 14, 15, 16, 19 et 20).

Ce tracé peut être scindé en trois étapes distinctes. La première correspond à une usure par abrasion ou adhésion, ensuite apparaît la couche de glissement facile, l'abrasion et l'adhésion diminue et on assiste à une amélioration de la résistance à l'usure.

Au-delà de cette amélioration relative est compensée par l'effet néfaste de l'accroissement de la température, qui augmente l'usure par diffusion jusqu'à atteindre le régime de destruction de l'outil (figure 16, 18, 19 et 20).

Par ailleurs, ceci découle des phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et corrélativement des qualités géométriques et mécaniques du couple en contact.

Enfin, cette perte de poids ou usure est la conséquence, de l'usure de ce système tribologique constitué de deux corps, de l'environnement et du produit interfacial ou troisième corps.

Celle-ci est d'abord de nature mécanique contrainte permanente ou cyclique, action du frottement, ce qui exige de l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables [78]. Mais leur sévérité se trouve accentuée par les effets thermiques intenses, qui tendent à dégrader les qualités de résistance du matériau coupant.

En outre, ces effets peuvent donner naissance à des réactions physico-chimiques interfaciales qui peuvent aggraver l'usure de l'outil.

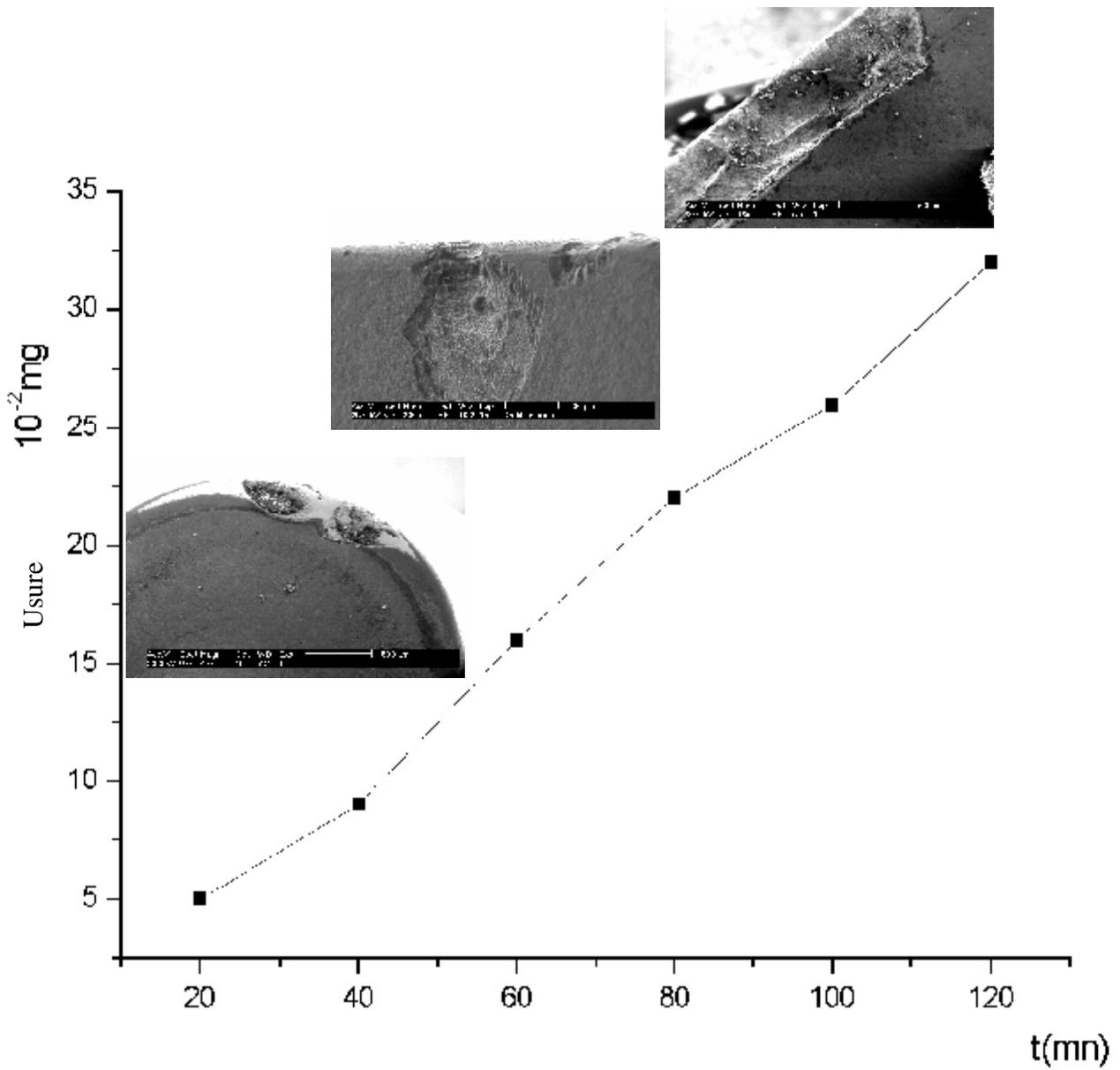


Figure 3a : Essai d'usure volumétrique par la perte en poids de l'outil TiN sur 42CrMo4V

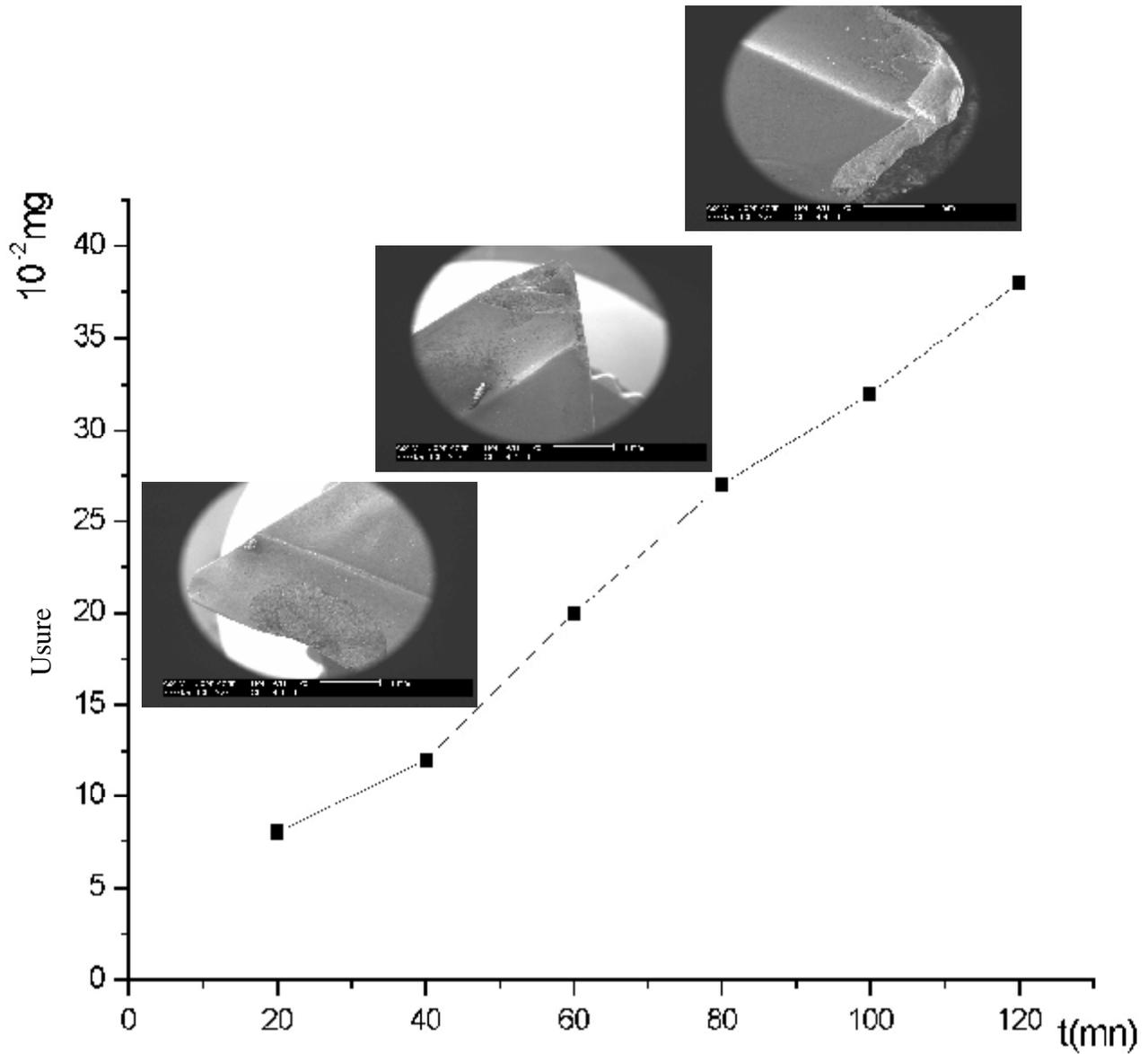


Figure 3b : Essai d'usure volumétrique par la perte en poids de l'outil TiC sur $42\text{CrMo}4\text{V}$
 $V=150\text{m/mn}$, $a=0,3\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$

III. ANALYSE EXPERIMENTALE DES ETATS DE SURFACES PAR PERTOGRAPHIE :

La surface effectivement engendrée par le déplacement du tranchant de l'outil, n'est pas rigoureusement cylindrique mais comporte des sillons hélicoïdaux résultant d'une part de la forme plus ou moins pointue de l'outil, et d'autre part, du contact intime outil-pièce (figures 1 et 2).

Si l'on considère le tracé du profil de ces sillons (figures 4, 5, 7, 10 et 11) dans un plan passant par l'axe de la pièce, on voit que ces sillons ont un profil d'autant plus aigu en dent de scies, que l'acuité du bec de l'outil.

En effet, l'état du bec de l'outil et les défauts d'état de surface résultant des imperfections de la coupe, donnant des ébréchures d'arêtes, écaillage du revêtement et usure en cratère (figures 15, 16 et 17) donne une rugosité de la surface découpée différente de la rugosité théorique.

Cette différence est plus au moins sensible suivant les conditions opératoires (nature des matériaux, vitesse de coupe et avance, type d'outil et son usure, temps et longueur de coupe, conditionnent l'accroissement de la rugosité des surfaces en contact (figures 6, 8, 12 et 13).

La diminution de l'acuité des aspérités va notamment dans le sens d'une amélioration de la tenue des films superficiels favorables et plus particulièrement ceux sensibles aux effets de surcharges localisées (films minces et/ou fragiles à base d'oxydes...).

D'une façon générale, les exigences de rugosité dépendent du niveau de sollicitations et surtout de la nature des matériaux en présence [76].

Les matériaux en vis-à-vis possèdent des duretés très différentes, les risques de dégradation par labourage, abrasion et transfert (figure 16 et 18) conduisent à augmenter la rugosité du couple en contact (figures 6, 8, 12 et 13).

La rugosité optimale peut être évidemment étendue à la topographie générale du contact qui correspond à la recherche d'un compromis entre une portance maximale et la discontinuité du contact [76].

Lorsque le copeau glisse sur la face de dégagement de l'outil, il y a un frottement intense. Comme tous les frottements celui-ci crée des élévations de température micro-localisées, des fusions et micro-soudures, ceci peut aboutir au collage d'une certaine quantité du matériau sur l'outil juste au dessus de la coupe (figures 16, 17 et 18). C'est ce qu'on appelle la fausse arête qui en croissant va complètement changer les caractéristiques de l'usinage, la côte de la pièce finie et l'état de surface, lorsque cette fausse arête aura trop grandi elle sera soumise à des efforts tels qu'elle sera arrachée d'un bloc otée de l'outil (figure 16, 19 et 20), et on reviendra au caractéristiques de coupe précédentes, ce rythme entre la formation d'une fausse arête et son élimination provoque des irrégularités de surfaces semblables à des vagues (figures 14 et 15).

D'autre part, la forme de la surface engendrée par les deux antagonistes peut être affectée par les perturbations de la trajectoire relative outil-pièce occasionnées par des vibrations importantes de l'un de ces éléments ou des deux.

Ainsi, l'observation et la mesure des états de surfaces effectuées conjointement (figures 6, 8, 12 et 13) lors d'un essai de durée de l'outil permettent de déterminer les conditions optimales d'usinage, au moins dans les intervalles choisis judicieusement selon, que l'on se trouve en régime d'ébauche ou de finition.

Par ailleurs, les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant (figures 14, 19 et 21) et corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par certaines modifications d'aspect de celui-ci, visible à l'œil nu à l'aide d'un moyen agrandisseur (figures 15, 16 et 17).

Ces manifestations macroscopiques et microscopiques permettent d'apprécier objectivement l'accroissement de l'évolution des rugosités en fonction de la longueur de coupe des deux antagonistes (figures 6, 8, 12 et 13).

Ainsi, le suivi en continu de la nature et de la rugosité des matériaux en contact montre que la rugosité initiale a un effet important sur la localisation et l'évolution du contact initiale.

Les contacts discrets conditionnent le champ local des contraintes et donc l'épaisseur des zones endommagées [76].

Ainsi, l'apparition d'une seule zone de contact peut entraîner des dégradations très profondes (figures 15, 16, 18, 19, 20 et 21). Alors que dans le cas de contact rugueux, les aires de contacts seront réparties sur toutes les surfaces en regard. La longueur des premières fissures (figure 14) et leur nocivité dépendent fortement de cette géométrie rugueuse.

Le comportement des premiers corps est décrit par leur aptitude à accommoder le déplacement imposé. Si l'effort normal est entièrement transféré aux premiers corps, aussi bien au niveau microscopique qu'au niveau macroscopique. Les efforts tangentiels, transmis par l'intermédiaire des interfaces ne le sont qu'en fonction de la notion d'adhérence entre les surfaces [50].

Aussi, le déplacement relatif entre ces surfaces rugueuses ne peut s'obtenir que par fissuration de l'interface ou fissuration des substrats. A cause de l'adhérence, une partie du déplacement peut être accommodée par la déformation plastique des couches superficielles qui s'écrouissent et qui peuvent être le siège de modification structurale [77].

Il est donc possible à ce stade du processus de définir deux types de bons matériaux tribologiques.

Un matériau qui sacrifie rapidement sa surface pour protéger le volume. Les débris apparaissent rapidement et toute la suite de l'usure sera dictée par la possibilité de piégeage du troisième corps. Ceci est rencontré en particulier dans le cas de revêtement dur qui émettent des débris dès le premier mouvement [77].

Aussi, ces matériaux sont capables d'accueillir longtemps des niveaux élevés de déformation plastique (figures 14, 15 et 16), c'est le cas de ces revêtements ductiles qui

retardent fortement l'apparition des débris. Lorsque la dégradation apparaît elle concerne une grande épaisseur de la matière (figures 15, 16,19 et 20).

Enfin, la nature et la rugosité des matériaux en contact produisent des particules d'usure, dont une partie sous l'action des écoulements et des pressions dans le contact adhère à l'outil pour former le film de transfert. Ce film intervient comme condition ou limite et contrôle totalement, l'écoulement des troisièmes corps à l'intérieur du contact.

Fichier Cartographie4-P1.cdr

Fichier Cartographie4-P2.cdr

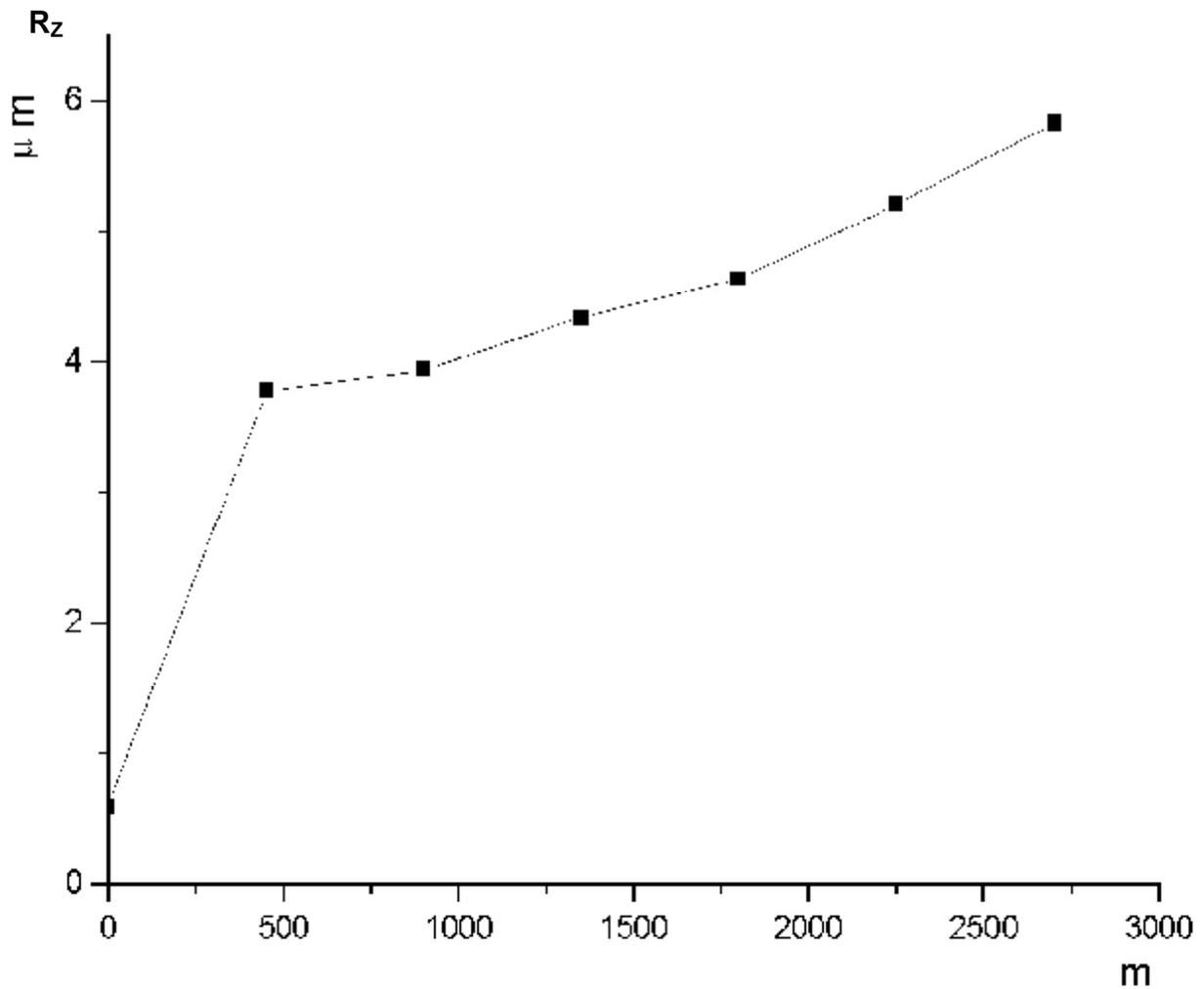


Figure 6 : Evolution de la rugosité R_z de l'outil de coupe TiN sur demi axe $42CrMo4V$, en fonction de la longueur de coupe
 $V=450m/mn$, $a=0,4mm/tr$, $p=1mm$

Fichier Cartographie4-P3.cdr

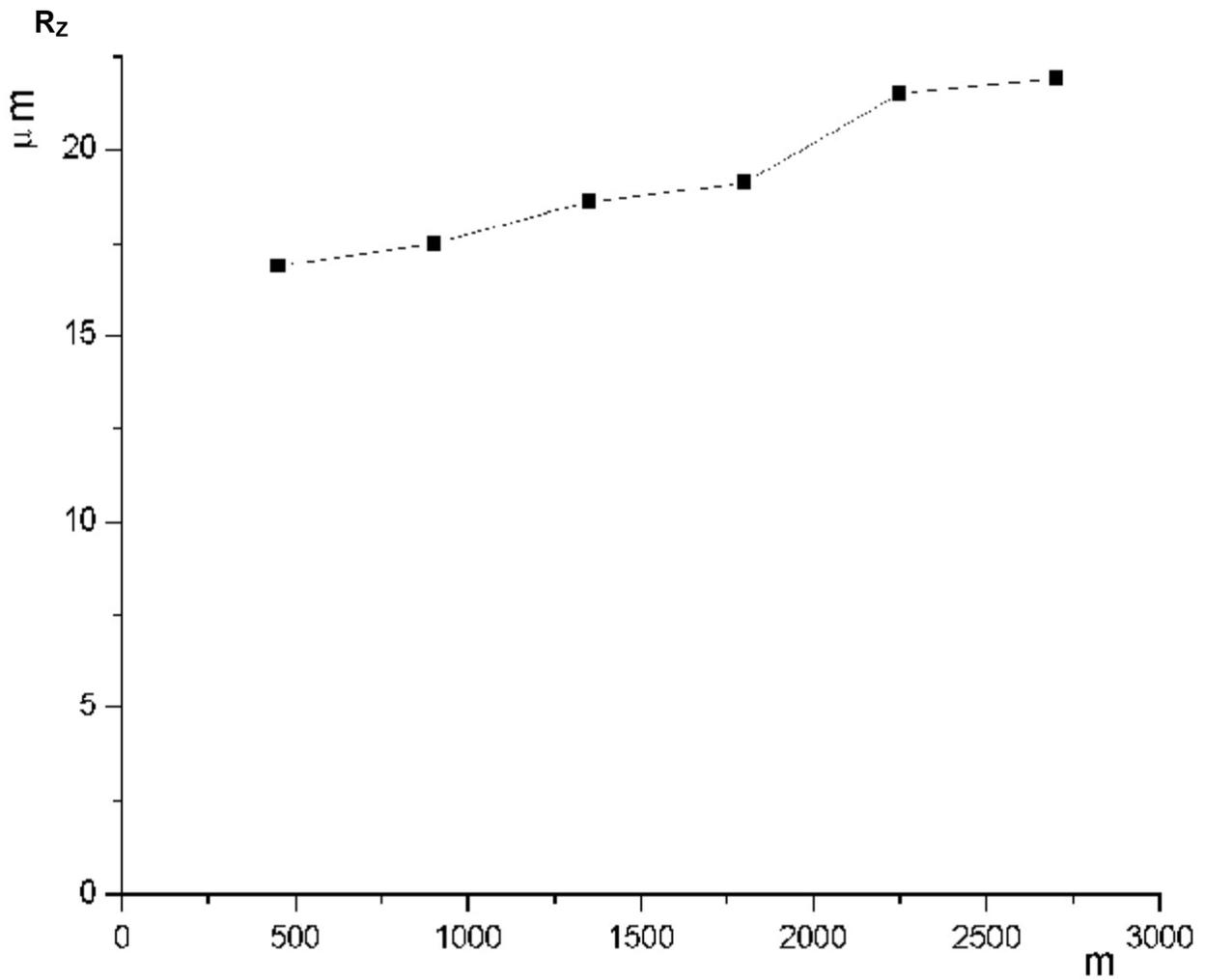


Figure 8 : Evolution de la rugosité R_z de la matière usinée demi axe
42CrMo4V sur l'outil de coupe TiN
 $V=450\text{m/mn}$, $a=0,4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$

Fichier Cartographie4-P4.cdr

Fichier Cartographie4-P5.cdr

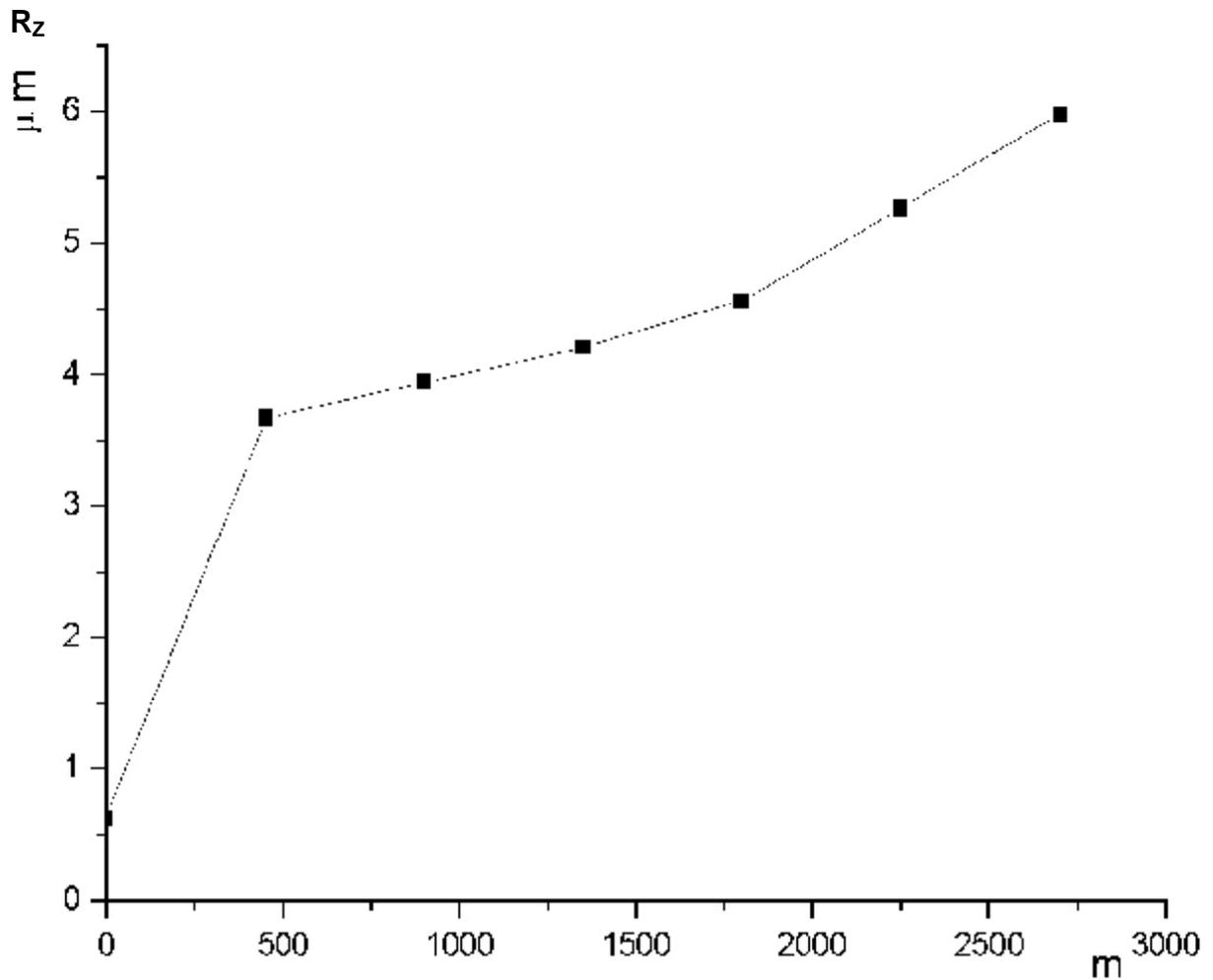


Figure 12 : Evolution de la rugosité R_z de l'outil de coupe TiC sur demi axe $42\text{CrMo}4\text{V}$ en fonction de la longueur de coupe
 $V=150\text{m/mn}$, $a=0,3\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$

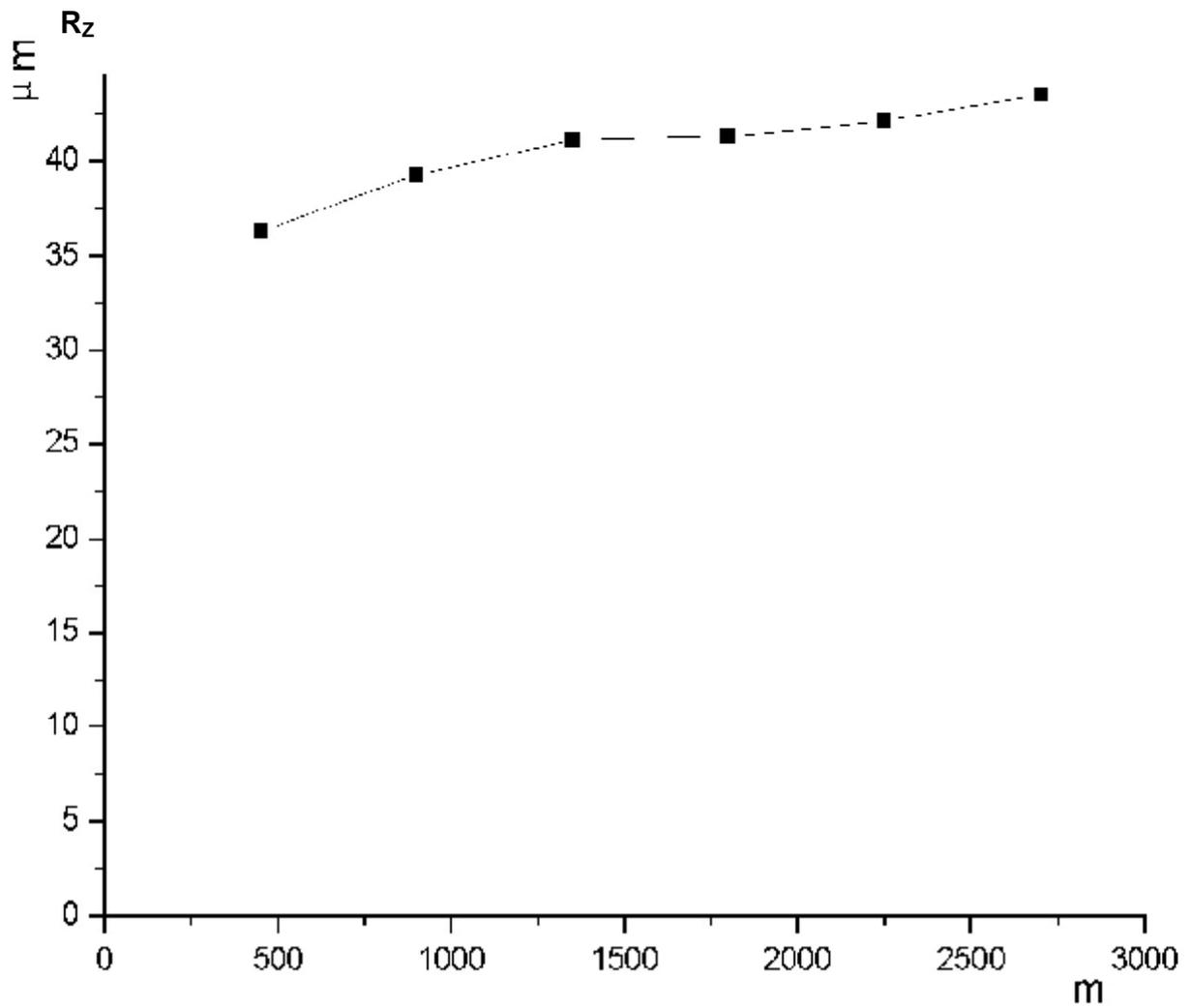
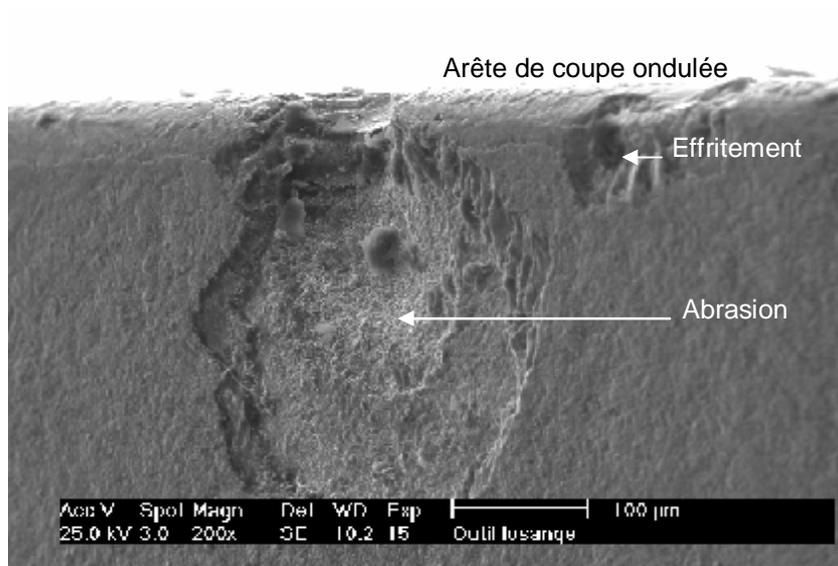
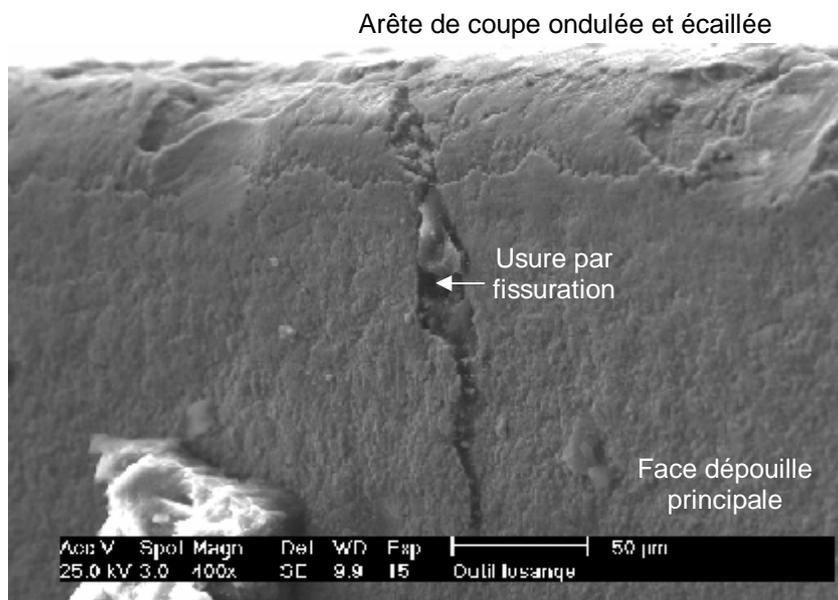


Figure 13 : Evolution de la rugosité R_z de la matière usinée demi axe 42CrMo4V sur l'outil de coupe TiC en fonction de la longueur de coupe $V=150\text{m/mn}$, $a=0,3\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$



a/



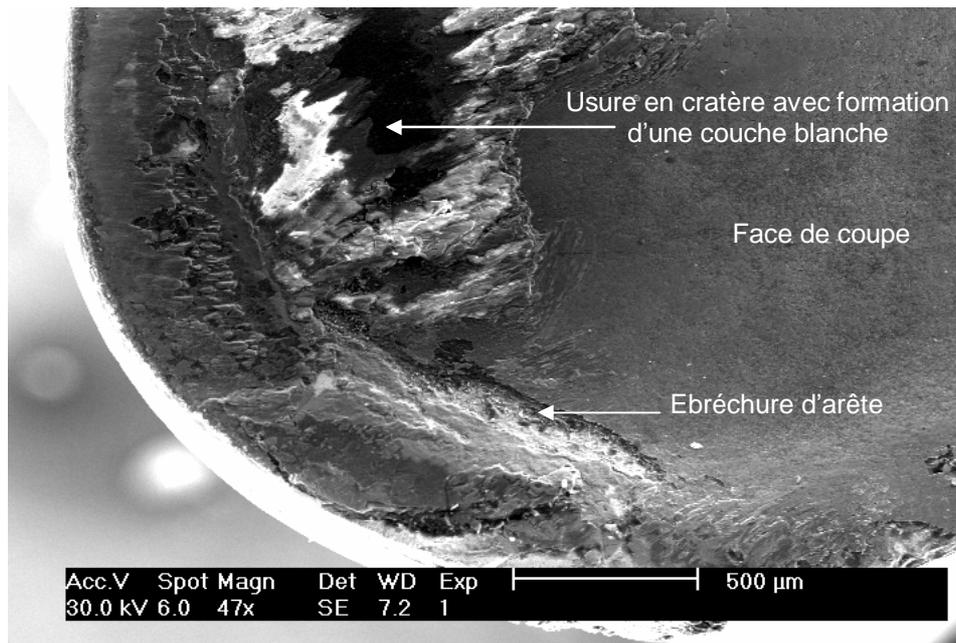
b/

Figure 14 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

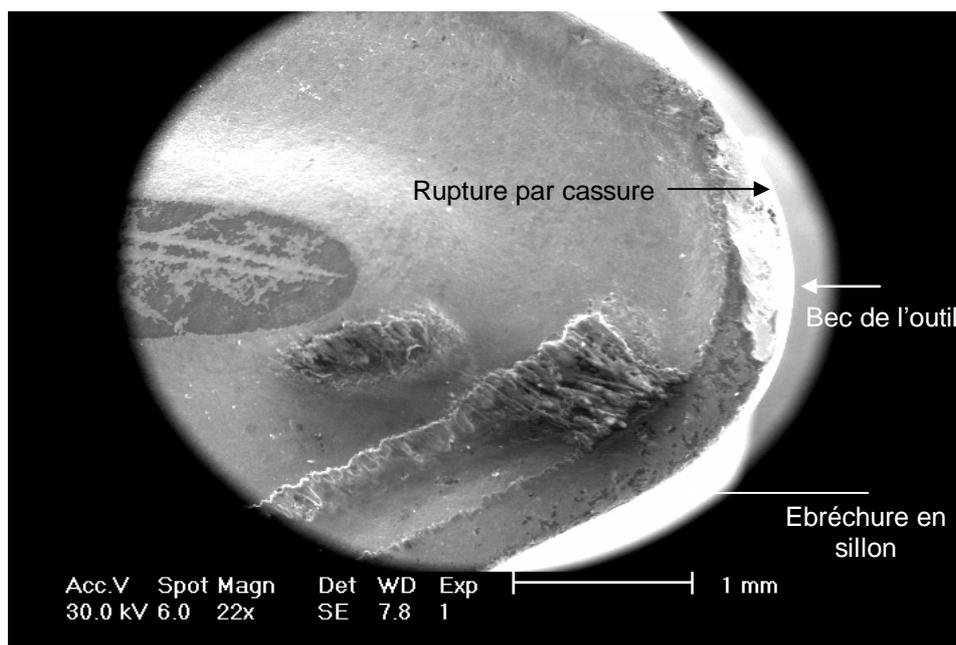
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Usure par abrasion et effritement

b/ Usure par fissuration et écaillage



a/



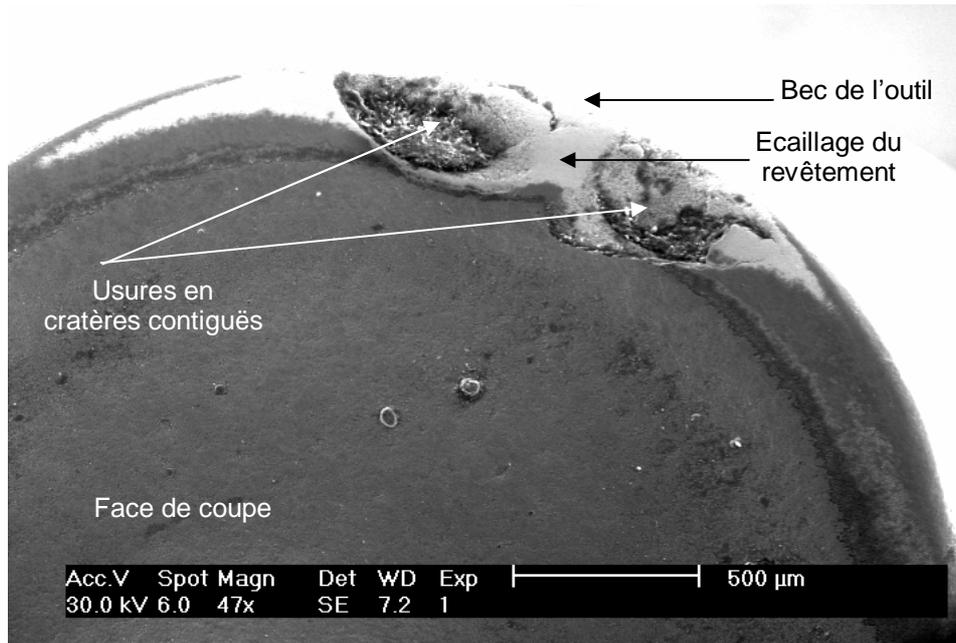
b/

Figure 15 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

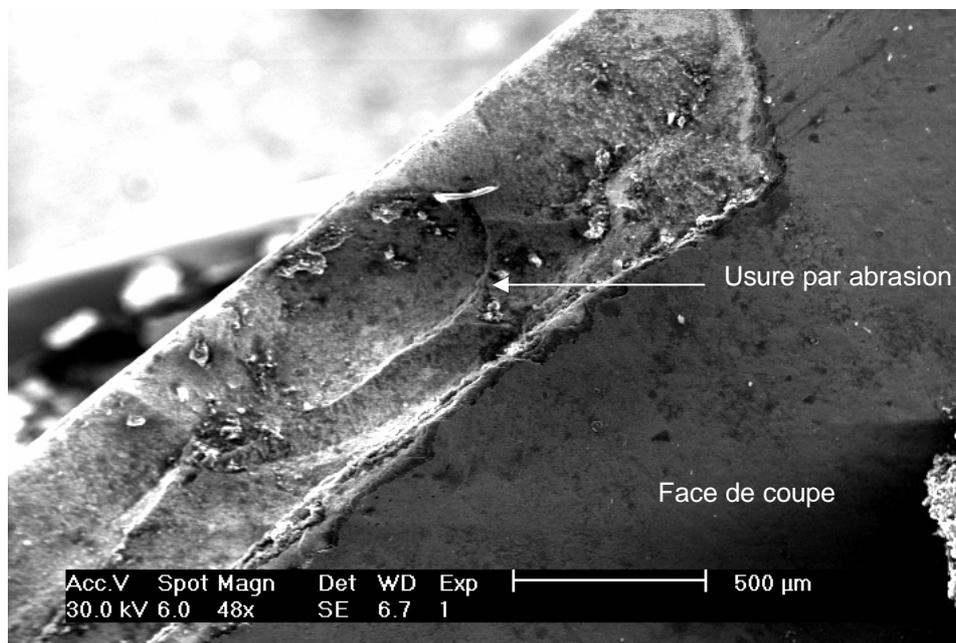
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Usure en cratère avec formation d'une couche blanche

b/ Usure par ébréchure d'arête en sillon



a/



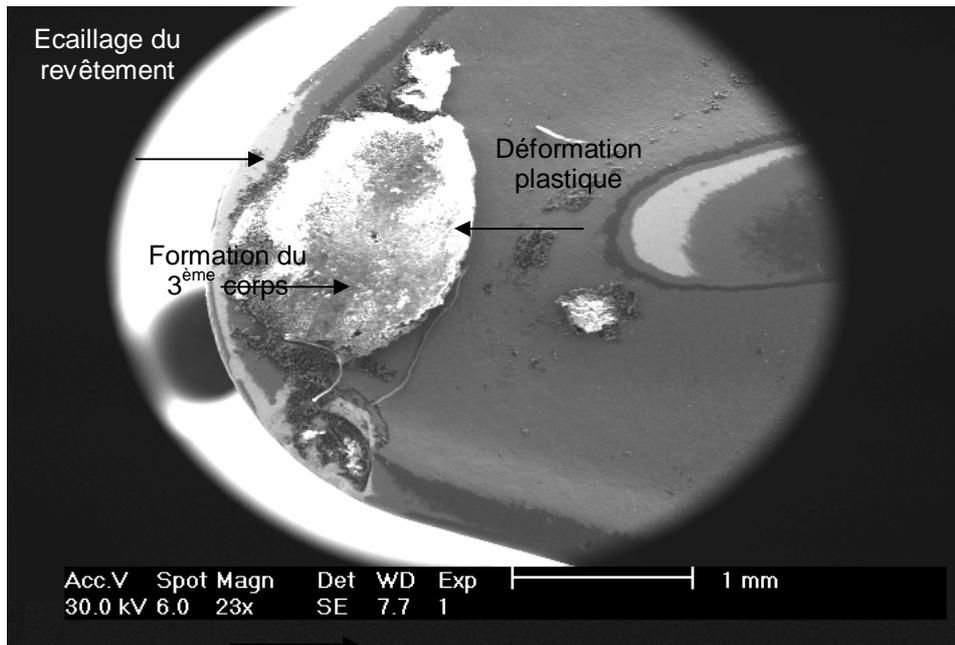
b/

Figure 16 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

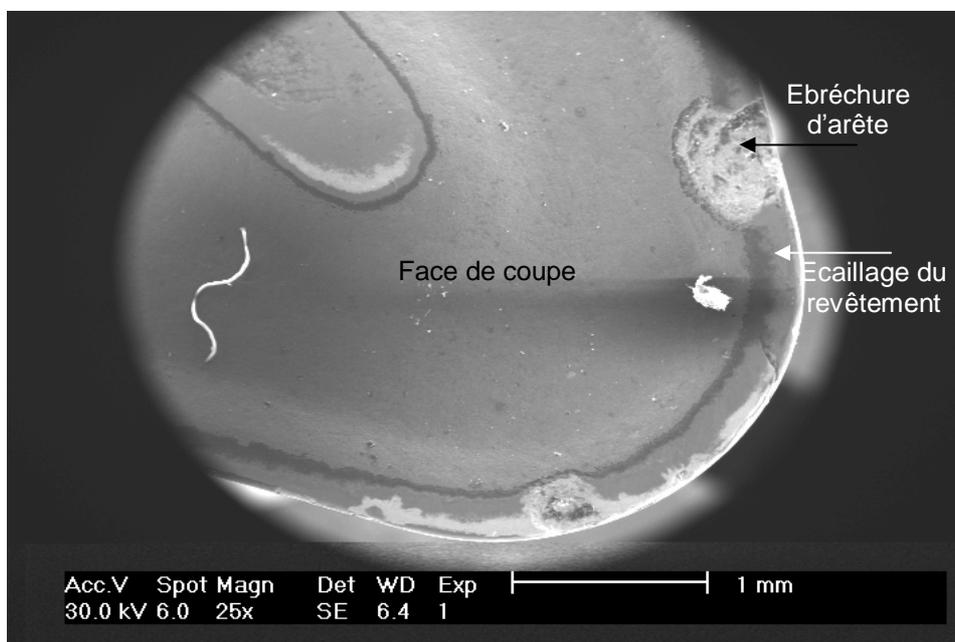
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Formation de deux usures en cratères contigus

b/ Usure par abrasion



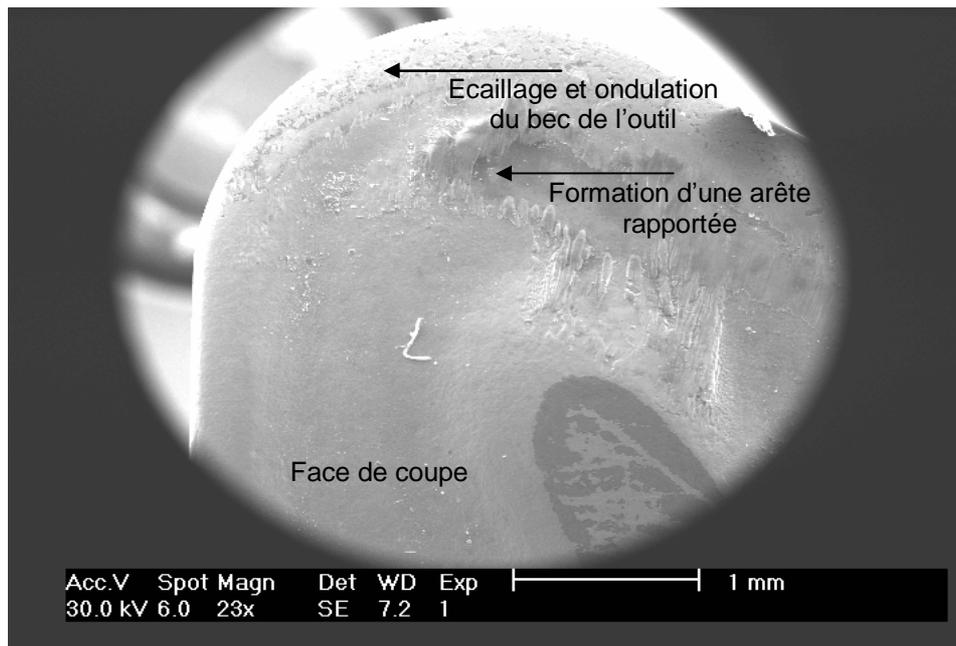
a/



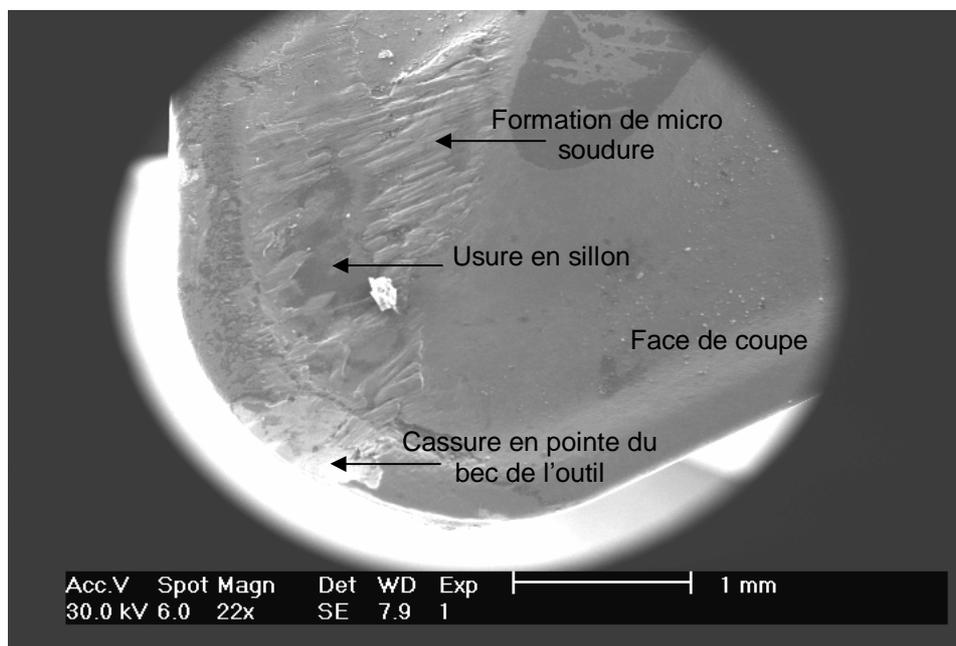
b/

Figure 17 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$
a/ Usure en cratère avec formation du 3^{ème} corps
b/ Ebréchure d'arête et disparition du revêtement par endroit



a/



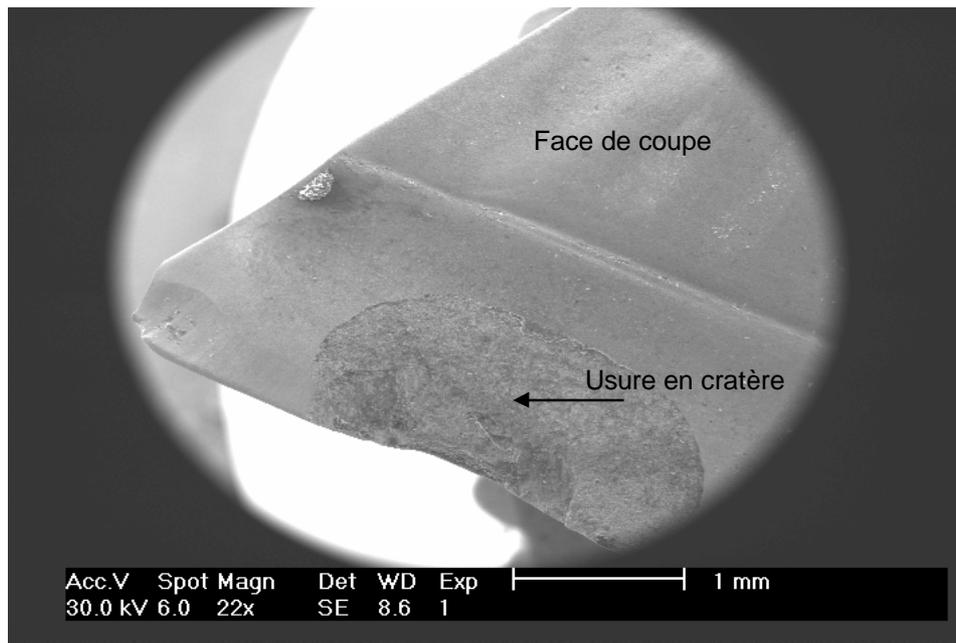
b/

Figure 18 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

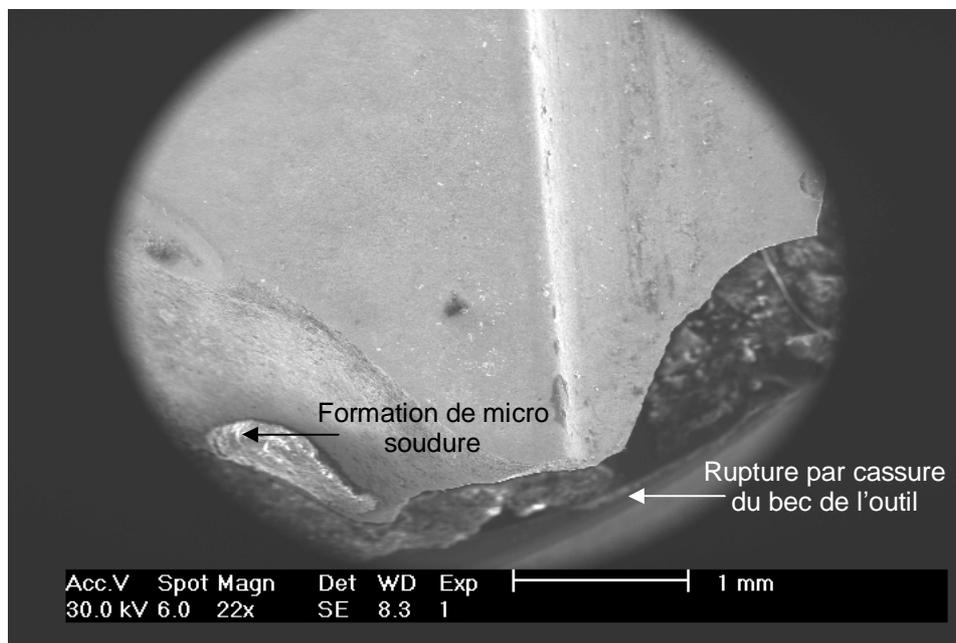
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Usure par ébrèchement d'arête et formation d'une arête rapportée

b/ Usure en sillon, par arrachement sur l'arête tranchante



a/



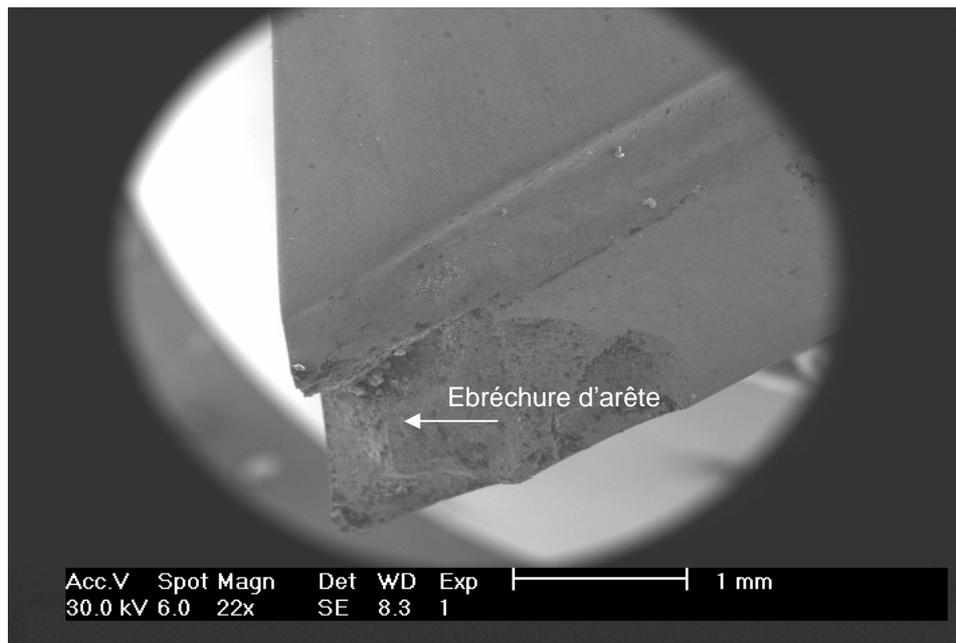
b/

Figure 19 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

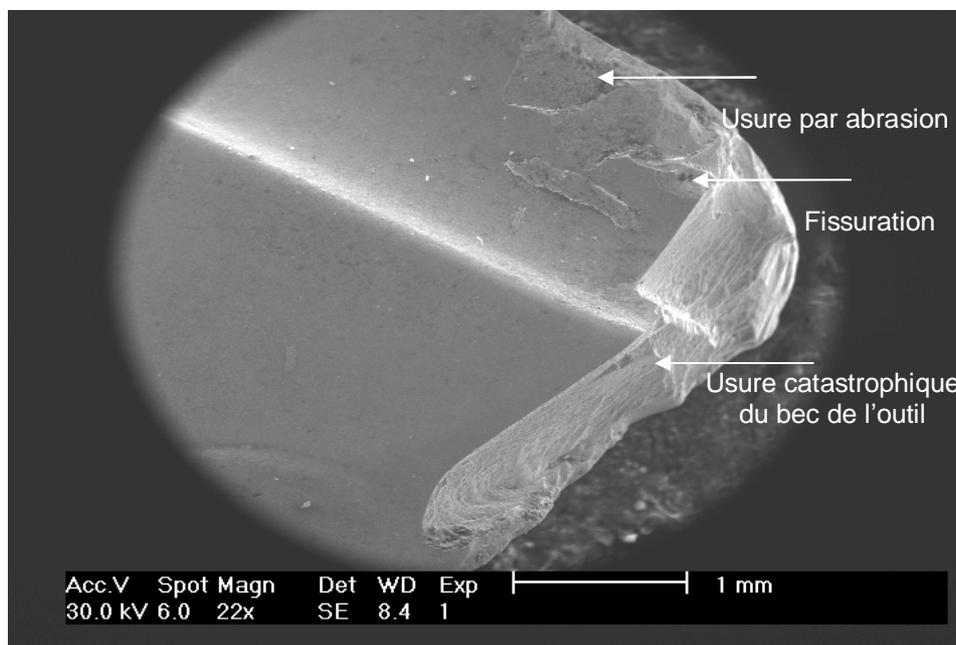
$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=20\text{mn}$

a/ Usure en cratère

b/ Rupture par cassure en pointe



a/



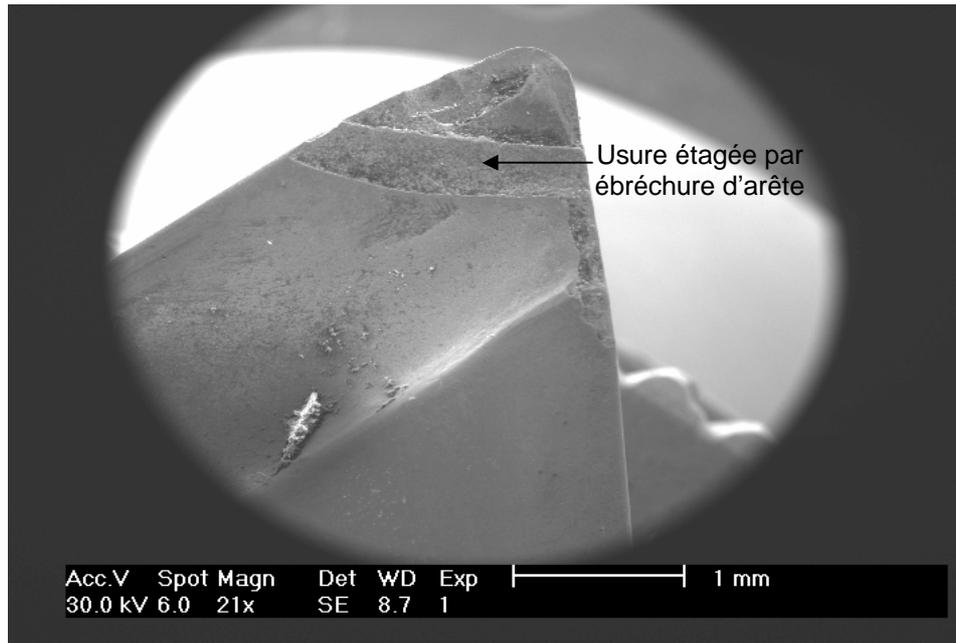
b/

Figure 20 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

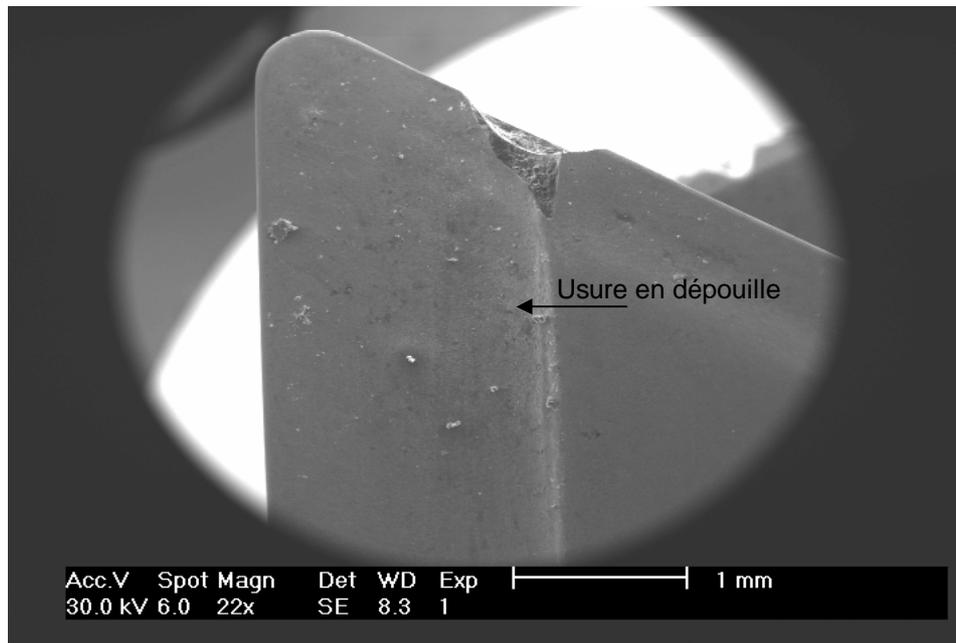
$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=20\text{mn}$

a/ Usure par ébréchure d'arête

b/ Rupture par cassure en pointe



a/



b/

Figure 21 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=30\text{mn}$

a/ Usure étagée par ébréchure d'arête

b/ Usure en dépouille

IV. ANALYSES ET DISCUSSIONS DES RELEVÉS PROFILOMETRIQUES A 3D

Les relevés sur profilomètre optique mettent en exergue la morphologie de l'état de surface à trois dimensions de l'arête tranchante. On distingue une topographie très labourée représentée par quatre stratifications étagées de couleurs distinctes le rouge, le jaune, le violet et le bleu, avec une précision dimensionnelle. A travers cette topographie, on distingue aisément les progressions de l'usure des outils de coupe, les imperfections à travers les différents revêtements, les déformations plastiques et physico-chimiques que l'outil subit au cours de l'usinage (figures 22a, b, c).

Indépendamment de cela, cette résolution nous permet d'obtenir des profils bidimensionnels pour l'exploitation statistique de ces mesures. La géométrie de ces rugosités réduit la largeur du contact; la charge normale appliquée et modifiée pour conserver la même valeur de la charge par unité de largeur.

Ces rugosités contrôlent la production et l'utilisation des particules d'usure du troisième corps. Les rugosités parallèles au sens du mouvement, écrouissent le troisième corps et localisent l'adaptation de vitesse à la surface, ce qui a pour effet d'accroître l'usure.

La nature et la rugosité des matériaux en contact produisent des particules d'usure dont une partie, sous l'action des écoulements et des pressions dans le contact, adhère à l'outil pour former le film de transfert ou troisième corps. Ce film intervient comme condition aux limites et contrôle totalement l'écoulement du troisième corps au cours de l'usinage [47, 48].

Les mouvements de troisième corps ne sont pas simples et sont contrôlés par l'ensemble du contact. Dès le début de fonctionnement, les conditions de géométrie (largeur, rugosité ...) et de cinématique (vitesse, rigidité ...) définissent des mouvements de particules d'usure, qui engendrent un film de transfert [11, 13].

Aussi, la forme de la courbe d'Abbott et Firestone permet d'évaluer la qualité de la rugosité, déduite de surface en u et en m . Par ailleurs, le volume de la surface, ou volume délimité par les rugosités, est beaucoup plus important dans les surfaces en u qu'en m . Cette distinction est importante dans les problèmes de frottement sec qui sont contrôlés par la surface des débris d'usure.

La courbe d'Abbott est une manière plus fine utilisée pour qualifier la forme et l'arrangement des défauts de surface. La courbe d'Abbott a deux intérêts pratiques.

- Elle permet de définir pour une hauteur donnée, le rapport entre l'aire réelle et l'aire apparente du contact,
- Elle peut servir à calculer le volume des creux entre aspérités.

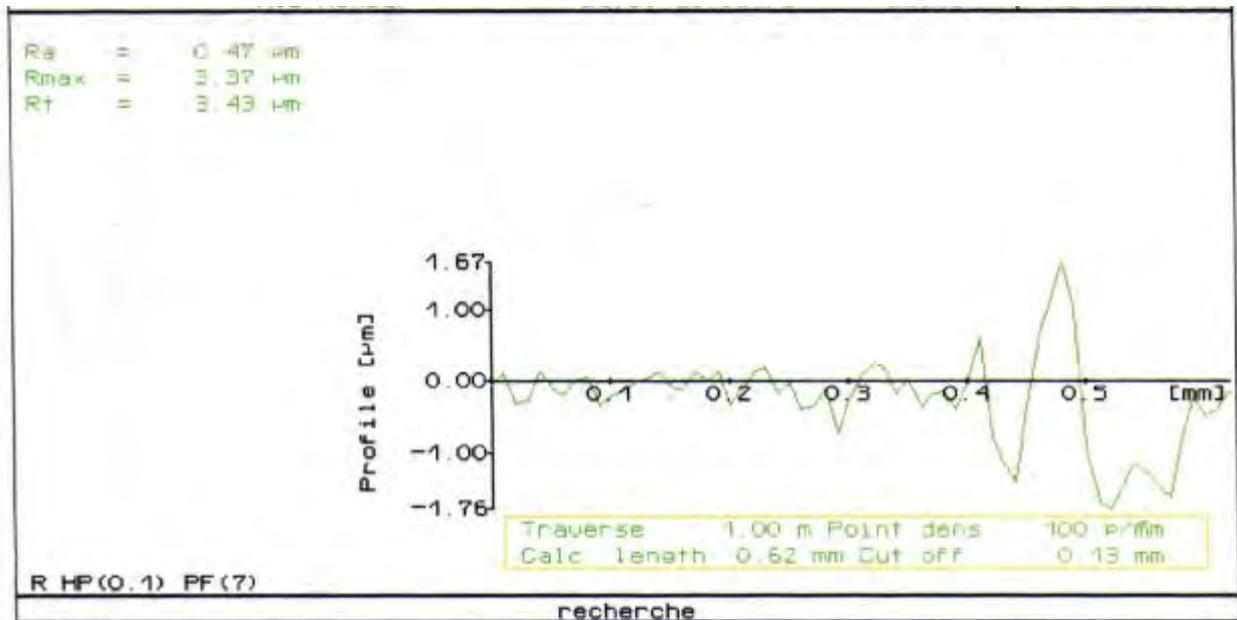
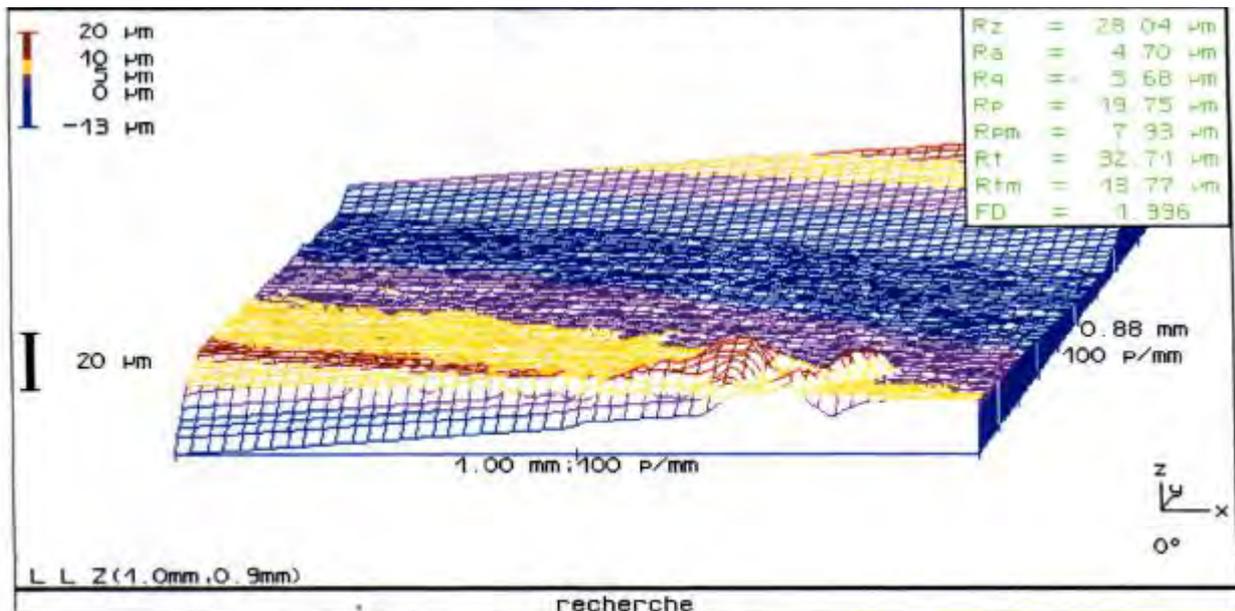


Figure 22a : Déformation plastique et physico-chimique en 3D
Revêtement TiC

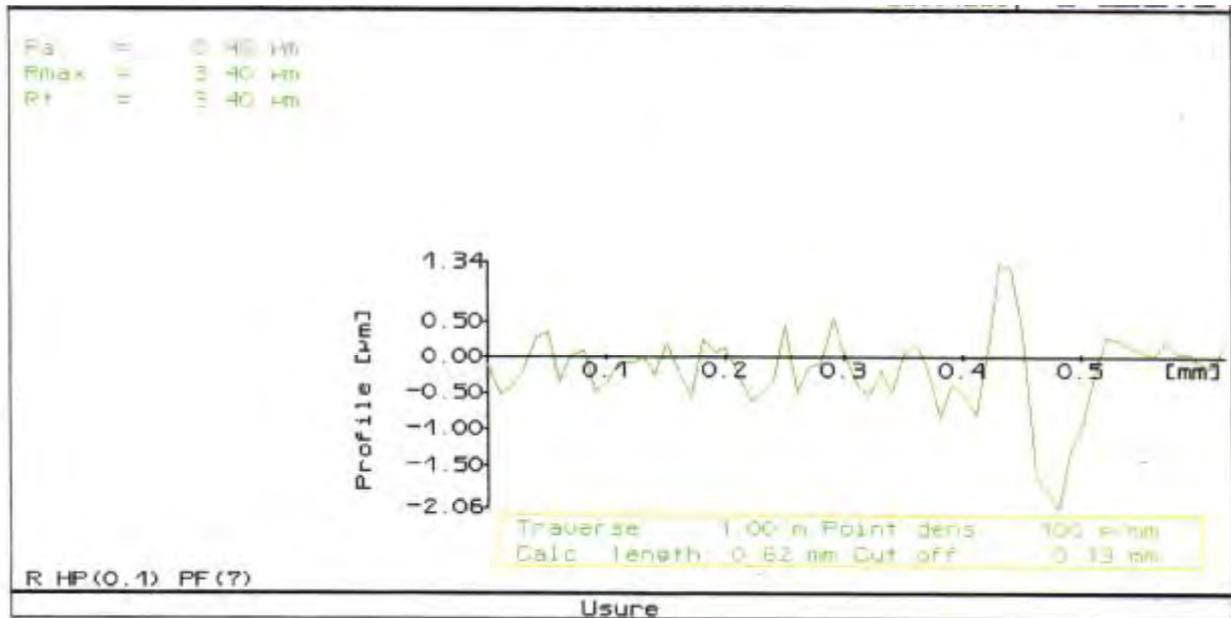
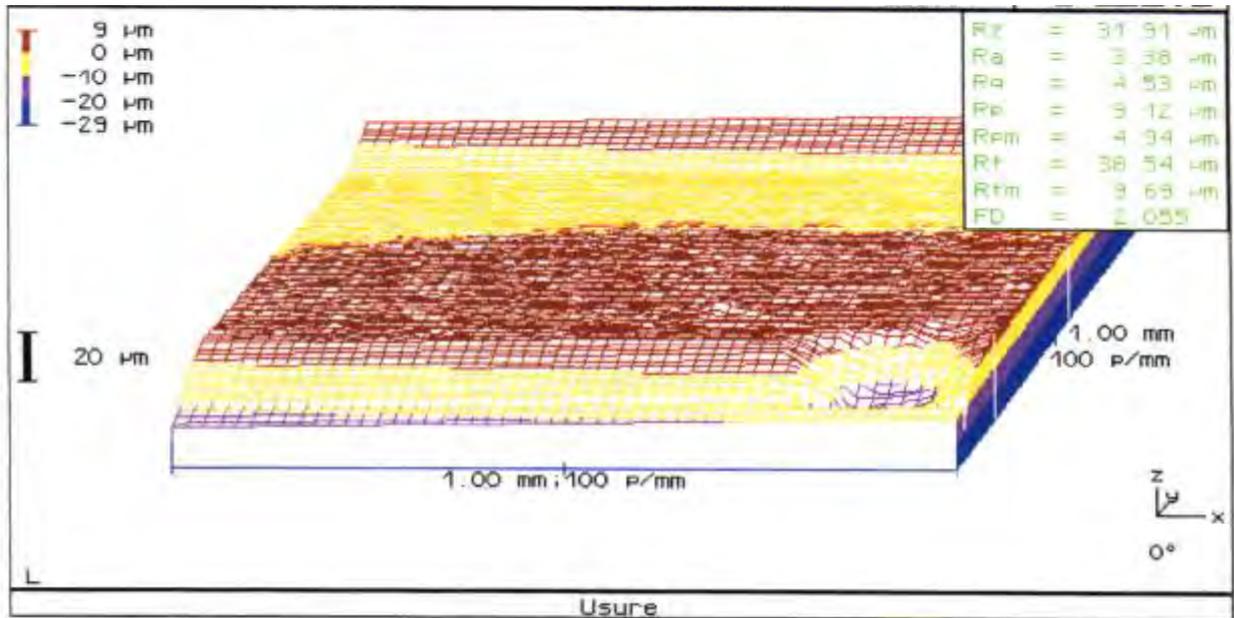


Figure 22b : Déformation plastique et physico-chimique en 3D

Revêtement TiN

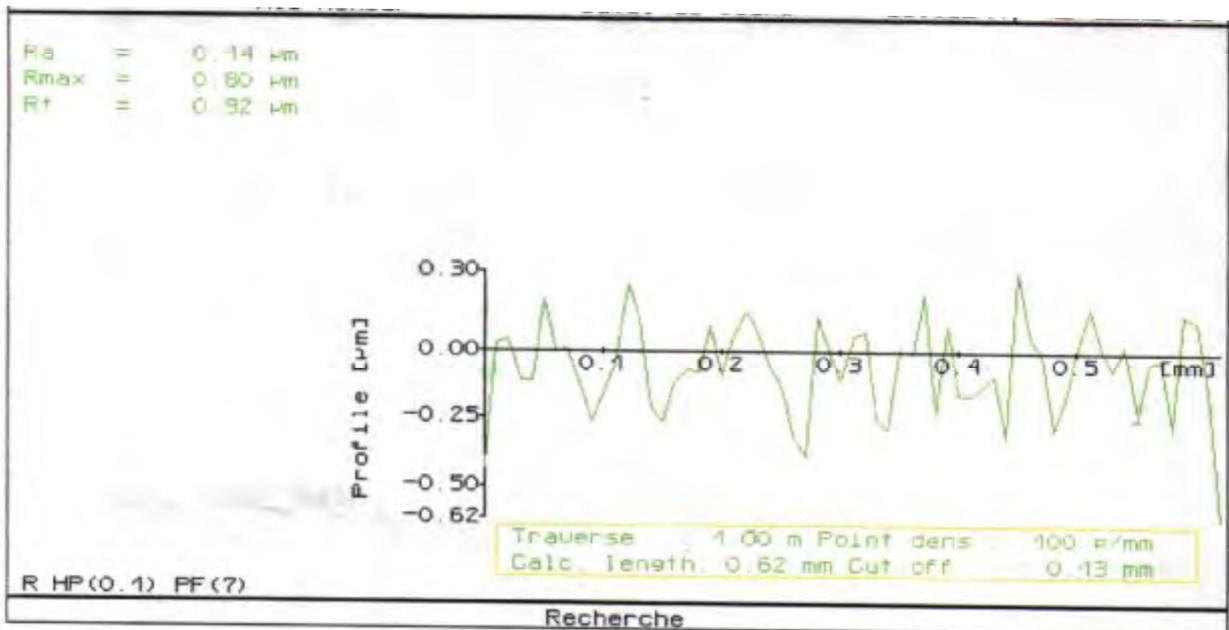
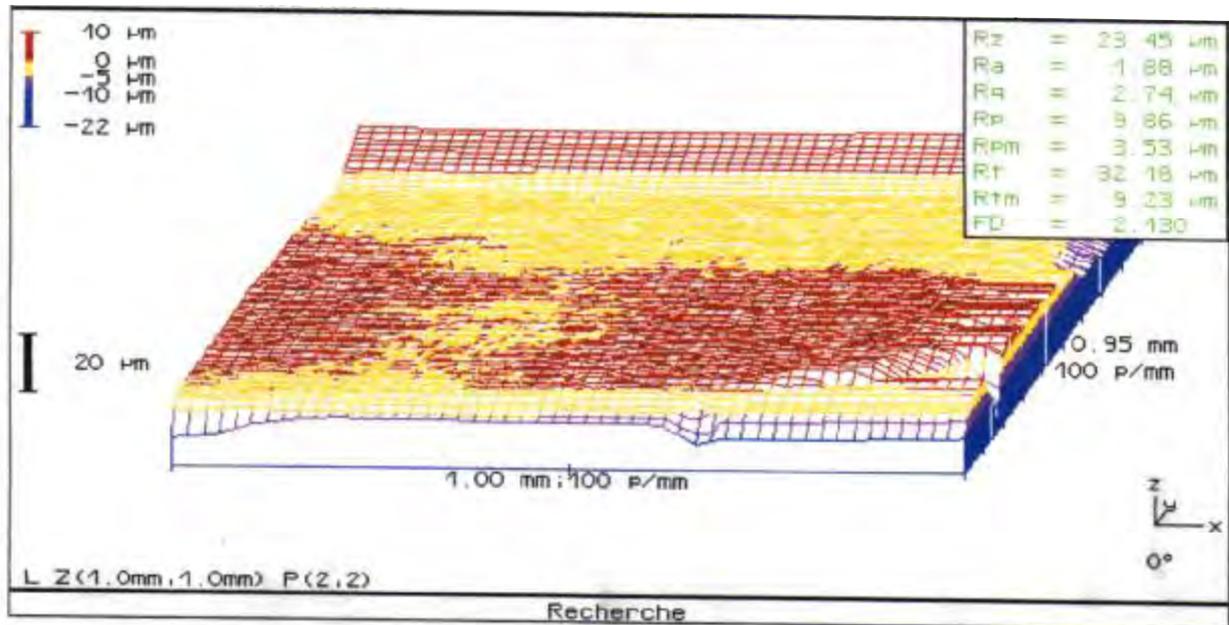


Figure 22c : Déformation plastique et physico-chimique en 3D

Revêtement TiC

V. ANALYSES ET DISCUSSIONS DES PROFILS A 2D

La rugosité est schématisée par des aspérités triangulaires dont les creux définissent un volume appelé volume d'Abbott (figures 23a, b,c).

Ces creux vides au départ, se remplissent de débris et selon le taux d'usure peuvent déborder. Ainsi, l'outil s'use autant à l'avant qu'à l'arrière et chaque sillon, recueille ainsi la même quantité de débris par unité de distance parcourue le long du contact fait de débris.

Une particule détachée de l'arrière du contact est immédiatement éliminée, tandis qu'une particule détachée de l'avant doit traverser toute la longueur du contact avant d'être éliminée. Les débris d'usure sont donc transportés de l'avant vers l'arrière.

Le volume de particules détachées est indépendant de l'abscisse le long du contact, le transport concentre les particules vers l'arrière du contact [12, 13, 32].

A l'avant du contact, les premiers corps matière et outil se touchent, les aspérités de l'outil pénètrent dans la matière usinée et l'abradent. Le taux d'usure, pour une condition donnée est comparativement important.

A l'arrière, les premiers corps sont séparés par un lit de particules ou troisième corps. L'usure qui résulte de l'action du troisième corps contre le premier corps s'apparente à une action de polissage.

On en déduit que deux mécanismes d'usure différents, qui séparément, engendrent dans des conditions identiques des taux d'usure différents, peuvent coexister dans un même contact.

Ces observations montrent que le troisième corps peut non seulement modifier la distribution des efforts tangentiels, mais peut également transformer la distribution des efforts normaux. Il crée donc une portance qui s'ajoute à ses propriétés d'écran séparateur [11, 13, 47].

En d'autres termes, les débris d'usure piégés à l'intérieur du contact forment un troisième corps qui diminue l'interaction entre premier corps et les protège au moins ou partiellement contre l'usure. Ce phénomène d'auto-protection dépend du temps pendant lequel les particules sont actives, c'est à dire piégées dans le contact. Pour une vitesse donnée, ce temps dépend de la longueur du contact dans le sens du mouvement. Pour une surface de contact donnée, l'auto-protection devrait donc, augmenter avec la longueur de contact dans le sens du mouvement.

Une particule détachée, de petite dimension, par rapport à celle du contact, est forcément piégée à l'intérieur du contact pendant un temps donné, elle est rejointe ou rejoint elle-même d'autres particules ou débris pour le lit de troisième corps où, les observations le montrent, sa vitesse n'est pas nécessairement égale ou même parallèle à celles d'un des premiers corps. Il existe donc un écoulement interne au troisième corps. Elle intéresse la partie interne S_3 et les écrans S_2 et S_4 du troisième corps [6].

Ra = 0.47 μm
Rmax = 3.37 μm
Rt = 3.43 μm

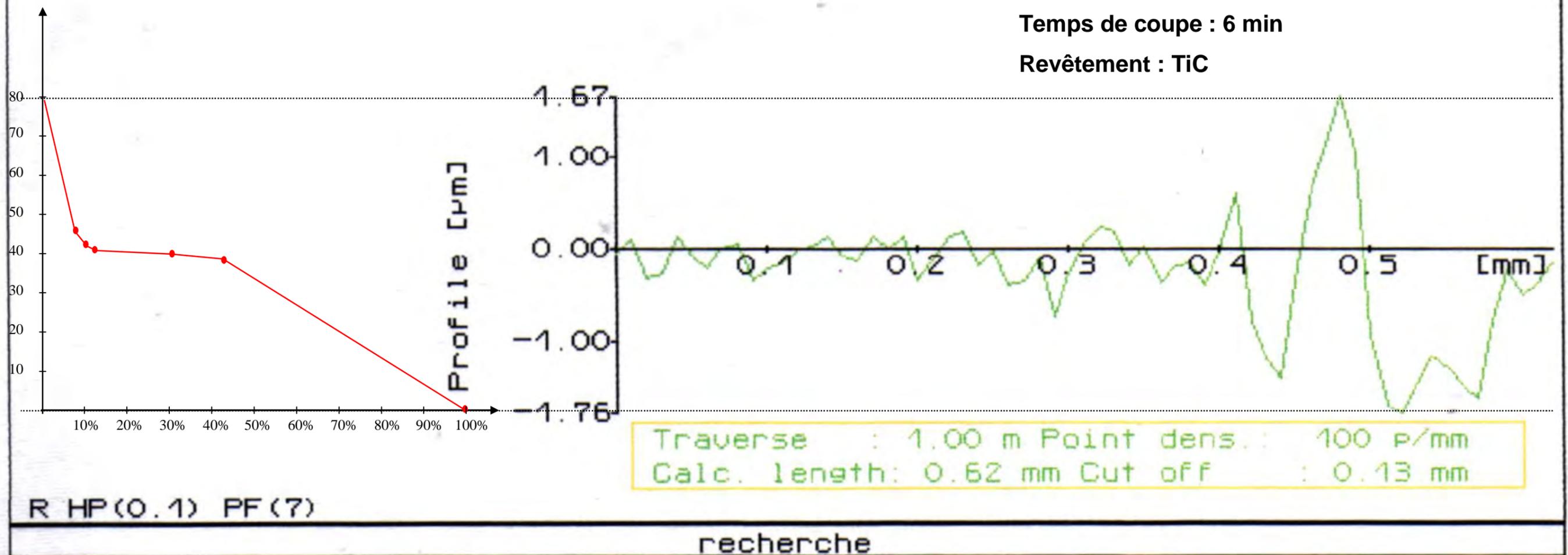
FIGURE 23 a : Tracé des courbes de rugosité et des courbes d'Abbot et Firestone correspondantes

Vitesse de coupe : 150 m/min

Avance : 0,2 mm/tour

Temps de coupe : 6 min

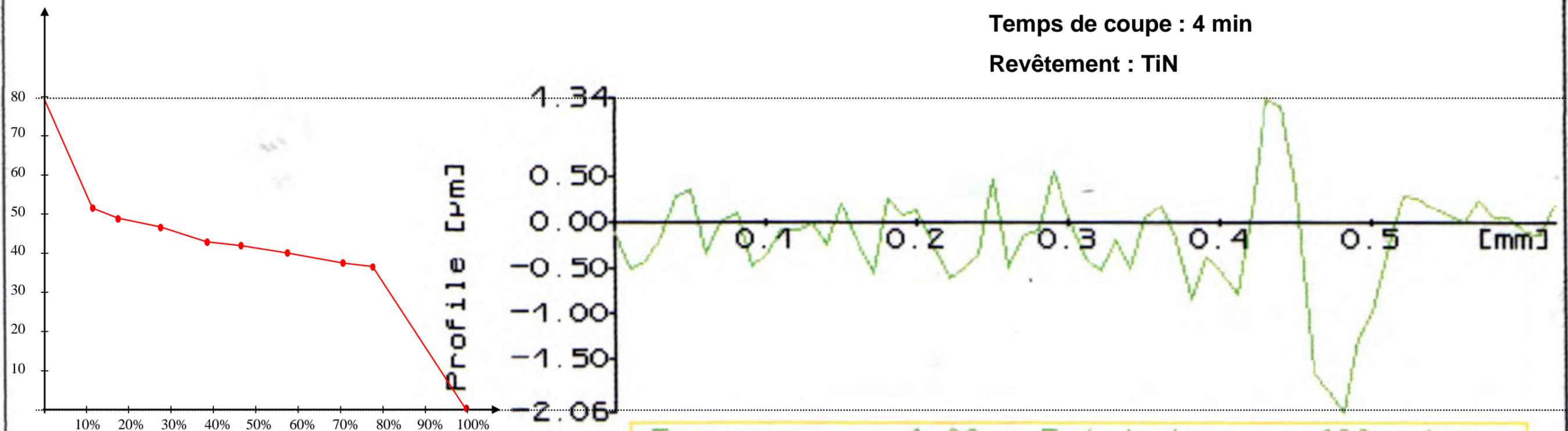
Revêtement : TiC



Ra = 0.40 μm
Rmax = 3.40 μm
Rt = 3.40 μm

FIGURE 23 b : Tracé des courbes de rugosité et des courbes d'Abbot et Firestone correspondantes

Vitesse de coupe : 150 m/min
Avance : 0,2 mm/tour
Temps de coupe : 4 min
Revêtement : TiN



Traverse : 1.00 m Point dens. : 100 p/mm
Calc. length: 0.62 mm Cut off : 0.13 mm

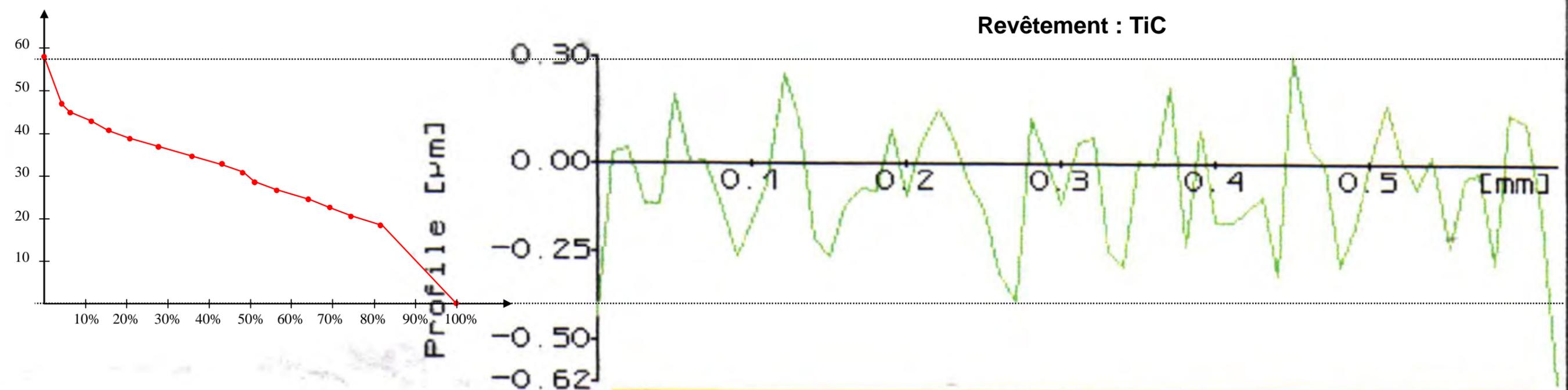
R HP (0.1) PF (7)

Usure

Ra = 0.14 μm
 Rmax = 0.80 μm
 Rt = 0.92 μm

**FIGURE 23 c : Tracé des courbes de rugosité et des courbes d'Abbot
 et Firestone correspondantes**

**Vitesse de coupe : 150 m/min
 Avance : 0,2 mm/tour
 Temps de coupe : 2 min
 Revêtement : TiC**



Traverse : 1.00 m Point dens. : 100 P/mm
 Calc. length: 0.62 mm Cut off : 0.13 mm

R HP (0.1) PF (7)

Recherche

VI. COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES REVÊTEMENTS :

Les surfaces changent au cours du temps à cause de l'usure et par conséquent les résultats évoluent aussi. Au départ, la surface de l'outil (contre face) est rectiligne avec une qualité normale industrielle (figure 4). Au cours du contact, un rodage se produit; seule, les ondulations restent.

Ce rodage est lié à l'existence de particules dans les revêtements de l'outil qui agissent comme un abrasif.

Un film de transfert est aussi créé sous l'effet du frottement et la présence du troisième corps. Par contre, si on regarde les revêtements, ils apparaissent poreux (figure 26, 27 et 28). Et en surface, les pics de rugosité initiales sont progressivement éliminées pour former une surface réelle de contact (figure 24) avec des plateaux de portance. Ce qui est visualisé dans le chapitre VI par les cartographies des surfaces et la formation d'un troisième corps tribologique.

L'influence d'un revêtement sur l'aire de contact outil-copeau est une question difficile à traiter, car sa quantification est très délicate. Il est possible de distinguer vers l'arête de coupe une zone où le copeau adhère fortement (figure 17 et 18) suivie d'une zone où le copeau ne fait que frotter.

En effet, nous savons bien que le déroulement du copeau dans son environnement n'est jamais constant. Le copeau va toujours buter sur une surface qui va l'obliger à se courber.

Du fait des rugosités d'outils, l'adhésion ne se produirait qu'aux extrémités des irrégularités de surface, alors qu'à d'autres endroits plus bas en altitude se produiraient uniquement des frottements intenses [79, 89]. Ce contact favorise un écrouissage et une usure par arrachement mécanique de particules d'outil, (figure 26 et 27), après formation d'une microsoudure entre le copeau et l'outil.

Ces microsoudures sont favorisées par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et de l'outil entraînant des déformations importantes (figure 14, 15 et 16).

Aussi, la pointe de l'outil peut subir une déformation plastique permanente et un effet de fluage sous l'action des températures élevées et des haute pressions dans la zone de contact qui altère l'assise du revêtement (figure 23 et 24).

De plus, la détermination de l'aire de contact est fortement variable en fonction du contraste entre le revêtement initial (figure 25 et 28) et les traces laissées par le contact ou

troisième corps, mis en évidence par le biais des analyses EDAX et cartographie du chapitre VI.

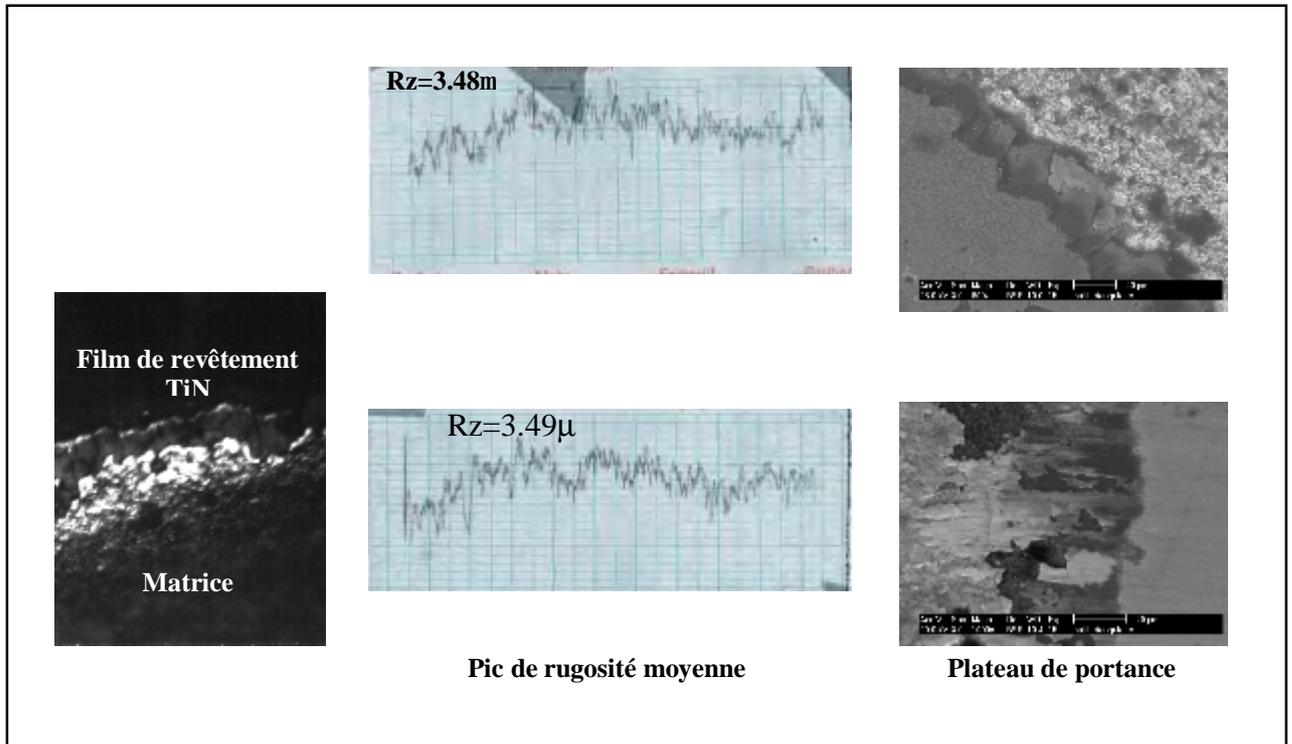
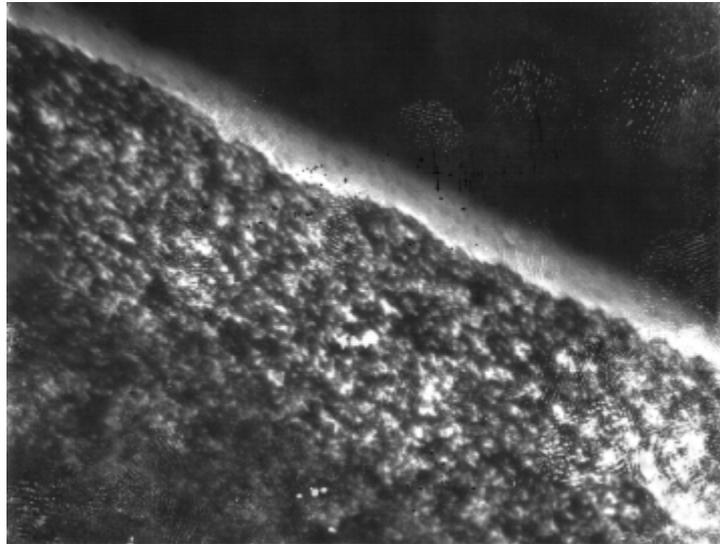
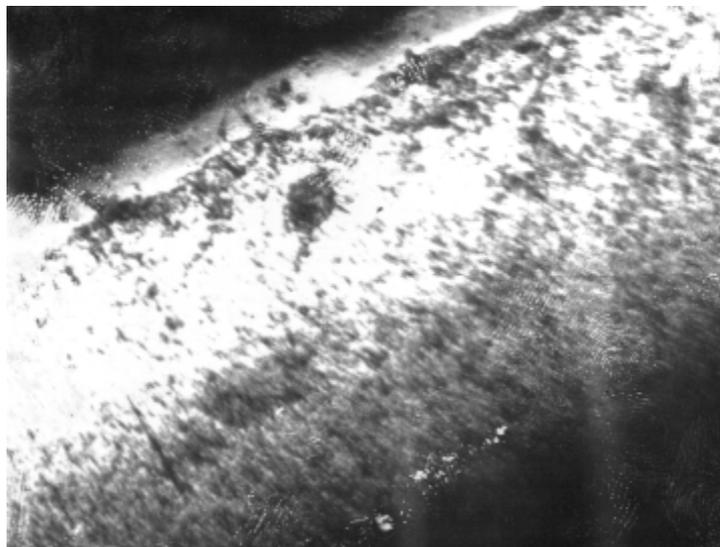


Figure 24 : Usure d'un outil de coupe revêtement TiN



a/



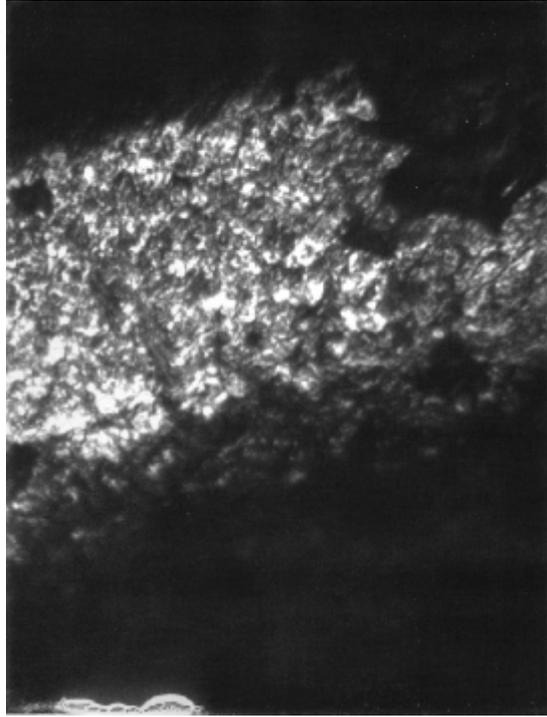
b/

Figure 25 : Morphologie du comportement du revêtement TiN sur 42CrMo4V sur microscope optique

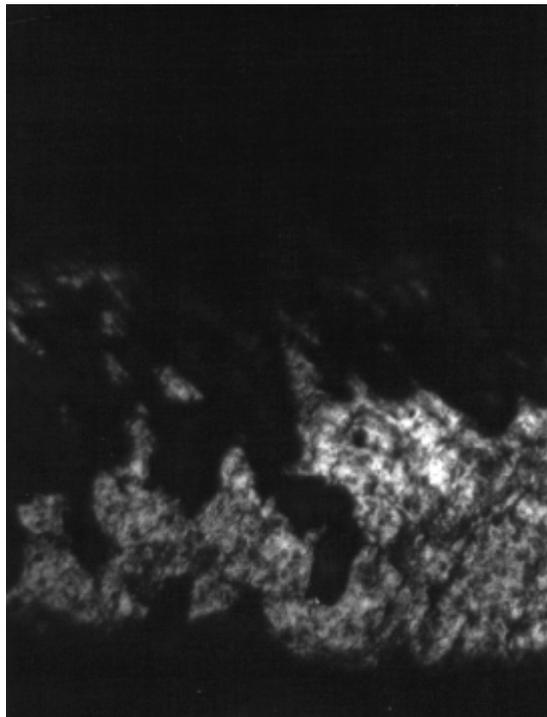
a/ Avant usage. g x 150

b/ Après usage détérioration du revêtement. g x 150

V=450m/mn, a=0.4mm/tr, p=1mm, t=20mn



a/

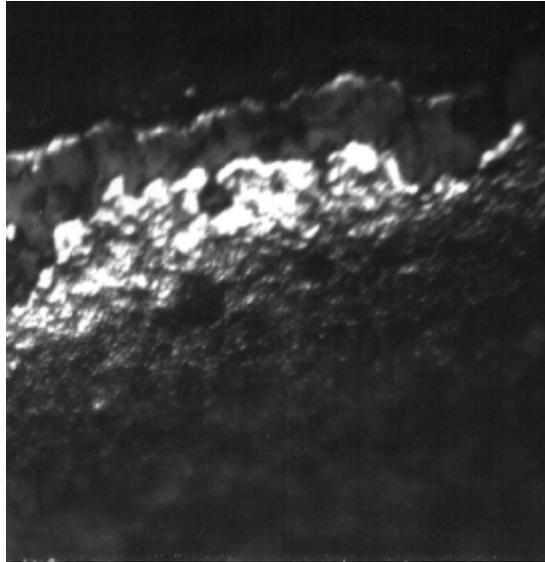


b/

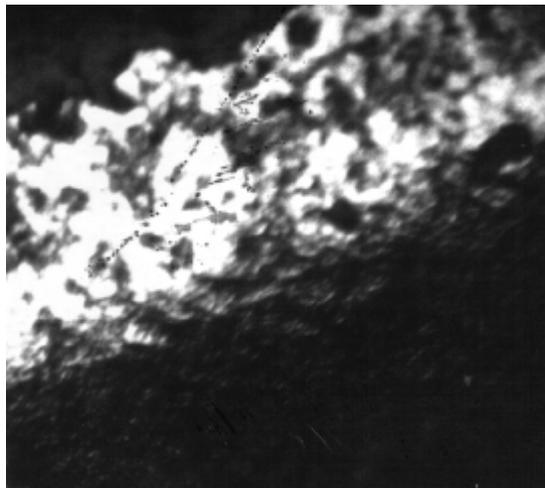
Figure 26 : Morphologie du comportement du revêtement TiN sur 42CrMo4V sur microscope optique

a/ Trace d'écrouissage et rupture du revêtement. g x 150

b/ Rupture du revêtement jusqu'au substrat



a/



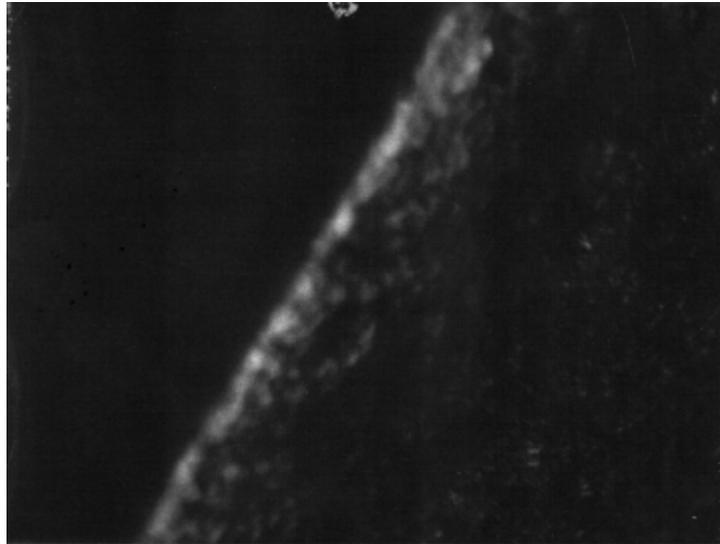
b/

Figure 27 : Morphologie du comportement du revêtement TiN sur 42CrMo4V sur microscope optique

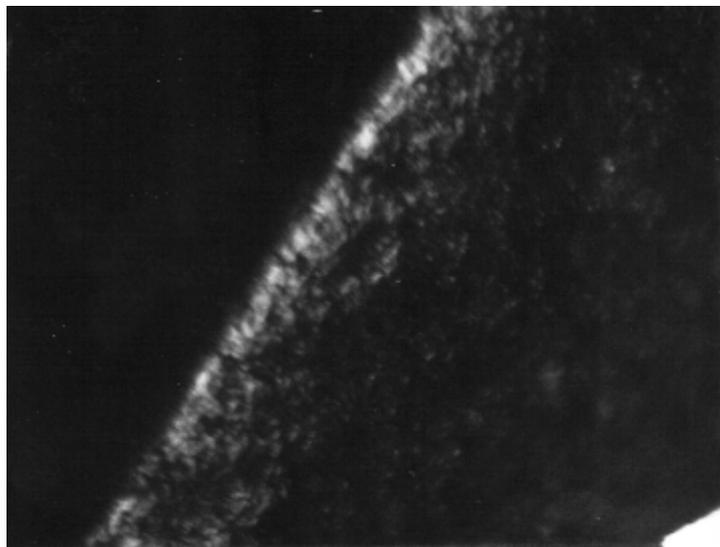
a/ Rupture totale du revêtement. $g \times 150$

b/ Ecrouissage et dissociation du revêtement. $g \times 150$

$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$



a/



b/

Figure 28 : Morphologie du comportement du revêtement TiC sur 42CrMo4V sur microscope optique

a/ Avant usage. $g \times 150$

b/ Après usinage. Ecrouissage et détérioration par endroit du revêtement.

$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=20\text{mn}$

CONCLUSION

Les courbes de rugosité moyennes relevées sur pertographe ont révélé deux phénomènes.

Jusqu'à 500m de coupe, il y a croissance linéaire de la rugosité.

A partir de 500m, il y a toujours une croissance, mais celle-ci est moins accentuée.

On peut la comprendre de la manière suivante.

Les cavités ou aspérités dues à l'usure, jusqu'à une utilisation moyenne, restent de dimensions faibles et l'effet du troisième corps reste très néfaste et son rôle est similaire à un abrasif qui se manifeste par une usure en croissance permanente.

Lorsque ces cavités ou aspérités deviennent de dimensions importantes, il y a un effet d'accumulation du troisième corps et son effet abrasif devient moins important.

On remarque par ailleurs, une évolution de rugosité identique, aussi bien pour le revêtement TiC que pour le revêtement TiN avec cependant un léger avantage pour ce dernier.

Par ailleurs, l'intérêt important de la topographie 3D en profilométrie optique nous offre plus de renseignement sur la diversité de la rugosité.

En effet, les relevés sur deux plans distants et pourtant proches suivant l'axe y (0.88 et 0.9mm) montrent dans le premier cas que la rugosité est faible sur une certaine longueur puis monte brusquement à partir de 0.5mm tandis que dans le second cas la rugosité reste approximativement stable.

On note de même une différence appréciable en ce qui concerne la valeur de la rugosité moyenne.

Aussi, l'avantage des courbes d'Abbot et Firestone renseignent sur l'importance de la rugosité.

Pour la première courbe, c'est à dire le revêtement TiC on remarque un profil très aplati au centre, ce qui montre une rugosité faible.

Pour les deux autres courbes, on note une pente centrale légèrement accentuée qui montre une rugosité moyenne.

Chapitre V

Analyse expérimentale des états de surfaces

I. MESURE DES DEFAUTS :

La qualité des surfaces en contact est étroitement liée au fonctionnement et à la fiabilité des machines. Les usures, les fatigues et les grippages sont en partie gouvernées par les états de surface. Une superfinition n'est pas toujours d'intérêt mécanique ni économique, elle est par exemple bénéfique sur le plan fatigue, mais désavantageuse sur le plan lubrification hydrodynamique. Ces conséquences de l'état de surface, font que l'intérêt qu'elle revêt est d'une grande importance dans l'industrie. C'est pourquoi sa caractérisation ainsi que les méthodes de mesure y aboutissant revêtent d'une grande importance.

L'usinage, opération de mise en forme par outil coupant avec formation de copeaux, a pour but la fabrication de pièces à précision de cotes macrogéométriques et microgéométriques imposées. Ceci entraîne que la solution adoptée ne peut être qu'affaire de compromis car en dehors des progrès techniques, le prix de revient croît avec la précision géométrique.

Le nombre de variable de coupe, telles que vitesse de coupe ou avance, susceptibles d'influer sur ces deux éléments prix et précision est très grand; TAYLOR en avait déjà dénombré plus de trente alors qu'actuellement il en est compté plus de cent, le problème est donc très complexe.

Jusqu'ici, trois caractères principaux, parmi d'autres, ont été principalement étudiés pour définir l'aptitude à l'usinage, ce sont :

- L'aptitude au fini de surface (fig.1) mesurée par la rugosité des surfaces en contacts.
- La résistance à la coupe mesurée par la force de coupe.
- L'usinabilité caractérisée par l'usure ou par la durée d'outil à usure définie ou par la vitesse de coupe permettant une durée d'outil fixée.

Par ailleurs, les trois aspects principaux de l'aptitude à l'usinage que nous venons d'évoquer ne présentent pas la même difficulté de l'usure. Les cotes macrogéométriques ou microgéométriques et les efforts de coupe ne demande que des mesures instantanées ne présentant pas d'autres difficultés que celles de se procurer la matériel nécessaire. Il n'en est pas de même en ce qui concerne les mesures relatives à la durée d'outil, longues si elles sont faites dans les conditions industrielles, et délicates, car elles demandent un contrôle.

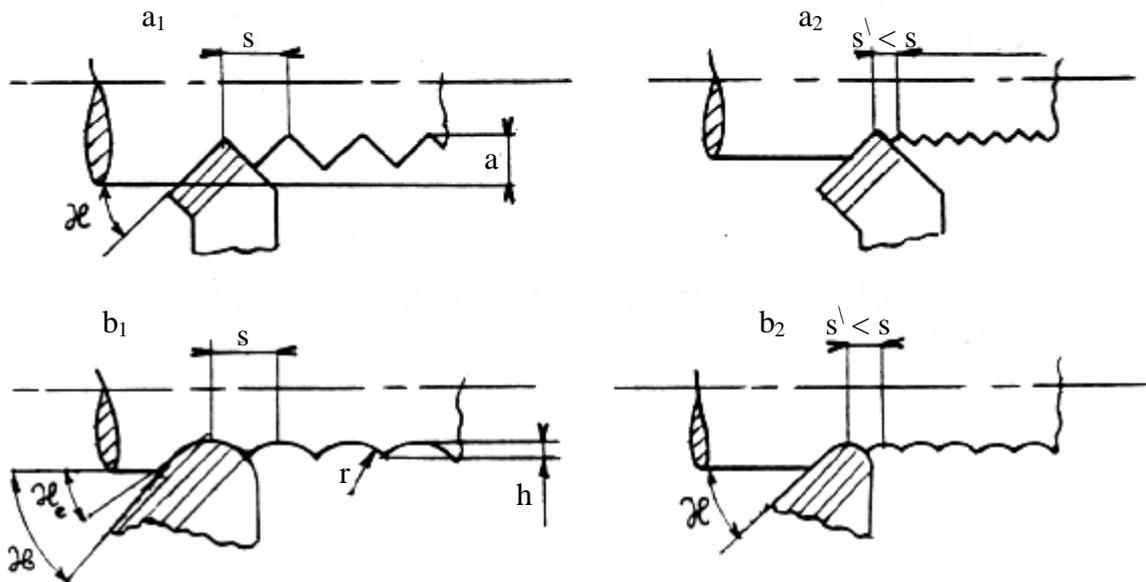


Figure 1 : Forme de la surface effectivement engendrée par le déplacement du tranchant de l'outil

Le profil d'une surface est le résultat de la superposition de ces trois types de défauts. Les défauts de forme sont facilement mesurés avec les instruments de métrologie classiques comme le micromètre ou le pied à coulisse parce que leur période en X est grande. La période des défauts d'ondulation et de rugosité étant plus petite, un palpeur capable de les détecter doit aussi être petit. L'appareil le plus utilisé pour cette tâche est le pertographe, dont le principe de fonctionnement est donné par la Figure 2. Cet appareil comprend un stylet durci (diamant), qui se déplace sur la surface à très basse vitesse (1 mm/s). Le stylet est terminé par une petite pointe (0,5 μm de rayon), qui agit un peu comme un filtre à haute fréquence : les contours plus petits que le rayon de la pointe du palpeur ne sont pas enregistrés.

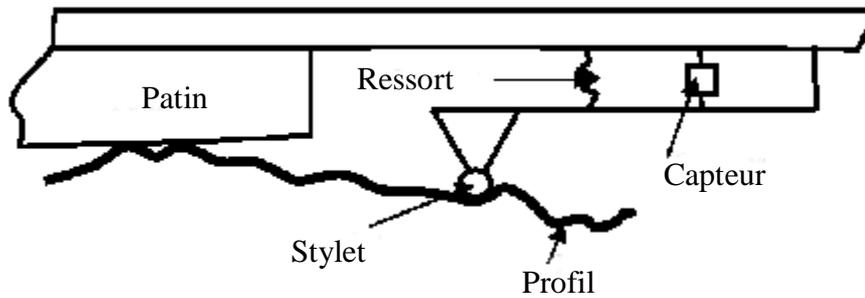
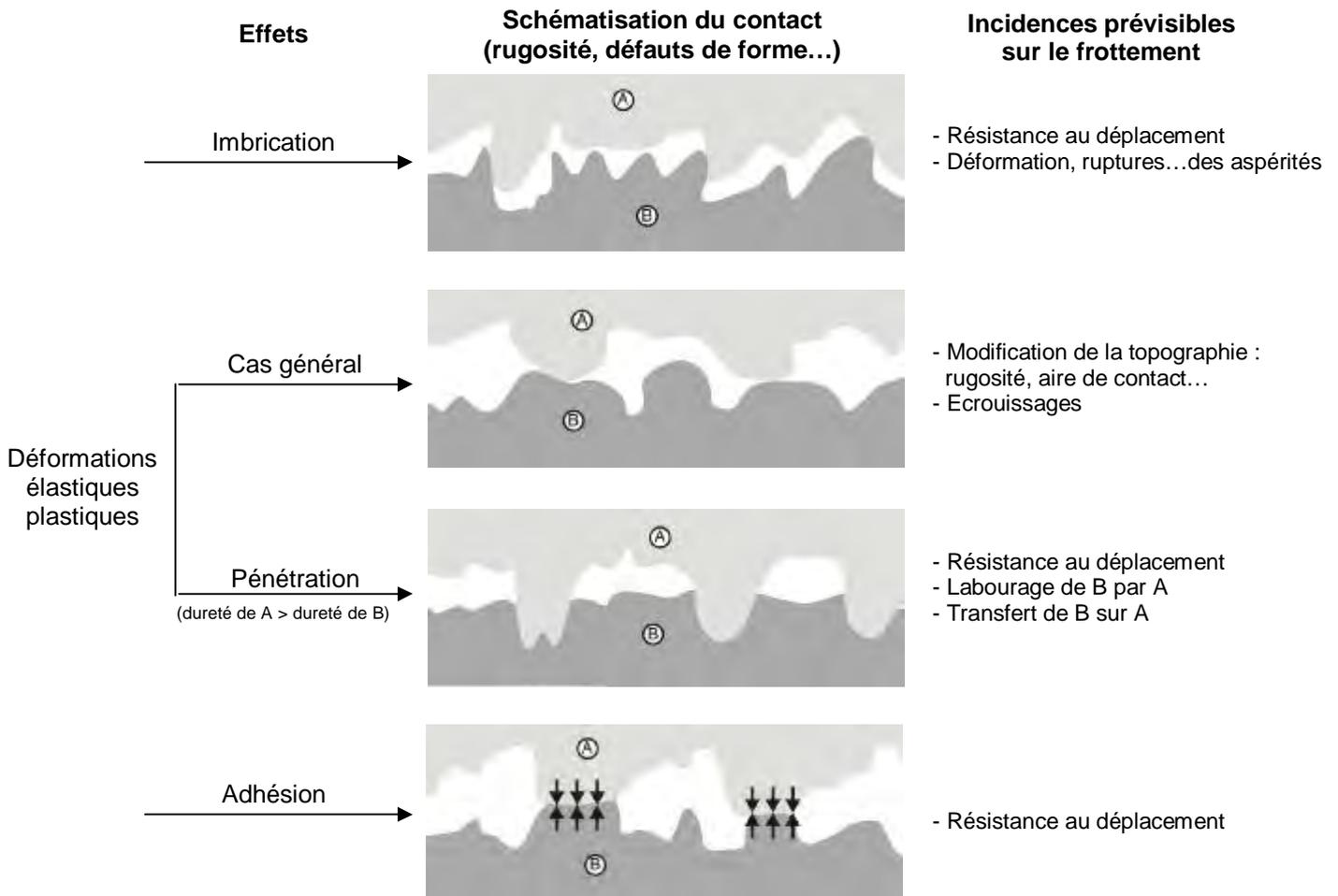


Figure 2 : Schéma du profilographe

Le déplacement du stylet sur le profil est transformé en signal électrique par le capteur. On donne dans le paragraphe III les résultats obtenus sur l'analyse des rugosités par pertographe.

L'autre manière d'étudier les rugosités est d'utiliser le profilomètre optique. C'est un appareil plus moderne, plus précis qui a en plus l'avantage de donner des topographies en 3D. Les résultats de l'analyse par profilomètre optique sont exposés aux paragraphes IV et V.



Rapprochement des premiers corps : Effets et conséquences

II. USURE VOLUMETRIQUE CARACTERISEE PAR LA PERTE EN POIDS DE L'OUTIL :

Le tranchant de l'outil, qui constitue l'élément actif par lequel est effectué le travail de déformation, est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques très sévères, qui entraînent son usure et sa dégradation dans un temps relativement limité. Ce sera une source de limitation en fonction de l'endurance de l'outil (figure 15, 16, 17, 19 et 20).

Aussi, l'usure de l'outil de coupe représente la variation du temps effectif de coupe en fonction des conditions géométriques et cinématique de l'usinage.

Ainsi, le temps effectif de coupe est défini comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite de l'outil par le critère de référence (figure 18, 19 et 20).

En effet, les (figures 3a et 3b) matérialisent et montrent l'allure de la variation du temps effectif de coupe des outils expérimentés en fonction du critère d'usure volumétrique ou massique caractérisée par la perte en poids de l'outil (figure 14, 15, 16, 19 et 20).

Ce tracé peut être scindé en trois étapes distinctes. La première correspond à une usure par abrasion ou adhésion, ensuite apparaît la couche de glissement facile, l'abrasion et l'adhésion diminue et on assiste à une amélioration de la résistance à l'usure.

Au-delà de cette amélioration relative est compensée par l'effet néfaste de l'accroissement de la température, qui augmente l'usure par diffusion jusqu'à atteindre le régime de destruction de l'outil (figure 16, 18, 19 et 20).

Par ailleurs, ceci découle des phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et corrélativement des qualités géométriques et mécaniques du couple en contact.

Enfin, cette perte de poids ou usure est la conséquence, de l'usure de ce système tribologique constitué de deux corps, de l'environnement et du produit interfacial ou troisième corps.

Celle-ci est d'abord de nature mécanique contrainte permanente ou cyclique, action du frottement, ce qui exige de l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables [78]. Mais leur sévérité se trouve accentuée par les effets thermiques intenses, qui tendent à dégrader les qualités de résistance du matériau coupant.

En outre, ces effets peuvent donner naissance à des réactions physico-chimiques interfaciales qui peuvent aggraver l'usure de l'outil.

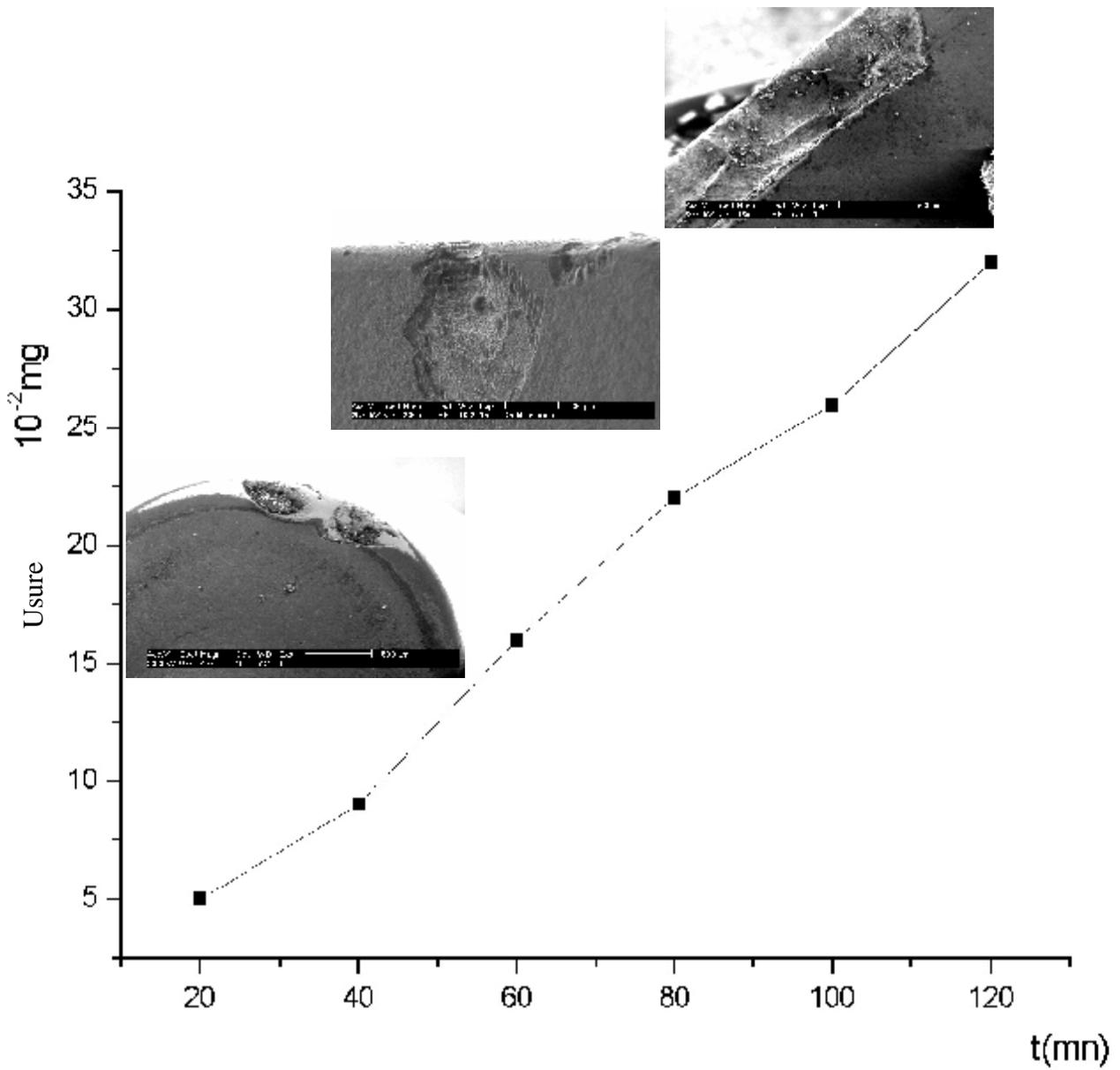


Figure 3a : Essai d'usure volumétrique par la perte en poids de l'outil TiN sur 42CrMo4V

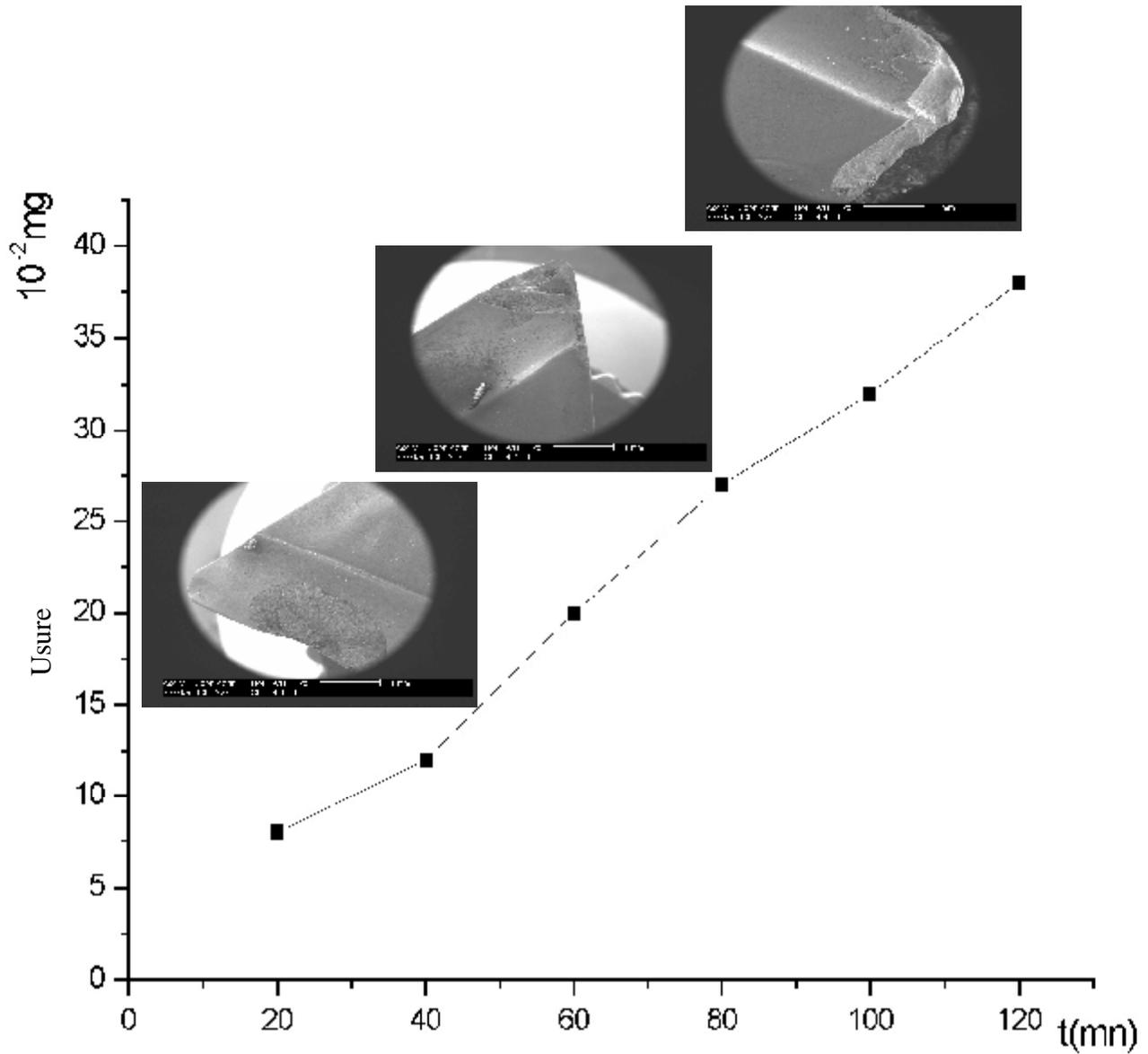


Figure 3b : Essai d'usure volumétrique par la perte en poids de l'outil TiC sur $42\text{CrMo}4\text{V}$
 $V=150\text{m/mn}$, $a=0,3\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$

III. ANALYSE EXPERIMENTALE DES ETATS DE SURFACES PAR PERTOGRAPHIE :

La surface effectivement engendrée par le déplacement du tranchant de l'outil, n'est pas rigoureusement cylindrique mais comporte des sillons hélicoïdaux résultant d'une part de la forme plus ou moins pointue de l'outil, et d'autre part, du contact intime outil-pièce (figures 1 et 2).

Si l'on considère le tracé du profil de ces sillons (figures 4, 5, 7, 10 et 11) dans un plan passant par l'axe de la pièce, on voit que ces sillons ont un profil d'autant plus aigu en dent de scies, que l'acuité du bec de l'outil.

En effet, l'état du bec de l'outil et les défauts d'état de surface résultant des imperfections de la coupe, donnant des ébréchures d'arêtes, écaillage du revêtement et usure en cratère (figures 15, 16 et 17) donne une rugosité de la surface découpée différente de la rugosité théorique.

Cette différence est plus au moins sensible suivant les conditions opératoires (nature des matériaux, vitesse de coupe et avance, type d'outil et son usure, temps et longueur de coupe, conditionnent l'accroissement de la rugosité des surfaces en contact (figures 6, 8, 12 et 13).

La diminution de l'acuité des aspérités va notamment dans le sens d'une amélioration de la tenue des films superficiels favorables et plus particulièrement ceux sensibles aux effets de surcharges localisées (films minces et/ou fragiles à base d'oxydes...).

D'une façon générale, les exigences de rugosité dépendent du niveau de sollicitations et surtout de la nature des matériaux en présence [76].

Les matériaux en vis-à-vis possèdent des duretés très différentes, les risques de dégradation par labourage, abrasion et transfert (figure 16 et 18) conduisent à augmenter la rugosité du couple en contact (figures 6, 8, 12 et 13).

La rugosité optimale peut être évidemment étendue à la topographie générale du contact qui correspond à la recherche d'un compromis entre une portance maximale et la discontinuité du contact [76].

Lorsque le copeau glisse sur la face de dégagement de l'outil, il y a un frottement intense. Comme tous les frottements celui-ci crée des élévations de température micro-localisées, des fusions et micro-soudures, ceci peut aboutir au collage d'une certaine quantité du matériau sur l'outil juste au dessus de la coupe (figures 16, 17 et 18). C'est ce qu'on appelle la fausse arête qui en croissant va complètement changer les caractéristiques de l'usinage, la côte de la pièce finie et l'état de surface, lorsque cette fausse arête aura trop grandi elle sera soumise à des efforts tels qu'elle sera arrachée d'un bloc otée de l'outil (figure 16, 19 et 20), et on reviendra au caractéristiques de coupe précédentes, ce rythme entre la formation d'une fausse arête et son élimination provoque des irrégularités de surfaces semblables à des vagues (figures 14 et 15).

D'autre part, la forme de la surface engendrée par les deux antagonistes peut être affectée par les perturbations de la trajectoire relative outil-pièce occasionnées par des vibrations importantes de l'un de ces éléments ou des deux.

Ainsi, l'observation et la mesure des états de surfaces effectuées conjointement (figures 6, 8, 12 et 13) lors d'un essai de durée de l'outil permettent de déterminer les conditions optimales d'usinage, au moins dans les intervalles choisis judicieusement selon, que l'on se trouve en régime d'ébauche ou de finition.

Par ailleurs, les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant (figures 14, 19 et 21) et corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par certaines modifications d'aspect de celui-ci, visible à l'œil nu à l'aide d'un moyen agrandisseur (figures 15, 16 et 17).

Ces manifestations macroscopiques et microscopiques permettent d'apprécier objectivement l'accroissement de l'évolution des rugosités en fonction de la longueur de coupe des deux antagonistes (figures 6, 8, 12 et 13).

Ainsi, le suivi en continu de la nature et de la rugosité des matériaux en contact montre que la rugosité initiale a un effet important sur la localisation et l'évolution du contact initiale.

Les contacts discrets conditionnent le champ local des contraintes et donc l'épaisseur des zones endommagées [76].

Ainsi, l'apparition d'une seule zone de contact peut entraîner des dégradations très profondes (figures 15, 16, 18, 19, 20 et 21). Alors que dans le cas de contact rugueux, les aires de contacts seront réparties sur toutes les surfaces en regard. La longueur des premières fissures (figure 14) et leur nocivité dépendent fortement de cette géométrie rugueuse.

Le comportement des premiers corps est décrit par leur aptitude à accommoder le déplacement imposé. Si l'effort normal est entièrement transféré aux premiers corps, aussi bien au niveau microscopique qu'au niveau macroscopique. Les efforts tangentiels, transmis par l'intermédiaire des interfaces ne le sont qu'en fonction de la notion d'adhérence entre les surfaces [50].

Aussi, le déplacement relatif entre ces surfaces rugueuses ne peut s'obtenir que par fissuration de l'interface ou fissuration des substrats. A cause de l'adhérence, une partie du déplacement peut être accommodée par la déformation plastique des couches superficielles qui s'écrouissent et qui peuvent être le siège de modification structurale [77].

Il est donc possible à ce stade du processus de définir deux types de bons matériaux tribologiques.

Un matériau qui sacrifie rapidement sa surface pour protéger le volume. Les débris apparaissent rapidement et toute la suite de l'usure sera dictée par la possibilité de piégeage du troisième corps. Ceci est rencontré en particulier dans le cas de revêtement dur qui émettent des débris dès le premier mouvement [77].

Aussi, ces matériaux sont capables d'accueillir longtemps des niveaux élevés de déformation plastique (figures 14, 15 et 16), c'est le cas de ces revêtements ductiles qui

retardent fortement l'apparition des débris. Lorsque la dégradation apparaît elle concerne une grande épaisseur de la matière (figures 15, 16,19 et 20).

Enfin, la nature et la rugosité des matériaux en contact produisent des particules d'usure, dont une partie sous l'action des écoulements et des pressions dans le contact adhère à l'outil pour former le film de transfert. Ce film intervient comme condition ou limite et contrôle totalement, l'écoulement des troisièmes corps à l'intérieur du contact.

Fichier Cartographie4-P1.cdr

Fichier Cartographie4-P2.cdr

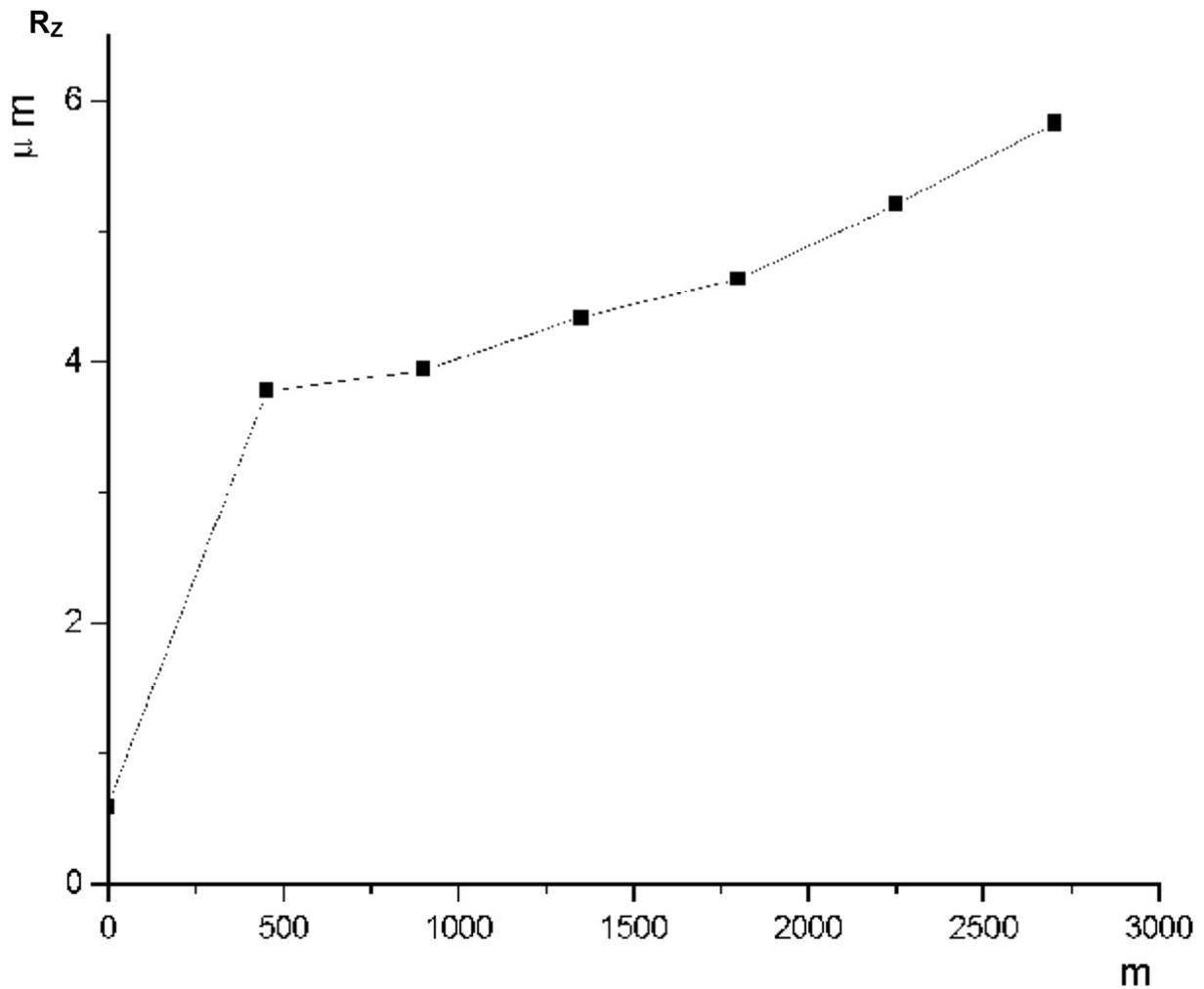


Figure 6 : Evolution de la rugosité R_z de l'outil de coupe TiN sur demi axe 42CrMo4V, en fonction de la longueur de coupe
 $V=450m/mn$, $a=0,4mm/tr$, $p=1mm$

Fichier Cartographie4-P3.cdr

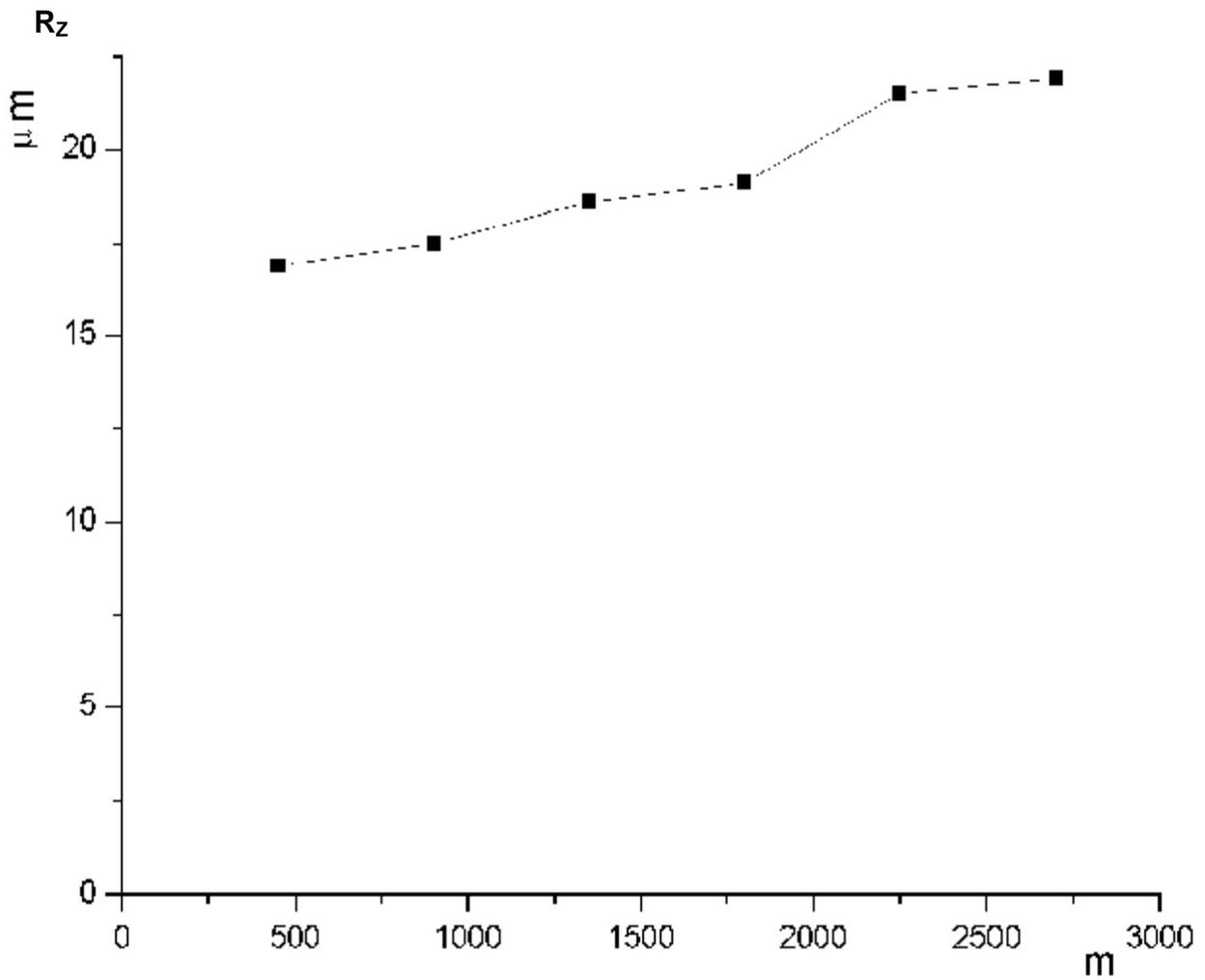


Figure 8 : Evolution de la rugosité R_z de la matière usinée demi axe
42CrMo4V sur l'outil de coupe TiN
 $V=450m/mn$, $a=0,4mm/tr$, $p=1mm$

Fichier Cartographie4-P4.cdr

Fichier Cartographie4-P5.cdr

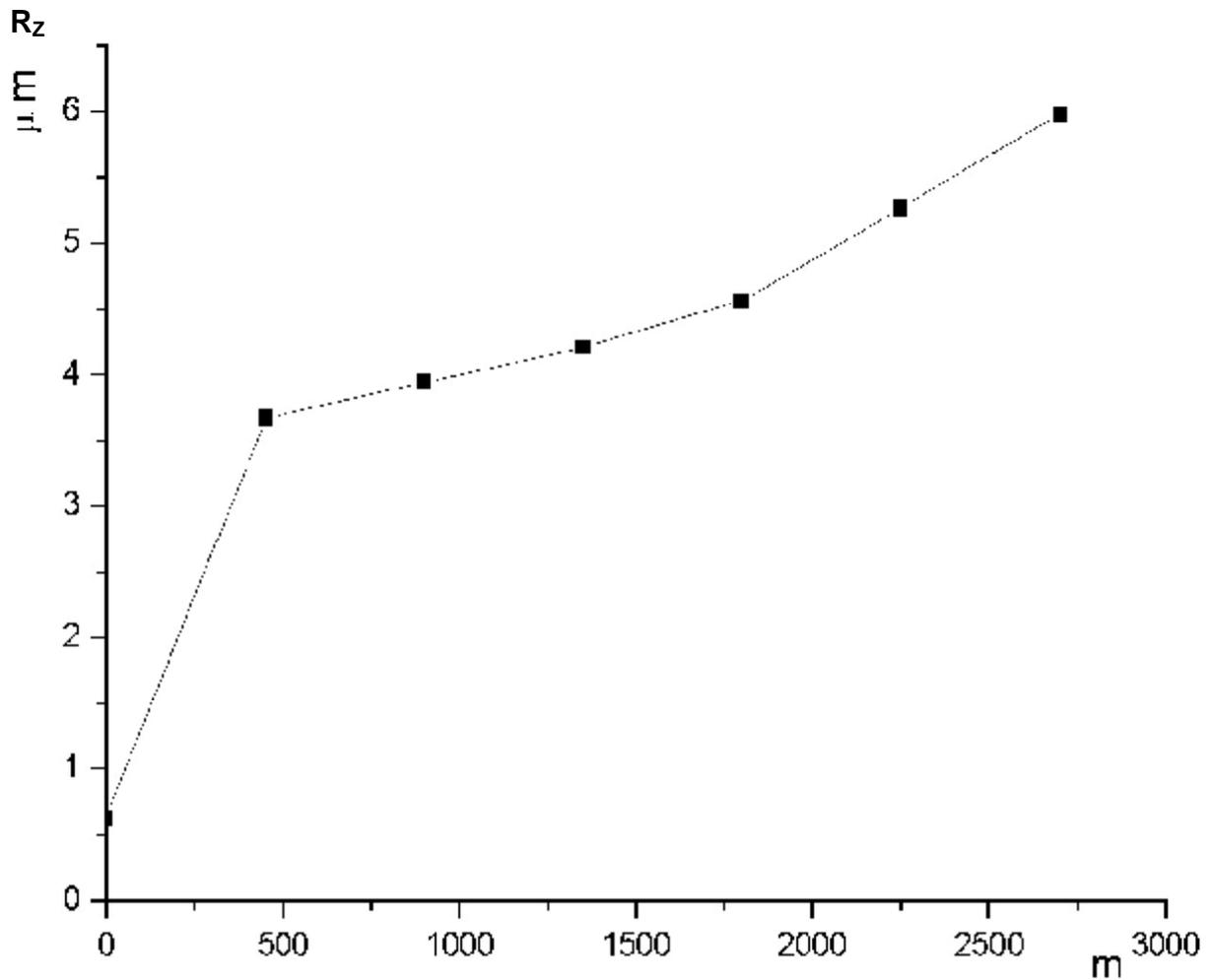


Figure 12 : Evolution de la rugosité R_z de l'outil de coupe TiC sur demi axe $42CrMo4V$ en fonction de la longueur de coupe
 $V=150m/mn$, $a=0,3mm/tr$, $p=1mm$

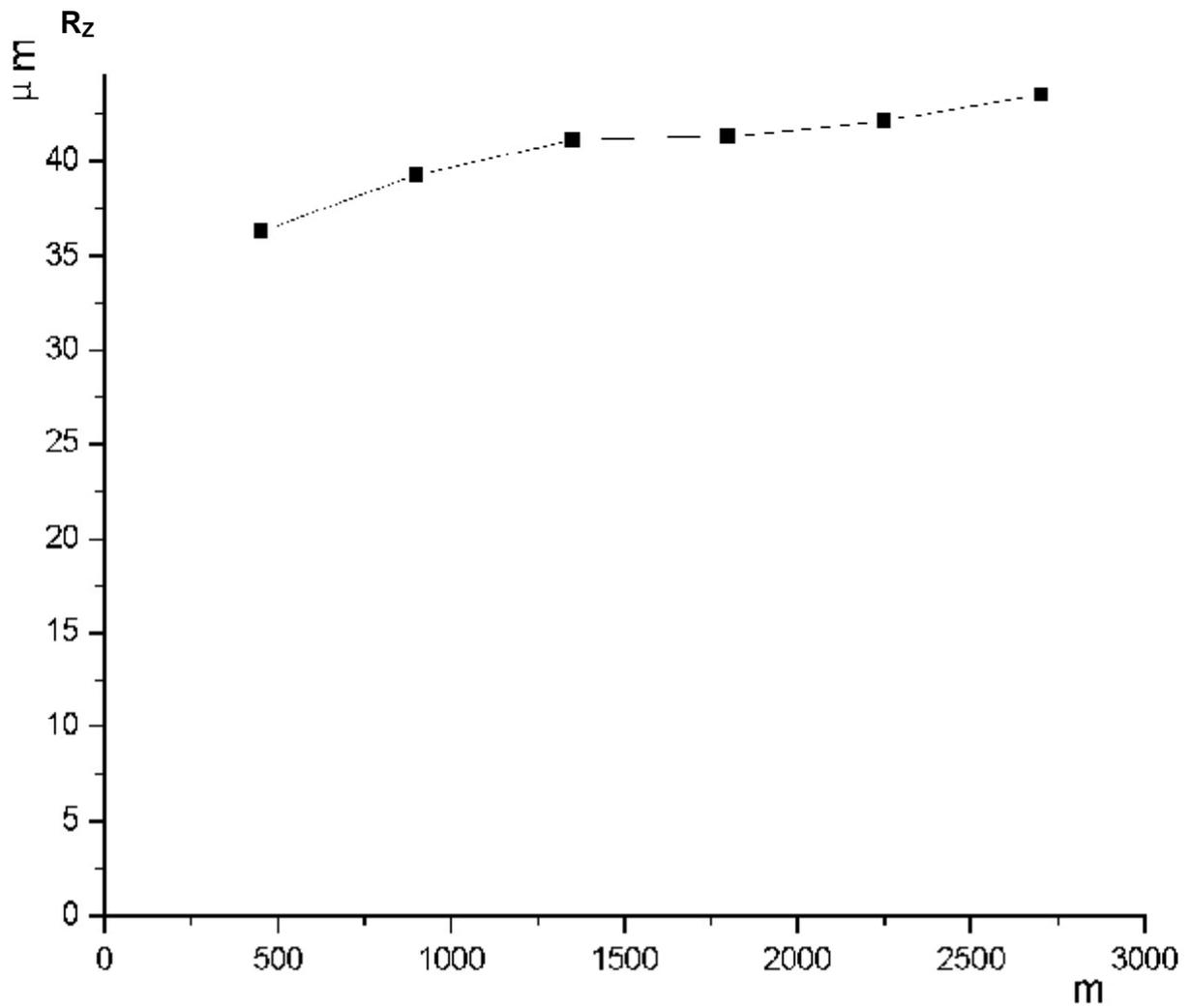
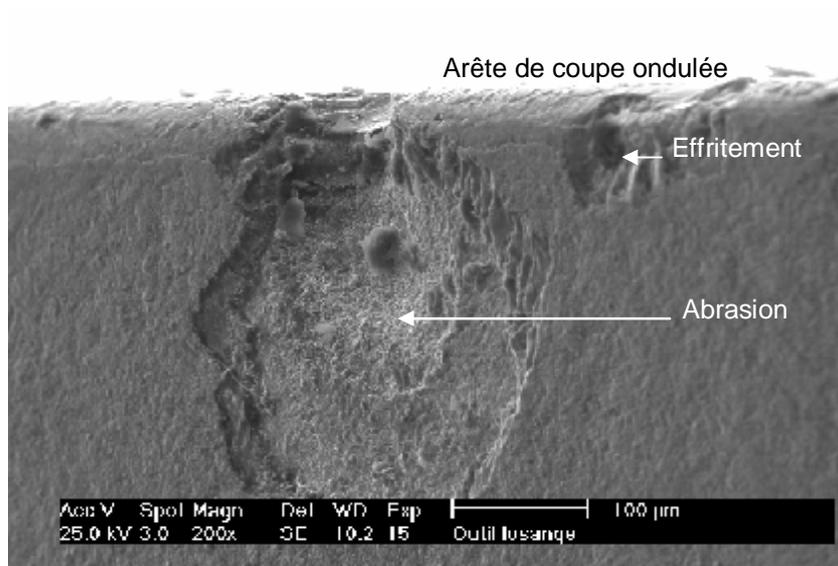
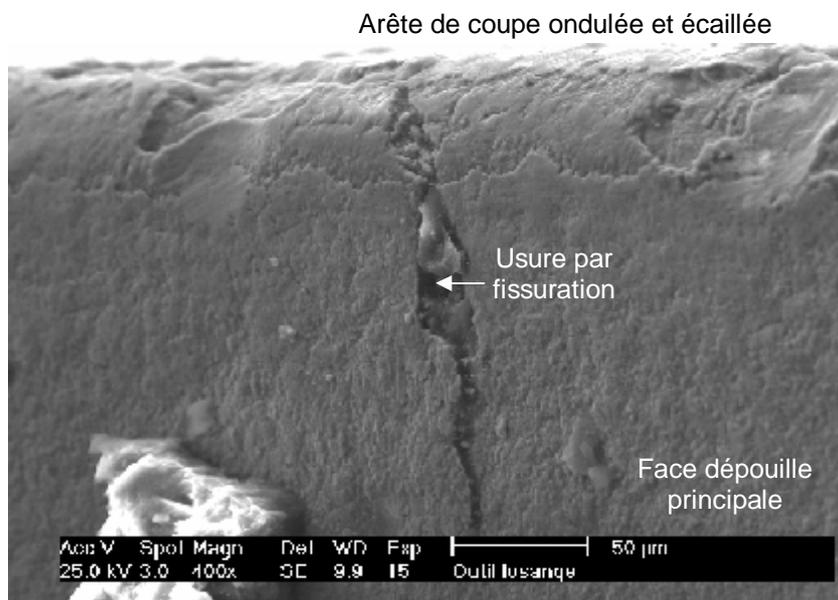


Figure 13 : Evolution de la rugosité R_z de la matière usinée demi axe 42CrMo4V sur l'outil de coupe TiC en fonction de la longueur de coupe $V=150\text{m/mn}$, $a=0,3\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$



a/



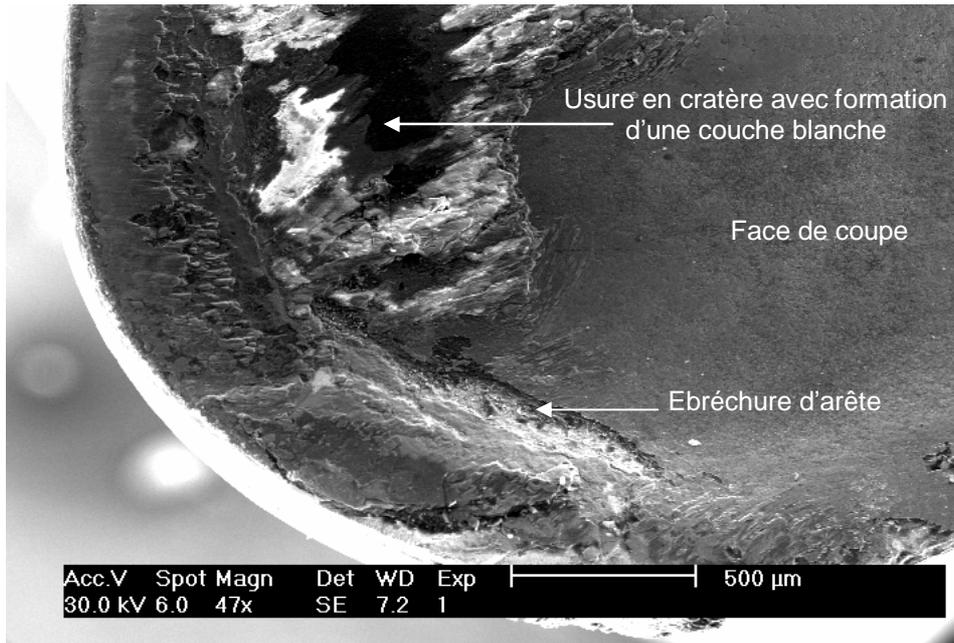
b/

Figure 14 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

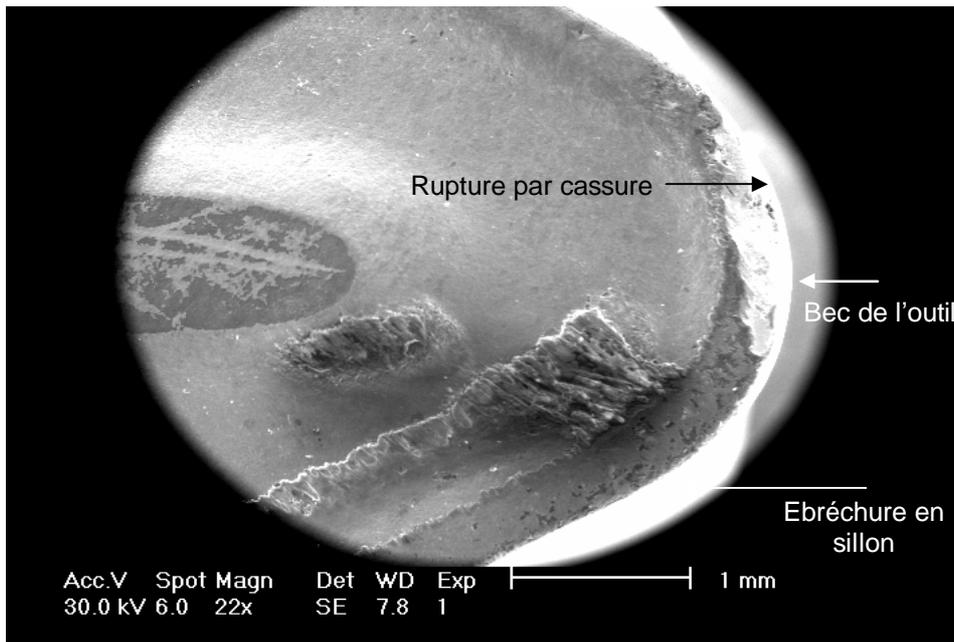
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Usure par abrasion et effritement

b/ Usure par fissuration et écaillage



a/



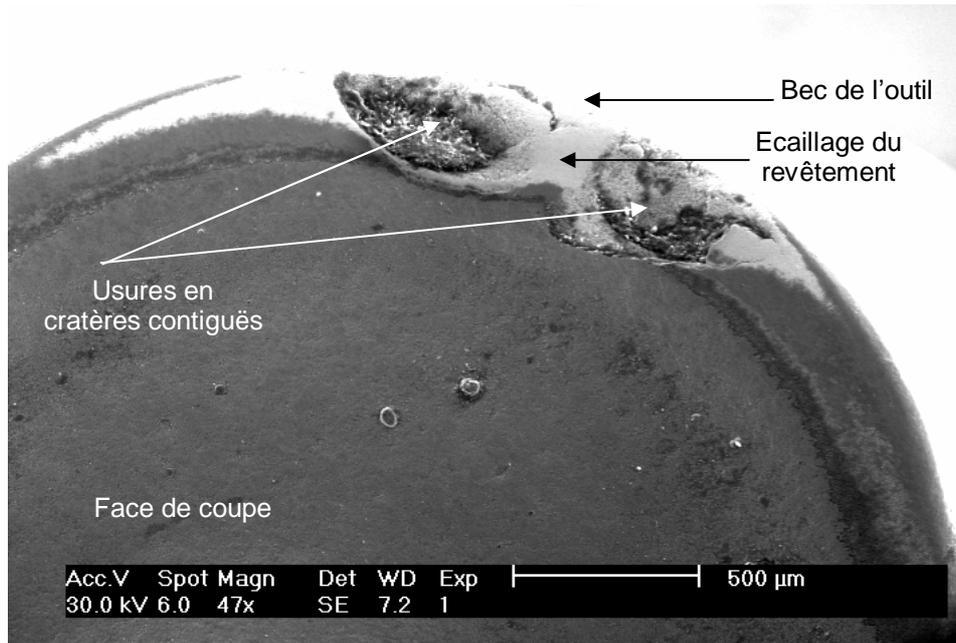
b/

Figure 15 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

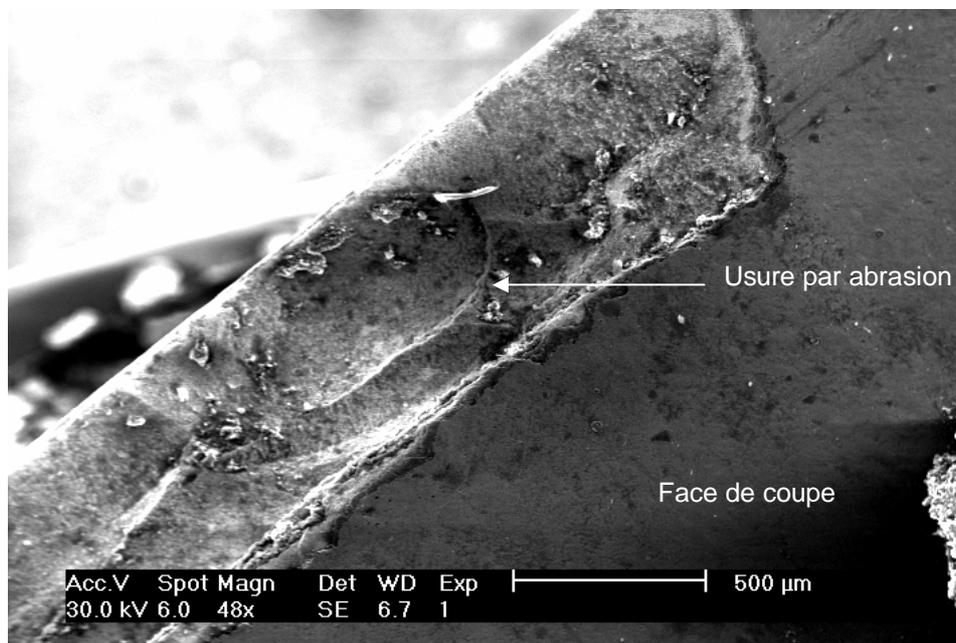
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Usure en cratère avec formation d'une couche blanche

b/ Usure par ébréchure d'arête en sillon



a/



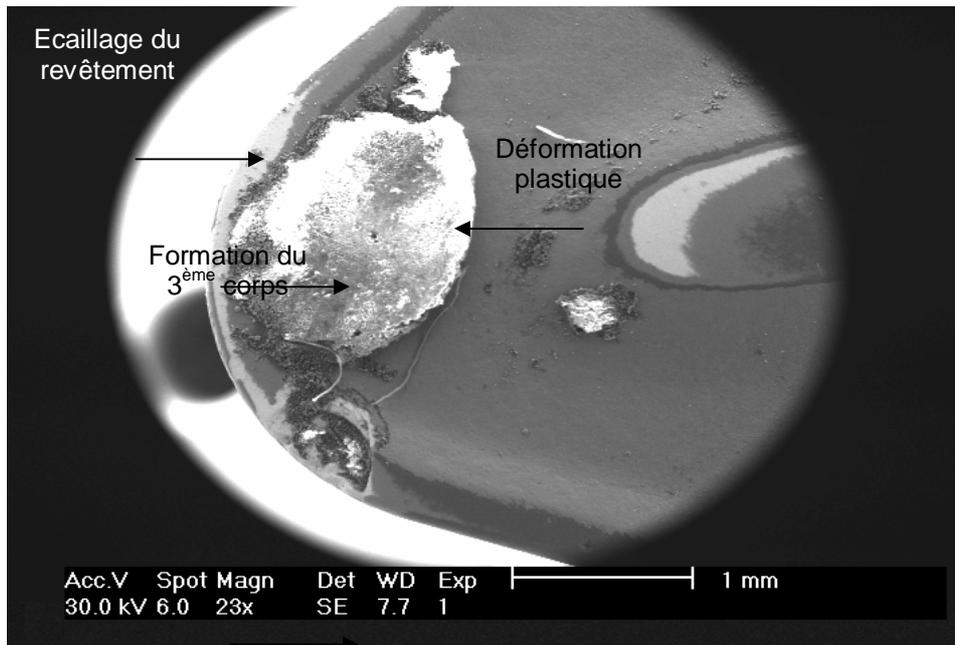
b/

Figure 16 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

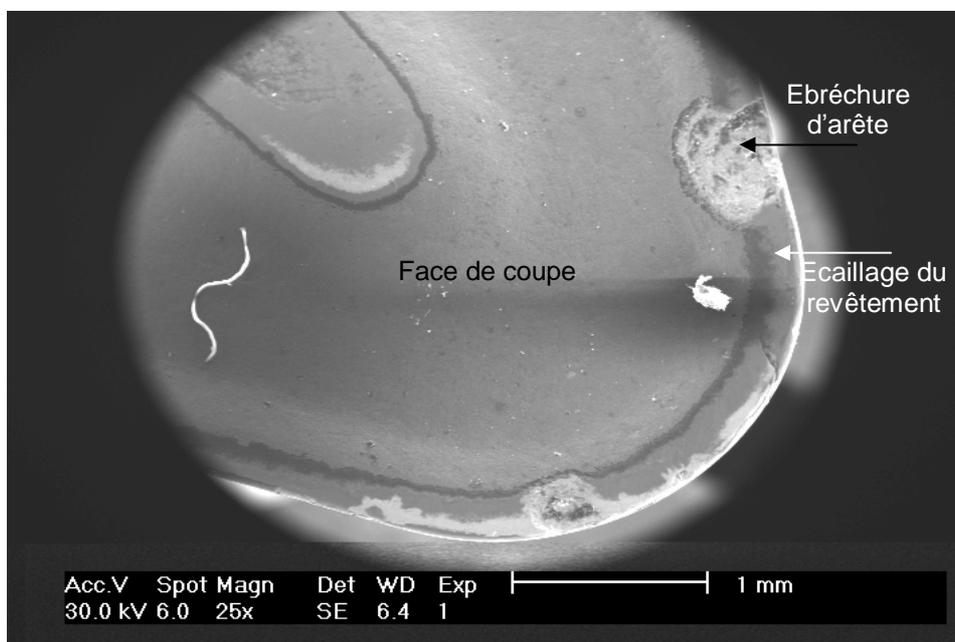
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Formation de deux usures en cratères contigus

b/ Usure par abrasion



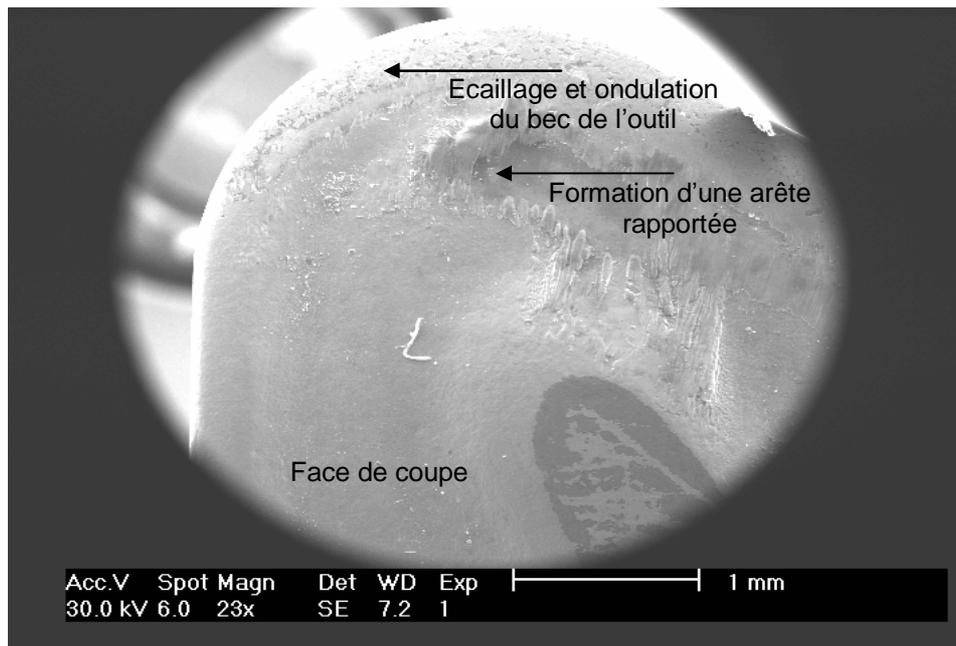
a/



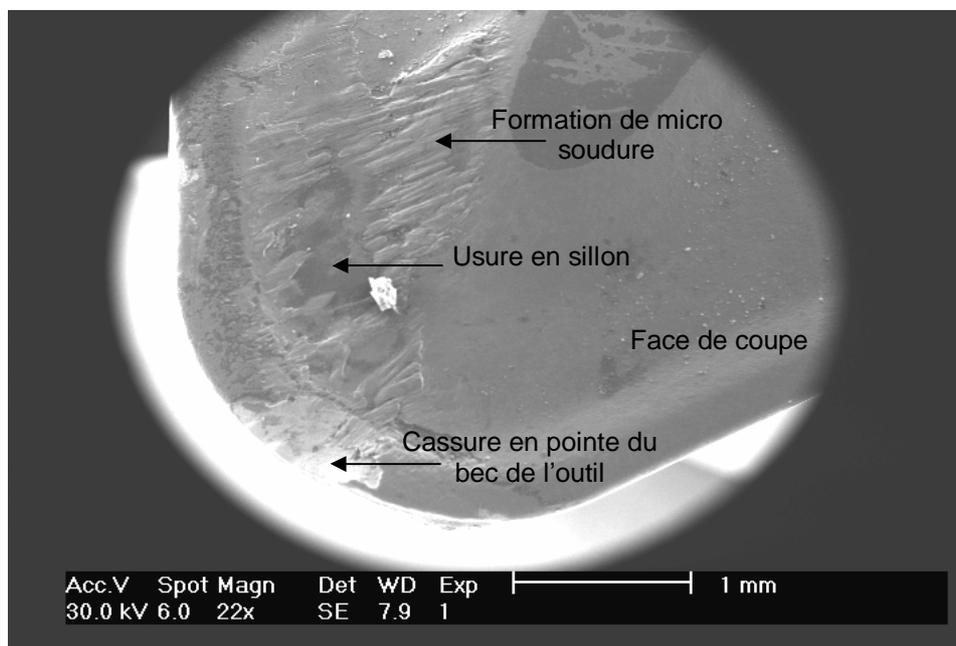
b/

Figure 17 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure de l'outil TiN sur 42CrMo4V

V=450m/mn, a=0.4mm/tr, p=1mm, t=40mn
a/ Usure en cratère avec formation du 3^{ème} corps
b/ Ebréchure d'arête et disparition du revêtement par endroit



a/



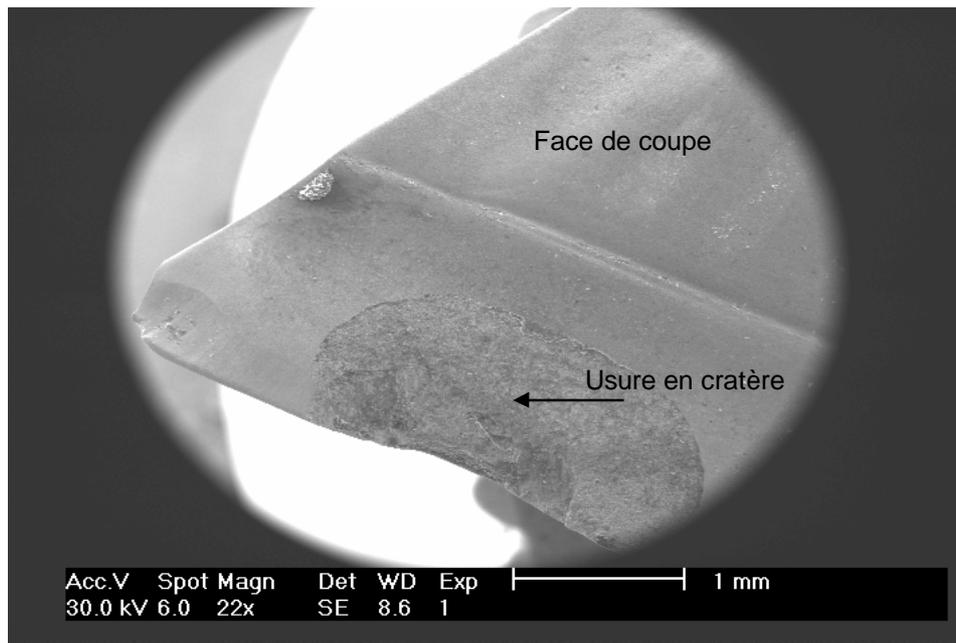
b/

Figure 18 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

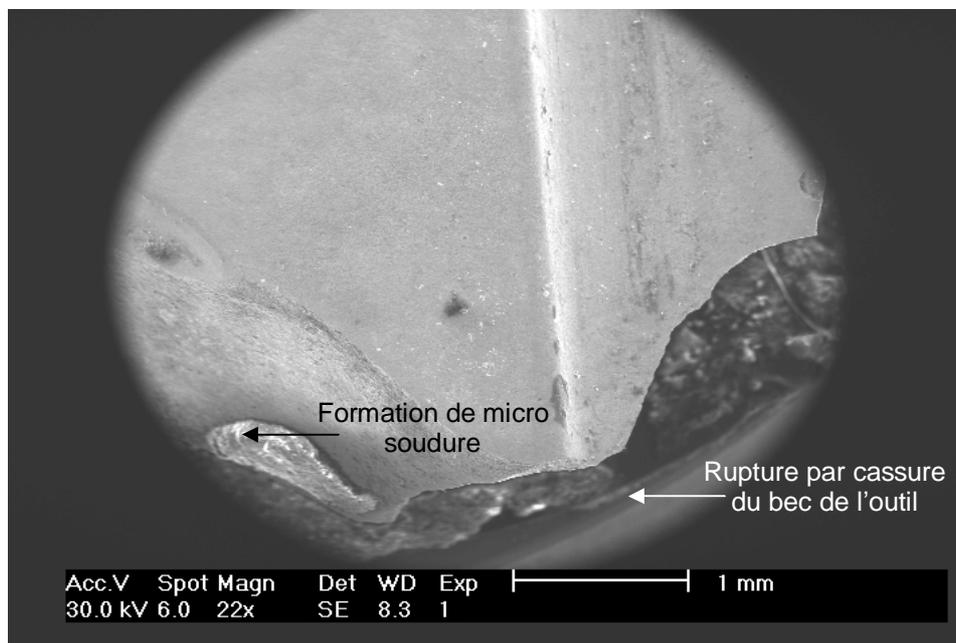
$V=450\text{m/mn}$, $a=0.4\text{mm/tr}$, $p=1\text{mm}$, $t=40\text{mn}$

a/ Usure par ébrèchement d'arête et formation d'une arête rapportée

b/ Usure en sillon, par arrachement sur l'arête tranchante



a/



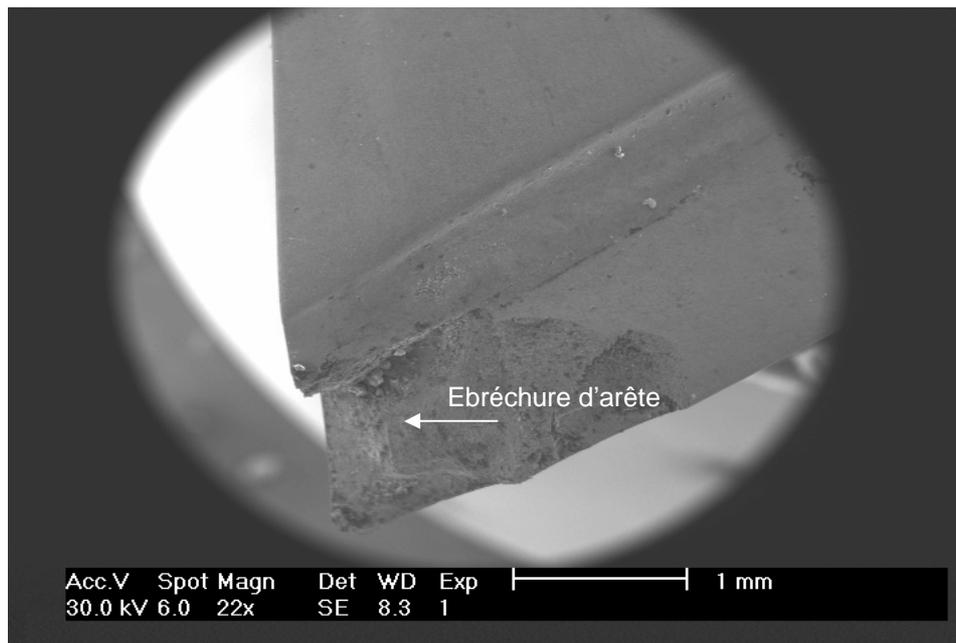
b/

Figure 19 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

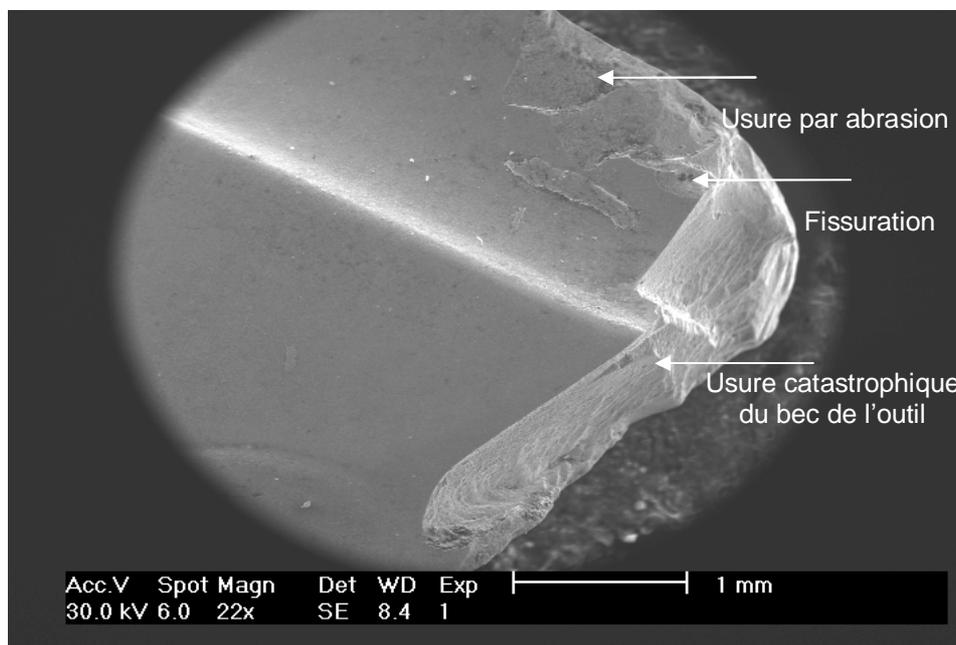
$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=20\text{mn}$

a/ Usure en cratère

b/ Rupture par cassure en pointe



a/



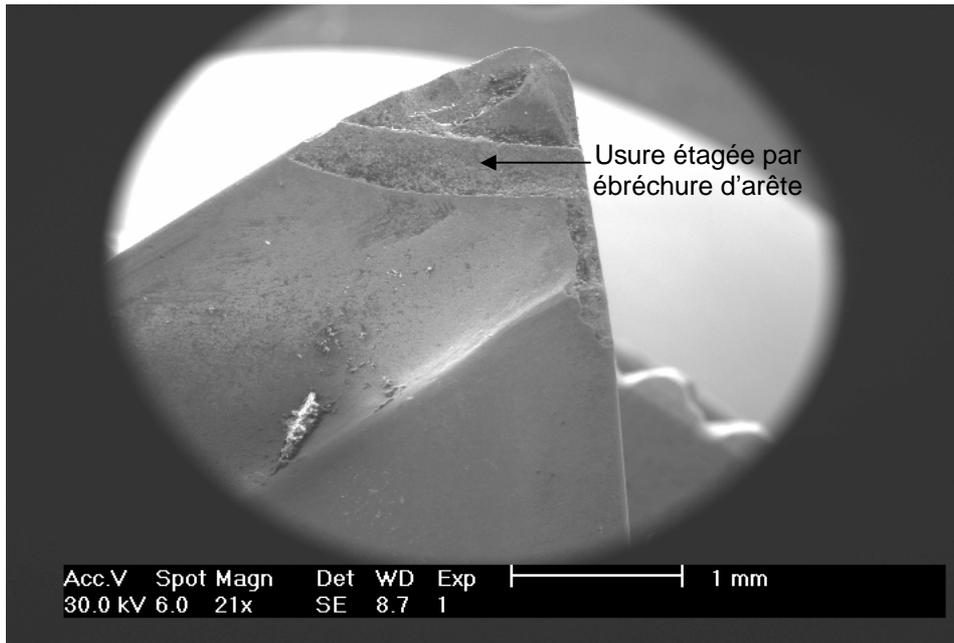
b/

Figure 20 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

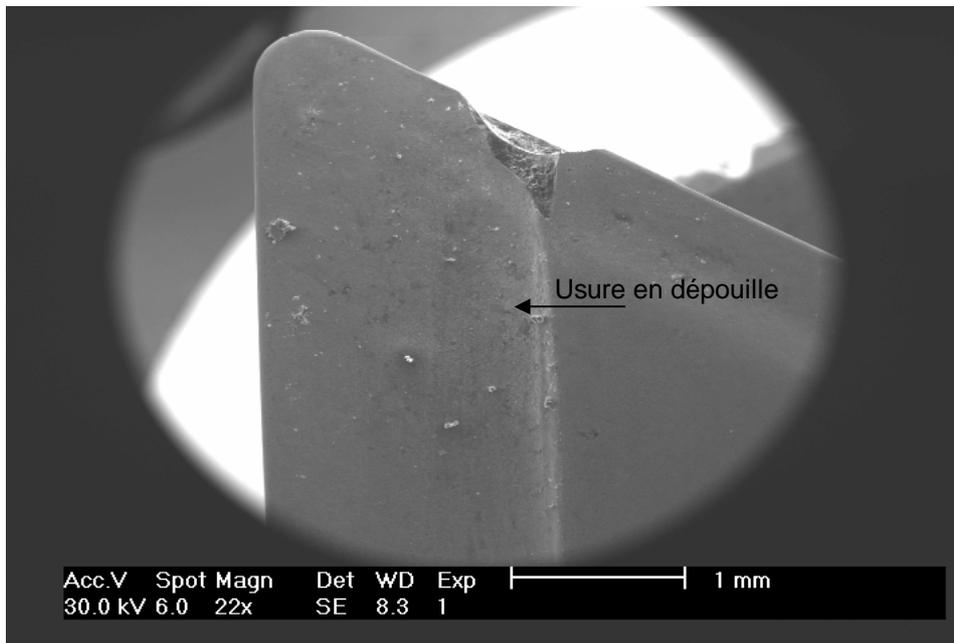
$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=20\text{mn}$

a/ Usure par ébréchure d'arête

b/ Rupture par cassure en pointe



a/



b/

Figure 21 : Morphologie de la topographie sur MEB de l'usure par déformation plastique

$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=30\text{mn}$

a/ Usure étagée par ébréchure d'arête

b/ Usure en dépouille

IV. ANALYSES ET DISCUSSIONS DES RELEVÉS PROFILOMETRIQUES A 3D

Les relevés sur profilomètre optique mettent en exergue la morphologie de l'état de surface à trois dimensions de l'arête tranchante. On distingue une topographie très labourée représentée par quatre stratifications étagées de couleurs distinctes le rouge, le jaune, le violet et le bleu, avec une précision dimensionnelle. A travers cette topographie, on distingue aisément les progressions de l'usure des outils de coupe, les imperfections à travers les différents revêtements, les déformations plastiques et physico-chimiques que l'outil subit au cours de l'usinage (figures 22a, b, c).

Indépendamment de cela, cette résolution nous permet d'obtenir des profils bidimensionnels pour l'exploitation statistique de ces mesures. La géométrie de ces rugosités réduit la largeur du contact; la charge normale appliquée et modifiée pour conserver la même valeur de la charge par unité de largeur.

Ces rugosités contrôlent la production et l'utilisation des particules d'usure du troisième corps. Les rugosités parallèles au sens du mouvement, écrouissent le troisième corps et localisent l'adaptation de vitesse à la surface, ce qui a pour effet d'accroître l'usure.

La nature et la rugosité des matériaux en contact produisent des particules d'usure dont une partie, sous l'action des écoulements et des pressions dans le contact, adhère à l'outil pour former le film de transfert ou troisième corps. Ce film intervient comme condition aux limites et contrôle totalement l'écoulement du troisième corps au cours de l'usinage [47, 48].

Les mouvements de troisième corps ne sont pas simples et sont contrôlés par l'ensemble du contact. Dès le début de fonctionnement, les conditions de géométrie (largeur, rugosité ...) et de cinématique (vitesse, rigidité ...) définissent des mouvements de particules d'usure, qui engendrent un film de transfert [11, 13].

Aussi, la forme de la courbe d'Abbott et Firestone permet d'évaluer la qualité de la rugosité, déduite de surface en u et en m . Par ailleurs, le volume de la surface, ou volume délimité par les rugosités, est beaucoup plus important dans les surfaces en u qu'en m . Cette distinction est importante dans les problèmes de frottement sec qui sont contrôlés par la surface des débris d'usure.

La courbe d'Abbott est une manière plus fine utilisée pour qualifier la forme et l'arrangement des défauts de surface. La courbe d'Abbott a deux intérêts pratiques.

- Elle permet de définir pour une hauteur donnée, le rapport entre l'aire réelle et l'aire apparente du contact,
- Elle peut servir à calculer le volume des creux entre aspérités.

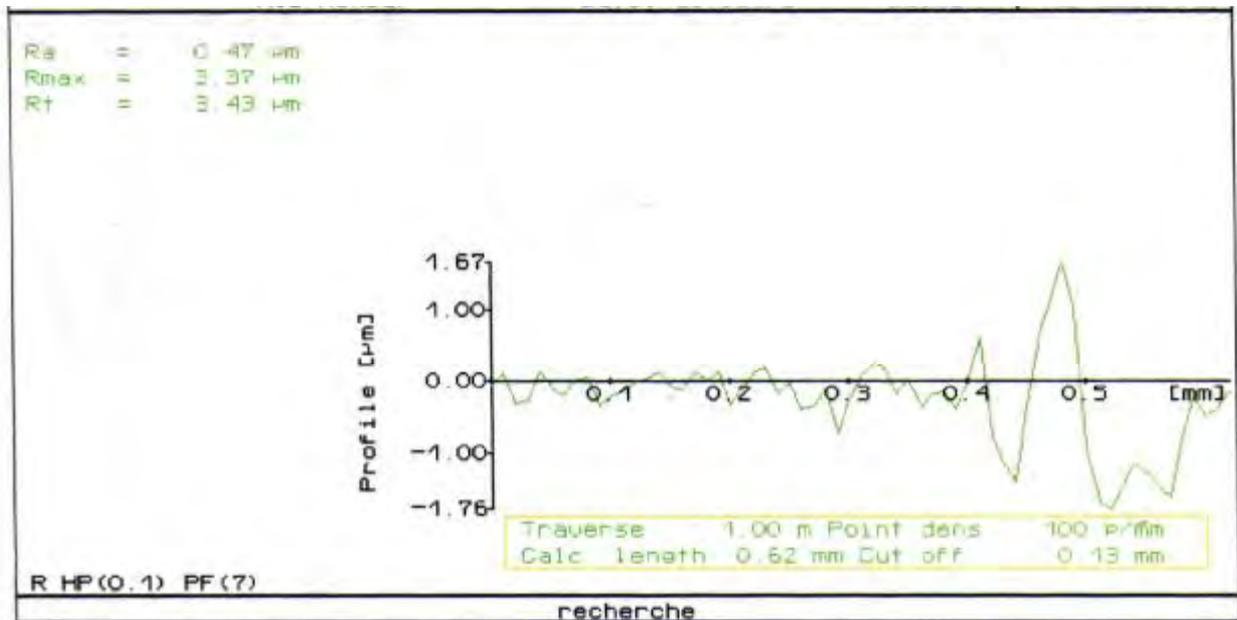
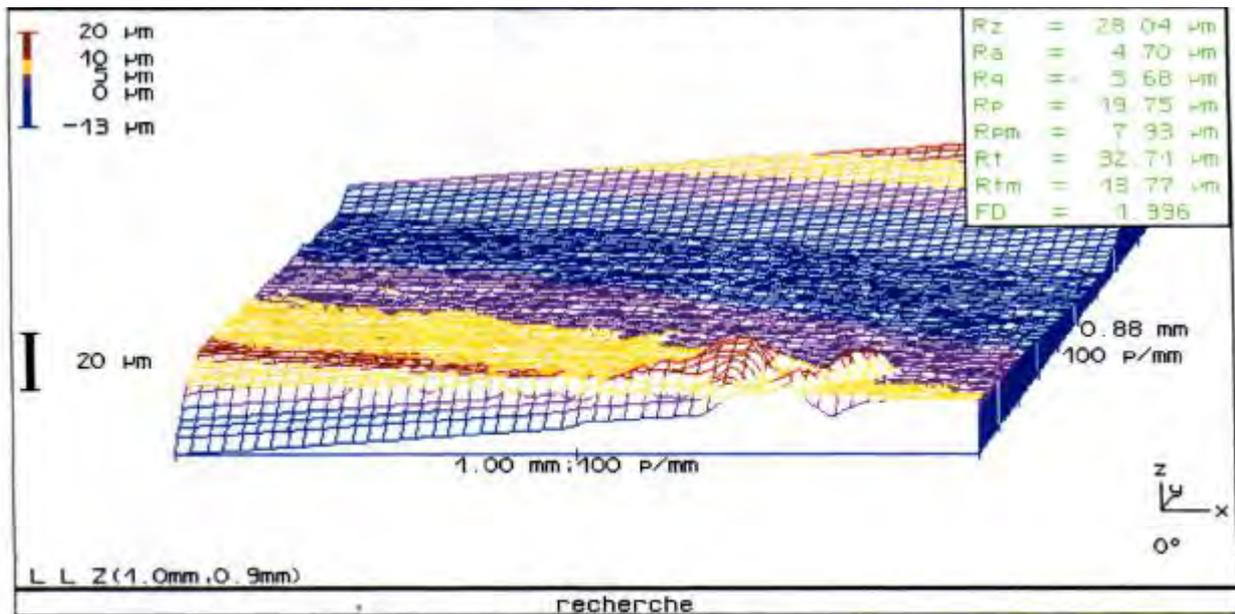


Figure 22a : Déformation plastique et physico-chimique en 3D
Revêtement TiC

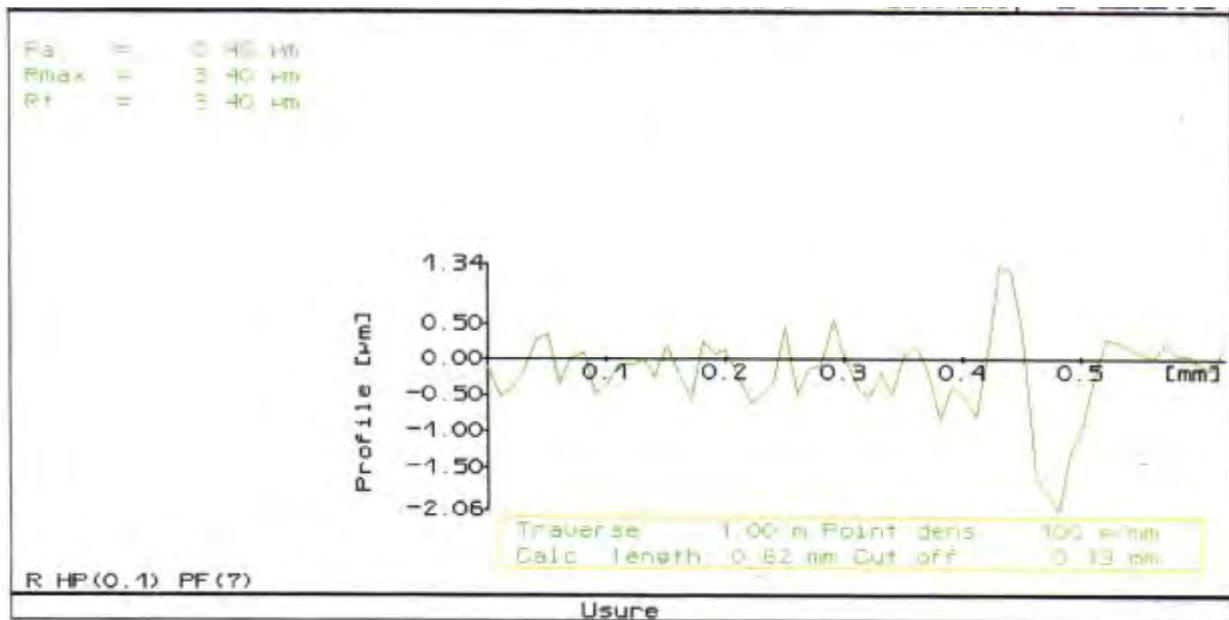
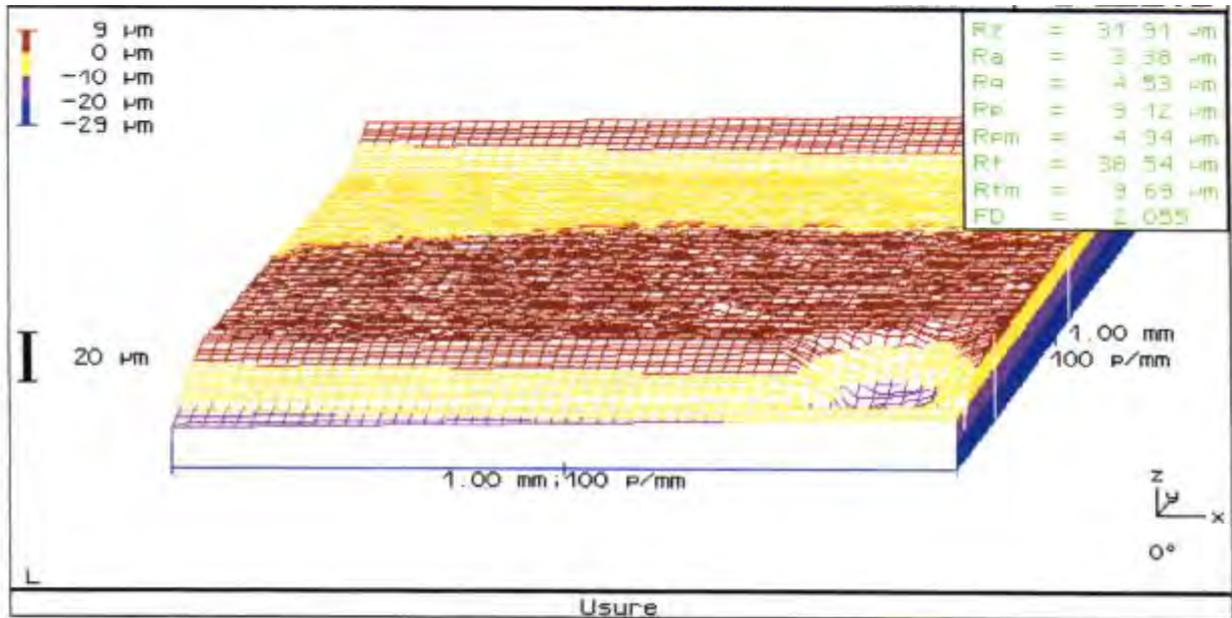


Figure 22b : Déformation plastique et physico-chimique en 3D

Revêtement TiN

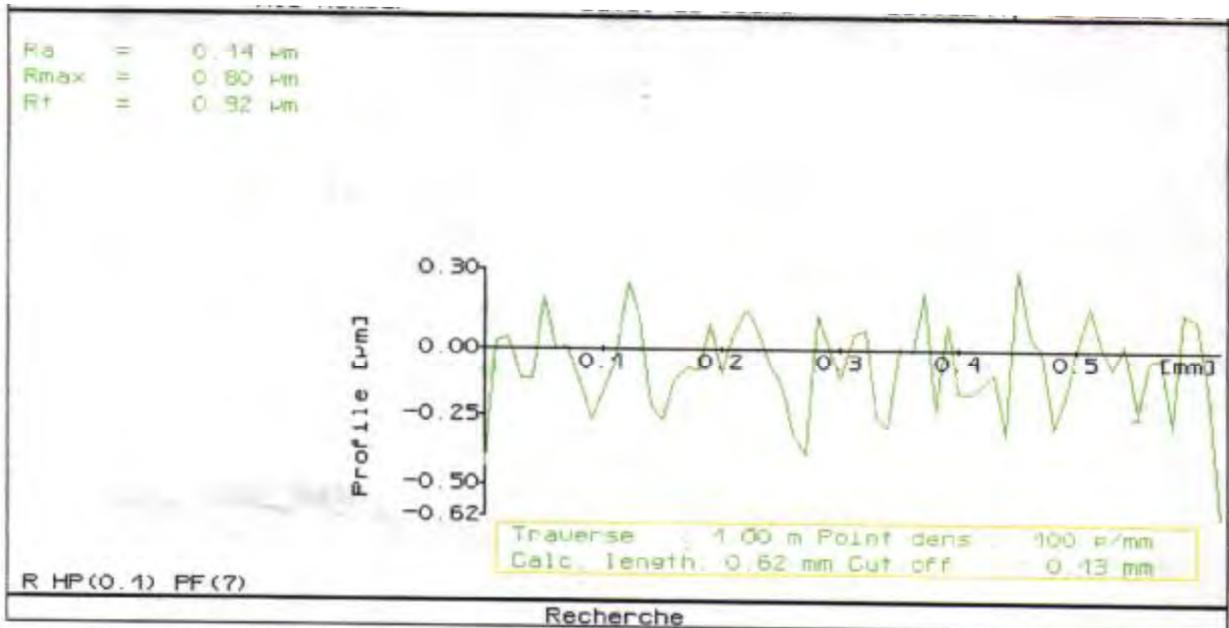
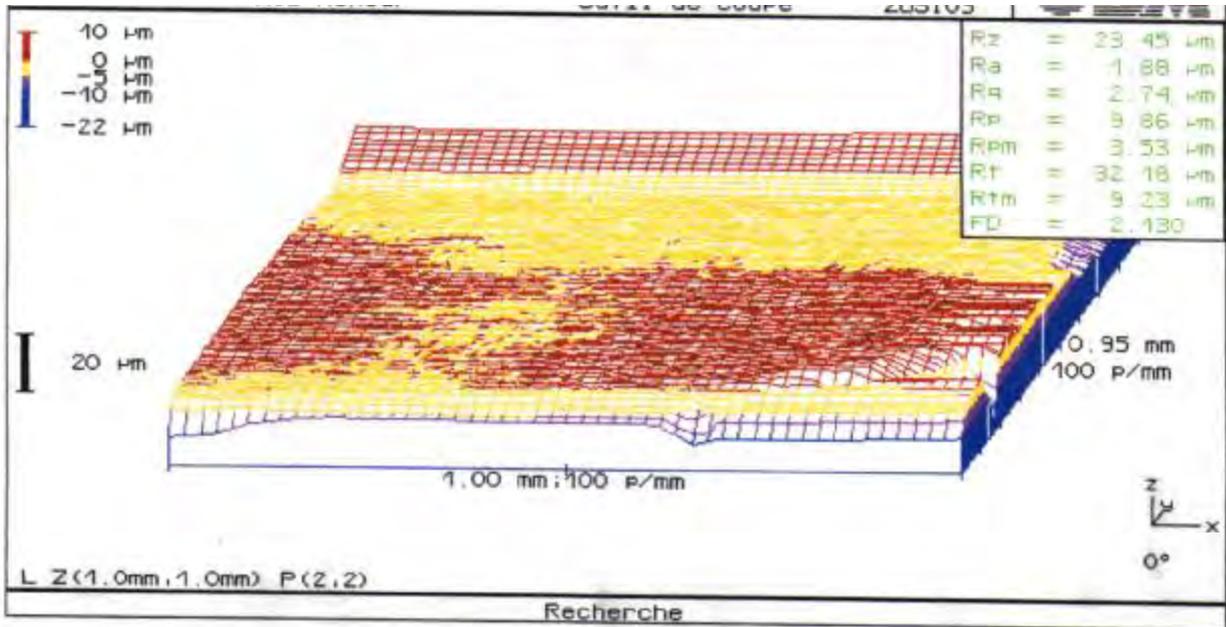


Figure 22c : Déformation plastique et physico-chimique en 3D

Revêtement TiC

V. ANALYSES ET DISCUSSIONS DES PROFILS A 2D

La rugosité est schématisée par des aspérités triangulaires dont les creux définissent un volume appelé volume d'Abbott (figures 23a, b,c).

Ces creux vides au départ, se remplissent de débris et selon le taux d'usure peuvent déborder. Ainsi, l'outil s'use autant à l'avant qu'à l'arrière et chaque sillon, recueille ainsi la même quantité de débris par unité de distance parcourue le long du contact fait de débris.

Une particule détachée de l'arrière du contact est immédiatement éliminée, tandis qu'une particule détachée de l'avant doit traverser toute la longueur du contact avant d'être éliminée. Les débris d'usure sont donc transportés de l'avant vers l'arrière.

Le volume de particules détachées est indépendant de l'abscisse le long du contact, le transport concentre les particules vers l'arrière du contact [12, 13, 32].

A l'avant du contact, les premiers corps matière et outil se touchent, les aspérités de l'outil pénètrent dans la matière usinée et l'abradent. Le taux d'usure, pour une condition donnée est comparativement important.

A l'arrière, les premiers corps sont séparés par un lit de particules ou troisième corps. L'usure qui résulte de l'action du troisième corps contre le premier corps s'apparente à une action de polissage.

On en déduit que deux mécanismes d'usure différents, qui séparément, engendrent dans des conditions identiques des taux d'usure différents, peuvent coexister dans un même contact.

Ces observations montrent que le troisième corps peut non seulement modifier la distribution des efforts tangentiels, mais peut également transformer la distribution des efforts normaux. Il crée donc une portance qui s'ajoute à ses propriétés d'écran séparateur [11, 13, 47].

En d'autres termes, les débris d'usure piégés à l'intérieur du contact forment un troisième corps qui diminue l'interaction entre premier corps et les protège au moins ou partiellement contre l'usure. Ce phénomène d'auto-protection dépend du temps pendant lequel les particules sont actives, c'est à dire piégées dans le contact. Pour une vitesse donnée, ce temps dépend de la longueur du contact dans le sens du mouvement. Pour une surface de contact donnée, l'auto-protection devrait donc, augmenter avec la longueur de contact dans le sens du mouvement.

Une particule détachée, de petite dimension, par rapport à celle du contact, est forcément piégée à l'intérieur du contact pendant un temps donné, elle est rejointe ou rejoint elle même d'autres particules ou débris pour le lit de troisième corps où, les observations le montrent, sa vitesse n'est pas nécessairement égale ou même parallèle à celles d'un des premiers corps. Il existe donc un écoulement interne au troisième corps.

Ra = 0.47 μm
Rmax = 3.37 μm
Rt = 3.43 μm

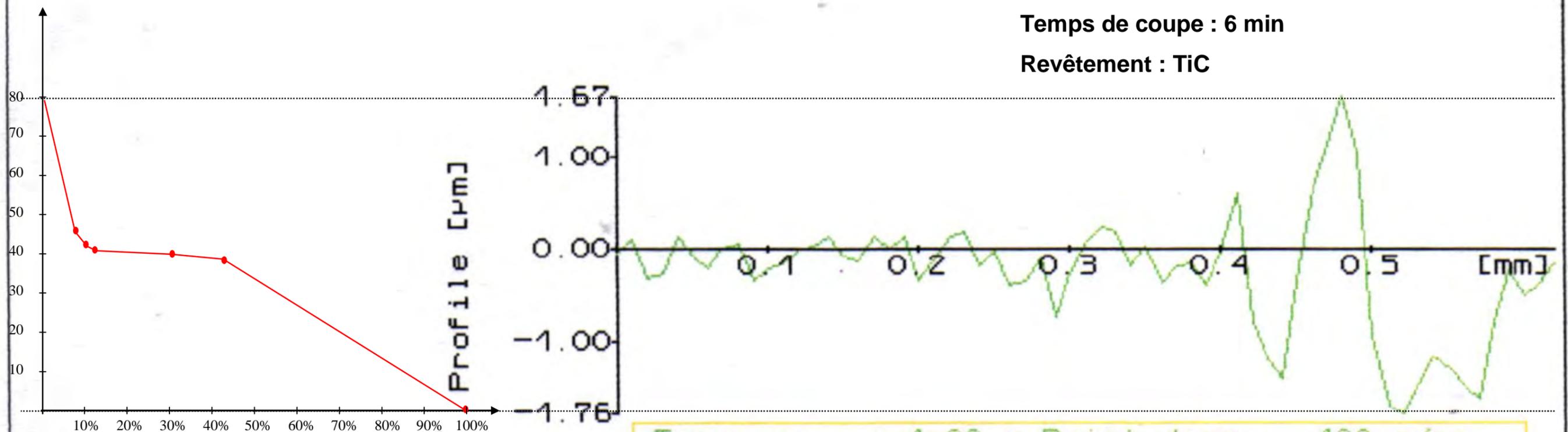
FIGURE 23 a : Tracé des courbes de rugosité et des courbes d'Abbot et Firestone correspondantes

Vitesse de coupe : 150 m/min

Avance : 0,2 mm/tour

Temps de coupe : 6 min

Revêtement : TiC



Traverse : 1.00 m Point dens. : 100 P/mm
Calc. length: 0.62 mm Cut off : 0.13 mm

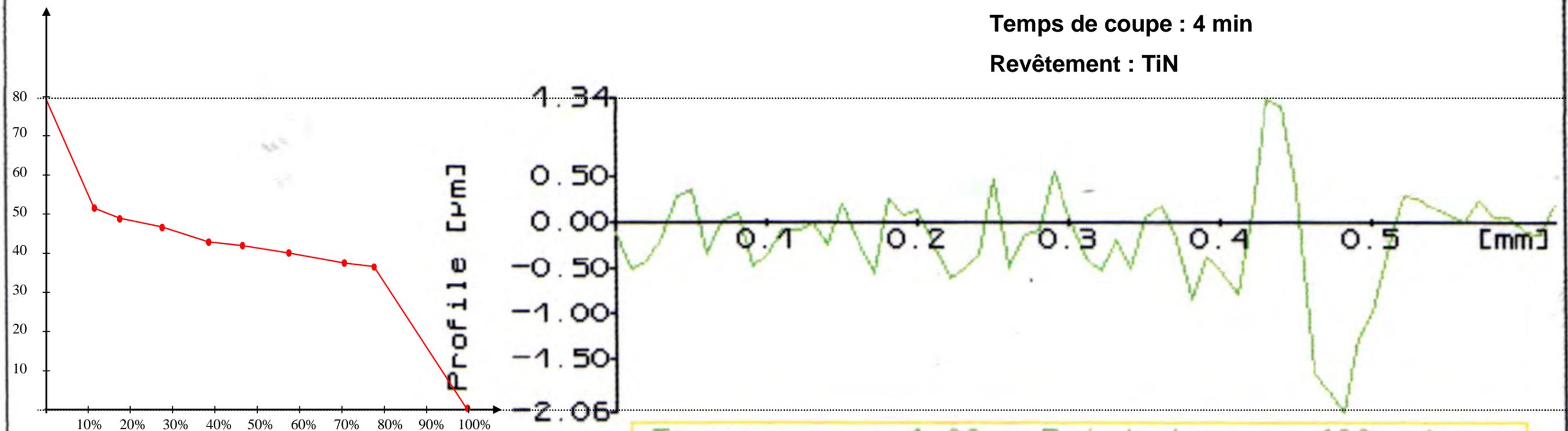
R HP (0.1) PF (7)

recherche

Ra = 0.40 μm
Rmax = 3.40 μm
Rt = 3.40 μm

FIGURE 23 b : Tracé des courbes de rugosité et des courbes d'Abbot et Firestone correspondantes

Vitesse de coupe : 150 m/min
Avance : 0,2 mm/tour
Temps de coupe : 4 min
Revêtement : TiN



Traverse : 1.00 m Point dens. : 100 p/mm
Calc. length: 0.62 mm Cut off : 0.13 mm

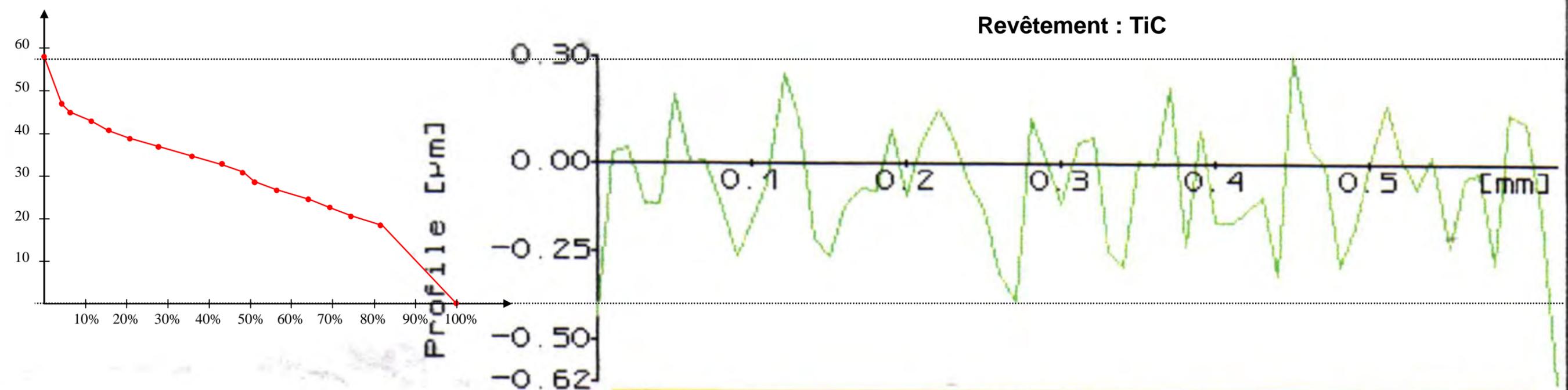
R HP (0.1) PF (7)

Usure

Ra = 0.14 μm
 Rmax = 0.80 μm
 Rt = 0.92 μm

FIGURE 23 c : Tracé des courbes de rugosité et des courbes d'Abbot et Firestone correspondantes

Vitesse de coupe : 150 m/min
 Avance : 0,2 mm/tour
 Temps de coupe : 2 min
 Revêtement : TiC



Traverse : 1.00 m Point dens. : 100 P/mm
 Calc. length: 0.62 mm Cut off : 0.13 mm

R HP (0.1) PF (7)

Recherche

VI. COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES REVÊTEMENTS :

Les surfaces changent au cours du temps à cause de l'usure et par conséquent les résultats évoluent aussi. Au départ, la surface de l'outil (contre face) est rectiligne avec une qualité normale industrielle (figure 4). Au cours du contact, un rodage se produit; seule, les ondulations restent.

Ce rodage est lié à l'existence de particules dans les revêtements de l'outil qui agissent comme un abrasif.

Un film de transfert est aussi créé sous l'effet du frottement et la présence du troisième corps. Par contre, si on regarde les revêtements, ils apparaissent poreux (figure 26, 27 et 28). Et en surface, les pics de rugosité initiales sont progressivement éliminées pour former une surface réelle de contact (figure 24) avec des plateaux de portance. Ce qui est visualisé dans le chapitre VI par les cartographies des surfaces et la formation d'un troisième corps tribologique.

L'influence d'un revêtement sur l'aire de contact outil-copeau est une question difficile à traiter, car sa quantification est très délicate. Il est possible de distinguer vers l'arête de coupe une zone où le copeau adhère fortement (figure 17 et 18) suivie d'une zone où le copeau ne fait que frotter.

En effet, nous savons bien que le déroulement du copeau dans son environnement n'est jamais constant. Le copeau va toujours buter sur une surface qui va l'obliger à se courber.

Du fait des rugosités d'outils, l'adhésion ne se produirait qu'aux extrémités des irrégularités de surface, alors qu'à d'autres endroits plus bas en altitude se produiraient uniquement des frottements intenses [79, 89]. Ce contact favorise un écrouissage et une usure par arrachement mécanique de particules d'outil, (figure 26 et 27), après formation d'une microsoudure entre le copeau et l'outil.

Ces microsoudures sont favorisées par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et de l'outil entraînant des déformations importantes (figure 14, 15 et 16).

Aussi, la pointe de l'outil peut subir une déformation plastique permanente et un effet de fluage sous l'action des températures élevées et des haute pressions dans la zone de contact qui altère l'assise du revêtement (figure 23 et 24).

De plus, la détermination de l'aire de contact est fortement variable en fonction du contraste entre le revêtement initial (figure 25 et 28) et les traces laissées par le contact ou

troisième corps, mis en évidence par le biais des analyses EDAX et cartographie du chapitre VI.

Il apparaît que l'action des revêtements sur la coupe serait essentiellement une action tribologique. Les revêtements faciliteraient plus ou moins l'écoulement de la matière sur la face de coupe des outils. Pour lutter contre les usures en général, il est nécessaire que l'outil ou sa surface ait une grande dureté et que le coefficient de frottement entre le copeau et l'outil soit faible, qu'il ait une grande stabilité chimique, une grande résistance à l'oxydation, une surface avec un minimum de défaut.

Aussi, l'élévation de la température de la plaquette entraîne une oxydation de la surface modifiant ses propriétés mécaniques. La pellicule ainsi altérée (figure 24) est emportée par le copeau, que nous retrouvons sous forme de particule sur le premier corps (analyse EDAX) du chapitre IV.

L'usure est alors déterminée par la vitesse d'oxydation. Dans ce cas, un revêtement parfait et stable ralentira l'usure en faisant office de barrière de diffusion. Il est clair que la stabilité chimique et la tendance à la dissociation ou à l'oxydation joueront un rôle dans une usure de ce type.

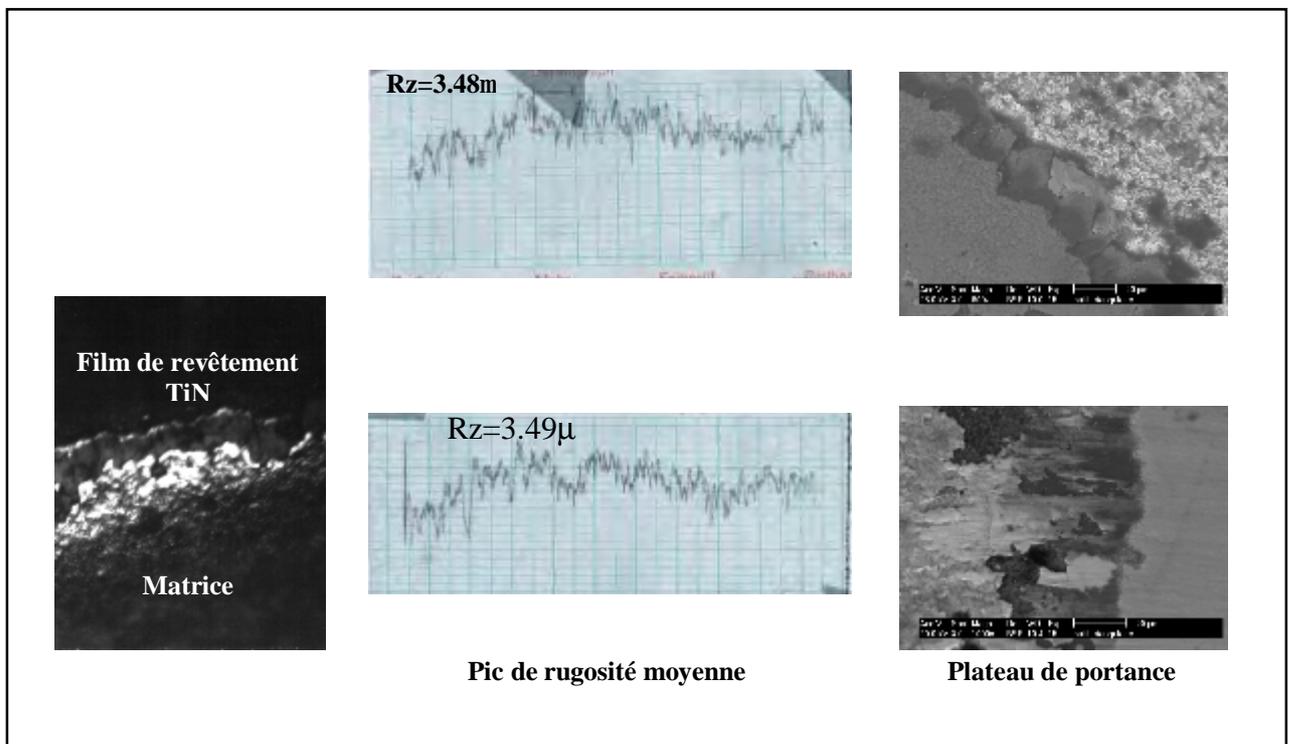
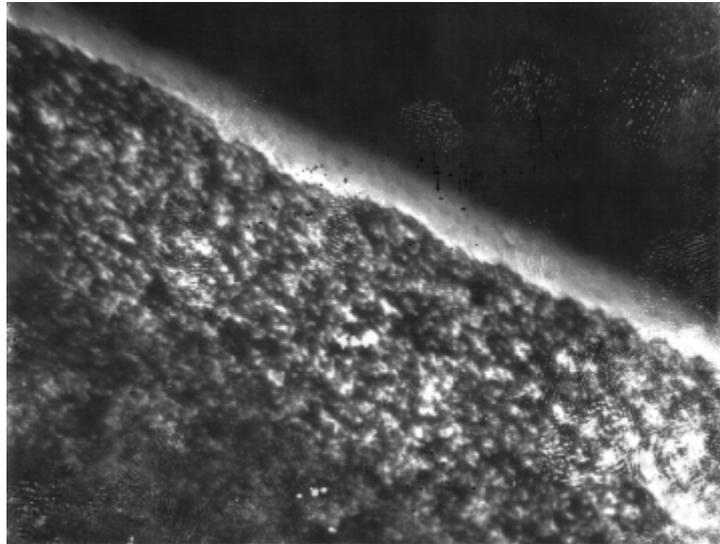
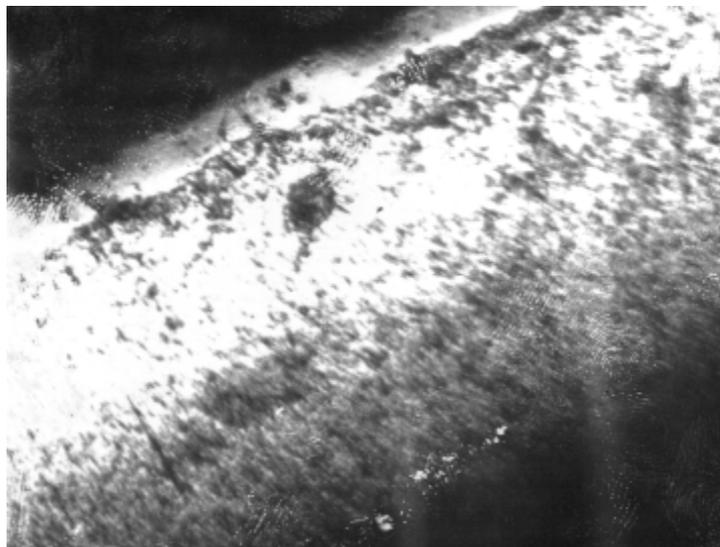


Figure 24 : Usure d'un outil de coupe revêtement TiN



a/



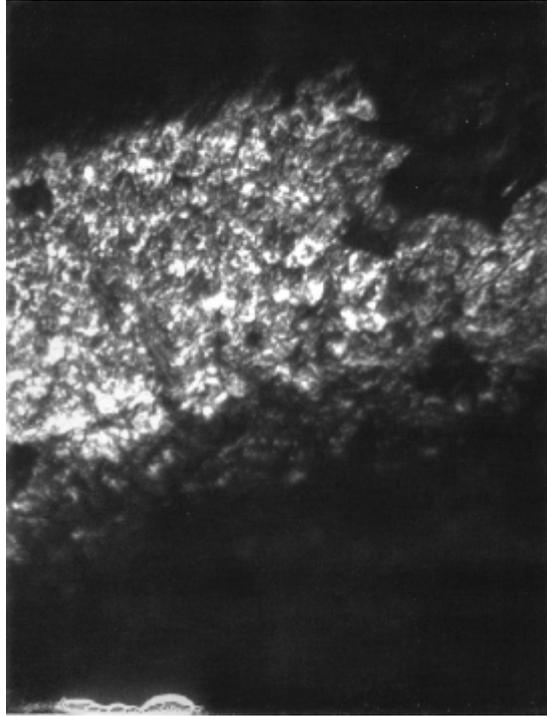
b/

Figure 25 : Morphologie du comportement du revêtement TiN sur 42CrMo4V sur microscope optique

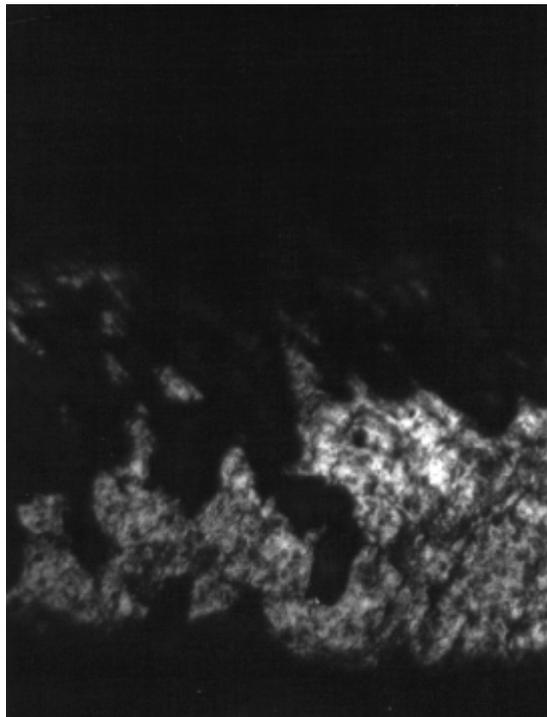
a/ Avant usage. g x 150

b/ Après usage détérioration du revêtement. g x 150

V=450m/mn, a=0.4mm/tr, p=1mm, t=20mn



a/

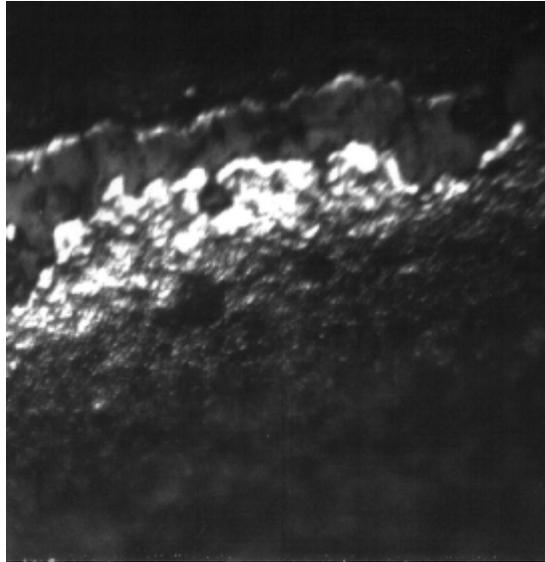


b/

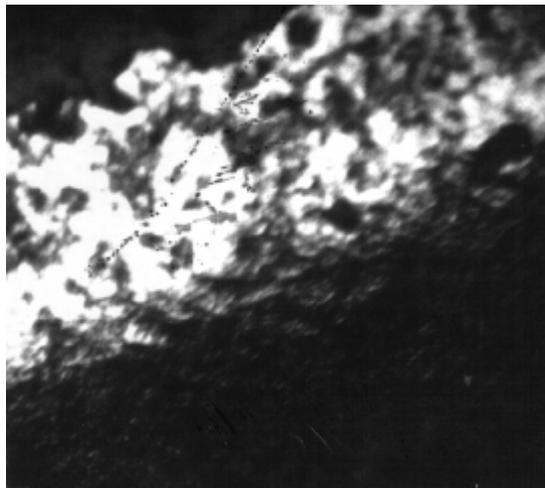
Figure 26 : Morphologie du comportement du revêtement TiN sur 42CrMo4V sur microscope optique

a/ Trace d'écrouissage et rupture du revêtement. g x 150

b/ Rupture du revêtement jusqu'au substrat



a/



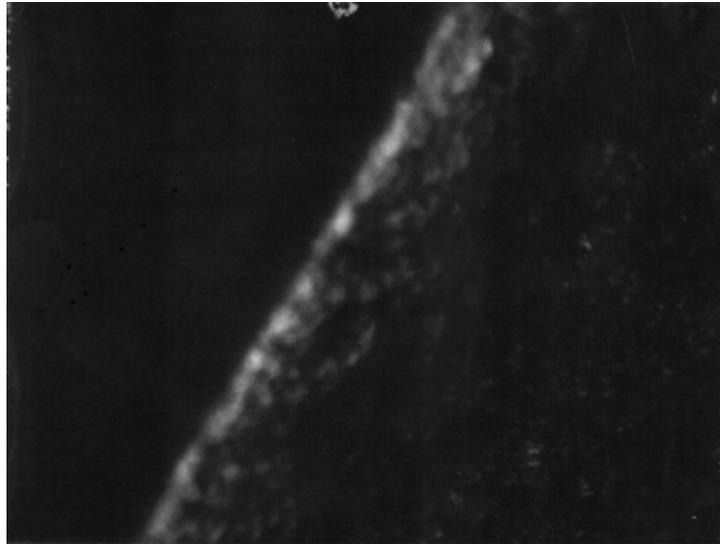
b/

Figure 27 : Morphologie du comportement du revêtement TiN sur 42CrMo4V sur microscope optique

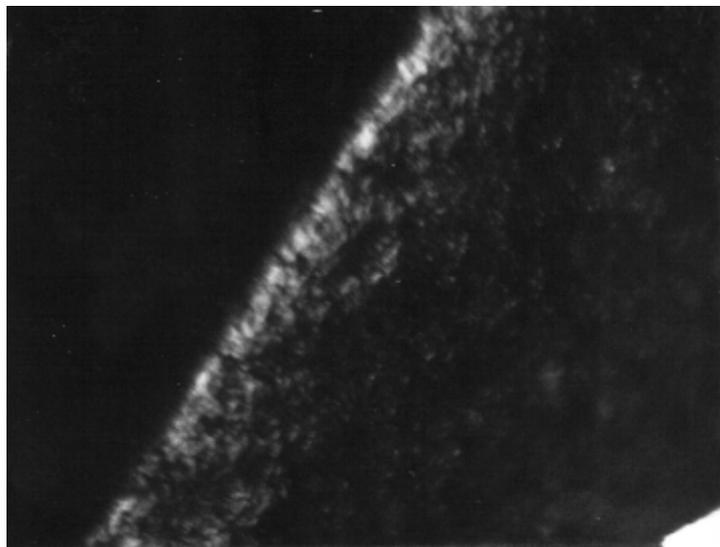
a/ Rupture totale du revêtement. $g \times 150$

b/ Ecrouissage et dissociation du revêtement. $g \times 150$

$V=450m/mn$, $a=0.4mm/tr$, $p=1mm$, $t=40mn$



a/



b/

Figure 28 : Morphologie du comportement du revêtement TiC sur 42CrMo4V sur microscope optique

a/ Avant usage. $g \times 150$

b/ Après usinage. Ecrouissage et détérioration par endroit du revêtement.

$V=150\text{m/mn}$, $a=0.3\text{mm/tr}$, $p=1.5\text{mm}$, $t=20\text{mn}$

VII. CONCLUSION

Les courbes de rugosité moyennes relevées sur pertographe ont révélé deux phénomènes.

Jusqu'à 500m de coupe, il ya croissance lineaire de la rugosité.

A partir de 500m, il y a toujours une croissance, mais celle-ci est moins accentuée.

On peut la comprendre de la manière suivante.

Les cavités ou aspérités dûes à l'usure, jusqu'à une utilisation moyenne, restent de dimensions faibles et l'effet du troisième corps reste très néfaste et son rôle est similaire à un abrasif qui se manifeste par une usure en croissance permanente.

Lorsque ces cavités ou aspérités deviennent de dimensions importantes, il y a un effet d'accumulation du troisième corps et son effet abrasif devient moins important.

On remarque par ailleurs, une évolution de rugosité identique, aussi bien pour le revêtement TiC que pour le revêtement TiN avec cependant un léger avantage pour ce dernier.

Par ailleurs, l'intérêt important de la topographie 3D en profilométrie optique nous offre plus de renseignement sur la diversité de la rugosité.

En effet, les relevés sur deux plans distants et pourtant proches suivant l'axe y (0.88 et 0.9mm) montrent dans le premier cas que la rugosité est faible sur une certaine longueur puis monte brusquement à partir de 0.5mm tandis que dans le second cas la rugosité reste approximativement stable.

On note de même une différence appréciable en ce qui concerne la valeur de la rugosité moyenne.

Aussi, l'avantage des courbes d'Abbot et Firestone renseignent sur l'importance de la rugosité.

Pour la première courbe, c'est à dire le revêtement TiC on remarque un profil très aplati au centre, ce qui montre une rugosité faible.

Pour les deux autres courbes, on note une pente centrale légèrement accentuée qui montre une rugosité moyenne.

Ainsi, lorsque le revêtement est parfait, il joue le rôle de barrière de diffusion protégeant ainsi le substrat plus sensible. Toutefois, on constate que celui ci n'est jamais parfait mais présente un réseau de fissure ou éventuellement des porosités. Ces défauts sont alors des points faibles lors d'un travail à haute température. L'oxygène pénètre au travers des imperfections de la couche et altère l'assise de la couche. L'outil périra par écaillage ou par rupture. Il arrive fréquemment que la matériau usiné joue un rôle chimiquement actif et provoque la destruction rapide de l'outil objet, de nos investigations au chapitre VI.

Chapitre VI

Effet du troisième corps sur l'usure des outils de coupe

I- INTRODUCTION :

On rappelle que le contact tribologique est composé de quatre éléments principaux (figure 1).

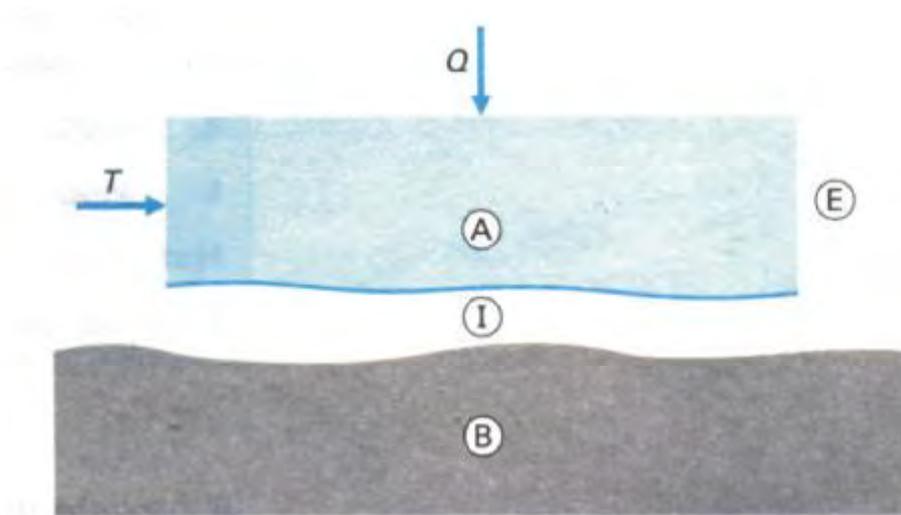


Figure 1 : Principaux éléments du contact tribologique

- Les solides A et B correspondant au corps en contact.
- L'environnement E.
- Le milieu interfacial I défini sous le terme générique de troisième corps.

On distingue trois grandes familles de troisième corps :

- Les dépôts macroscopiques qui sont constitués de particules issues du solide A et stabilisées sur le solide B.
- Les dépôts microscopiques qui peuvent être constitués de particules issues du solide A, avec ou sans réactivité chimique entre celles-ci et le solide B.

~~Effet du troisième corps sur l'usure des outils de coupe~~

- Les débris, qui peuvent être des particules abrasives préalablement incluses dans le solide A, des produits de réaction du solide A avec l'atmosphère, des morceaux du solide B arrachés, etc...

Or, ce troisième corps participe à l'endommagement des outils de coupe et son étude revêt donc une grande importance.

En effet, on montre que :

- Les dépôts macroscopiques constitués à température modeste provoquent essentiellement un endommagement mécanique (régime vibratoire de travail de l'outil conduisant à fissuration et la rupture);
- Les dépôts microscopiques constitués à température élevée donnent lieu à des altérations de l'outil : endommagement chimique;
- Les débris de toute nature sont cause d'une abrasion de la surface des outils : endommagement physique.

Il s'agit dans ce chapitre de mettre en évidence sous les aspects qualitatifs et quantitatifs.

- La présence du troisième corps est notamment par sa cartographie.
- L'analyse ponctuelle qui nous renseigne sur le spectre des différents éléments jouant le rôle de troisième corps.

II. MISE EN EVIDENCE DU TROISIEME CORPS :

Il existe un nombre considérable de paramètres qui président au comportement des surfaces frottantes. La plupart de ces paramètres peuvent interagir fortement, de sorte qu'aucune théorie générale n'est à même de prendre en compte et de décrire l'extrême diversité des situations possibles.

On trouvera dans cette discussion un certain nombre d'indicateurs permettant de situer le rôle ou l'importance de quelques unes des variables principales vis à vis du comportement tribologique du couple en question.

Ainsi, le frottement de la surface interne du copeau sur l'outil est vierge, exempte de tout corps étranger. Il en est rapidement de même de la surface de l'outil nettoyée par le copeau [80]. Les conditions sont donc favorables pour réaliser des soudures par friction après écrasement des aspérités du couple en contact (figures 2 et 3).

Les aspérités des deux premiers corps se soudent, mais le défilement du copeau impose de rompre en continu les jonctions qui se forment.

Les soudures constituées résistent plus que les aspérités des deux antagonistes, résultats du chapitre V. La rupture des jonctions conduit à déposer des fragments du matériau le plus doux sur le plus dur. Il y a donc transfert de l'un sur l'autre (figures 2 et 3). En effet, compte tenu de la nature des premiers corps, c'est pratiquement toujours sur l'outil que se dépose le troisième corps, tel que le Fer, le carbone, le soufre, l'oxygène, le manganèse, le Chrome, etc... éléments constituant le premier corps, quand retrouvés stabilisés sur la face de coupe de l'outil, qui tapissent la zone de contact copeau-outil, matérialisés par les cartographies en surbrillance (figures 2a, 2b, 2c et 2d).

Par ailleurs, quand la zone de contact copeau-outil est recouverte, des particules du premier corps qui peuvent continuer à se déposer sur le deuxième corps (outil) (figures 2 et 3).

Ainsi, la géométrie de la zone de coupe perd l'acuité de l'arête de coupe, de ce fait, un effort plus important doit être appliqué à l'outil pour poursuivre la coupe.

Le dépôt peut atteindre une épaisseur et une forme qui dépendent de la rigidité de la liaison outil-pièce et de la résistance au cisaillement du matériau déposé [80].

La géométrie des dépôts macroscopiques dépend de la dureté et de l'érouissabilité à chaud, du matériau usiné. Une compétition se produit entre le durcissement qui renforce la résistance des aspérités du copeau et l'adoucissement de la température dans la zone de contact secondaire et par conséquent de la vitesse de coupe. En règle générale, pour un couple outil-matériau usiné, le dépôt a un volume qui s'accroît, lorsque la vitesse de coupe augmente. Le mécanisme de l'adhésion peut être actif à toute vitesse de coupe [81]. Très souvent, des morceaux de dépôts macroscopiques sont évacués, ce qui peut entraîner un régime vibratoire, ainsi l'outil se comble, puis se relaxe. On observe une spectaculaire altération de la qualité des surfaces usinées et un endommagement mécanique de l'outil soumis à des surcharges importantes (figures 5, 7 et 8).

Enfin, l'évacuation peut se faire par arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt (figure 7).

Quant à l'endommagement induit par des dépôts microscopiques, ou troisième corps, obtenu dans les conditions de coupe élevées et par conséquent, une température élevée dans la zone de contact secondaire, un dépôt du matériau usiné qui se formerait ne serait pas écroui et n'atteindrait pas une taille capable de modifier les efforts de coupe [80]. Seuls peuvent être obtenus, des dépôts du troisième corps du frottement sec du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, cartographies en surbrillance (figures 3a, 3b, 3c et 3d) dont l'ordre de grandeur d'épaisseur est celui de la microgéométrie de l'outil, soit des dépôts un peu plus épais du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, dont la rhéologie à la température du contact copeau-outil rend possible une lubrification hydrodynamique [82]. Dans un cas ou dans l'autre de ces deux types de dépôts, qui ne font pas croître les efforts de coupe et par conséquent ne génèrent pas un endommagement mécanique; peuvent engendrer deux situations possibles.

Ces dépôts sont réactifs avec le matériau usiné de l'outil (figures 2d₁, 2e₁, 2f, 3f, 3d₁, 3d₂ et 3g₁), ils contribuent alors à un endommagement chimique, ou bien ces dépôts ne sont pas réactifs avec le matériau de l'outil et leurs effets endommageants sont assez modestes, étant

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~
non durcis, ils ne sont pas abrasifs. Leur évacuation peut toutefois donner lieu à des arrachements de particules de l'outil (figures 5, 7 et 8).

Aussi, les phénomènes de réactivité chimique sont très fréquents et multi-formes. Chaque couple outil-matière usinée est un cas particulier.

Enfin, après usinage, la cartographie a révélé la présence d'un dépôt de Fer (figures 2a et 3a).

Par ailleurs, un examen approfondi en coupe a permis de voir que ce fer porté à haute température diffuse aux joints des carbures et altère la résistance à l'abrasion de l'outil [83].

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie1-P1.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie1-P2.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie1-P3.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie1-P4.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie1-P5.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie1-P6.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie2-P1.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie2-P2.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie2-P3.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie2-P4.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie2-P5.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie2-P6.cdr

III. EVALUATION QUANTITATIVE DE L'APPORT DU TROISIEME

CORPS:

On peut considérer l'usure d'un système tribologique constitué de deux corps, de l'environnement et du produit interfacial ou troisième corps. Dans ce cas, les phénomènes doivent être décrits à partir du comportement du matériau interfacial, dont la présence et les propriétés sont primordiales, son comportement définissant la façon dont les premiers corps sont sollicités [84]. On parle alors de vie du troisième corps, de débris d'usure, de débit de particules, de circuit tribologique, de recirculation ou non des particules perdus par le contact, etc...

En effet, les conditions d'écoulement à la surface de l'outil jouent un rôle important dans le phénomène de diffusion en favorisant l'enlèvement de matière quand les vitesses sont élevées mais en la diminuant lorsqu'il se forme des couches limites à des vitesses plus réduites. Ainsi, la diffusion augmente rapidement avec la vitesse et la température interfaciale [85].

L'usure par diffusion est une usure continue pour laquelle des éléments de l'outil sont extraits par le copeau par quantité très petite. Elle est aussi bien due à la diffusion des constituants de l'outil dans le copeau qu'à celle des constituants de la matière usinée dans l'outil. Ceci est mis en évidence quantitativement, par la répartition des éléments chimiques obtenus par analyse EDAX (figures 4, 5 et 6) où l'on voit les pics des éléments constituants l'alliage usiné sur l'outil de coupe, en plus d'un pic plus intense, de l'oxygène (figures 5a, b, c) qui témoigne d'une oxydation effective.

A ce titre, l'analyse ponctuelle de la figure 5 met en évidence la morphologie de la couche d'oxyde formée sur la face de coupe de l'outil. On remarque que la couche ainsi formée se présente ondulée, avec une épaisseur qui n'est pas uniforme. On observe des cavités localisées à proximité de l'interface. Ces cavités sont le résultat de déformations plastiques, ou une analyse chimique localisée a été effectuée (figures 5a, b, c) où l'on voit aussi des pics représentatifs des éléments diffusés par le matériau usiné. Ces couches d'oxydes dont certaines peuvent se comporter en véritables lubrifiants solides ou en troisième corps, au même titre que les éléments chimiques retrouvés sur la face de coupe (figures 4, 5 et 6) obtenus par analyse EDAX. Il sont à l'origine des différences radicales de comportement des contacts.

D'une façon générale, l'influence de l'oxydation est étroitement liée à la composition, à la structure et la morphologie des couches formées, qui déterminent entre autres leurs caractéristiques mécaniques, physico-chimiques, ténacité et stabilité [78, 90].

Outre, l'enlèvement de matière sur l'outil, l'écaillage du revêtement (figure 5, 6, 7 et 8), les réactions provoquées par la diffusion affaiblissent la résistance mécanique de l'outil en surface (analyse ponctuelle des figures 5, 6, 7 et 8).

Il est bien connu que les pièces frottantes en l'absence du lubrifiant en particulier, se dégradent par différents processus superficiels conduisant au grippage, écaillage, usure par adhésion, par fatigue, par corrosion et par diffusion. Ces différentes dégradations sont illustrées et analysées ponctuellement par les (figures 4, 5, 6, 7, 8 et 9) qui dénotent la présence du troisième corps et réactions chimiques qui gouvernent l'usure de l'outil en question.

A ce titre, l'élévation de la température au niveau du contact conduit irrémédiablement à la formation d'une couche de transfert constituée des débris d'usure qui s'agglomèrent pour former un film intercalaire ou troisième corps tribologique entre les deux pièces et dépendent simultanément des matériaux et des conditions de fonctionnement.

Pour combattre ces effets, en particulier au niveau des applications il est essentiel de réduire les solubilités relatives et la vitesse d'interdiffusion entre éléments frottants. C'est ainsi qu'a été étudié le mécanisme d'usure des outils de coupe WC+CO analyse ponctuelle (figures 7 et 9) qui se manifestent à la température de service, par des microsoudages outil copeau puis par l'apparition de cratère (figures 4, 7 et 9).

Les stades successifs d'évolution et de dégradation de l'outil WC+CO au contact de l'acier en cours d'usinage sont donnés par (la figure 3g₁).

Le Cobalt immigre vers le copeau, changeant ainsi le potentiel chimique du carbone dans l'austénite, et vient alors se localiser à l'interface pour former un nouveau carbure dispersé (Fe_x, Co_y, W_z) C au dépend des carbures initiaux WC [86, 91].

~~Effet du troisième corps sur l'usure des outils de coupe~~

Il y a donc une modification importante des phases présentes, qui s'accompagnent d'une décohésion des grains de carbure les plus superficiels, formant le débris d'usure (figure 9 et 10).

Enfin, les problèmes de surface et les propriétés rhéologiques des films intercalaires ou troisième corps qui gouvernent le frottement et l'usure, sont inconnues.

En fait, ces troisièmes corps de composition mal définie, résultent le plus souvent de réactions chimiques inconnues.

Les hautes températures accentuent les difficultés de prévision des comportements car elles ont un effet marqué sur la vitesse d'évolution des processus et sur la génération du troisième corps [87] (oxyde, films réactifs, etc...) (figures 4, 5, 7 et 8).

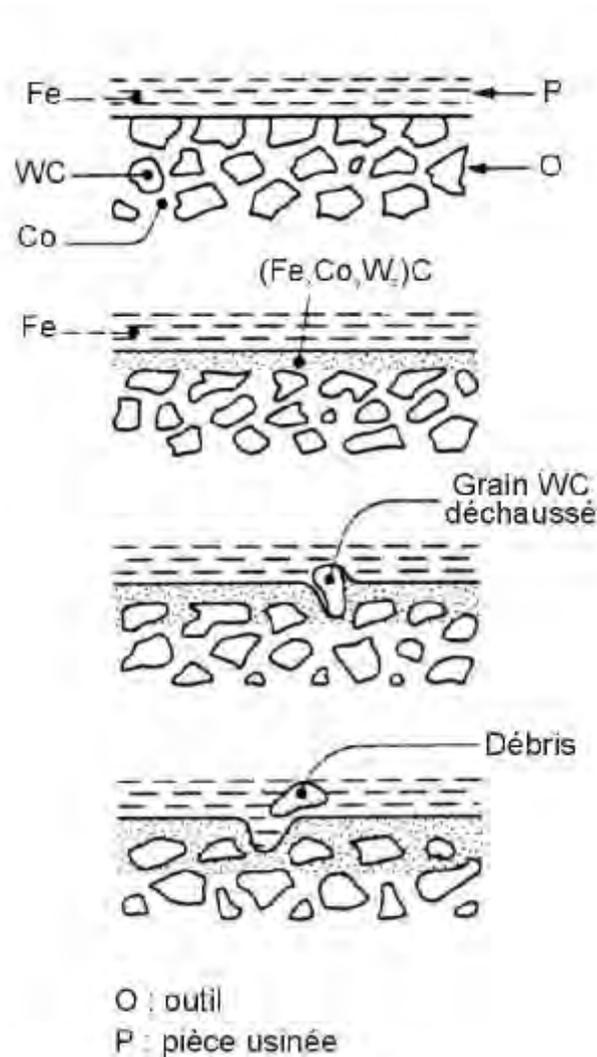


Figure 3g₁ : Stades successifs de diffusion entre la surface d'un outil en carbure (WC+Co) et l'acier à usiner, suivis du stade final d'arrachement des particules.

Pour confirmer cet aspect théorique, une étude expérimentale a été réalisée au centre de recherches nucléaires d'Alger.

Pour cela, on a effectué une analyse à la microsonde de la distribution des éléments analysés par la méthode d'une droite sur deux types d'outils : un outil neuf et un outil usagé.

Les résultats sont résumés sur les photographies obtenues par MEB (figures 11a et 11b) et les courbes de distribution (figures 12a et 12b), (pages 191 et 192).

On remarque sur les courbes d'analyse sur l'outil neuf une concentration de tungstène d'une valeur presque négligeable sur une profondeur de 15μ , puis une remontée brusque à partir de cette valeur qui indique la frontière entre la matrice (substrat) et les revêtements.

Quand on examine par contre les courbes respectives sur l'outil usagé, on remarque essentiellement une diffusion de tungstène de la matrice vers les couches de revêtements, la longueur de diffusion étant égale à environ 5μ .

On note de même un phénomène identique en ce qui concerne le cobalt avec, cependant, une diffusion de celui-ci moins accentuée.

Quant aux concentrations des autres constituants des revêtements (alumine et TiN) celles-ci restent grossièrement de même allure, il y a uniquement une redistribution des concentrations.

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P1.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P2.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P3.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P4.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P5.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P6.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P7.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P8.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P9.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P10.cdr

~~— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe~~

Fichier Cartographie3-P11.cdr

— Effet du troisieme corps sur l'usure des outils de coupe

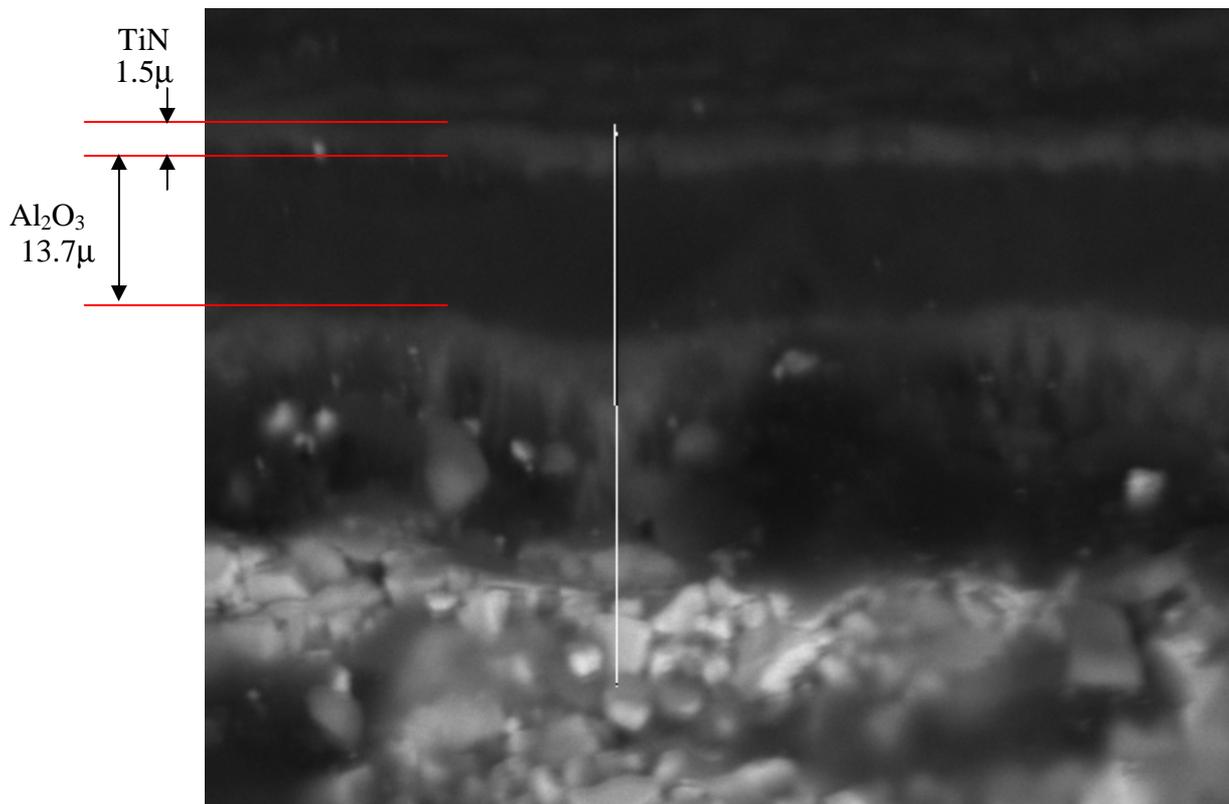
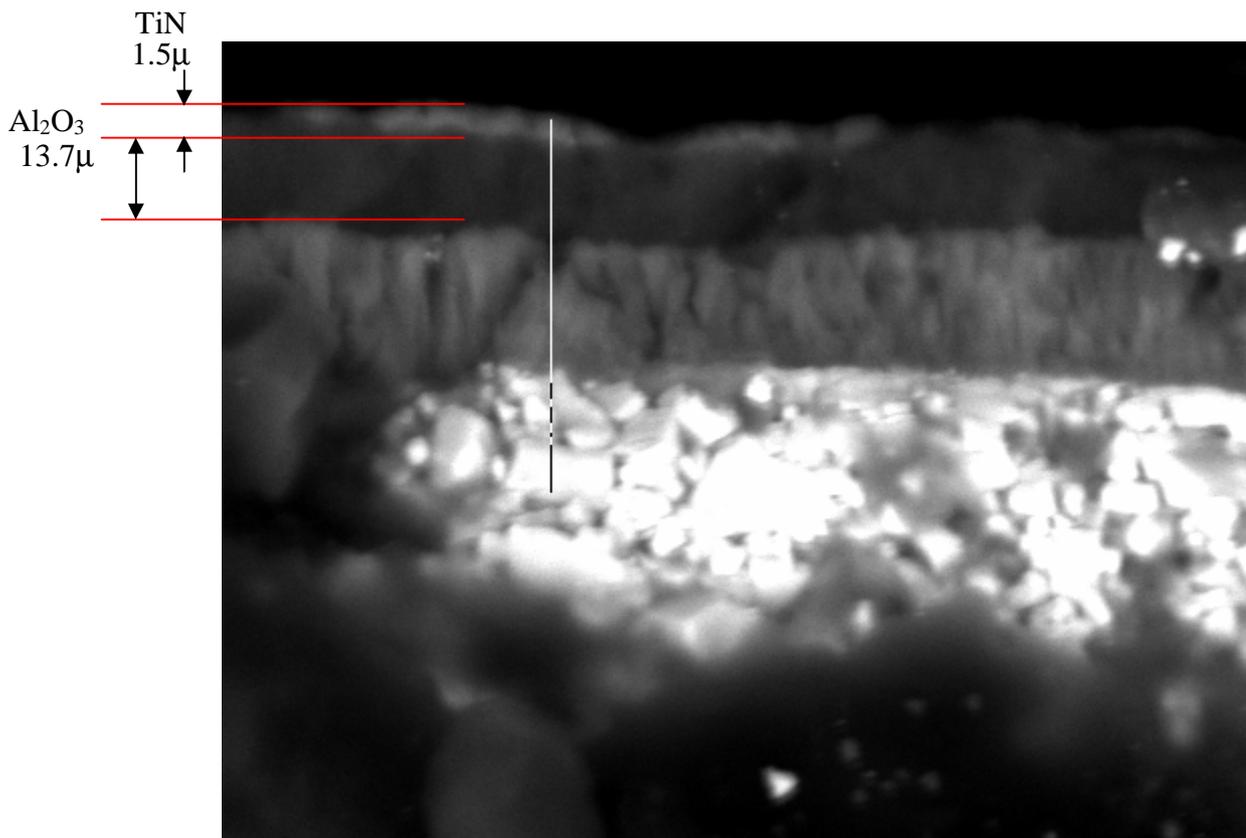
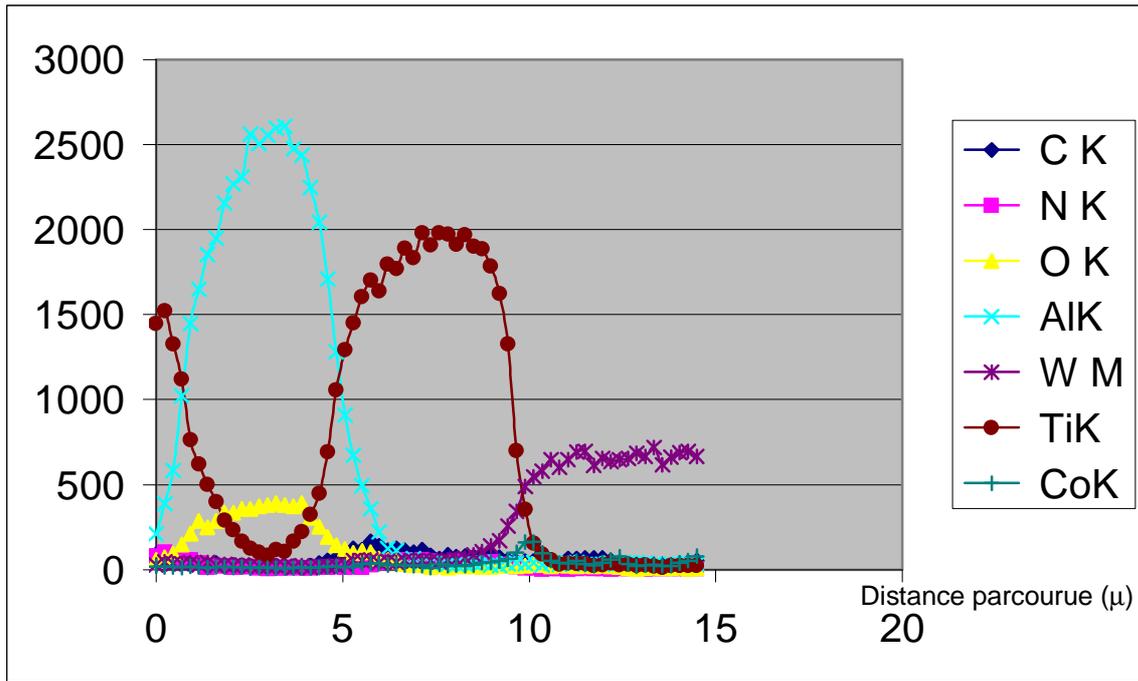


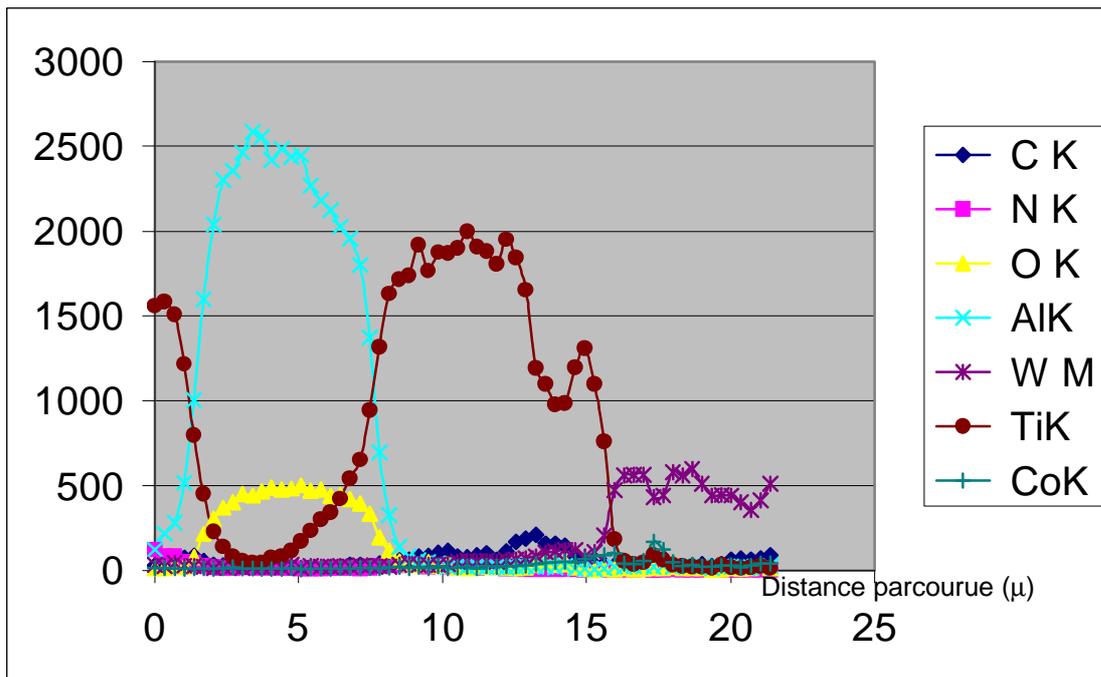
Figure 11 : Morphologie et mesure des revêtements sur MEB par microsonde d'un outil de coupe TiN et mesure de la distribution des éléments analysés à travers une droite

a/ Outil de coupe usagé

b/ Outil de coupe neuf



Outil Usagé



Outil neuf

Figure 12 : Morphologie et mesure des épaisseurs des revêtements sur MEB à la microsonde d'un outil de coupe TiN et mesure de la distribution des éléments analysés par la méthode de la droite
a/ Outil de coupe usagé
b/ Outil de coupe neuf

IV. COCLUSION

Les différentes analyses EDAX sur différents cas d'outils ont révélé essentiellement la présence de trois zones qui se superposent au substrat de l'outil.

On remarque d'abord la présence permanente d'une zone d'alumine (Al_2O_3) révélée par les pics d'oxygène et d'aluminium.

La zone extrême constituant le troisième corps est, comme le prévoyait l'analyse théorique, riche en éléments diffusant et constituant les éléments vitaux de l'outil et de son revêtement. On remarque notamment la présence de titane et de fer.

Ce phénomène de diffusion est dû à la forte température.

La zone intermédiaire est la zone de transition entre le revêtement et le troisième corps. On peut examiner ces propriétés sur les figures 4, 5 et 6.

Sur la figure 7, on note la présence de tungstène sur les diagrammes EDAX. Ceci montre donc une diffusion importante dont le siège est le substrat même.

Enfin, les figures 8, 9 et 10 montrent les cas extrêmes d'usure.

Ainsi, les propriétés rhéologiques des films intercalaires ou troisième corps qui gouvernent le frottement et l'usure, sont inconnues. En fait, ces troisièmes corps de composition mal définie, résultent le plus souvent de réaction chimique inconnue. Les hautes températures accentuent les difficultés de prévision des comportements car elles ont un effet très marqué sur la vitesse d'évolution des processus et sur la génération des troisièmes corps (oxydes, films réactifs, etc). Aussi ces hautes températures entraînent une spécificité dans chaque étude qui obscurcit les aspects généraux.

Conclusion Générale

L'analyse des résultats présentés précédemment est difficile car les contradictions apparentes sont nombreuses et les données ou lignes directrices de réflexions insuffisantes pour tenter de les concilier. L'obstacle principal provient du fait que chaque essai analysé se fait avec une optique le plus souvent mono-disciplinaire ce qui laisse dans l'ombre les éléments d'appréciation propres aux autres domaines. Le premier enseignement est donc que toute recherche est pluridisciplinaire. Elle exige la contribution d'un mécanicien, d'un physicien des volumes et des surfaces, et d'un chimiste.

L'analyse de chacune des principales formes d'usure des surfaces devrait permettre d'une part, de rendre un diagnostic sûr concernant l'origine des détériorations examinées sur les surfaces détériorées et, d'autre part, de proposer un ou plusieurs remèdes destinés à lutter contre une usure ultérieure.

Bien entendu, l'examen n'est pas toujours facile et la cause de l'usure n'apparaît pas toujours clairement au vu des détériorations observées.

Très souvent, les surfaces détériorées portent les traces juxtaposées de plusieurs formes d'usure les ayant successivement ou simultanément affectées. Ceci se traduit par l'aspect thermique du phénomène de coupe qui se manifeste par le mécanisme de diffusion qui dépend du gradient d'activité des éléments et à la nature du couple, directement en contact avec le copeau.

Les observations microscopiques, les analyses qualitatives et quantitatives à la microsonde mettent en exergue la diffusion du carbone dont la solubilité est restreinte dans les structures ferritique et bloquée par la couche blanche, une décroissance du pourcentage de Cobalt dans la direction de la surface de coupe, une réduction d'une partie de tungstène sous la surface de coupe, tout ce phénomène de diffusion provoque et entraîne une usure accélérée continue inhérent au mécanisme de la formation du copeau.

Nous avons constaté à travers nos différentes analyses au microscope électronique à balayage des mécanismes identiques de diffusion dans les outils à revêtement, néanmoins le

revêtement joue un rôle prépondérant dans le mécanisme de migration des éléments inhérent dans la constitution de l'outil.

La séparation des éléments associés tels que les carbures de tungstène qui existent de fait ont tendance à rester sous le revêtement au lieu de disparaître avec le copeau.

Le déplacement des éléments dissociés est fonction des températures et pressions dans la formation du copeau, ces derniers se fixent dans des lieux d'allures périodiques conformément aux conditions de coupe, à l'écart de l'interface du revêtement, et de la matrice.

En outre, cette dernière s'affaiblit lorsque le Cobalt afflue sous la surface du revêtement. A travers nos différentes expérimentations et observations, nous avons constaté, lorsque les revêtements sont détériorés, les usures par cratérisation ou frontales s'accroissent, ce qui provoque l'usure totale de l'outil. Ceci est mis en évidence sur les différentes micrographies et les relevés profilométriques.

En effet, lorsque le revêtement ne joue plus son rôle de barrière de diffusion, le copeau se trouve en contact avec une surface à structure matricielle très modifiée et très affaiblie par les contraintes des hautes pressions et températures, ce qui entraîne la rupture prématurée des arêtes de coupe.

La morphologie des usures obtenues, nous laisse présager qu'un accommodement est à faire entre les résistances de tous les types d'usure et de surcroît le revêtement avec ses critères physico-chimique.

De plus, un aspect morphologique spécifique de la détérioration même non masqué par des phénomènes secondaires, n'informe pas toujours sur le type d'usure impliqué. Ainsi, la présence de petites cavités sur une surface peut être due, à un processus de fatigue, ou de corrosion de contact, ou d'érosion par cavitation.

Aussi, depuis longtemps, il est connu qu'en lubrification hydrodynamique, la présence d'un film d'huile, protège les premiers corps contre l'usure; une analogie peut être faite avec

le troisième corps en frottement sec, ceci a été vérifié expérimentalement par plusieurs chercheurs. Le troisième corps a donc pour rôle de :

- Former la protection des premiers corps contre l'usure.
- Gouverner le frottement qui peut accroître ou décroître.
- Contrôler l'usure qui peut croître avec l'instabilité du troisième corps.

On peut noter que la majeure partie de l'usure des outils, usinant des matériaux tels que les aciers, provient d'un processus chimique, mise en évidence à travers les différentes micrographies. Ceci étant la diffusion et l'oxydation de la surface pendant le travail, dues à la température élevée et la haute pression engendrée par les efforts de coupe. Il existe trois façons d'y remédier, qui sont la modification de la surface, la modification du substrat et la modification de la géométrie. Ces trois façons sont applicables soit séparément, soit ensemble. Il est de ce fait très difficile d'établir un critère d'usure d'emploi général pour la détermination de la durée de vie des outils de coupe.

Nous avons remarqué que les essais d'usure à paramètres de coupes constants sont long et coûteux. En effet, compte tenu du nombre élevé de facteurs, nos résultats expérimentaux présentent une dispersion importante, nécessitant un plus grand nombre d'essais afin d'obtenir une précision suffisante.

Actuellement, certaines études soulignent qu'en utilisant de très faibles quantités d'un matériau étranger, tel que le ruthénium, on peut modifier la masse du métal dur de manière à rehausser la durée de vie des outils.

Nous avons également constaté à travers nos multiples expérimentations que la nature et l'évolution de l'usure des outils de coupe dépendent de nombreux facteurs (vitesse de coupe, géométrie du copeau, nature et géométrie de l'outil, matériaux usinés ...); De ce fait, il est très difficile d'établir un critère d'usure, d'emploi très général, pour la détermination du temps effectif de coupe des outils.

D'après les normes I.S.O, il est recommandé, compte tenu de l'évolution de l'usure et de la reproductibilité des essais, de retenir le critère de « mort d'outil » le critère d'usure frontalé ($VB = 0,3 \text{ mm}$) pour les outils en carbures.

Toutefois, durant nos essais, d'autres critères, liés à la cratérisation sur la face de l'outil ou à l'état de surface de la pièce usinée, peuvent être utilisés. Les lois d'usure des outils, qui associent le temps effectif de coupe aux différents paramètres de l'usinage, et en particulier à la vitesse de coupe dépendent du critère d'usure adopté pour leur établissement.

Aussi, divers expérimentateurs ont tenté de préciser les corrélations de ces modèles avec les conditions d'usure des outils au cours d'essais accélérés à vitesse de coupe variable. Ces essais, qui ne présentent pas les mêmes sujétions que les précédents, sont en effet à la base de diverses méthodes empiriques d'appréciation de l'usinabilité relative des matériaux ou de l'endurance des outillages dont l'intérêt pratique est évident. Par ailleurs, les résultats des essais indiqués ici, qui s'appliquent à des conditions de coupe continue, ne préjugent en rien de l'évolution de l'usure en coupe interrompue, souvent mise en œuvre pour certains travaux. En effet, celle-ci fait intervenir des phénomènes et des propriétés des matériaux de coupe (résistance aux chocs et aux sollicitations cycliques) suffisamment particulières pour justifier des études spécifiques.

Cependant, la comparaison de nos résultats obtenus avec les mêmes matériaux, conduit à des conclusions variées quant à la possibilité d'évolution rapide des paramètres de la loi d'usure des outils; la validité de ces procédures dépend en effet du type de matériau et de la possibilité d'établir un modèle à la fois simple d'expression et suffisamment représentatif, pour décrire l'évolution du processus d'usure.

Les recherches entreprises ces dernières années sur les revêtements pour outils de coupe ont montré que les revêtements TiC et TiN sont généralement les plus efficaces malgré que dans certaines circonstances particulières ces alliages sont extrêmement réactifs (réaction chimique) et dans ce cas on leur préfère un revêtement en Al_2O_3 .

Par ailleurs, des recherches sur l'endurance des outils de coupe ont montré que ces revêtements contribuant à une meilleure tenue des outils, les vitesses de coupe permises peuvent aller de 15m/mn pour l'ébauche des super-alliages à base de Nickel jusqu'à 180 m/mn pour le Titane.

Enfin, il faudrait souligner par contre que ces revêtements ne sont pas des revêtements miracles qui excellent à la fois en terme de coefficient de friction, de dureté, de température maximale permise et de stabilité chimique.

Il faudrait donc accepter un compromis en ce qui concerne les performances recherchées.

L'idée recherchée maintenant est de combiner les deux types de revêtements afin d'unir leurs propriétés.

Ainsi, le Carbonitrure de Titane, le TICN est sensible à la chaleur et est limité à 400°C. Toutefois, il possède le coefficient de friction le plus faible des revêtements, de l'ordre de 0.3 aux températures d'usinage, il génère donc moins de chaleur que les autres revêtements, ce qui lui confère une coupe plus froide. Le TICN possède également une résistance très élevée aux impacts et une grande résistance à l'usure en flanc. L'ensemble de ces caractéristiques en fait un candidat de choix pour les applications de dégrossissage.

De plus, le TICN adhère particulièrement bien au substrat. Il est donc souvent utilisé comme première couche d'un revêtement multicouches pour éviter la délamination, mais il est aussi utilisé comme revêtement monocouche.

Perspective et recommandation

La traduction, en terme mécanique, des actions physiques doit être activement poursuivi. C'est en effet la compétition entre phénomène mécanique et physique qui pilote les différentes activations, qui à leur tour gouvernent le frottement et l'usure par l'importance du champs thermique, qui régnent dans la zone de coupe à l'interface outil-copeau sur le comportement à l'usure de matériau coupants.

Perspective et développement des recherches

Les mécanismes très endommageants comme l'usure chimique (par diffusion, par oxydation, ...) dépendent directement de la température à l'interface copeau outil : il est donc primordial de pouvoir mesurer avec exactitude les très forts gradients thermiques qui régnent dans cette zone par des mesures directes le plus près possible de la zone du contact, valider une modélisation avec un maximum de mesures des conditions thermiques aux limites, en prenant en compte les données expérimentales commodément accessibles.

Nomenclature

PNB	produit national brut
α	angle de dépuille
β	angle de taillant
γ	angle de coupe
ϕ	angle du plan de cisaillement
h	épaisseur de coupe
h_c	épaisseur du copeau
V	vitesse de coupe
V_c	vitesse du copeau
V_f	vitesse d'avance
VB	usure frontale
K_T	usure en cratère
ZCP	zone de cisaillement primaire
ZCS	zone de cisaillement secondaire
A_α	face de dépuille principale
A'_α	face de dépuille secondaire
A_γ	face de coupe
Δ_γ	épaisseur moyenne de la ZCP
Co	Cobalt
Cr	Chrome
C	Carbone
W	Tungstène
V	Vanadium
Mn	Manganèse
Si	Silicium
WcCo	Carbure de tungstène et du cobalt
TiC	Carbure de titane
TiN	Nitrure de titane
Fe	Fer
N	Azote
O ₂	Oxygène
Ca	Calcium
S	Soufre
Al	Aluminium

Références Bibliographiques

- [1] LOUIS FLAMAND – Recherche en tribologie, conférence on EHD Lubrification and Traction, Romanian Society of tribologie, 5-7 june 1992.
- [2] F. P. BOWDEN, D. TABOR – The friction and lubrication of solids – Oxford (G.B) : Clarendon Press, 1954, V.1, p180 et 1960, V.2, p210.
- [3] J. HALLING – Principale of tribology – London (G.B) : Macmillam Press Ltd, 1975, p320.
- [4] M. GODET, D. PLAY – Introduction to tribology polymères et lubrification, colloques internationaux du CNRS, N° 233, 20-23 mai 1974, Brest, p441-450
- [5] Y. BERTHIER, L. VINCENT, M. GODET – Fretting fatigue and fretting wear – Tribology trends to the 90'S, Lisbonne 3 – 8 mai 1988, p 1 – 17.
- [6] M. GODET – Extrapolation in tribology, wear, V.77, p29 – 44, 1982.
- [7] R. WEILL - Phénomène d'usure au contact du copeau et l'outil - conférence du 3 mai 1966 - Paris – Revue française de mécanique (1966) n°18 et 19, p63.
- [8] F. LE MAITRE - Les phénomènes d'usure au contact du copeau et de l'outil - Recueil des conférences sur la coupe des métaux - 1970.
- [9] DAHWILL - Etude du collage entre deux cylindres de carbure et des cylindres d'acier soumis à haute température (1940) n° 11 et 12.
- [10] TRENT - Analyse d'une usure chimique à 1300°C en phase liquide entre carbure et acier (1950).
- [11] M.GODET – Les aspects mécaniques de la tribologie – A.U.M. 1983.
- [12] J. RIOUT – Les états de surfaces, description, élaboration, mesure, notions techniques du CETIM, 1979, N°18, 96p.
- [13] J. RIOUT – Les états de surfaces, caractérisation géométrique, fonctions mécaniques, notes techniques du CETIM, 1979, N° 19, 180p.
- [14] C. SIKDAR, S. PAUL and A.B. Chattopadhyay - Effect of variation in edge geometry on wear and life of coated carbide face milling inserts - Wear 157 (1992) 111-126
- [15] T. N. LOLADZE - Usure des outils de coupe, Machguiz, 1958.
- [16] Laboratoire Aix - Lachapelle - 1960.
- [17] B. COLDING – Caractéristique d'usure du carbure, Institut de technologie, Stocklom (Suède), juillet 1970.

~~Références Bibliographiques~~

- [18] I. HAM - Wear characteristics of ticcoated carbide tools, Pennsylvania State University (USA), 1973.
- [19] T. N. LOLADZE - Nature of brittle failure of cutting tool tribology of metal cutting helps to create new effective tool materials, Mechanical Engeening Departement, Georgian Polytechnic Institute Lenin St. 77, TBILISI U.R.S.S. 1974.
- [20] H.J.J.KALS - The significance of structural parameters in failure of cemented carbides, report WT 0347 – Eindhoven University Press 1975.
- [21] H.J.J.CHERMANT; A.DESCHANVRES; A. IOST - Tenacité des WC-Co 15%, Laboratoire de chimie minérale industrielle – ERA, n° 305, université de Caen 1974.
- [22] T. KITAGAWA, A. KUBO, K. MAEKAWA – Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of inconel 718 and Ti-6AL-6V-2Sn, Departement of mechanical engineering, Kitami Institule of technologie, 165 Koen – cho Kitami 090 japan - Wear 202 (1997) 142-148
- [23] S.Y. Lwo, T.S.LIAO, YY. TSAI, wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools, journal of material processing technology 88 (1999) 114-121
- [24] SLAVKO DOLINSEK, BORIVOJ SUSTARSIC, JANEZ KAPAC - wear mechanisms of cutting process – Wear 250 (2001) 349-356.
- [25] REZA YOUSEFI, YOSHIO ICHIDA - A Study on ultra - high - speed cutting of aluminium alloy : Formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface – Precision engineering 24 (2000) 371-376
- [26] B. VICENZI, L. RISSO, R CALZAVARINI - High performance milling and gear hobbing by means of cermet tools with a tough (Ti, W, Ta) (C, N) - Co, Ni, W composition, international journal of refractor metal and hard material 19 (2001) 11-16
- [27] J. PAULO DAVIM, A. MONTEIRO BAPTISA – Relation ship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium, journal of material precessing technology 103 (2000) 417-423.
- [28] YUKIHIRO SAKAMOTO, MATSUFUMI TAKAYA YOSHIRO ISHII, SHIGERU IGARASHI - Surface modified tool fabricated by radical nitriding, surface and coating technology 142-144(2001) 152-155
- [29] H.E.HINTERMANN, M.MAILLAT – Revêtements durs ou tendre pour la microtechnique, élaboration et propriétés, laboratoire Suisse de recherche horlogère, Neuchatel Suisse, 1980.
- [30] V.C. VENKATESH – Diffusion wear of thigh – speed tools machine tool design and research 1966. 7th international MTDR conference university of Burmingham

- [32] D. BERTHE, B.FANTINO, M.GODET - Influence of shape defect and surface roughness on the hydrodynamique system, J. Of Mech. Eng. Sci.,1974, Vol. 16, N°3, P.156-159.
- [33] P. MATHON – Determiation des critères d’usinabilité des métaux et alliages par méthode rapide, Contrat DGRST N°69.
- [34] H. OPITZ et CAPPISH - Some recent research of the wear behaviour of carbide turning tools, int. J. Mach. Tool. Des. (GB) 2 1962 p.43-73
- [35] TAYLOR (F.W) – On the art of cutting métaux, 248 p., 1906 ASME
- [36] A. HARA et T. NUMURA – Ubersich über die Entwicklung und Stand der Technik der Cermet in Japan. Vdi Berichte N.R.762, 1989
- [37] G. POULACHON, S. BORDES et L. COLOMBET – Tournage dur : endommagement d’un outil PCBN durant l’usinage d’un acier à roulement 100Cr6 traité à 62 HRc. Bulletin du cercle d’étude des métaux. Colloque international usinabilité et mécanisme endommageants des outils de coupe, 19 novembre 1998.
- [38] O. VEROT – La méthodologie couple outil matière et la mesure de l’usinabilité des aciers à haute résistance. Bulletin du cercle d’étude des métaux. Colloque international usinabilité et mécanismes endommageants des outils de coupe, 19 novembre 1998.
- [39] R. BUSI et C. TROMBERT – Emploi de la méthodologie couple outil matière dans les essais d’usinabilité en décolletage : application à un acier inoxydable martensitique. Bulletin du cercle d’étude des métaux. Colloque international usinabilité et mécanismes endommageants des outils de coupe, 19 novembre 1998.
- [40] Y. YAO etal – On line estimation of groove wear in the minor cutting edge for finish machining annals of CIRP, Vol. 40/1 1991, p.41
- [41] EM TRENT – Métal cutting. Butler worths Londres, 1977.
- [42] M COCKS – The formation of wedges of displaced metal between sliding metal surfaces. Wear, 8, 1965, p85-92.
- [43] M ANTLER – Processes of metal transfer and wear, 7, 1964, p.181-203.
- [44] E SAUGER – Contribution à l’étude de la transformation tribologique superficielle en fretting. These 97-25, Ecole centrale de Lyon, 1997.
- [45] F. LE MAITRE et D. BIZEUL – Contribution to the study of periodic phenomena un dynamic deformation, CIRP – 24th General Assembly, Ann, CIRP, 23(1), 1974, 5-6.
- [46] D. BIZEUL – Wave propagation in metal warking document, CIRP-SIC-C, Subgroup Fundamental Research in Metal Cutting, CIRP, Paris, january 1979.

- [47] AMBRISH Misra, IAIN FINNIE – Correlation between two-body and three-body abrasion and erosion of metal, wear 68, 1981, pp. 33-39.
- [48] I.V. KRAGELS KII – Friction and wear, butter worths editor, 1965
- [49] J. SEBRA, D. BERTHE - Influence of surface waviness and roughness on the normal pressure distribution in the contact - J. Of tribology, 1987, vol. 100, p.462-470.
- [50] L. FLAMAND – Fatigue des surfaces INSA de Lyon, 1993.
- [51] P. KAPSA – Usure des contacts mécaniques, laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes, UMR, CNRS, 2001.
- [53] F. LE MAITRE, Phénomène d'usure au contact du copeau et de l'outil, INSA de lyon 1971.
- [54] B.ROUMESY - Remarques sur le représentativité comparée des modèles de la loi d'usure des outils carbure, Machine-outil, N°301, octobre 1973.
- [55] R.WEILL - Phénomène d'usure au contact du copeau et de l'outil, conférence du 3 mai 1966, Paris, revue française de mécanique, N°18 et 19, p63.
- [56] A.V.PANKINE - Usinage des métaux par la coupe, éd. Moscow, p190 – 1970.
- [57] F. LE MAITRE, PH. COCHET – Mécanisme d'usure et de rupture des outils carbure, 25^{ème} Assemblée générale du C.I.R.P., Freudenstadt 27 août 1975.
- [58] C.E.T.I.M., SENLIS – Test de tenue aux chocs des outils carbure, Assemblée du C.I.R.P.FREUDENSTADT, 21.08.1975.
- [60] S.POPOV, I.ANDONOV, I.PAWLEWSKI - Guide des travaux pratiques de la coupe des métaux, technica, Sofia, 1983.
- [61] C.HAUSSER - Technologie et quelques problèmes liés au revêtement, Stellram S.A., 1260, Nyon Suisse, 1979.
- [62] F. LE MAITRE, D.BIZEUL, R.WEIL - Contribution to the study of periodic phenomena in dynamic deformation, C.I.R.P., 24th General Assembly 1974, Kyoto, Japan.
- [63] P.MARTIN, J.RICHARD, M.VERON - The influence of cutting speed variation on tool wear for optimal control of machining, annals of C.I.R.P., vol.28, N°1, 1979, p7-11.
- [64] B.ROUMESY, C.BEDRIN - Correlation between evolution of tool wear during machinability fast test, annals of C.I.R.P., vol.28, N°1979, p1-5.
- [65] C.SKIDAR, S.PAUL and A.B.CHATTOPADHYAY - Effect of variation in edge geometrie on wear and life of coated carbide face milling insert, february 3, 1992.

- [66] E.M.TRENT et E.F.SMART - Distribution de la température dans les outils de coupe des aciers, matériaux et technique, août et sep. 1981.
- [67] G.ROMAGNOLO - Evolution de l'outil de coupe en carbure, Mach-Modernes, N°384, 1974.
- [68] ACHOUR.A, MEZIANI.S - Contribution à l'étude du comportement à l'usure des outils de coupe, European journal of mechanical and environmental engineering, N°48, sep.2003.
- [69] L.E.TOTH - Transition metal carbides and nitrides, Academic Press, New York, 1971, chap.5, p179.
- [70] R.KOMARDOURI - Advance in hard materiel tool technology, Proc. 1976 Int. Conf Pittsburgh, Carnegie Press, Pittsburgh, 1976, p442.
- [71] F. BAGUR – Matériaux pour outils de coupe, Doc. BM7080-10/01/1999.
- [72] SHERINGTHON, I. SMITH, E.H. – A quantitative study of the influence of stylus shape and load on the fidelity of data recorded by stylus instruments – Proc. 2nd National Con. On production research, Edinburgh, September 1986.
- [73] DUPUY, O. – High precision optical profilometer fir the study of micro-geometrical surface defects- Proc. Inst. Mech. Eng, London, 182, 1967-1968, P.255-259.
- [74] THWAITE, E.G. – The roughness of surface – Aust. Phys. November 1977, P.170-174.
- [75] MIGNOT J. GORECKI C. – Mesurement of surafce roughness, comparison between a defect of focus optical technique and the classical stylus thechnique – Wear, 87, 1983, P.39-45.
- [76] C. BEDRIN – Méthode d'étude de l'usinage par coupe – INSA – Lyon, 1990
- [77] I. SALNSOT L. FLAMANT – Accommodation de déplacement . vibration and wear – 1989.
- [78] M. CARTIER et P. KAPSA – Usure des contacts mécaniques – BM 5066 – 2004
- [79] N.N.ZOREV - Inter-relationship between shear processes along tool face and shear plane in metal cutting, International Research in Production Engineering ASME, New York, 1963.
- [80] F. LEROY – Endommagement des outils de coupe – B. 7042 – 2004.
- [81] F. LEROY – Mise en forme par usinage – Pratique des matériaux industriels – 1990.
- [82] H. OPITZ et W. KONIG – Basic research on the wear carbide cutting tools machinability proceedings of ISI – Londre 1995.

- [83] G. BITTEL – Mesure de température à l’interface outil-copeau – 1993.
- [84] P. KAPSA et M. CARTIER – Usure des contacts mécaniques manifestation de l’usure – BM5067 – 2004.
- [85] F. LE MAITRE – Les aspects physico-chimiques de l’interaction outil-copeau – ENSM – 1970.
- [86] P. GUIRALDENQ – Diffusion dans les métaux – Ecole centrale de Lyon – M55 – 2003.
- [87] D. PLAY – Relation entre l’usure des aciers et le transport des débris à haute température – Laboratoire des contacts – Lyon – 1980.
- [88] N.J.M. CARVALHO, Interfacial fatigue stress in PVD TiN coated tool steels under rolling contact fatigue conditions – 1998.
- [89] Y. BOUTIN – Les matériaux de coupe utilisés pour l’usinage à grande vitesse – 2001.
- [90] G. COVAREL, P. LOUIS – Etude expérimentale et théorique des relations entre structure et propriétés mécaniques de matériaux TiC et TiN utilisés comme revêtement d’outil, soumis aux conditions extrêmes des processus d’usinage – 2001.
- [91] A. COLLAINE, M. SARROCA – Performance des outils de coupe en usinage à grande vitesse – 2001.

MESURE DE LA RUGOSITE A L'AIDE DES METHODES OPTIQUES

1. Introduction

Les méthodes de mesure des rugosités qui utilisent les propriétés optiques des matériaux, ont été développées récemment. Elles présentent des avantages considérables dont le plus important est d'opérer sans contact avec la surface à caractériser.

Avec l'avènement des systèmes numériques le développement des méthodes optiques a été accéléré et offre les avantages suivants :

- Pas de contact direct entre la pièce à mesurer et le palpeur.
- Obtention d'informations directement en 3D.

Nous nous intéressons dans cette partie aux méthodes les plus usuelles [72].

- Techniques non paramétriques : ce sont des méthodes qui caractérisent les rugosités en termes de variations de hauteur en fonction de la position.
- Techniques paramétriques : ce sont des méthodes utilisant des propriétés physiques qui permettent d'évaluer les caractéristiques générales d'une portion de surface.

2. Techniques de mesure optique non paramétriques

Les critères obtenus par un grand nombre de ces méthodes sont analogues à ceux du stylet, mais leur précision et leur niveau de modernisation les placent en position de sérieux concurrents à ce dernier, parmi ceux-ci on cite :

- La sonde de Foucault.
- La défocalisation.
- La microscopie interférentielle.

2.1. La sonde de Foucault

Le schéma de principe et les principales composantes sont données sur la figure A1.

La lumière provenant de S traverse le miroir argenté et tombe sur la lentille convergente O qui la focalise sur la surface de l'échantillon à caractériser. La lumière réfléchie traverse le même chemin qu'à l'aller, mais au niveau du miroir, elle est orientée sur la lentille L devant laquelle on positionne un couteau de Foucault. Deux photodétecteurs jouent le rôle d'observateur et traitent l'information.

Les résolutions verticales et horizontales sont respectivement de 0,01 et 0,5 μm ; L'étendue verticale et de 60 μm [73]. Si la pente des rugosités dépasse 15°, cette méthode

peut donner des mesures inexactes. Elle est également d'une exécution lente (10min/mm). [74] décrit une nouvelle version qui prétend avoir une résolution verticale de 0,001 et horizontale de 1 μ m.

2.2. Défocalisation [75]

Le schéma de principe est donné sur la figure A2. La source de lumière est projetée sur la lentille L, qui la focalise sur la surface de l'échantillon. Tout déplacement de l'échantillon dans le plan de la figure conduit à un défaut Z autour du plan focal. La variation de la taille de la tâche de lumière sur la surface est proportionnelle au défaut Z.

Pour mesurer la rugosité moyenne à travers la tâche de lumière, il est nécessaire de mesurer le flux reçu par le détecteur P₁ de toute la tâche de lumière et le flux reçu par le détecteur P₂ de référence.

Le traitement consiste à déterminer la proportion des deux intensités reçues par P₁ et P₂. On suppose que le coefficient de réflexion ne varie pas localement sur l'échantillon. On peut donc en conclure que l'intensité I₂ ne dépend que de la variation du défaut Z où :

- Γ : Rayon de la pupille de la lentille L,
- M : Magnification de la lentille,
- B : Distance de L au plan de l'image,
- Z : Défaut local,
- d : Distance de P₂ à la fente F,
- I₁(0) : Intensité reçue par P₁ pour Z=0,
- I₂(0) : Intensité reçue par P₂ pour Z=0
- Δl : Longueur de la fente.

J. MIGNOT et C. BORECKI [75], comparent les critères d'une même surface obtenue avec cette méthode et celle du stylet et concluent que cette dernière omet beaucoup de détails relativement à la précédente.

$$I_2(Z) = \frac{2 \Delta l (b-d) I_1(0)}{\pi \Gamma d^2} M^2 Z + I_2(0)$$

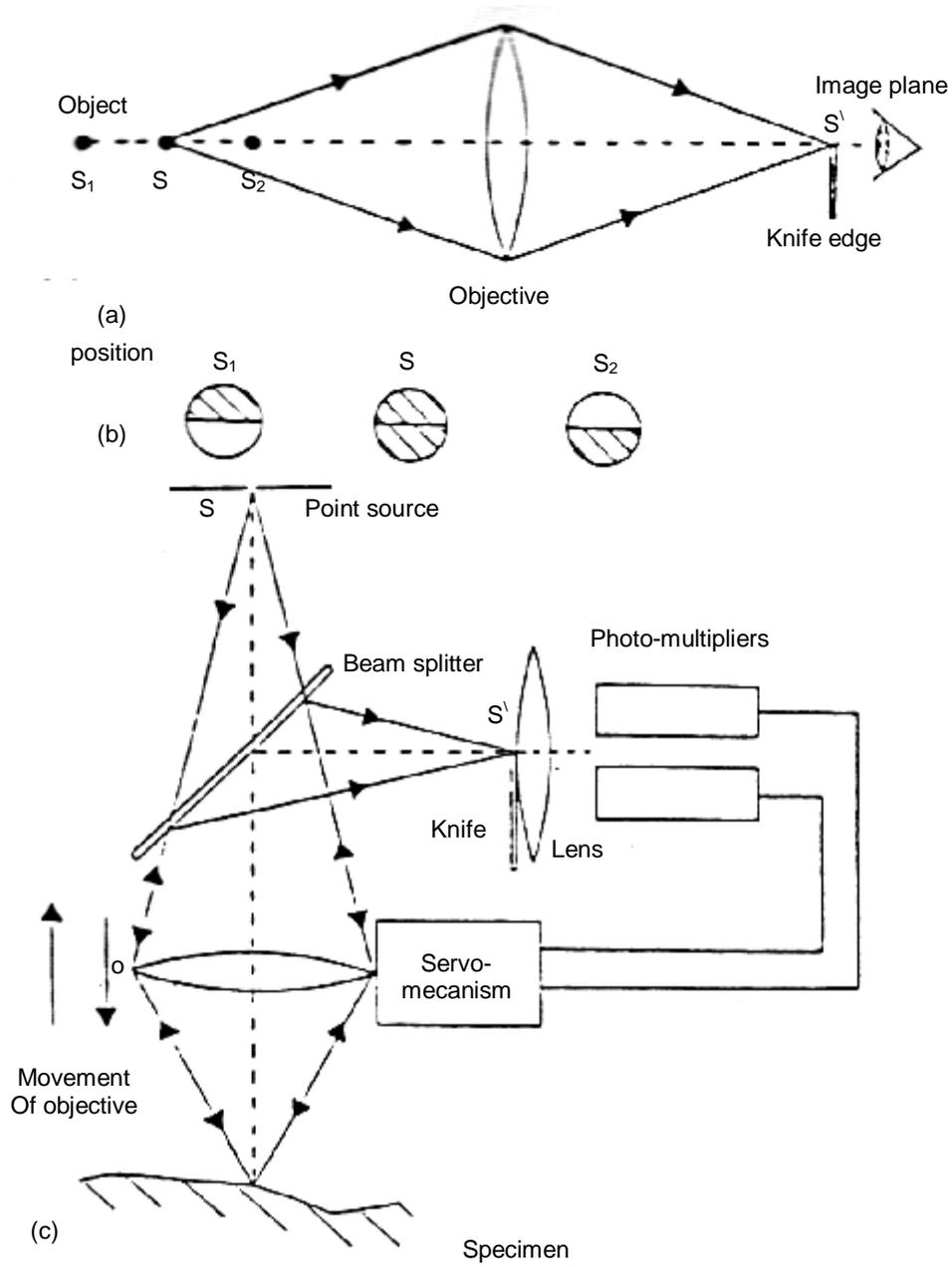


Figure A1 : Principe de la sonde Foucault

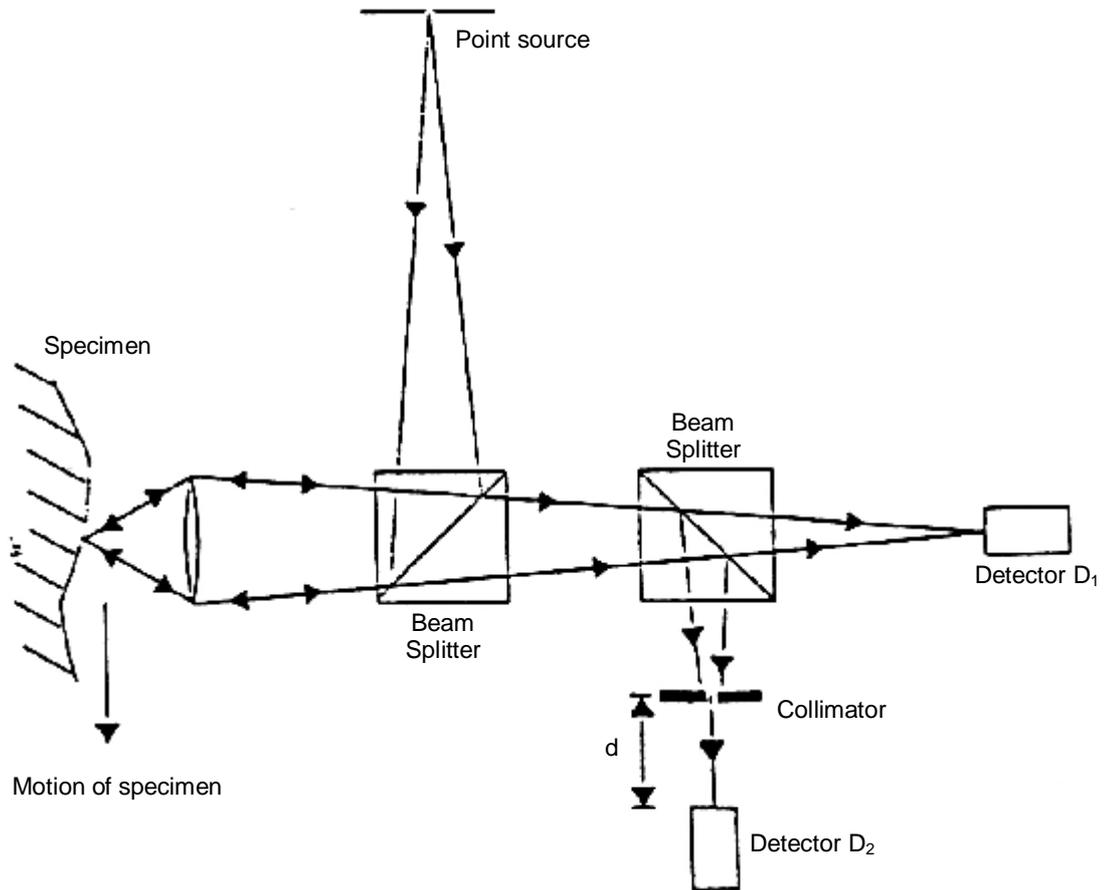


Figure A2 : Mesure par défocalisation

3. Performances

La résolution verticale, dépend de la plage de mesure. Elle est de $0,001\mu\text{m}$ à $+50\mu\text{m}$ et de $0,1\mu\text{m}$ à $+500\mu\text{m}$. La résolution horizontale est de $1\mu\text{m}$ et la dimension de la tâche d lumière. Sa capacité est de $0,5\text{mm}$.

- La longueur de palpation est réglable de $0,1$ à 150mm en X et de $0,1$ à 130mm en Y.
- Le pas d'échantillonnage peut être choisi dans une gamme très large, 1 à 2000P/mm en X et 2 à 500P/mm en Y.

Fichier Calcul1-F1.xls

Fichier Calcul1-F1.xls

Fichier Calcul1-F1.xls

Fichier Calcul1-F1.xls

Fichier Calcul1-F2.xls

Fichier Calcul1-F2.xls

Fichier Calcul1-F2.xls

Fichier Calcul1-F2.xls

Fichier Calcul2-F1.xls

Fichier Calcul2-F1.xls

Fichier Calcul2-F1.xls

Fichier Calcul2-F1.xls

Fichier Otn1.xls

Fichier Otn1.xls

Fichier Out-1.xls

Fichier Out-1.xls

الملخص :

أدت التطورات الحاصلة في ميدان المواد المعدنية إلى ظهور أدوات قطع ذات طبيعة جديدة قدرت على الرفع من إنتاجية تقنيات التصنيع الآلي. استعمال هذه المواد يتطلب تجارب خاصة لتقييم وتحديد الظروف المثالية لاستعمالها. هذه الدراسة تهدف إلى الوصول إلى هذه الغاية. يقدم لنا الفصل الأول مجموعة دراسات سابقة حول الميكانيكيات الأساسية التي تدخل في عملية التصنيع عن طريق القطع بالخصوص العوامل الحرارية التي تمثل عنصرا أساسيا في تحديد سلوك المواد المعدنية. يبين الفصل الثاني التطورات التي عرفتها مواد القطع من أجل الإستجابة لمتطلبات التصنيع في ميدان القطع. يتناول الفصل الثالث وصف لوازم دراسة وخصائص الأدوات والمواد المستعملة. أما الفصل الرابع فيحتوي على دراسة سلوك التآكل التي تتركز على تحليل النتائج المتحصل عليها والتي تمت ملاحظتها. وفي الفصل الخامس نوضح التحليل التجريبي لحالات المساحات في حالة احتكاك. بينما يبين الفصل السادس مفعول الجسم الثالث على تآكل أدوات القطع.

يمكن الإستنتاج بأن الجزء الأكبر من تآكل الأدوات التي تدخل في تصنيع المواد مثل الفولاذ تأتي من مبدأ النظام "التريبولوجي"، الذي من مكوناته الأساسية العناصر المختلفة والمتغيرات العملية والتي تتطلب دراسته مساهمة العديد من التخصصات.

الكلمات المفتاحية : مواد القطع، التدهور والتآكل، العوامل الحرارية، الطريقة التجريبية.

Abstract

Progress in the field of materials Appears cutting tools of new nature liable to improve the productivity of the automated machining techniques. Their use requires specific experiments to evaluate their optimum work conditions. This study contributes to this objective. The first part presents various former studies on the fundamental mechanisms of the machining cutting process and in particular the heating effects, which are determining for the materials behaviour. The second part recalls the evolution of cutting materials in order to fulfil the requirements of machining in the cutting field. The third chapter is devoted to the description of the devices of studies and characteristic of the tools and material used. As an aim of the fourth chapter me study the behavior in the wear, wich consists of experimental analysis of the obtained and observed results. The fifth chapter highlights the experimental analysis of surfaces states, which are in contacts; as the sixth chapter put in evidence, the effect of the third body on the wear cutting tools. One can conclude that the study of frictions wear problems depend on the concept of tribological system whose the principal components are various involved elements (properties and interaction) and the variables operations, of which the study needs as various disciplines as mechanics, metallurgy, solid state physics and chemistry, they are many and bounded by a lattice of complex relation.

Key words : cutting materials, Wear and degradation, thermal effects, experimental method.

Résumé

Les progrès dans le domaine des matériaux font apparaître des outils coupants de nature nouvelle susceptible d'améliorer la productivité des techniques d'usinage automatisé. Leur mise en œuvre nécessite des expérimentations spécifiques pour évaluer leurs conditions d'emploi optimales. Cette étude contribue à cet objectif. Le premier chapitre a pour but de faire connaître les phénomènes intervenant dans la coupe et leur influence sur les performances de ce processus. Une revue, certes non exhaustive, des publications consacrées à ce sujet, nous permettra d'en préciser les caractères et les aspects généraux, parmi lesquels l'aspect thermique. L'influence de celui-ci s'avère d'un intérêt certain sur le comportement des matériaux coupants, et son corollaire réside dans le choix des conditions optimales de coupe pour un couple outil-pièce donné. Le deuxième chapitre retrace l'évolution des matériaux et la tribologie des contacts afin de répondre aux exigences de l'usinage dans le domaine de la coupe. Le troisième chapitre est consacré à la description des dispositifs d'étude et des caractéristiques des outils et des matériaux utilisés. Le quatrième chapitre a pour objet l'étude du comportement en l'usure, qui consiste à l'analyse des résultats obtenus et observés. Le cinquième chapitre met en relief l'analyse expérimentale des états de surfaces en contacts. Quant au sixième chapitre, il met en évidence l'effet du troisième corps sur l'usure des outils de coupe. On peut conclure que l'étude des problèmes de frottements-usure en mécanique fait appel au concept de système tribologique dont les principales composantes sont les différents éléments en présence, (propriétés et interaction) et les variables opératoires, dont l'étude fait appel à des disciplines aussi diverses que la mécanique, la métallurgie, la physique du solide, la chimie, sont très nombreux et sont liés par un réseau de relations complexes.

Mots clés : matériaux de coupe, usure et dégradation, effets thermiques, méthode expérimentale

ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DES OUTILS DE COUPE EN CARBURE DE TUNGSTENE

A. ACHOUR, S. MEZIANI, A. BOUCHOUCHA
Laboratoire de Mécanique, Université Mentouri Constantine
e-mail : achouralimec@yahoo.fr

Résumé :

L'expérimentation et l'interprétation des essais d'usure ont été élaborées de diverses manières depuis les premiers travaux de TAYLOR. Par ailleurs, le développement de nouvelles variétés d'outils et l'évolution de la gamme des matériaux usinés ont très nettement élargi les conditions opératoires, bien au-delà du domaine des expérimentations antérieures [1, 2]. Il en est résulté un regain d'intérêt de l'étude des phénomènes d'usure, orientée vers l'amélioration des conditions d'exploitation des essais permettant d'apprécier les performances optimales des outils et l'usinabilité relative des matériaux.

L'étude de l'usure doit être abordée suivant une démarche progressive et systématique, alors qu'au contraire, poussés par les nécessités de la pratique industrielle, les expérimentateurs l'envisagent dans une perspective souvent très particulière. Les conclusions qui s'en dégagent sont alors soumises à des conditions de validité forcément restrictives.

Mots clés : Usure, frottement, outils de coupe, interface, troisième corps.

1. INTRODUCTION

L'optimisation des conditions opératoires par outil coupant doit contribuer largement au développement et à la productivité des techniques avancées d'automatisation de l'usinage, car leur mise en œuvre nécessite une maîtrise suffisante du déroulement du processus et en particulier de l'évolution de l'usure des outils. De plus, les progrès techniques, ont développé l'emploi de matériaux très durs ou réfractaires d'usinabilité difficile, nécessitant des matériaux à outils très résistants.

Parallèlement, ces progrès font apparaître de nouveaux matériaux susceptibles d'être utilisés pour réaliser des outils coupants répondant à ces exigences. C'est pourquoi, bien que les études entreprises, jusqu'à présent, dans le domaine de la coupe (mécanisme de la formation du copeau, comportement des outils aspect thermique) aient permis des progrès importants pour la connaissance du processus, il est nécessaire de les réactualiser et de les poursuivre, afin de répondre à ces conditions nouvelles du contexte industriel. Il apparaît, en particulier, que la complexité et les interactions des nombreux facteurs impliqués dans les phénomènes de la coupe, nécessitent des expérimentations spécifiques à chaque matériau, afin de définir le meilleur choix des outils et les conditions de coupe optimales correspondantes.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

2.1. Machine outil

- Tour universel : SN40C, ayant une puissance de 6,6 Kw avec variateur de vitesse mécanique;
- Gamme des vitesses de coupe de 0 : 1200 m/min ;
- Gamme des avances 0,05 : 0,7 mm/tr ;
- Distance entre pointes : 800 mm ;
- Le travail a été effectué à sec (sans lubrification).

2.2. Appareil de mesure

- L'usure frontale a été suivie et mesurée approximativement après chaque expérimentation à l'aide, d'un microscope optique d'atelier HAUSSER équipé d'une table croisée et d'un plateau circulaire, avec une précision de 0.01.

- L'usure en cratère a été visualisée à l'aide d'un dispositif équipé d'un comparateur à cadran et d'une pointe, avec une précision de 0,001 mm.

- L'évolution des revêtements a été suivie à l'aide d'un microscope optique (Carl, Zeis) équipé d'un appareil photo Polaroid. L'agrandissement peut varier de 50 à 1600 fois.

- Les observations topographiques, l'analyse qualitative et quantitative avec l'identification de divers éléments déposés sur les faciès d'usure ont été observés sur MEB (microscope électronique à balayage).

2.3. Caractéristiques de la matière et des outils

On a utilisé des rondins de diamètre 80 et de longueur de 500 dont la nuance est le 42CrMo4V et dont les caractéristiques mécaniques sont les suivantes $HB=257\text{Kg/mm}^2$.

Les caractéristiques chimiques du rondin utilisé sont les suivantes :

- Carbone	à	0.38 ÷ 0.42	- Soufre	à	≤
- Silicium	à	0.15 ÷ 0.40	- Molybdène	à	0.15 ÷ 0.30
- Manganèse	à	0.50 ÷ 0.80	- Nickel	à	≤ 0.60
- Phosphore	à	≤	- Chrome	à	0.9 ÷ 1.2

Les plaquettes utilisées pour les essais sont des plaquettes carbure type P25, et plaquettes carbure de grade P25 revêtues soit TiN soit TiC – de forme triangulaire équilatérale et en forme de losange.

3. USURE PAR FATIGUE PHYSICO-CHIMIQUE

Le microscope à balayage électronique, reproduit les faciès à observer sous le grossissement voulu. L'émission des rayons X permet l'analyse de surfaces et l'identification de divers éléments déposés sur les faciès usés.

Cette analyse se fait à l'aide d'une microsonde qui nous permet d'analyser, à tout endroit, les éléments en déposition.

A travers nos différentes analyses (figure 2a, b) nous avons constaté le phénomène de diffusion des premiers corps dans le troisième corps et d'éléments du premiers corps dans le deuxième corps. Cette perte d'élément, les réactions et les dissociations, diminuent la résistance mécanique et thermique dont le rôle, favorise le mécanisme d'usure.

Aussi, ceci fait apparaître, une diminution de la concentration en cobalt, en fonction du taux d'usure, du fait que le cobalt de structure CFC est isomorphe. La pièce aux températures et aux pressions régnantes à l'interface se retrouve par endroit à l'état austénitique. Cette transformation favorise, la diffusion du cobalt de l'outil vers le copeau, en réduisant la résistance de l'outil en surface [9, 10, 13].

La détérioration rapide, de la phase du liant est la conséquence de la diffusion du fer, dans l'outil qui va former une solution solide avec le cobalt, due à l'importance des gradients, de température et de pression sous l'effet des conditions de coupe [14].

Toutes ces transformations vont donner une éventuelle formation de couche blanche, dont l'épaisseur variera en fonction des sollicitations de pression et température. Cette dernière va faire barrière de diffusion de l'outil vers le copeau et va minimiser la progression de l'usure par cratérisation [3, 7, 8]. L'identification à la microsonde de cette forme de couche blanche révèle que la nature des éléments provient des premiers corps.

L'aspect macro et microscopique de la zone usée (figure 1a, b) de la surface latérale se manifeste par une modification très sévère de leurs états de surface. La zone usée est caractérisée par une surface très rugueuse d'aspect fortement labouré, dont les sillons sont orientés dans le sens longitudinal de l'outil. Une caractéristique importante de la cicatrice d'usure est d'amas allongé dans le sens longitudinal de l'outil en certaines régions de la zone usée par un empilement successif de couches.

Ces dernières sont très vraisemblablement formées par arrachement de copeau en surface (cisaillement) des premiers corps, qui sont ensuite redéposés pour constituer le troisième corps. Nous observons également au sein de la zone usée de l'outil des ruptures sur les rebords des sillons, ainsi que certaines régions d'aspect poli finement rayées.

Macroscopiquement, le phénomène d'usure qui a affecté la surface se manifeste par la formation d'une couche d'oxyde au sein de la surface de la zone usée, mais sans la recouvrir entièrement. Nous supposons que durant l'essai d'usure, cette couche d'oxyde a subi des déformations qui l'ont réduite par endroits. Le processus d'usure, qui a affecté cet outil, peut donc être caractérisé par la formation d'une couche d'oxyde partiellement décapée.

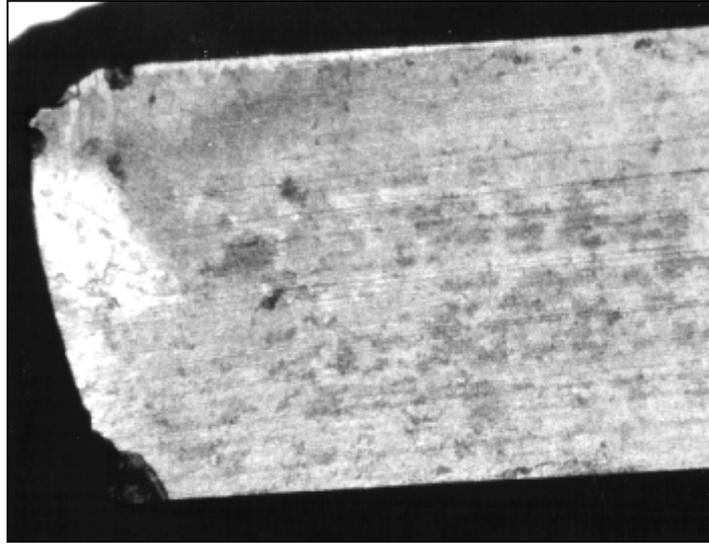


Figure 1a : Aspect macro et microscopique de la zone usée des surfaces latérales avec formation de couche d'oxyde dans le sens de la longueur P25 + TiC.

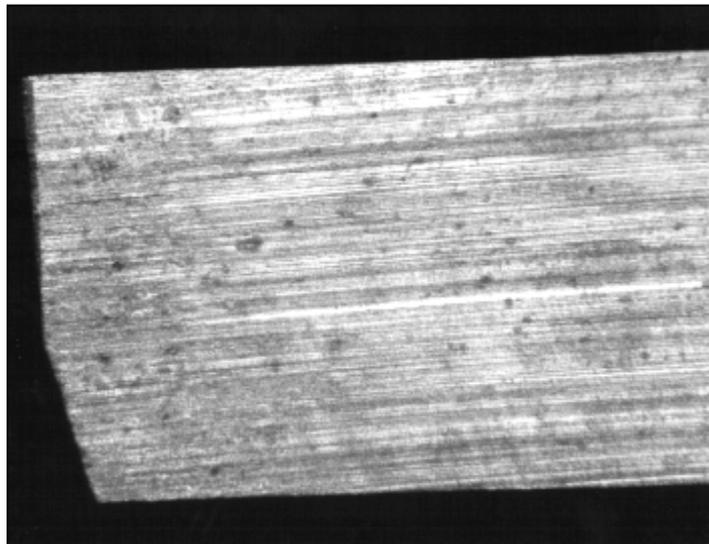
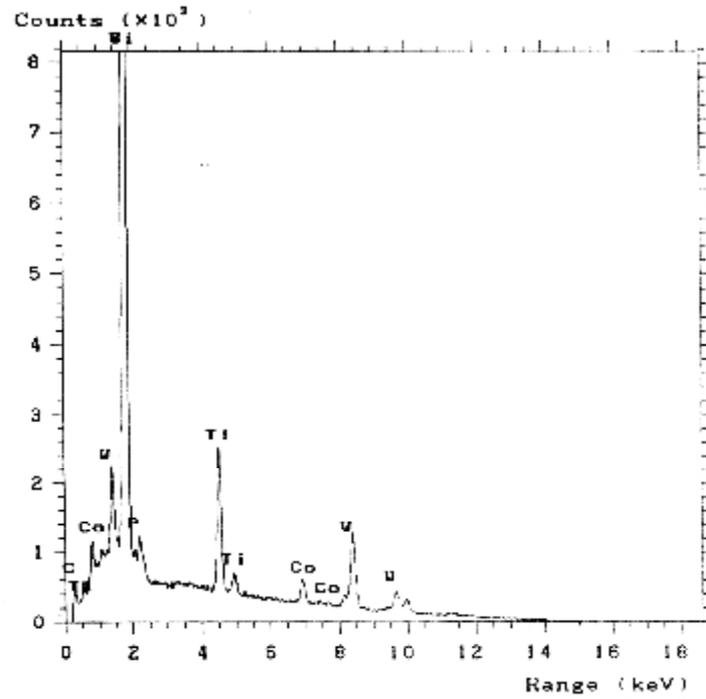


Figure 1b : Morphologie de la cicatrice d'usure en surface P25 + TiN

a/



b/

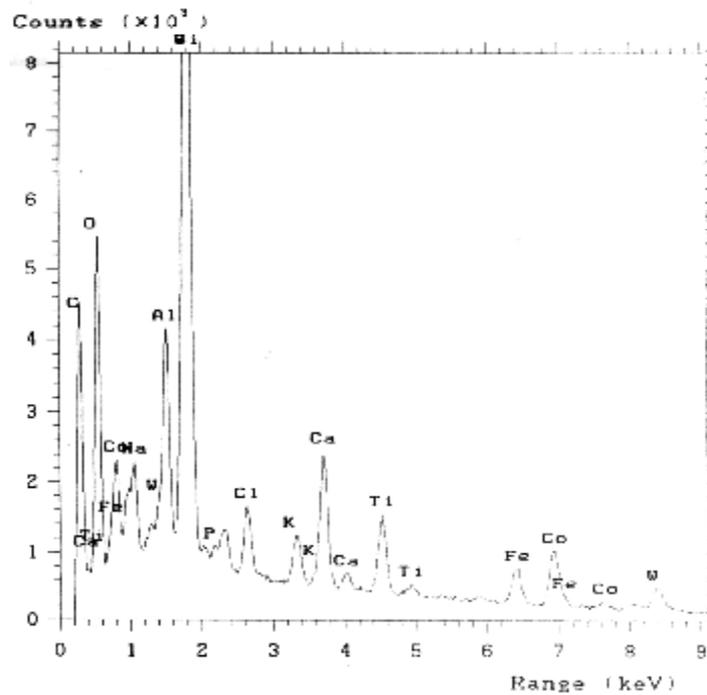


Figure 2 : Analyse de la couche blanche dans le cratère
a/ à la frontière de la couche blanche
b/ à l'intérieur de la couche blanche

4. FRACTURE PAR DEFORMATION PLASTIQUE

Les analyses mécaniques et physiques des surfaces montrent que dans une application industrielle, les contacts s'établissent entre deux surfaces de morphologie et de composition mal connues.

Ainsi, dans notre cas, nous avons des contacts triborigueux, dans lesquelles le contact s'établit sur des zones discrètes d'étendue variable, définissant ainsi des surfaces réelles de contact que l'on oppose.

En effet, à travers nos différentes investigations, nous avons remarqué une progression significative des déformations plastiques résultantes du contact entre le copeau et l'outil et les conditions de coupe appliquées.

Ceci se manifeste dans un premier temps par la formation de micro-cavités et des micro-fractures sur les différentes faces de l'outil, dues à un processus de fatigue ou de corrosion de contact.

Les contraintes thermiques et mécaniques développent au cours du contact des rayures, des nucléations et des fissures unidirectionnelles sur les faces de l'outil en rapport avec le gradient de température qui varie en fonction de l'échauffement et du refroidissement (figure 3a, b) et (figure 4b). Ces contraintes thermiques, sont fonctions des propriétés physico-mécaniques, de la conductivité et du coefficient d'expansion [6, 5].

Durant la période d'échauffement, la pression de coupe suscite des déformations plastiques considérables, en fonction de la résistance à la rupture des plaquettes et la résistance à la flexion du revêtement. Lorsque l'outil se refroidit, les contraintes de tension naissent et donnent des fissures unidirectionnelles, résultantes du déroulement du copeau sur la face de coupe.

Une caractéristique importante de la cicatrice d'usure est la formation d'amas allongés (figure 4b), dans le sens longitudinal en certaines régions de la zone usée, par un empilement successif de couches (figure 4a) analogue à un beurrage. Ces couches sont très vraisemblablement formées par un arrachement de copeau en surface, cisaillement des premiers corps qui sont ensuite redéposés pour constituer le troisième corps [2, 7, 4].

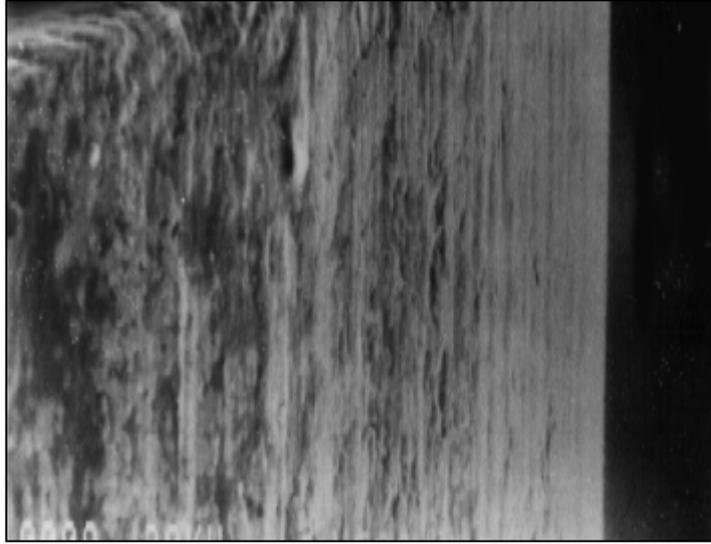
Nous avons également observé dans la zone usée des ruptures sur les rebords et des détériorations qui portent, des traces juxtaposées de plusieurs formes d'usure ayant successivement ou simultanément affectées par fatigue, adhésion, corrosion, abrasion et cavitation.

Quant au mécanisme d'usure des outils, il semble se présenter avec la formation éventuelle d'une couche blanche et d'oxyde dans le cratère (figure 5a, b) donnant une diminution de la teneur en tungstène et l'élimination des carbures mixtes par l'écoulement du copeau [10, 11, 12].

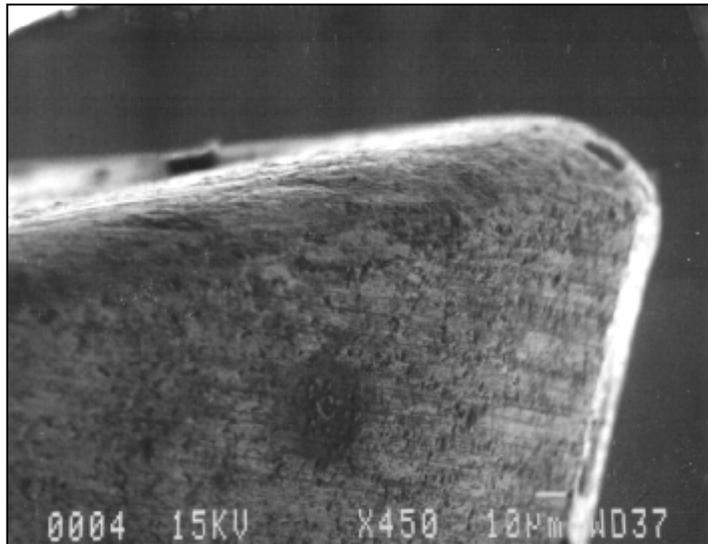
Lorsque la température dans la zone de cisaillement augmente, ou lorsque la profondeur de coupe augmente, le métal liquide est éjecté de façon significative entre l'outil et le copeau et peut éventuellement former une arête rapportée sur l'outil.

A travers cette analyse, nous pouvons suggérer ou affirmer que la déformation plastique se situe dans la région la plus chaude de l'outil, la présence de fissures implique des contraintes de tension, ceci est confirmé du fait que les fissures débutent en amont de l'arête de coupe.

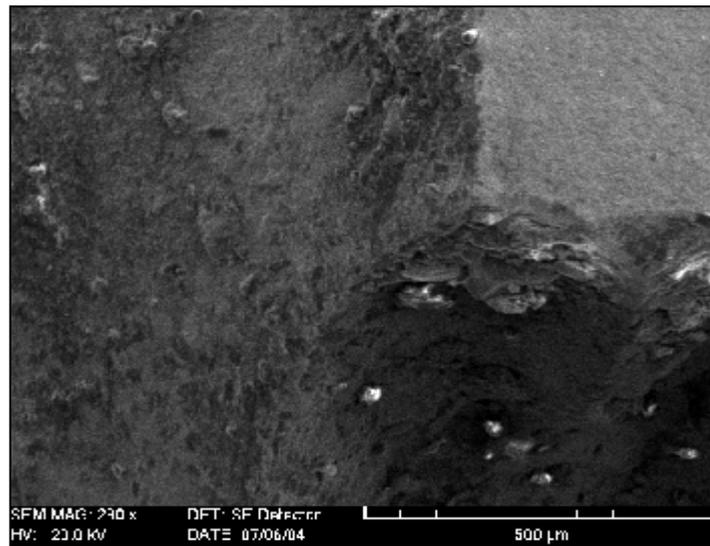
Les figures montrent des transformations superficielles de structure, sous l'effet du frottement, ces transformations sont associées à une certaine quantité d'énergie, pouvant par exemple correspondre à l'activation de l'oxydation des surfaces et aux différents stades de dégradation du couple en contact, en induisant une accumulation de déformations plastiques puis la formation en surface d'une phase blanche très dure [3]. L'énergie dissipée supplémentaire va permettre la création des premiers débris et activer la progression en sous-couches de la structure modifiée.



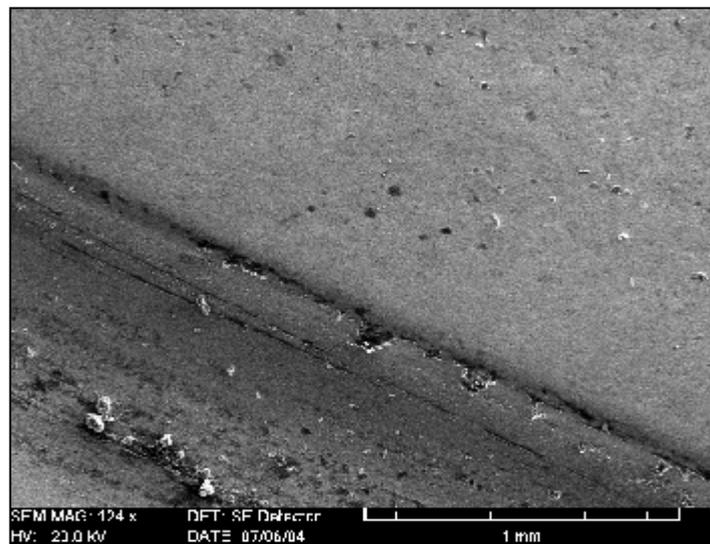
*Figure 3a : Nucléation de fissures près de l'arête
P25 + TiN, $t = 5 \text{ min}, 30 \text{ sec}$; $g \times 500$*



*Figure 3b : Morphologie de la cicatrice d'usure en surface.
Rayure abrasive, sillons dans le sens du glissement
P25 + TiC; $t = 3 \text{ min}$; $g \times 450$*



*Figure 4a : Nucléation à la remontée du cratère et formation d'un lit de débris
P25 + TiC; t = 5 min; g x 280*

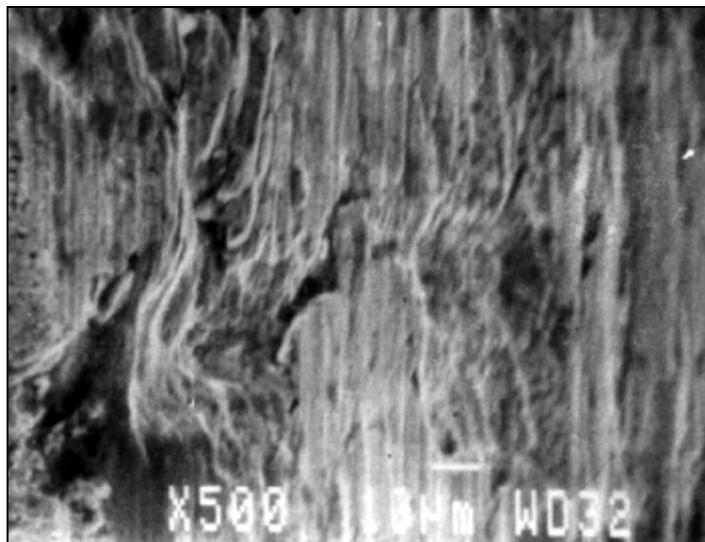


*Figure 4b : Fissuration unidirectionnelle et formation de particule
Avec des micro-cavités
P25 + TiN; t=3min; gx124*

a/



b/



*Figure 5 : Micrographie montrant la formation de la couche blanche à la remontée du cratère sur P25 + TiC
a- g x 800, montrant la matière adhérente.
b- g x 500, formation de l'oxyde dans le cratère.*

CONCLUSION

L'examen au microscope électronique à balayage a révélé quatre phénomènes d'endommagement de l'outil.

1) Le premier phénomène est l'observation de fissures dans la matrice dûes à une propagation d'ondes de surfaces. Ces ondes de surface sont le résultat de choc dûs aux engagement et déengagement de l'outil. Ces fissures peuvent créer une rupture brutale et montrent que le revêtement peut ne pas être favorable.

2) Le second phénomène est l'observation de déformations plastiques dûes au contact entre le copeau et l'outil. Elles se forment essentiellement dans la partie chaude de l'outil et se caractérisent par la formation de micro-cavités et micro-fractures. Celles-ci sont probablement le résultat d'un processus de fatigue ou de corrosion de contact.

3) Le troisième phénomène est l'observation d'une usure chimique dûe au travail de forte chaleur. En effet, celle-ci crée une oxydation qui modifie les propriétés mécaniques.

4) Le dernier phénomène est l'observation d'une usure physico-chimique de même indirectement dûe à la forte température. Celle-ci crée en effet, un phénomène physique de diffusion d'éléments vitaux soit vers le deuxième corps, soit vers le troisième corps.

Cette dispersion d'éléments vitaux est néfaste puisque le rôle de ces éléments est justement de limiter le phénomène d'usure.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. WEILL - Phénomène d'usure au contact du copeau et l'outil - conférence du 3 mai 1966 - Paris – Revue française de mécanique (1966) n°18 et 19, p63.
- [2] F. LE MAITRE - Les phénomènes d'usure au contact du copeau et de l'outil - Recueil des conférences sur la coupe des métaux - 1970.
- [3] E SAUGER – Contribution à l'étude de la transformation tribologique superficielle en fretting. These 97-25, Ecole centrale de Lyon, 1997.
- [4] L. FLAMAND – Fatigue des surfaces INSA de Lyon, 1993.
- [5] P. KAPSA – Usure des contacts mécaniques, laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes, UMR, CNRS, 2001.
- [6] B.ROUMESY - Remarques sur le représentativité comparée des modèles de la loi d'usure des outils carbure, Machine-outil, N°301, octobre 1973.
- [7] R.WEILL - Phénomène d'usure au contact du copeau et de l'outil, conférence du 3 mai 1966, Paris, revue française de mécanique, N°18 et 19, p63.
- [8] F. LE MAITRE, PH. COCHET – Mécanisme d'usure et de rupture des outils carbure, 25^{ème} Assemblée générale du C.I.R.P., Freudenstadt 27 août 1975.
- [9] C.E.T.I.M., SENLIS – Test de tenue aux chocs des outils carbure, Assemblée du C.I.R.P.FREUDENSTADT, 21.08.1975.
- [10] C.HAUSSER - Technologie et quelques problèmes liés au revêtement, Stellram S.A., 1260, Nyon Suisse, 1979.
- [11] P.MARTIN, J.RICHARD, M.VERON - The influence of cutting speed variation on tool wear for optimal control of machining, annals of C.I.R.P., vol.28, N°1, 1979, p7-11.
- [12] B.ROUMESY, C.BEDRIN - Correlation between evolution of tool wear during machinability fast test, annals of C.I.R.P., vol.28, N°1979, p1-5.
- [13] C.SKIDAR, S.PAUL and A.B.CHATTOPADHYAY - Effect of variation in edge geometrie on wear and life of coated carbide face milling insert, february 3, 1992.
- [14] E.M.TRENT et E.F.SMART - Distribution de la température dans les outils de coupe des aciers, matériaux et technique, août et sep. 1981.