

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique

N° d'ordre :.....
Série :.....

THÈSE
Soutenue pour l'obtention du diplôme de Doctorat
En Génie Mécanique
Option
Construction Mécanique

*Contribution à l'optimisation de la durée de
vie d'un outil de coupe par l'application d'un
champ magnétique*

Par :

NECIB Djilani

Soutenue le..... Devant le jury

PRÉSIDENT :	Ammar HAIACHEM	Pr	U. d'Annaba
RAPPORTEUR :	Ali BOUCHOUCHA	Pr	U. de Constantine
EXAMINATEURS :	Brahim NECIB	Pr	U. de Constantine
	Salim MEZIANI	Pr	U. de Constantine
	Abdelaziz BOUCHELACHEME	MC	U. d'Annaba

Année Universitaire 2010-2011

Remerciements

Ce mémoire est la synthèse de travail de recherche que j'ai effectué au sein de l'équipe de Recherche en Mécanique et Energétique de Surface du Laboratoire de Mécanique de l'Université Mentouri Constantine, sous la Direction de Monsieur le Professeur **Ali Bouchoucha** qui m'a donné toutes les chances nécessaires pour mener à bien ce travail. Sa disponibilité, ses conseils et surtout ses grandes qualités humaines m'ont beaucoup aidé à réaliser ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et ma gratitude pour la confiance qu'il m'a témoignée.

Je suis également très reconnaissant à Monsieur **Hamid ZAIDI**, Professeur à l'Université de Poitiers, pour m'avoir donné l'occasion de travailler au sein de son équipe de Recherche du Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS, UMR CNRS 6610) de l'Université de Poitiers, France ; et aussi pour ses encouragements, son soutien, sa patience et ses idées très enrichissantes.

Je tiens aussi à remercier vivement Monsieur le Professeur **Olivier BONNEAU**, Directeur du LMS pour m'avoir accueilli au sein du Laboratoire.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur **Ammar HAIAHEM**, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba, d'avoir bien voulu accepter d'examiner mon travail et de présider mon jury de thèse.

Je suis également très reconnaissant à Monsieur **Brahim NECIB**, Professeur à l'Université Mentouri Constantine, pour avoir accepté de participer au jury de soutenance.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur **Salim MEZIANI**, Professeur à l'Université Mentouri, Constantine, pour m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury.

Mes vifs remerciements vont aussi à Monsieur **Abdelaziz BOUCHELACHEM**, Maître de Conférences à l'Université Badji Mokhtar Annaba, d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie également Monsieur **Bernard TOURNERIE**, Professeur à l'Université de Poitiers et **Noël BRUNETIERE**, Maître de Conférences à l'Université de Poitiers, pour leur aide et leur soutien au LMS.

Je tiens également à remercier Monsieur **Dominique EYEDI**, Ingénieur au Laboratoire LMP (UMR CNRS 6630) de l'Université de Poitiers, pour sa contribution précieuse lors de l'utilisation du MEB et du MOP.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **Mohamed AMIRAT**, pour son aide, son soutien et ses encouragements.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel technique et administratif du LMS, notamment Djamila, Laurence et Nathalie pour leur aide et leur soutien.

Finalement, je termine par un grand remerciement à ma très chère mère, ma femme, mes enfants, mes frères et sœurs et tous mes amis qui m'ont encouragé pendant toute la durée de mes études.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Encore une fois, merci à tous.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié l'effet du champ magnétique sur le comportement tribologique de l'outil de coupe durant les opérations d'usinage à partir de l'usure massive caractérisée par la perte de masse, la morphologie du mode d'usure, la morphologie du copeau d'usinage et la température de coupe.

En présence du champ magnétique dans le contact d'usinage, celui-ci conduit à une diminution de l'usure et modifie radicalement la nature du mode d'usure. Il y a une intensité critique du champ magnétique $H = 16,5 \text{ KA/m}$, pour laquelle l'usure de l'outil de coupe est minimale et le rayon de pointe de coupe est préservé. En ce qui concerne, des observations au microscope électronique à balayage (MEB) et au microscope optique ont révélé l'existence de trois modes d'usure : frontale, en cratère et par déformation plastique, en absence du champ magnétique. Par contre, en présence du champ magnétique, il existe uniquement une usure en cratère. De plus, l'augmentation de l'intensité du champ magnétique modifie la forme et la morphologie des copeaux ainsi que l'élévation de la température de contact.

L'étude de l'influence du champ magnétique sur le comportement tribologique de l'outil de coupe durant les opérations d'usinage a permis de recueillir des informations susceptibles d'être employées dans des applications technologiques au cours des procédés d'usinage et les techniques de fabrication des outils de coupe. D'une manière générale, l'application d'un champ magnétique aux outils de coupe apparaît comme une solution simple, efficace et peu onéreuse pour augmenter leur durée de vie et ainsi contribuer à l'optimisation de l'outil de production.

Abstract

In this work we studied the effect of magnetic field on the tribological behavior of the cutting tool during manufacturing operations starting from the mass wear characterized by mass loss, morphology wear mode, chips morphology and manufacturing the cutting temperature.

In the presence of magnetic field in the contact manufacturing leads to reduction wear and radically changes the nature of mode wear. There is a critical intensity of the magnetic field $H = 16.5 \text{ KA / m}$, for which the wear of the cutting is minimal and the cutting edge is preserved. With regard to, the scanning electron microscope (SEM) and optical microscope observations revealed the existence of three modes of wear: frontal, in crater and by plastic deformation, in absence of the magnetic field. On the other hand, in the presence of the magnetic field with wear in crater. Moreover, the increase of the magnetic field modifies the shape and the morphology of chips and it rises the contact of temperature as well.

The study of the effect of magnetic field on the tribological behavior of the cutting tool during manufacturing operations permitted to collect information likely to be employed in technological applications during processes of manufacturing and techniques of manufacture of the cutting tools. In general, the application of a magnetic field for cutting tool appears as a simple, effective and inexpensive to increase their lifetime and contribute to the optimization of the production tool.

Key words: magnetic field, cutting tool, wear, cutting conditions.

مساهمة و ملائمة الحقل المغناطيسي في مدة حياة أداة القطع

ملخص

في هذا العمل قمنا بدراسة تأثير الحقل المغناطيسي على البنية التريبولوجية على أداة القطع أثناء عمليات التصنيع . انطلاقا من التآكل الكتلي عن طريق الضياع في الكتلة و التغيير في أسلوب التآكل و أسلوب رانش التصنيع و درجة حرارة القطع .

في حالة وجود الحقل المغناطيسي وأثناء التصنيع الأسطح ينتج انخفاض في تآكل الأداة و تغيير كلي في أسلوب نوع التآكل. وخلال العمل التجريبي لاحظنا وجود قيمة حرجة لشدة الحقل المغناطيسي مساوية لـ 16.5KA/m و الذي ينتج عنه مقاومة غير مهمة للتآكل و أسلوب نوع التآكل. وفي هذا السياق، و بمساعدة الصور المجهرية وجدنا هناك ثلاث أنواع من التآكل في حالة عدم وجود حقل مغناطيسي يحدث تآكل على سطح القطع و تآكل على الحد القاطع و تآكل بنشوهات بلاستيكية على الحد القاطع. وبوجود حقل مغناطيسي وجدنا تآكل على سطح القطع فقط. وبالإضافة إلى ذلك، رفع في قيمة شدة الحقل المغناطيسي ينتج عنه تغيير في شكل و نوع الرانش، و كذلك يرفع قيمة درجة حرارة القطع أثناء عمليات التصنيع .

دراسة تأثير الحقل المغناطيسي على البنية التريبولوجية لأداة القطع أثناء عملية التصنيع، كما تسمح هذه النتائج باستعمالها في التطبيقات التكنولوجية و هذا من أجل أساليب التصنيع على مختلف ماكنات التصنيع و تآكل الأداة. وبصفة عامة، تطبيق الحقل المغناطيسي على أدوات القطع يعتبر حلا بسيطا و فعالا من أجل رفع في مدة حياة الأداة و مساهمة في الحفاظ على أداة الإنتاج.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I - GENERALITES SUR LA TRIBOLOGIE ET L'USINAGE AVANCE..	4
I.1. GENERALITES SUR LE FROTTEMENT ET L'USURE.....	4
I.1.1. LA TRIBOLOGIE.....	4
I.1.2. LES SURFACES.....	5
I.1.3. MECANISMES DE DEGRADATION DES SURFACES.....	7
I.2. GENERALITES SUR L'USINAGE.	8
I.2.1. INTRODUCTION.....	8
I.2.2. MODE DE FORMATION DES COPEAUX.....	9
I.2.2.1. Etude de la formation de la coupe orthogonale.....	9
I.2.2.2. Zone de cisaillement primaire	10
I.2.2.3. Zone de cisaillement secondaire	11
I.2.2.4. Zone de cisaillement tertiaire.	11
I.2.3. CLASSEMENT DES TYPES DU COPEAU	11
I.2.4. LES PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE.....	13
I.2.4.1. Vitesse de coupe.....	13
I.2.4.2. L'avance par tour.....	14
I.2.4.3. La profondeur de passe	14
I.2.5. LES OUTILS	15
I.2.5.1. La géométrie de l'arête de coupe.....	15
I.2.5.2. Les angles de coupe	16
I.2.6. PROCEDES D'USINAGE.....	18
I.2.6.1. Introduction.....	18
I.2.6.2. Usinage assisté par ultrasons	18
I.2.6.3. Usinage assisté jet d'eau haute pression	19
I.2.6.4. Usinage assisté champ magnétique.....	21
I.2.6.5. Usinage assisté Laser	22
I.2.6.6. Assistance cryogénique	22
I.2.6.7. Usinage par Electroérosion.....	23

CHAPITRE II - TRIBOLOGIE DU CONTACT DES OUTILS DE COUPE ET DU CONTACT MAGNETO-TRIBOLOGIQUE.....	24
II.1. TRIBOLOGIE DES CONTACTS COPEAU-OUTIL ET PIECE-OUTIL.....	24
II.1.1. Analyse du système C-O.....	25
II.1.1.1. Corps (1).....	25
II.1.1.2. Corps (2).....	26
II.1.1.3. Corps (3).....	28
II.2. BILAN DES TROIS TYPES DE COUPE SUR L'USURE.....	28
II.3. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR L'USURE.....	29
II.4. USURE DES OUTILS.....	29
II.4.1. Mécanismes d'endommagement des outils.....	30
II.4.2. Déformation plastique et fatigue (mécanique).....	32
II.4.3. Usure par adhésion : arête rapportée et attrition.....	32
II.4.4. Usure par abrasion (mécanique).....	34
II.4.5. Usure par fissuration (mécanique).....	35
II.4.6. Usure par diffusion (physico-chimique).....	35
II.4.7. Usure par oxydation (physico-chimique).....	35
II.4.8. Usure avec effet de chocs.....	36
II.5. MANIFESTATION DE L'USURE.....	36
II.5.1. Usure frontale.....	37
II.5.2. Usure cratère.....	38
II.5.3. Usure par déformation plastique.....	38
II.6. USURE VISIBLE SUR L'OUTIL.....	38
II.6.1. Usure par déformation plastique de l'arête.....	38
II.6.2. Usure par écaillage de l'arête.....	39
II.6.3. Usure par arête rapportée ou copeau adhérent.....	40
II.6.4. Usure en dépouille.....	40
II.6.5. Usure en cratère.....	41
II.7. CRITERES D'USURE.....	42
II.7.1. Les critères directs.....	42
II.7.2. Les critères indirects.....	43
II.8. EFFET DU CHAMP MAGNETIQUE.....	43

II.8.1. Susceptibilité magnétique.....	43
II.9. CROISSANCE DES DOMAINES MAGNETIQUES.....	44
II.10. CLASSIFICATION DES MILIEUX MAGNETIQUES.....	45
II.10.1. Ferrimagnétisme.....	45
II.10.2. Antiferromagnétisme.....	46
II.10.3. Ferromagnétisme.....	46
II.10.4. Paramagnétisme.....	47
II.10.5. Diamagnétisme.....	48
I.11. PHENOMENE DE MAGNETOSTRICTION DES MATERIAUX	48
II.11.1. Magnétostriction des ferrites.....	48
II.12. PRINCIPAUX PHENOMENES DE MAGNETOSTRICTION.....	49
II.12.1. Effet joule longitudinal	49
II.12.2. Effet joule transversal.....	50
II.12.3. Effet de variation du module d'Young ou effet ΔE	50
II.13. EFFET DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE.....	51
II.13.1. Matériaux ferromagnétique	51
II.13.2. Contact ferromagnétique/ferromagnétique	51
II.13.3. Contact outil/pièce	51

CHAPITRE III - DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET TECHNIQUE DE MESURE

III.1. INTRODUCTION.....	53
III.2. DEROULEMENT DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	54
III.3. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	55
III.3.1. Intensité du champ magnétique.....	55
III.3.2. Montage du dispositif expérimental.....	56
III.3.3. Description globale de la machine.....	57
III.3.4. Description globale de l'outil de coupe : Dimensions des plaquettes, géométrie de la partie active et corps de l'outil de coupe.....	58
III.3.5. Description globale de la pièce usinée	60
III.4. TECHNIQUES UTILISEES POUR L'EXAMEN DES SURFACES	61
III.4.1. Evaluation de l'usure de la plaquette.....	61
III.4.2. Microscope optique.....	61

III.4.3. Microscopie électronique à balayage MEB.....	62
III.4.4. Mesure de la température d'interface	63
CHAPITRE IV - RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION.....	65
IV.1. INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR L'USURE DE L'OUTIL.....	65
IV.1.1. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction de la vitesse de coupe sans lubrification.....	65
IV.1.1.1. Usinage sans lubrification.....	65
IV.1.1.2. Usinage avec lubrification.....	69
IV.1.2. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction de la vitesse d'avance	69
IV.1.3. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction de la profondeur de passe	72
IV.1.4. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction du temps de coupe.....	75
IV.2. OBSERVATIONS ET ANALYSES DU MODE D'USURE DES OUTILS.....	81
IV.2.1. Contrôle de l'usure des zones de coupe des outils.....	81
IV.2.2. Morphologie de l'usure en fonction de la vitesse de coupe.....	81
IV.2.2.1. Usinage sans lubrification	81
IV.2.2.2. Usinage avec lubrification	83
IV.2.3. Morphologie de l'usure en fonction du temps de coupe.....	85
IV.2.4. Morphologie de l'usure en fonction de la profondeur de passe.....	87
IV.2.5. Morphologie de l'usure en fonction de la vitesse d'avance.....	89
IV.3. Evolution du champ magnétique sur la morphologie du copeau.....	91
IV.3.1. Usinage sans lubrification	91
IV.3.2. Usinage avec lubrification	93
IV.4. Evolution de la température en fonction du champ magnétique.....	97
IV.4.1. Analyse thermique de la zone de coupe.....	97
IV.4.2. Evolution des températures avec et sans champ magnétique.....	97
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	100
BIBLIOGRAPHIE.....	106
TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	113
ANNEXE.....	118
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS.....	123

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

Dans l'usinage, l'usure des outils de coupe conduit à une dégradation de la qualité de la pièce usinée, notamment en termes d'état de surface et de précision géométrique. Ainsi, il est important de disposer de critères permettant de suivre la dégradation d'un outil durant les opérations de tournage. Cela permettra de prendre la décision du changement de l'outil au moment opportun.

Cependant, le rendement économique des machines outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe et de leur durée de vie.

Le tournage joue un rôle très important dans l'industrie mécanique, où les industriels cherchent à augmenter la productibilité, tout en maintenant le coût de production le plus bas possible. Ces deux objectifs sont limités par plusieurs paramètres dont la durée de vie de l'outil de coupe. Ceci a poussé les chercheurs à améliorer, d'une part la qualité de la matière de l'outil de coupe, et d'autre part, à minimiser l'effet négatif des conditions de coupe.

La durée de vie de l'outil de coupe est étudiée en considération des critères semblables à ceux pris en compte lors de l'usinage selon des conditions de coupe conventionnelles, à savoir les grandeurs qui caractérisent l'usure en dépouille (frontale) et l'usure cratère de l'outil de coupe. D'autres critères moins facilement quantifiables sont utilisés dans les essais de validation de matériaux et de géométries de coupe. Par exemple, on peut chercher à usiner jusqu'à effondrement de l'arête de coupe et dégradation significative de l'état de surface.

La réduction de l'usure de l'outil de coupe peut être obtenue soit par un choix de la géométrie et de la dureté de la partie active de l'outil, soit par l'emploi d'un matériau usiné ayant subi un traitement thermique qui l'adouci. Ce dernier doit répondre à une double contrainte. D'une part, une contrainte quantitative qui amène à réduire les coûts des pièces usinées. D'autre part, une contrainte qualitative qui consiste à obtenir des surfaces possédant des géométries et des microgéométries optimales.

Dans la présente étude, nous avons cherché à optimiser la durée de vie des outils de coupe par un procédé peu connu des industriels qui consiste à appliquer au contact pièce-outil un champ magnétique durant les opérations de tournage. Ainsi, l'objectif principal de ce travail est de déterminer l'influence du champ magnétique sur le comportement tribologique en usure d'un outil de coupe durant les opérations d'usinage. De plus, nous cherchons à mettre en relation les mécanismes d'endommagement d'outil de coupe avec les sollicitations thermomécanique à l'interface outil-copeau-pièce dans le cas de l'usinage avec et sans champ magnétique (les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes).

Le thème s'articule autour de quatre chapitres principaux.

Dans le premier chapitre, nous présentons quelques généralités sur la tribologie de contact et l'usinage avancé. Dans un premier temps, les bases scientifiques du phénomène de la tribologie sont rappelés, ensuite, les travaux les plus marquants dans le domaine de l'usinage avancé et du tournage magnétisé sont présentés et analysés. Les différentes assistances à l'usinage et plus particulièrement l'assistance magnétique sont présentées, ainsi que les différents travaux réalisés ces dernières années sur le procédé d'usinage.

Le deuxième chapitre est consacré aux différents mécanismes d'endommagement des outils de coupe qui ont lieu lors d'une opération d'usinage : la tribologie du contact des outils de coupe et du contact magnéto-tribologique, l'étude du processus de l'usure des outils de coupe, l'influence du champ magnétique sur les matériaux ferromagnétique. Une étude bibliographique sur l'usinage des contacts magnétiques est également présentée.

Dans le troisième chapitre, nous faisons la description du dispositif expérimental utilisé pour mener cette recherche, les caractéristiques des outils de coupe testés dans cette

étude ainsi que le choix des outils de coupe et du matériau d'usinage (pièce usinée) et les diverses techniques de mesure utilisées.

Le quatrième chapitre est consacré à l'interprétation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus, à savoir l'influence :

- du champ magnétique sur l'usure de l'outil de coupe;
- du champ magnétique sur le mode d'usure de l'outil de coupe;
- du champ magnétique sur la morphologie du copeau;
- du champ magnétique sur la température de coupe.

Nous concluons en exposant l'intérêt des résultats obtenus et les perspectives d'études qui nous semblent essentielles pour la suite.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA TRIBOLOGIE ET L'USINAGE AVANCE

I.1. GENERALITES SUR LE FROTTEMENT ET L'USURE

I.1.1. La tribologie

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés des mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps [1] est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation in situ (particules détachées) (Fig. I.1). L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de frottement (Tab. I.1).

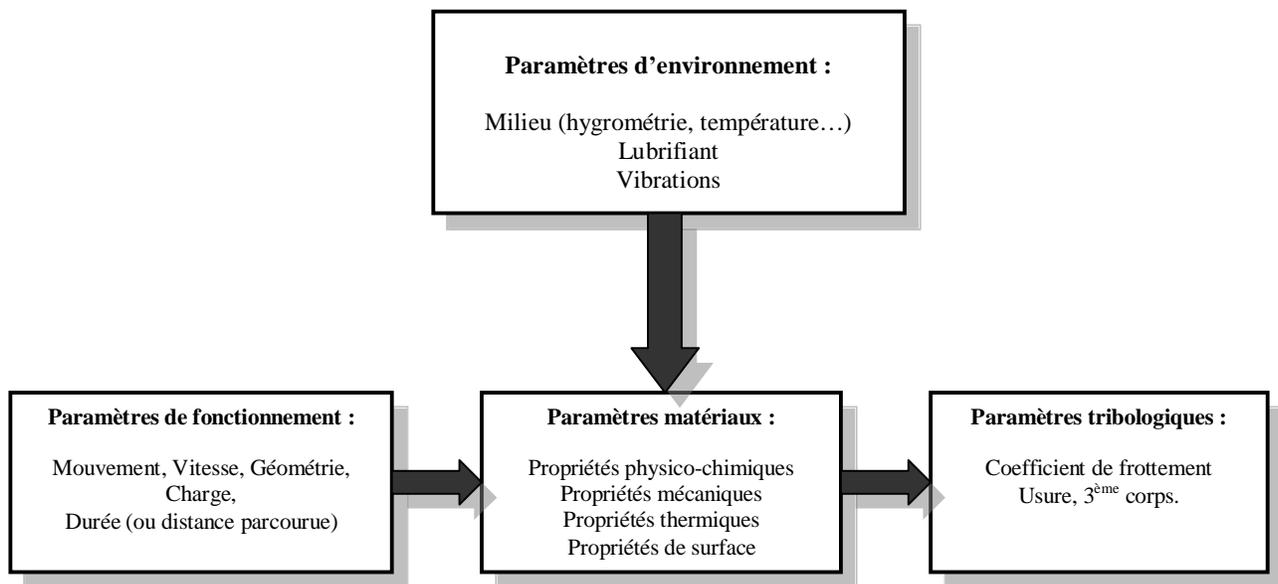


Fig. I.1. Synoptique général d'un système tribologique [2].

Énergie dissipée	Mode de dissipation
Énergie de déformation	Déformations élastiques et plastiques
Énergie de rupture	Fissuration, formation de débris, arrachements, écaillages
Énergie thermique	Échauffements, écoulement de chaleur, transferts par conduction
Énergie chimique	Adhésion, oxydation
Énergie acoustique	Vibrations, bruits
Énergie électrique	Électrisation, accumulation de charges, potentiels électrochimiques
Énergie lumineuse	Étincelles, rayonnement, photoémission

Tableau I.1 Différents modes de dissipation d'énergie en frottement [2].

La quantification de ces énergies est d'un intérêt capital car elles conditionnent les échauffements à l'interface, elles modifient la micro et la macro géométrie du contact (dégradations par usure conduisant à la détérioration du système). Elles influencent également les écoulements à l'interface outil/matière dans les procédés de mise en forme (laminage, forgeage,...).

I.1.2. Les surfaces

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci. En surface, le nombre de plus proches voisins est différent de ce qu'il est en volume. On parle aussi d'interface solide-gaz, solide-liquide, solide-solide.

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles)
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale).

Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :

- ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1^{er} et 2nd ordre),
- ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3^{ème} et 4^{ème} ordre).

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (gaz adsorbés, produits organiques), d'oxydes et dans le cas de métaux, peut être écrouie. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologiques des corps en contact (Figure. I.2.).

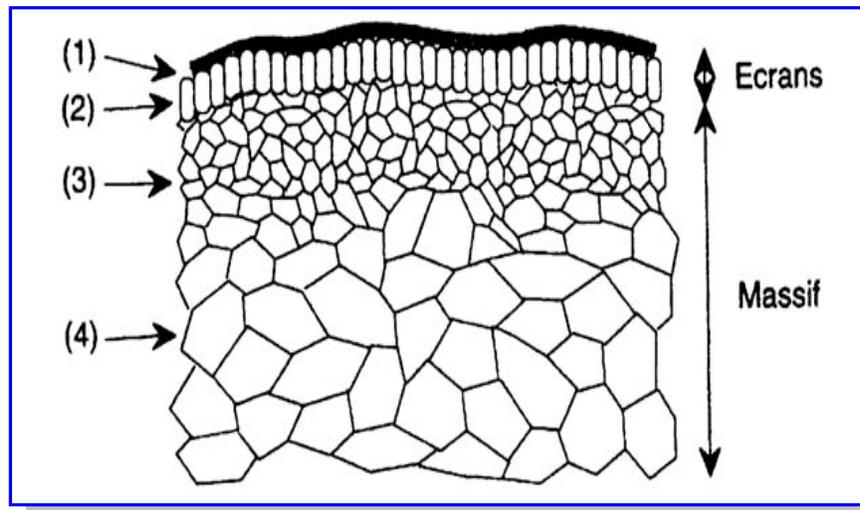


Fig. I.2. Vue théorique en coupe d'une surface [2].

La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. La zone (1) est un film de contamination (0,3 à 3 nm) constitués de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes (1 à 10 μm). La zone (3) est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50 μm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone (4) partant de 100 μm est le matériau massif.

Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée « usure douce ». Ces écrans détruits peuvent être reconstitués par réaction avec l'environnement. Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure « destructrice » ou « sévère ».

Les surfaces de contact de deux corps frottants peuvent ne pas jouer des rôles symétriques. Par exemple, dans le cas du glissement d'un pion sur un disque : un point de la surface de contact du pion est constamment sollicité, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion. Les distances cinématiques sont alors différentes.

L'exposition au champ de contraintes développées dans le pion et le disque ne sera pas la même, et les effets de fatigue vont être différents. Les usures du pion et du disque différeront également ainsi que les coefficients de frottement. Par exemple, pour des conditions expérimentales identiques, un pion de cuivre frottant sur un disque d'alumine présente un coefficient de frottement type Coulomb de 0,2 qui s'élève jusqu'à 1,5 lorsque le pion est en alumine et le disque en cuivre [4]. Le contact peut être selon les géométries des corps :

- Ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...)
- Linéaire (cylindre/plan)
- Surfaccique (rotule dans sphère)
- Conformel (cylindre/cylindre) ou contraformel (cylindre dans cylindre creux).

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes (aussi appelées aspérités) dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées. Le rapport aire réelle sur aire apparente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression.

La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée. De nombreuses études se sont intéressées à la variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation des aspérités : élastiques pour le modèle d'Archard (années 50), élasto-plastiques pour le modèle de Greenwood-Williamson (années 60). Plus récemment, Robbe-Valloire & al. [3] ont publié un modèle intégrant les déformations élastiques, élasto-plastiques mais aussi totalement plastiques des aspérités.

I.1.3. Mécanismes de dégradation des surfaces

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. Elle ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles.

Il arrive que l'on provoque sciemment certaines formes d'usure pour lutter contre d'autres formes qui seraient beaucoup plus dévastatrices. Quand il est bien conduit, le rodage d'un mécanisme, c'est-à-dire la phase de fonctionnement où les pièces « apprennent à vivre ensemble », provoque des usures qui se révéleront « protectrices » lors des phases suivantes.

La plupart du temps, l'usure globale d'un mécanisme est due à plusieurs processus qui agissent simultanément, plus rarement à un processus bien défini et identifiable. L'effet de ces actions simultanées est souvent plus important que la somme des effets que l'on produirait en faisant agir séparément les divers processus, on parle parfois de « suradditivité ».

Dans les premiers instants du frottement, ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou chimiques). Ensuite, ces mécanismes se relaient ou s'interpénètrent en fonction des multiples conditions présentes. En général, une pièce subit tout au long de sa vie 3 étapes d'usure :

- Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante.
- Marche normale : durée de vie (usure faible et constante).
- Vieillesse et mort : vitesse d'usure croissante [4].

I.2. GENERALITES SUR L'USINAGE.

II.2.1. Introduction

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière (formation des copeaux) en utilisant un outil coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe.....).

En usinage, il existe plusieurs configurations utilisables selon le procédé de coupe (le fraisage, le rabotage, le tournage.....). Durant notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière (tournage) par l'application d'un champ magnétique.

En tournage (Fig. I.3) le mouvement de coupe (M_c) est appliqué à la pièce avec une trajectoire circulaire et une fréquence de rotation définissant la vitesse de coupe (V_c). Le

mouvement d'avance (M_f) est appliqué à l'outil avec une trajectoire coplanaire et une vitesse d'avance définie (V_f) [6].

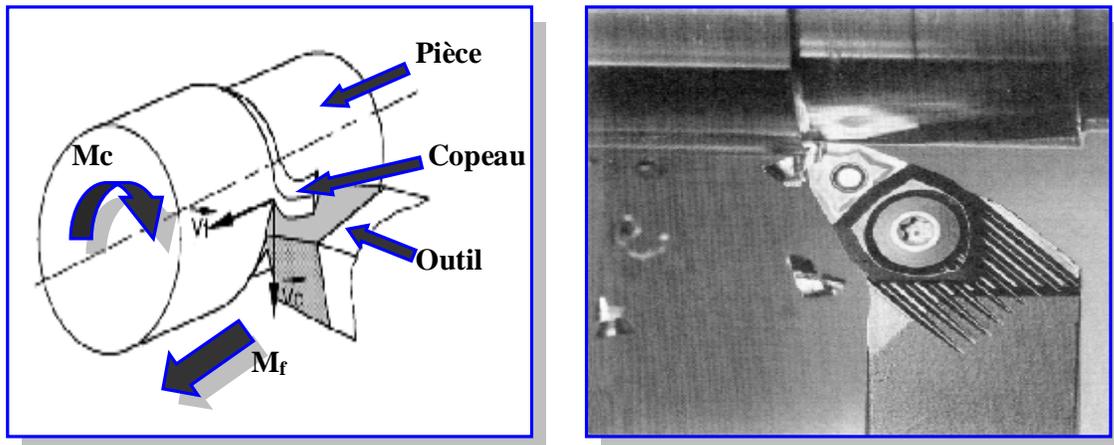


Fig. I.3. Opération de chariotage en tournage [5-6].

I.3. MODE DE FORMATION DES COPEAUX

I.3.1. Etude de la formation de la coupe orthogonale

La coupe la plus élémentaire est la coupe dite « orthogonale » (Figure. I.4). Dans cette configuration, l'arête de coupe est perpendiculaire à la fois aux directions de coupe et d'avance. L'outil est incliné de l'angle de coupe par rapport à la verticale et se déplace avec la vitesse de coupe V_c . La quantité de matière enlevée est représentée par l'épaisseur du copeau non déformé t_1 (ou avance par tour f) et la profondeur de passe w . Le copeau d'épaisseur t_2 se déplace le long de la face de coupe de l'outil avec la vitesse V_{cop} et quitte en se courbant l'interface outil-copeau à la distance l_c de la pointe de l'outil (longueur de contact) [7]. L'observation de la section d'un copeau en formation met en évidence trois zones particulières de déformation, comme expliquées ci-dessous:

I.3.2. Zone de cisaillement primaire

La zone de cisaillement primaire est le lieu où s'effectue le changement de direction de la matière usinée qui passe de la vitesse de coupe V_c à la vitesse du copeau V_{cop} . C'est une zone intense de déformation qui s'étend de la pointe de l'outil jusqu'à la surface libre du copeau. Dans de nombreux modèles de coupe [8 et 9], la zone de cisaillement primaire est idéalement représentée par un plan (dit de « cisaillement ») incliné d'un angle par rapport à la direction de coupe.

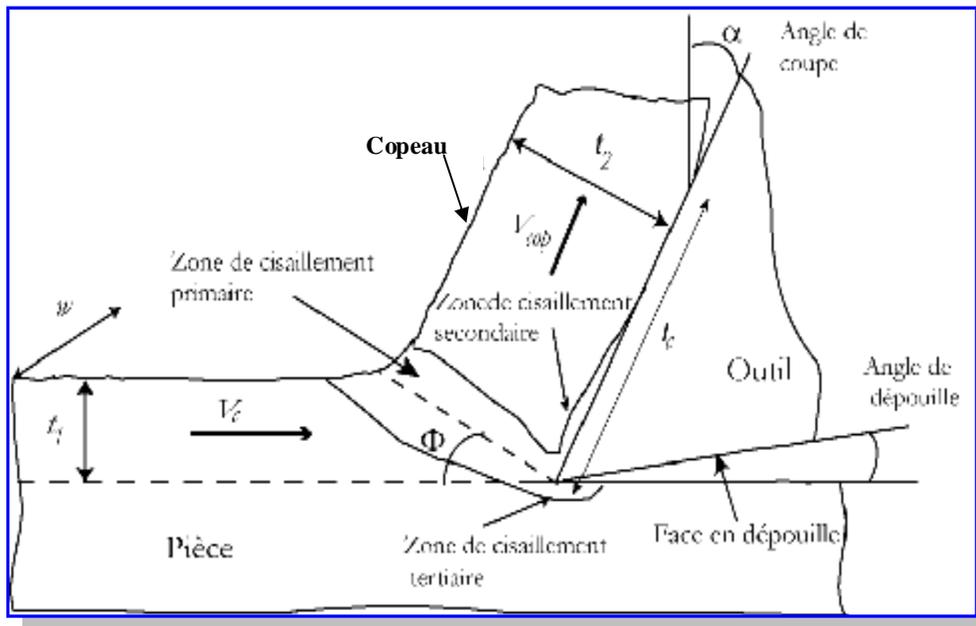


Fig. I.4. Principales zones de déformation et paramètres de la coupe orthogonale [7].

L'angle de cisaillement est alors géométriquement relié à \$t_1\$, \$t_2\$ et \$\alpha\$ par la relation :

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\sin f}{\cos(f - \alpha)} \tag{I.1}$$

Où

$$f = \tan^{-1} \left[\frac{\left(\frac{t_1}{t_2} \right) \cos \alpha}{1 - \left(\frac{t_1}{t_2} \right) \sin \alpha} \right] \tag{I.2}$$

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

$$V_c t_1 = V_{cop} t_2 \tag{I.3}$$

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

$$V_{cop} = \frac{\sin \alpha}{\cos(f - \alpha)} V_c \tag{I.4}$$

Une estimation de la déformation subie par le matériau dans la zone primaire peut être obtenue géométriquement en supposant un cisaillement pur sur le plan de cisaillement, [7] :

$$g = \frac{\cos a}{\sin f \cos(f - a)} \quad (I.5)$$

I.3.3. Zone de cisaillement secondaire

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

I.3.4. Zone de cisaillement tertiaire

Le contact entre l'outil (au niveau du bec et de la face en dépouille) et la surface usinée peut également provoquer des déformations plastiques dans la pièce. Elles sont beaucoup moins intenses que dans les deux précédentes zones de déformation, mais d'elles dépendent aussi la qualité de la surface usinée (rugosité et contraintes résiduelles) [6].

I.4. CLASSEMENT DES TYPES DU COPEAU

La classification des copeaux présentés est celle donnée par Komanduri et Brown [10]. Une nomenclature des différents types de copeau est présentée en ci-dessous. Ils les ont classés en tant que (Figure. I.5) :

- Copeau continu,
- Copeau ondulant,
- Copeau dentelé à zone de cisaillement concentrée, ou copeau de cisaillement catastrophique, ou copeau de cisaillement adiabatique.
- Copeau discontinu

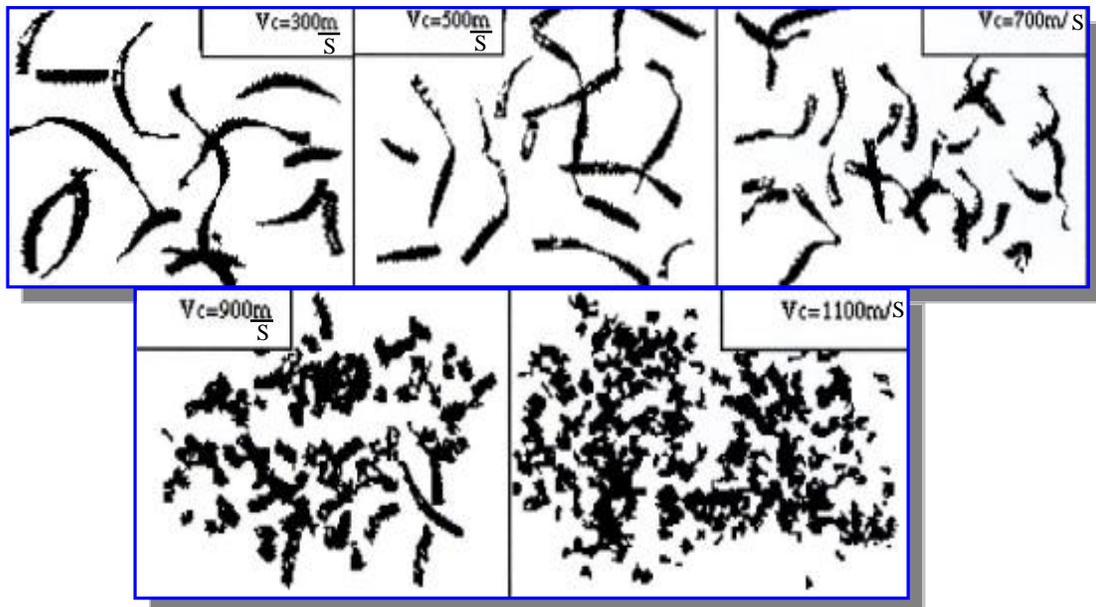


Fig. I.5. Morphologie des copeaux en fonction de la vitesse de coupe V_c (copeau obtenus lors d'essais de tournage avec plaquette céramique Al_2O_3 . Avance par tour : $0,2 \text{ mm/tr}$) d'après [11].

Des variations d'épaisseur, non cyclique sont observées lorsque des matériaux purs sont coupés à base vitesse. Dans la littérature, le terme de copeau fragmenté est souvent utilisé pour tous les types cycliques, en particulier les ondulés et les dentelés, bien que ces deux types soient réellement différents. La fréquence du cycle ondulé est de l'ordre de 100 Hz alors que celle du cycle dentelé est 2 à 4 fois plus élevée. La section longitudinale des copeaux ondulés n'a pas de points anguleux comme celles des copeaux dentelés.

L'usinage de matériaux ductiles est caractérisé par un copeau périodique composé de segments. Les copeaux obtenus sont appelés copeaux continus (Fig. I.6) ou bien copeau en dent de scie (Fig. I.7)

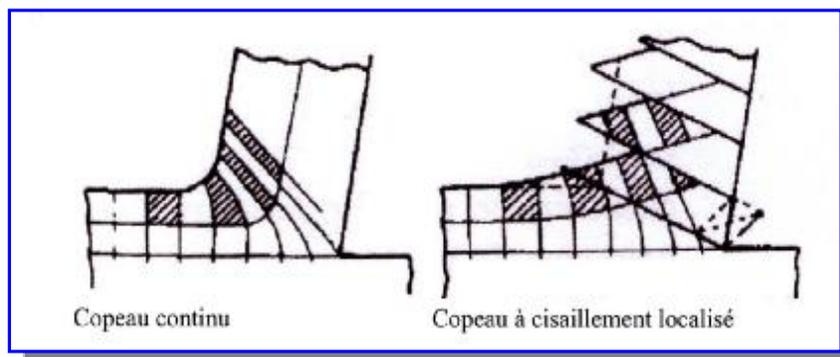


Fig. I.6. Modèles du copeau [12].

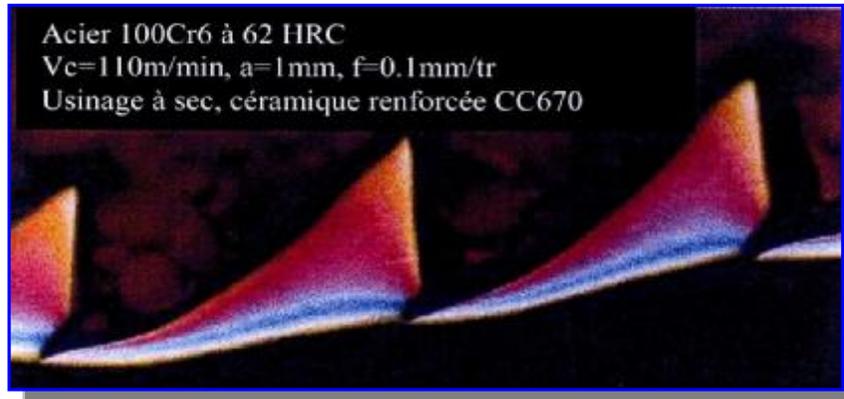


Fig. I.7. Copeau en dent de scie formé par tournage dur d'après [12].

I.5. LES PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE

Les conditions de coupe mises en jeu pendant le tournage, hormis les caractéristiques de l'outil, sont :

I.5.1. Vitesse de coupe

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce (notée N et exprimée en tour.mn^{-1}). Cette vitesse dépend de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce à usiner. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'Équation I-6 [13].

$$N = \frac{1000 \times V_c}{p \cdot D} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

D : diamètre de la pièce exprimée en [mm],

V_c : vitesse de coupe [m.mn^{-1}],

N : vitesse de rotation [tour.mn^{-1}]

I.5.2. L'avance par tour

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée f et est exprimée en mm.tour^{-1} (Figure. I.8). Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance V_f . Cette dernière représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce. Elle est donnée par l'Équation I-7.

$$V_f = f \times N \quad (\text{I.7})$$

Avec :

V_f : vitesse d'avance exprimée en mm.min^{-1} .

I.5.3. La profondeur de passe

La profondeur de passe représente la différence des rayons avant et après usinage (profondeur de la matière à enlever) (Figure. I.8). Elle est notée a_p et exprimée en mm. En coupe orthogonale, ce paramètre disparaît car il est confondu avec l'avance [14].

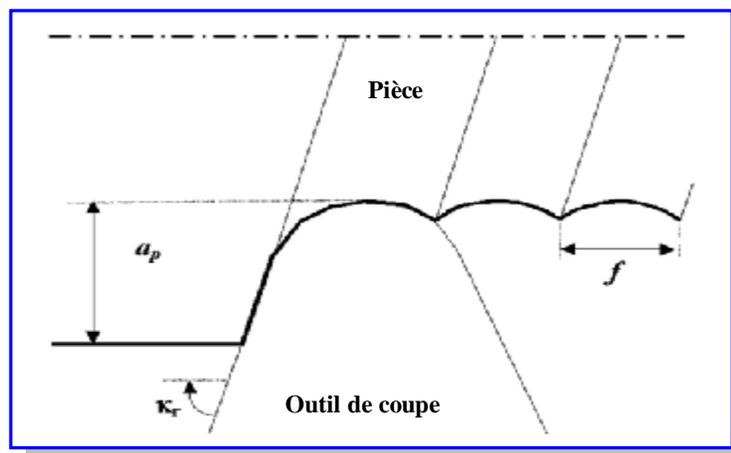


Fig. I.8. Définition de a_p et f en tournage [14].

I.6. LES OUTILS

L'outil de coupe est l'élément qui enlève la matière. Il existe une très grande variété d'outils de coupe : différents type de géométries, de matériaux et de revêtements. Dans ces travaux, une configuration d'outil simple sera développée. La partie active de l'outil fera l'objet d'une description (Fig. I.9(b)) géométrique simple, sans brise copeau sur la face de coupe, sans préparation d'arête particulière. Un outil de coupe de tournage peut être caractérisé par une géométrie d'arête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés.

I.6.1 La géométrie de l'arête de coupe

Usuellement dans les modèles de coupe, la partie active de l'outil est définie par trois plans (Fig. I.9(a)) sans raccordement. En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de 3 plans raccordés par deux rayons (Fig. I.9(b)) : le rayon de bec ϵ et le rayon d'acuité de l'arête de coupe, qui est souvent négligée dans un grand nombre de modèles

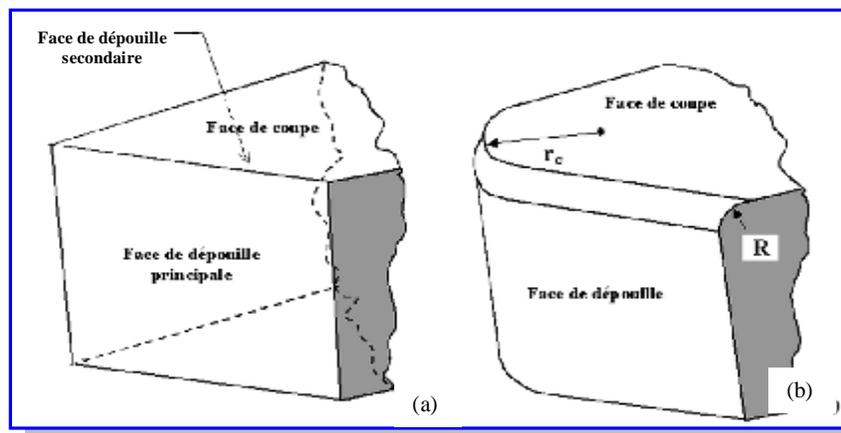


Fig. I.9. Géométrie de l'arête de coupe [14].

I.6.2. Les angles de coupe

L'orientation, dans la configuration outil en main, de l'arête de l'outil de coupe, de la face de coupe et de la face de dévissage (Fig. I.10) est définie par l'expression de différents angles caractéristiques.

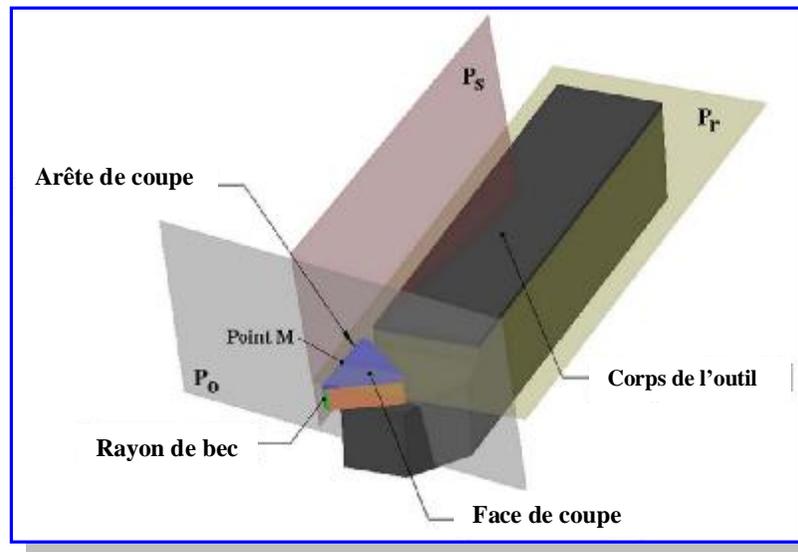


Fig. I.10. Définition basique d'un outil de coupe de tournage [15].

Pour définir ces angles des plans de références doivent être introduits [15] :

- Le plan de référence de l'outil P_r passe par un point M de l'arête de coupe et est parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil.
- Le plan d'arête de l'outil P_s est tangent à l'arête de coupe au point M et perpendiculaire au plan de référence P_r .
- Le plan orthogonal de l'outil P_o est perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête de l'outil P_s , au point M .

Ainsi sont définis :

- L'angle de direction d'arête de l'outil K_r (Fig. I.11).

C'est l'angle, projeté dans le plan P_r , entre l'arête de coupe et la direction d'avance, défini par la direction de la vitesse d'avance.

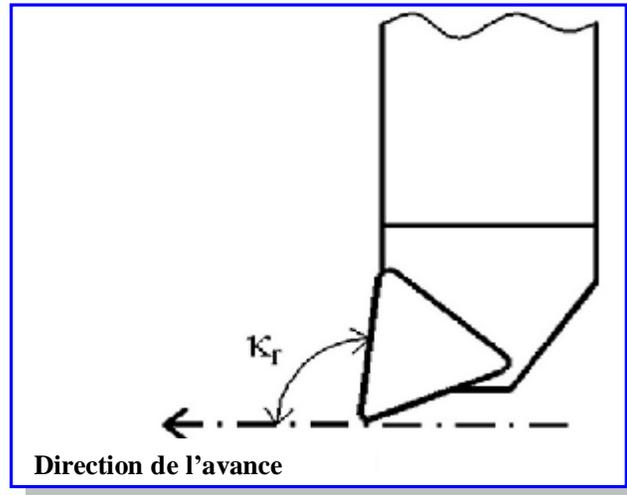


Fig. I.11. Angle de direction d'arête de l'outil. [14]

L'angle d'inclinaison d'arête de l'outil I_s : c'est l'angle (Fig. I.12) dans le plan s entre l'arête de coupe et le plan de référence P_r de l'outil.

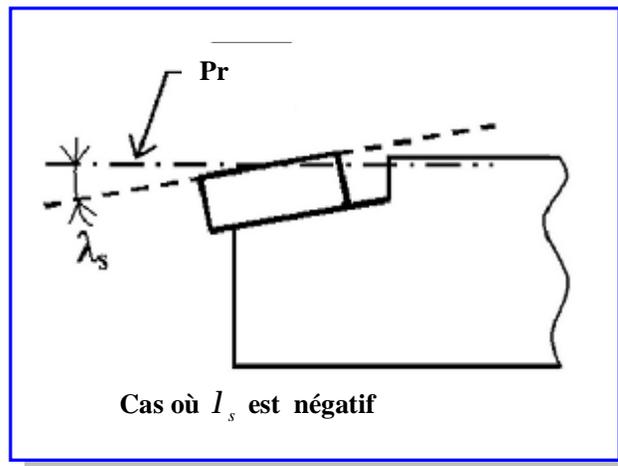


Fig. I.12. Angle d'inclinaison d'arête. [14]

Les caractéristiques géométriques de la partie active de l'outil de coupe sont définies (fig. I.13) dans le plan par trois angles P_o :

- L'angle entre la face de coupe et le plan de référence P_r dénommé g_0 , l'angle de coupe (fig. I.13).
- L'angle entre la face de coupe et face de dépouille dénommé b_0 , l'angle de taillant (Fig. I.13).

- L'angle entre la face de dépouille et le plan perpendiculaire au plan de référence P_r dénommé α_o , l'angle de dépouille principal (Fig. I.13).

Les faces de coupe et de dépouille sont reliées par le rayon d'acuité R .

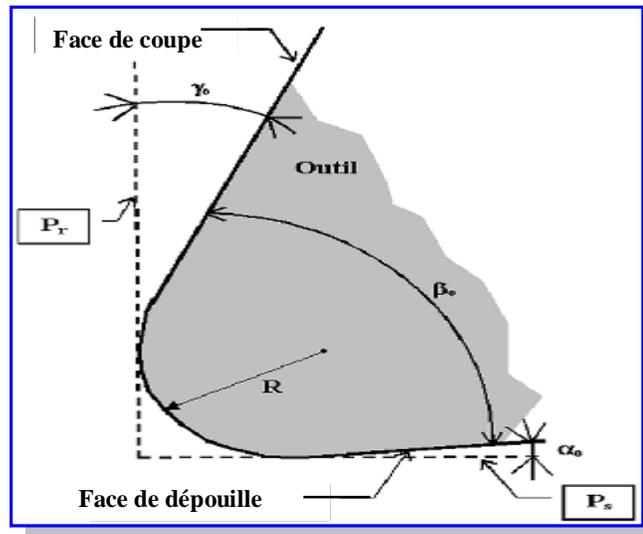


Fig. I.13. Arête de coupe dans le plan P_o [14].

I.7. PROCÉDES D'USINAGE

I.7.1. Introduction

L'usinage par enlèvement de matière à l'outil coupant est un des plus vieux procédés de mise en forme. Les tribus primitives utilisaient déjà ce procédé pour fabriquer les outils de chasse et depuis, ce procédé n'a jamais cessé de se développer.

Les dernières décennies (années 80 et 90) ont connu un niveau d'activités sans précédent par des avancées dans les connaissances scientifiques fondamentales et par le développement de nouveaux procédés d'usinage.

Pour améliorer l'usinabilité des matériaux métalliques réputés difficiles et/ou durs à usiner, de nouveaux procédés d'usinage avec assistance ont été développés. Parmi ces nouveaux procédés, nous pouvons citer : l'usinage assisté laser, l'usinage assisté jet d'eau haute pression, l'usinage assisté ultrasons et l'usinage assisté champ magnétique [13].

I.7.2. Usinage assisté par ultrasons

L'assistance ultrasons en tournage (Fig. I.14) excite l'outil de coupe avec une fréquence de l'ordre de 15 à 20 kHz et une amplitude d'environ 10 à 20 μm suivant la direction axiale, radiale ou tangentielle [6].

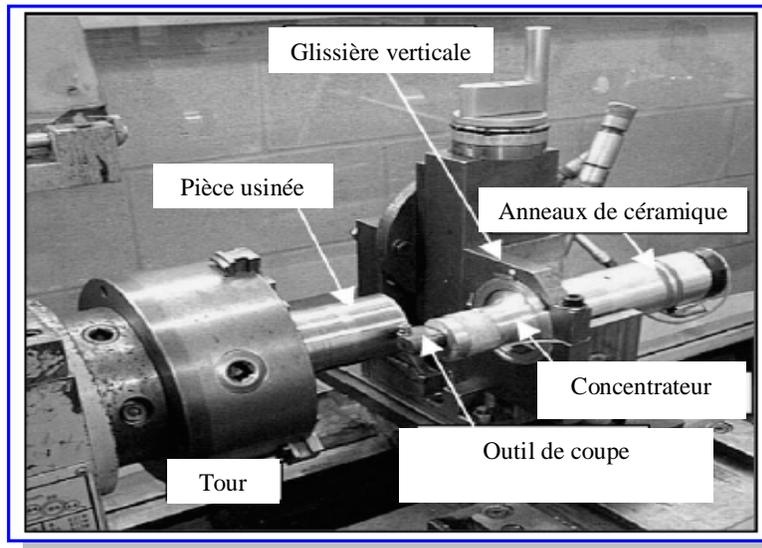


Fig. I.14. Dispositif d'assistance ultrason en tournage d'après [16 et 17]

Des études récentes ont montré des améliorations sensibles de l'usinage avec l'assistance ultrasonore. Babitsky *et al.* [16] ont obtenu, pour des alliages de nickel (NiCrCo20Mo - C263- et NiCr19FeNb -Inconel 718-) une amélioration de l'état de surface (diminution de 25 à 40 % du Ra et diminution de 40 % du Rt). De plus, les auteurs proposent un système d'excitation ultrasonore autorésonant permettant d'améliorer la commande de l'assistance [17]. L'assistance ultrasonique n'a qu'une légère influence sur la microstructure des couches de surface (mesure de la couche écrouie par nano-indentation). Mais elle forme un copeau continu (déformation homogène du copeau sur sa longueur) et elle augmente la température de coupe d'environ 50 % [18]. S. Chang [19] montre une forte diminution des bavures pour les opérations de perçage assisté par ultrasons sur une pièce en aluminium pur. Des modélisations numériques du procédé assisté ultrason ont été mises en place pour montrer l'influence des vibrations sur la coupe [18 et 20].

I.7.3. Usinage assisté jet d'eau haute pression

Le tournage assisté jet d'eau haute pression est l'une des méthodes permettant d'améliorer la productivité. Diverses recherches ont démontré que l'application d'un jet haute pression au niveau de l'interface outil-copeau permet de contrôler et d'améliorer la fragmentation des copeaux [21 et

22]. Avec ce procédé, il ne s'agit plus de noyer la zone de coupe avec un lubrifiant, mais de viser une zone précise et parfaitement définie (Figure. I.15), en intégrant une gestion optimale des nombreux paramètres mis en jeu. En effet, viser l'interface outil-copeau va permettre de créer un coin hydraulique entre le copeau et la plaquette. Cela augmente nettement la durée de vie de l'outil, améliore la fragmentation des copeaux, diminue les efforts de coupe [23] et les contraintes résiduelles en surface [22].

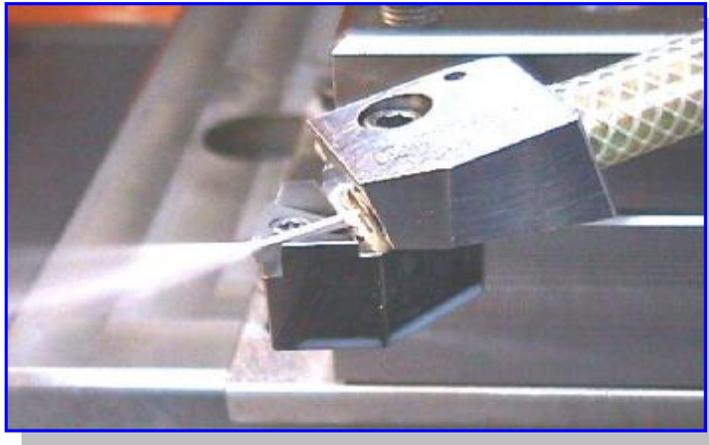


Fig. I.15. Principe de l'usinage assisté jet d'eau haute pression [22 et 13].

L'effet de l'assistance jet d'eau sur la température à la pointe d'outil, sur la forme des copeaux et la rugosité a été exploré par Kaminski [24]. Les résultats obtenus montrent une réduction de 40 à 45 % de la température de la pointe d'outil avec l'utilisation d'un jet d'eau. Ces auteurs concluent que l'assistance haute pression permet de contrôler la forme des copeaux et de changer les conditions de frottement outil-copeau et l'angle du plan de cisaillement. Kovačević et al. [23] ont étudié le rôle de l'assistance jet d'eau haute pression dans le cas du fraisage. Ils ont analysé l'influence de la position et de la direction du jet et suivant ceci, une diminution remarquable des efforts de coupe et de l'usure de l'outil sont observées. Le copeau est fragmenté (la fragmentation est due au phénomène de coupe discontinue) et l'état de surface est amélioré.

La simulation de l'usinage assisté jet d'eau dans le cas de la coupe orthogonale a fait l'objet de l'étude de Shet et al. [25]. Cette étude a permis de donner des informations sur l'évolution des efforts de coupe, de la température de coupe et des contraintes résiduelles en fonction des conditions de coupe et de la présence du jet haute pression (vitesse de coupe, avance, position du jet ...).

Pour comprendre les phénomènes qui se produisent pendant l'usinage assisté jet d'eau haute pression et voir le rôle de cette assistance sur la forme des copeaux et les contraintes résiduelles des

pièces usinées, des expérimentations de dressage de face, ont été menées à différentes vitesses de coupe et d'avance, avec assistance haute pression (20, 50 et 80 MPa) et à sec. Dans ce cas, le matériau étudié est un acier inoxydable 316L (AISI) et l'outil de coupe utilisé est un outil standard qui n'est pas adapté à l'usinage des aciers inoxydables (TCMW16T304, nuance H13 de Sandvik). Les résultats ont permis de mettre en évidence le rôle de chacun des paramètres mis en jeu avec notamment les conclusions suivantes [22] :

- Le contrôle des copeaux est significativement amélioré. La fragmentation est rendue possible avec des plaquettes qui ne pouvaient jusqu'alors le permettre.
- Le niveau maximal des contraintes résiduelles superficielles diminue, alors que la profondeur affectée ne varie pas beaucoup en comparaison avec l'usinage à sec.

I.7.4. Usinage assisté champ magnétique

L'assistance magnétique (Fig. I.16) consiste à réaliser l'opération d'usinage dans un champ magnétique engendré par des sources de courant (ex. bobine) ou par des corps aimantés (ex. système de serrage magnétique).

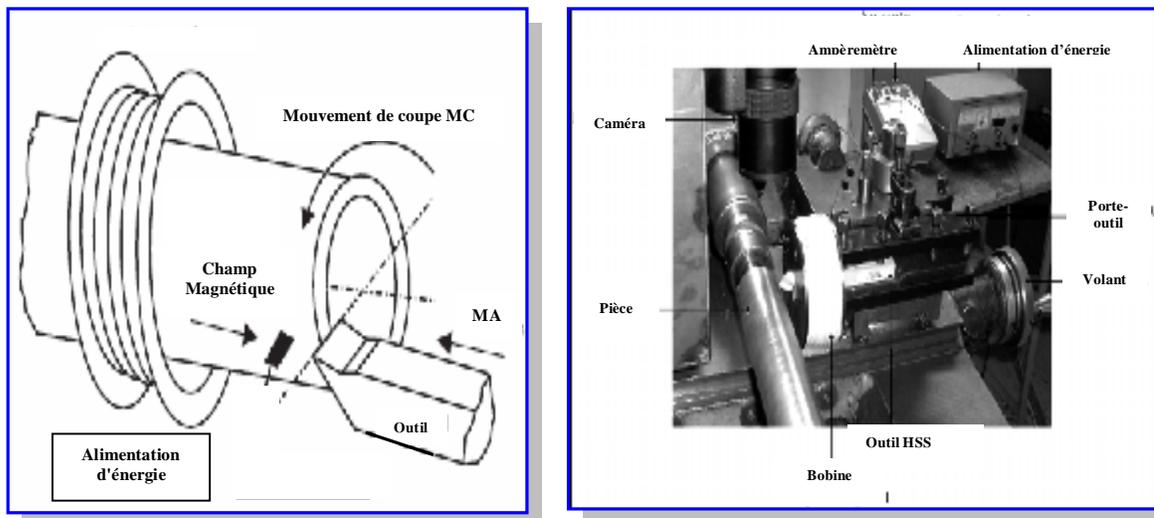


Fig. I.16. Schéma du dispositif d'assistance magnétique d'après [26-28].

L'assistance magnétique permet de modifier la formation du copeau (position et morphologie de la zone primaire) et le contact outil-copeau (tribologie). Dans un acier C50, cela induit une diminution de l'usure de l'outil, une forte augmentation de la durée de vie de l'outil

(multiplié par deux), mais favorise la formation d'arête rapportée. L'augmentation de la durée de vie de l'outil (usure plus faible) est peut être seulement due à la protection de l'arête de coupe par l'arête rapportée [26-28]. Des essais de perçage sous assistance dans un acier S235 ont été réalisés par O. Bataineh et al. [29]. Ils ont montré une diminution de 10 % de l'usure de l'outil et une augmentation de la température de coupe pendant l'assistance magnétique. Leur modélisation éléments finis du procédé montre que le champ magnétique se concentre au niveau de la couche superficielle du matériau, ce qui pourrait avoir pour effet de modifier son comportement mécanique ou la tribologie de la surface de la pièce.

I.7.5. Usinage assisté Laser

L'usinage assisté laser a vu le jour durant les années 80. Il consiste à chauffer d'une façon localisée la matière avec un spot laser (densité de puissance très importante) et utiliser en parallèle un outil de coupe pour usiner la matière. Ainsi, le laser est utilisé comme une source thermique servant à diminuer les caractéristiques du matériau à usiner juste avant la coupe et faciliter ainsi l'usinage à l'aide d'un outil coupant. L'usinage assisté laser peut être considéré comme étant un procédé alternatif pour l'usinage des matériaux durs (alliage de titane, acier à roulement, céramiques ...) [30 et 31]. L'effet du laser sur la coupe a été étudié par Germain et al. [31]. Des essais de chariotage avec et sans assistance laser ont été menés sur un acier à roulement 100Cr6 durci à 57 HRc. Après une comparaison avec les résultats obtenus en usinage classique, il montre que l'assistance laser permet de diminuer :

- Les efforts de coupe de 30 à 50 %,
- Les contraintes résiduelles en surface jusqu'à 70 %,
- La profondeur affectée par les contraintes résiduelles jusqu'à 70 %,

I.7.6. Assistance cryogénique

L'assistance cryogénique permet d'envoyer un jet d'azote liquide entre le copeau et l'outil (Fig. I.17). Cette technique est utilisée pour l'usinage de matériaux comme l'alliage de titane (Ti6Al4V). Pour ces matériaux, la température de coupe est très grande car le copeau n'évacue que très peu de chaleur. Cette température élevée affecte l'outil qui s'use très rapidement même à des vitesses de coupe faibles. L'assistance cryogénique permet donc d'évacuer l'énergie calorifique générée par la coupe.

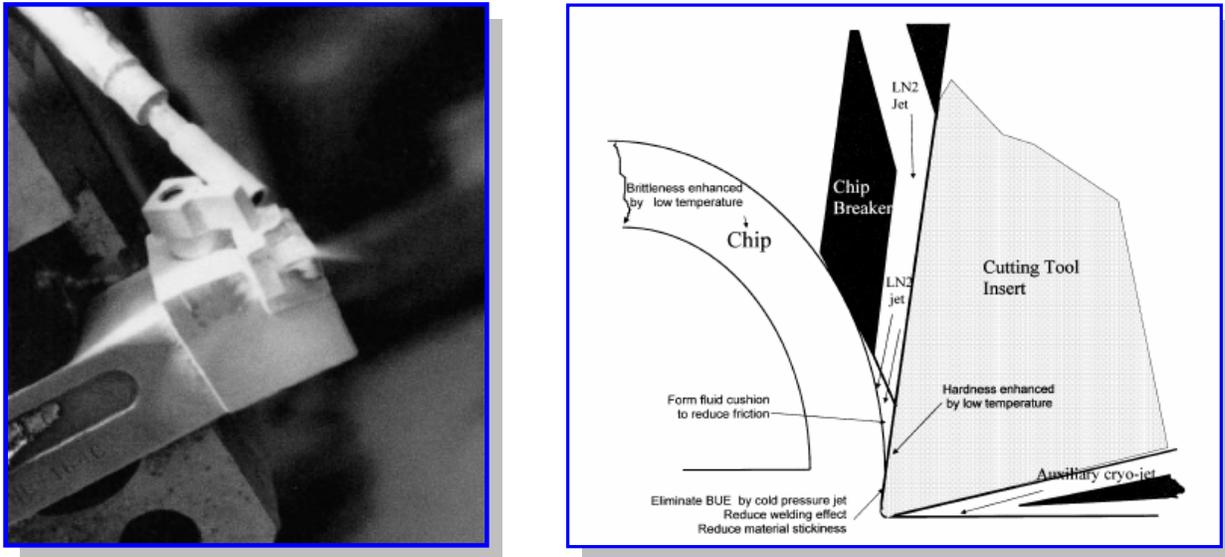


Fig. I.17. Dispositif d'assistance cryogénique d'après [32].

I.7.7. Usinage par Electroérosion

L'usinage par électroérosion (ou EDM du terme anglais « Electrical Discharge Machining ») qui a la particularité d'usiner des matériaux sans égard à leur dureté, peut être appliqué à l'usinage des CMM, car ils sont conducteurs d'électricité. Poon et Lee [33 et 34] pensent que l'usinage par électroérosion peut ouvrir de nouvelles portes pour l'usinage des CMM. En plus de la possibilité d'usiner des pièces de formes complexes et variées, l'électroérosion ne déforme pas les pièces et produit des surfaces sans ébavurages.

Selon Poon et Lee [33 et 34], le problème associé à l'électroérosion des CMM est que la matrice d'alliage d'aluminium est conductrice d'électricité mais les renforts (SiC par exemple) le sont beaucoup moins. Plus les CMM contiennent des particules, plus l'électrode va s'user. Par ailleurs, Gilmore [35] a remarqué que les composites usinés par électroérosion accusent une diminution de leur résistance à la fracture, une surface endommagée par la chaleur pouvant s'étendre jusqu'à 50 μ m de profondeur, et des fissures.

Au terme de cette analyse portant sur l'utilisation des procédés non conventionnels pour l'usinage des CMM, il ressort que l'électroérosion et l'usinage par jet d'eau abrasif peuvent être utilisés dans le cas des pièces complexes. Mais, en raison de leur bas taux d'enlèvement de métal, ils ne sauraient être envisagés pour une grande production. De plus, le fini des pièces est moins bon que celui obtenu en usinant les CMM par procédés conventionnels [36].

CHAPITRE II

TRIBOLOGIE DU CONTACT DES OUTILS DE COUPE ET DU CONTACT MAGNETO-TRIBOLOGIQUE

II.1. 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 (Fig. II.1) :

- Le couple C-O : copeau-outil côté face A_g ;
- Le système P-O : pièce-outil côté face A_a ;
- Le système P-O : pièce-outil côté face A'_a .

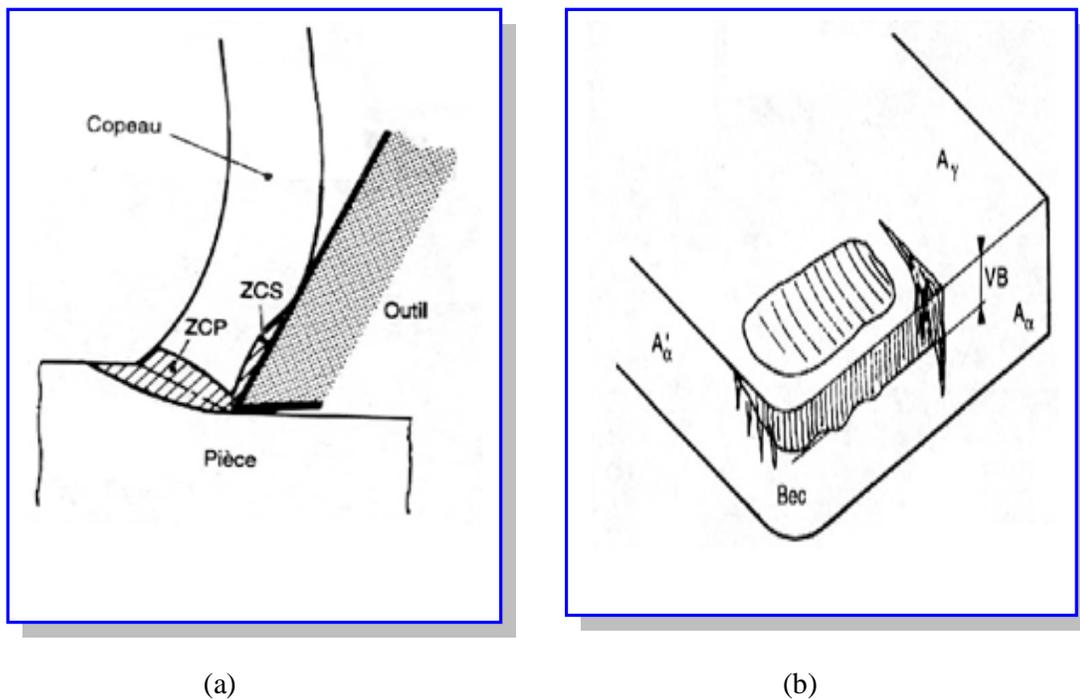


Fig. II.1. Désignation des faces ((a) formation du copeau, (b) usure de l'outil de coupe) [38].

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. Une bonne connaissance de l'évolution des phénomènes décrits est requise pour optimiser la productivité et la qualité des usinages. Si l'on met à part les ruines d'outils par écaillages et micro-écaillages, on peut observer que les systèmes C-O(A_g), P-O(A_a) et P-O(A'_a), donnent lieu plus ou moins rapidement a trois faciès d'endommagement macroscopiques (Fig. II.1)

- Une plage d'usure plane sur la face A_a 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_g , dont la profondeur maximale est couramment désignée par le symbole KT. La résistance mécanique de l'outil décroît lorsque KT augmente.
- Le creusement d'un sillon sur la face A_g en limite de zone de coupe et d'une multitude de petits sillons sur la face A'_a . L'état de la surface usinée est d'autant plus détérioré que ces sillons sont plus développés [38].

II.1.1. Analyse du système C-O

Le frottement sec de deux corps sous une pression de contact élevée conduit souvent 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 C1, C2 et C3 qui déterminent l'évolution du couple frottant C-O.

II.1.1.1. Corps (1) : Copeau

Pour une approfondie des interférences entre l'endommagement de l'outil par le copeau et les caractéristiques structurales de tel ou tel matériau usiné. On trouvera seulement ci-après une liste type des paramètres du corps (1) qu'il est très souhaitable de prendre en compte (Fig. II.2).

Le copeau se différencie du matériau usiné par l'intense déformation et par le cycle thermique subi. 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.

Le copeau peut contenir des particules incluses dans ses phases : les inclusions. On distingue couramment entre :

- Les particules qui ont une grande dureté dans la zone de cisaillement secondaire (ZCS), (à la température du contact copeau-outil).
- Les particules visqueuses à la température de coupe dans la zone de cisaillement secondaire (ZCS). Fréquemment, elles contribuent à constituer le corps (3) et ralentissent l'endommagement

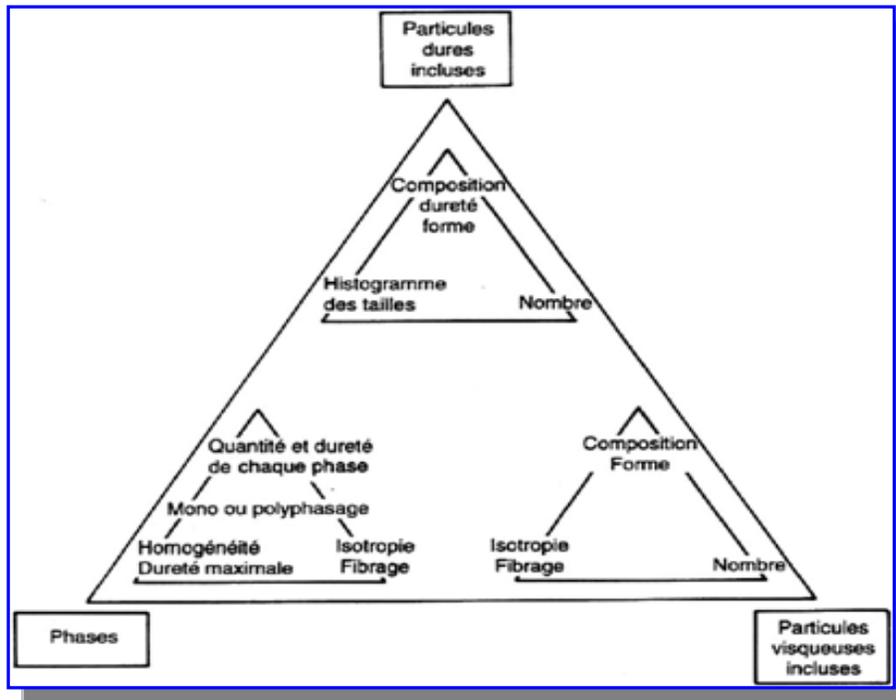


Fig. II.2. Paramètres du comportement du copeau [38].

II.1.1.2. Corps (2) : L'outil

Pour les mêmes raisons que dans le cas du corps (1), il n'est pas possible de décrire ici les particularités de chaque matériau utilisé pour réaliser un outil. On trouvera seulement ci-après une liste type des paramètres du corps à qu'il est possible de prendre en compte pour analyser son comportement (Fig. II.3).

L'outil est soumis à un gradient thermique important. 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 compacité, de sa ténacité, etc.

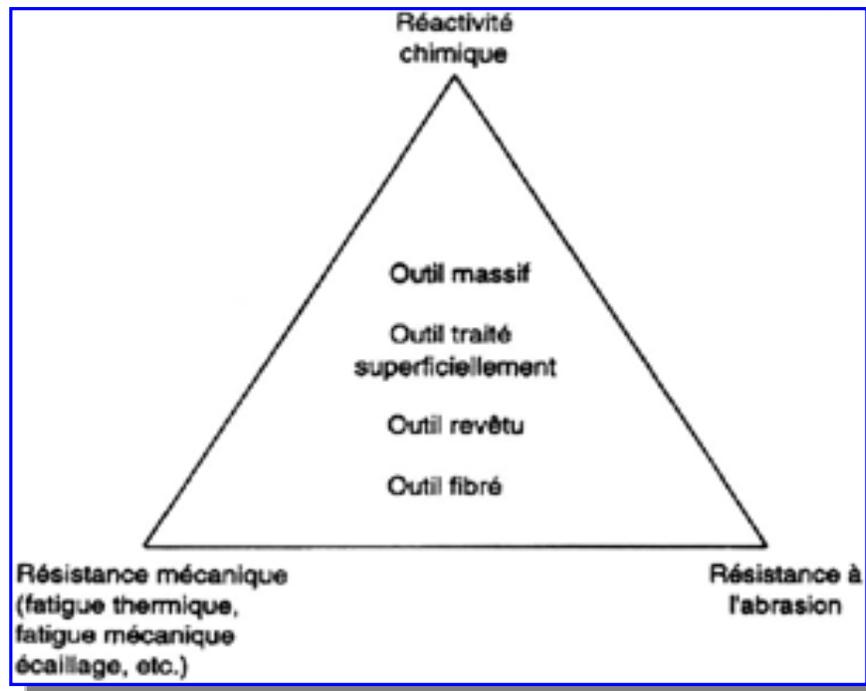


Fig. II.3. Paramètres du comportement d'outil de coupe [38].

L'outil est en contact intime avec le copeau à haute température. À 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.

II.1.1.3. Corps (3)

En coupe, on observe trois grandes familles de troisièmes corps (Figures. II.3 et 4) :

- les dépôts macroscopiques, qui sont constitués de particules issues du corps (1) et stabilisées 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.

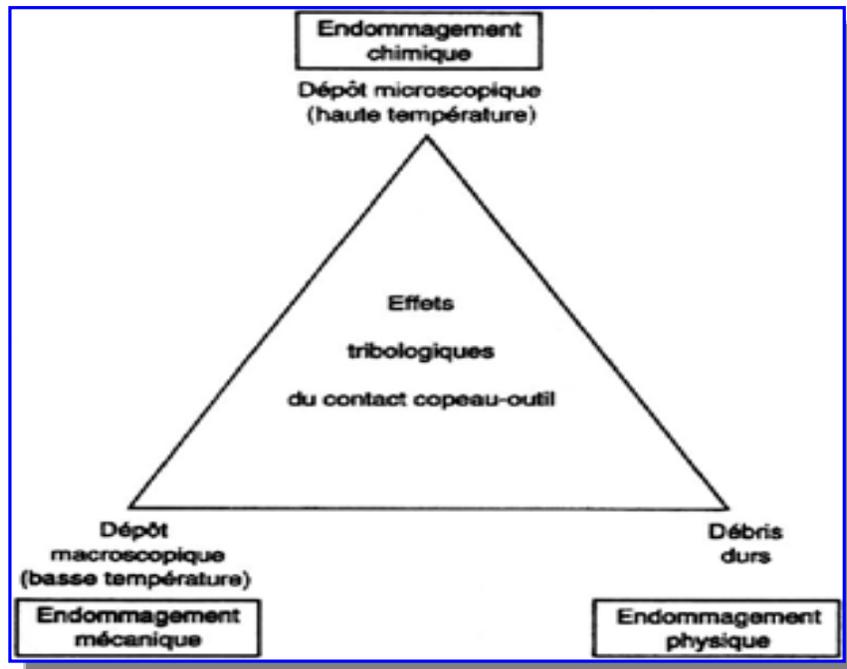


Fig. II.4. Mécanismes endommageants des outils de coupe [38].

II.2. BILAN DES TROIS TYPES DE COUPE SUR L'USURE

- Les dépôts macroscopiques constitués à température moyenne ($\approx 400\text{C}^\circ$) provoquent essentiellement un endommagement mécanique (régime vibratoire de travail de l'outil conduisant à la fissuration et à la rupture) ;
- Les dépôts microscopiques formés à température élevée ($\approx 1000\text{C}^\circ$) donnent lieu à des altérations de l'outil générant ainsi un endommagement chimique;
- Les débris de toute nature sont cause d'une abrasion de la surface des outils, cela se traduisant par un endommagement physique [38].

II.3. INFLUENCE DES PARAMETRES DE COUPE SUR L'USURE

On peut observer deux grands groupes de paramètres dans le processus de coupe. Le premier est formé par la matière usinée et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, lubrification) [5].

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

Le second groupe est formé par les paramètres physiques et mécaniques de l'outil (géométrie et composition du matériau de l'outil, dureté, effort et propriétés thermiques). Des chercheurs comme Martin [38] et Ber [39] ont observé que les différents mécanismes de l'usure interviennent pour différentes plages de vitesse de coupe. L'usure par abrasion est la plus forte à basse vitesse, mais lorsque la vitesse augmente, l'usure adhésive devient de plus en plus dominante et l'effet d'abrasion diminue ou disparaît. La température est une fonction de la vitesse, l'excès de chaleur catalyse le phénomène d'usure. Diminuer la chaleur dans le système d'usinage est une méthode naturelle pour contrôler la vitesse et le niveau d'usure. Comme les propriétés thermiques sont supposées constantes, la seule manière de changer les conditions thermiques est d'agir par des moyens extérieurs au système.

II.4. USURE DES OUTILS

L'usure de l'outil est due aux contraintes qu'on lui fait subir lors de l'usinage. En effet, la coupe des métaux est une opération de déformation plastique qui doit obtenir la rupture de la matière. Les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes. Il s'ensuit une usure de l'outil qui peut être d'origine thermomécanique ou chimique. Cette usure est provoquée par la concentration de contraintes en divers endroits de l'outil qui dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi :

- de la géométrie de la plaquette : angle de coupe, présence de brise copeau, etc.

- du revêtement et de son comportement mécanique et thermique

Il en résulte une usure apparente schématisée par la figure. II.5.

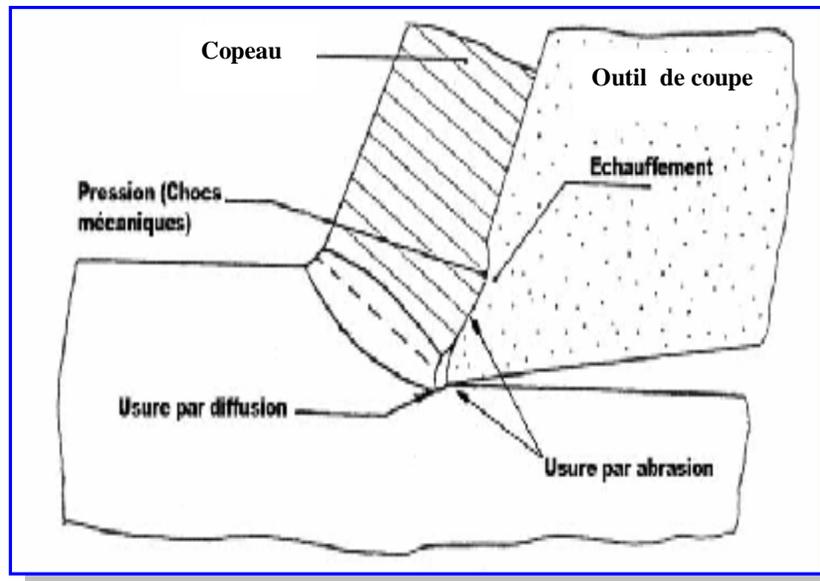


Fig. II.5. Représentation des différentes zones d'usures de l'outil durant la phase de formation du copeau [40].

II.4.1. Mécanismes d'endommagement des outils

Berdin [41] prend en compte les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et corrélativement des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, qui se traduisent par certaines modifications d'aspect de celui-ci, visibles à l'œil nu ou l'aide d'une loupe de forte puissance. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de l'usure en fonction de divers paramètres géométriques mesurables.

L'évolution de l'usure peut se faire par la mesure de la perte de masse en fonction du temps. D'après la figure II.6, on observe l'existence d'un régime transitoire suivi d'un régime stabilisé.

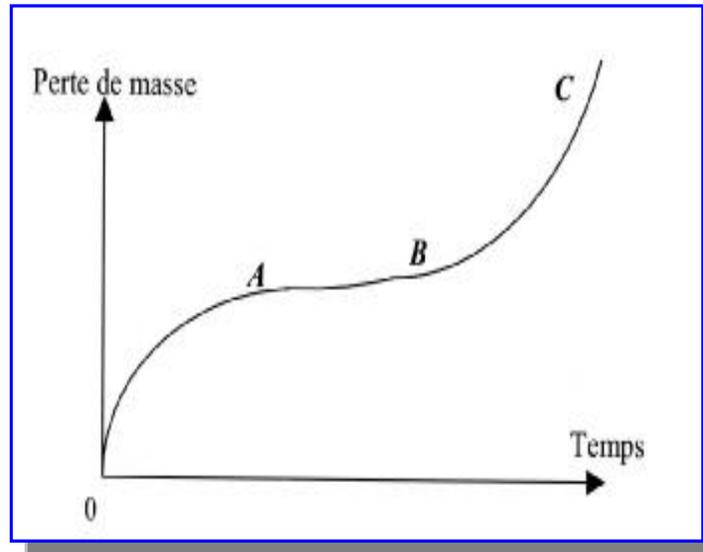


Fig. II.6. Perte de masse en fonction du temps [41].

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

Au cours d'un usinage, l'ensemble de ces processus se produit. Suivant les conditions d'usinage certains processus sont favorisés par rapport à d'autres. En général on peut dire que :

- les processus d'abrasion et d'adhésion sont favorisés lors des usinages où les températures sont faibles et où les vitesses de défilement du copeau sont faibles. En effet, dans ces cas là, il n'y a pas de formation de couche de glissement due à la température ou aux vitesses élevées. Il y a donc grippage ou arrachement.
- les processus de diffusion, de déformation plastique, d'oxydation sont favorisés par l'élévation de la température et des vitesses de coupe [5].

Ce qui peut se résumer d'après KONIG [42,43] par le diagramme suivant (Fig. II.7) :

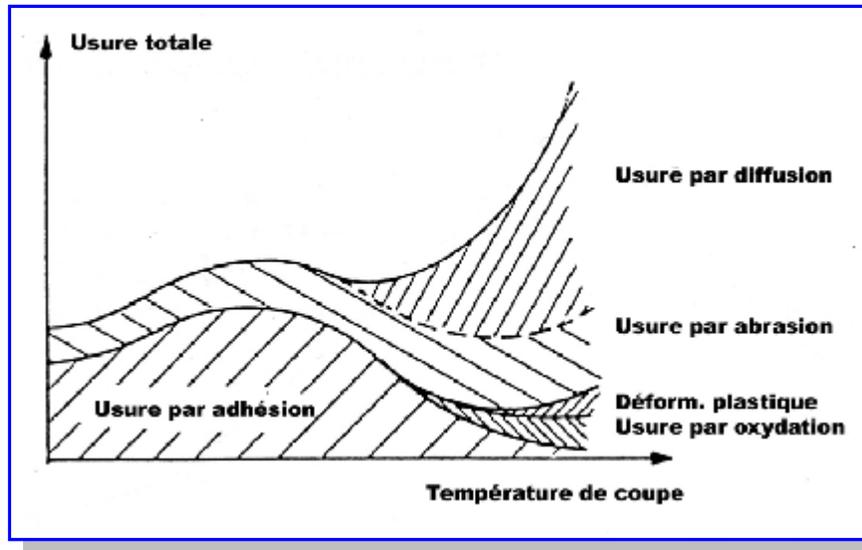


Fig. II.7. Diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température d'usinage (parallèle possible avec la vitesse) [40].

Ces différentes formes d'endommagement font intervenir, à des degrés plus ou moins importants, les mécanismes suivants :

II.4.2. Déformation plastique et fatigue (mécanique)

Les déformations plastiques se produisent sous l'effet combiné des grandes pressions et des grandes températures générées pendant l'usinage. Elles apparaissent au niveau de la pointe de l'outil et sur la face de coupe de celui-ci. Les conditions d'usinage sévères (grandes vitesses de coupe et grandes avances) ainsi que la dureté élevée de certaines pièces sont donc favorables à l'apparition de tels phénomènes. Les dimensions et la géométrie des outils (acuité de l'arête) sont les principaux paramètres pour prévenir l'usure par déformation plastique. La fatigue des outils est due aux combinaisons des phénomènes thermiques et mécaniques. Les fluctuations de la température, le chargement et le déchargement des efforts peuvent en effet conduire à la fissuration des outils et/ou à l'effondrement des arêtes de coupe [7].

II.4.3. Usure par adhésion : arête rapportée et attrition

Sous l'effet de la pression, de véritables soudures se créent entre l'outil et le copeau par écrasement/entrelacement des aspérités ou par des phénomènes d'adsorption et de solubilité s'il existe une affinité chimique entre les atomes qui constituent les deux surfaces. Lorsque les jonctions

formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil. Dans certaines conditions, notamment à faible vitesse de coupe, les éléments du copeau qui ont tendance à coller s'accumulent de manière importante pour former un dépôt macroscopique (Figure. II.8-9(a)) que l'on appelle arête rapportée (Built-Up Edge). Comme l'arête rapportée (BUE) a tendance à grossir, elle devient instable et finit par se briser. Une partie de la matière est emportée par le copeau, le reste peut passer sous l'arête de coupe et coller à la surface de la pièce. Le processus de formation et de destruction de l'arête rapportée peut se répéter plusieurs fois au cours d'un usinage causant une variation périodique de l'avance et de l'angle de coupe. Il en résulte une modification importante des dimensions souhaitées du produit fini et une détérioration de son état de surface.

L'évacuation des fragments de copeaux adhérents ou de l'arête rapportée peut s'accompagner d'arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt, ce phénomène d'usure est appelé attrition. Il est encore plus néfaste vers la fin de l'usinage au moment où l'outil se désengage de la pièce et l'arête rapportée expulsée. Le mécanisme de formation d'arête rapportée est encore mal connu, mais il est généralement associé au phénomène d'écrouissage de la matière qui semble être prédominant dans la formation du copeau aux faibles vitesses de coupe [44 et 45]. L'utilisation de vitesses de coupe suffisamment élevées permet souvent de limiter l'apparition de l'arête rapportée (Figure. II.8-9(b)).

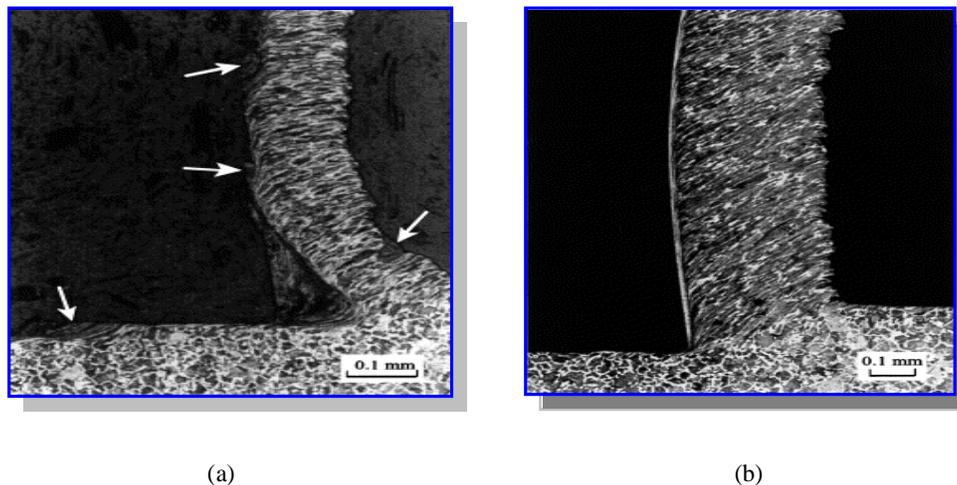


Fig. II.8. Coupe orthogonale d'acier : (a) $V_c = 0,5$ m/s, $f = 0,2$ mm/tr, les flèches blanches indiquent les dépôts de matière laissés sur la pièce après l'évacuation de l'arête rapportée.

(b) $V_c = 2$ m/s, $f = 0,2$ mm/tr [44 et 45].

II.4.4. Usure par abrasion (mécanique)

L'usure par abrasion se caractérise par la formation de bandes striées dans la direction de contact avec la surface usinée de la pièce ou dans la direction du copeau qui glisse le long de la face de coupe. L'usure par abrasion apparaît donc à la fois sur la face de coupe (Figure. II.9(a)) et sur la face de dépouille des outils (Figure. II.9(b)). Ce sont les particules dures qui sont à l'origine de cette usure. Elles peuvent être présentes dans la pièce sous la forme d'inclusions et de précipités ou provenir de l'outil lui-même par d'autres mécanismes d'usure telle que l'adhésion. De micro copeaux sont ainsi arrachés à l'outil par ces éléments durs qui sont sans cesse renouvelés au cours de l'usinage. L'usure par abrasion est l'usure dominante quand le contact à l'interface outil-copeau est essentiellement du glissement [44 et 46].

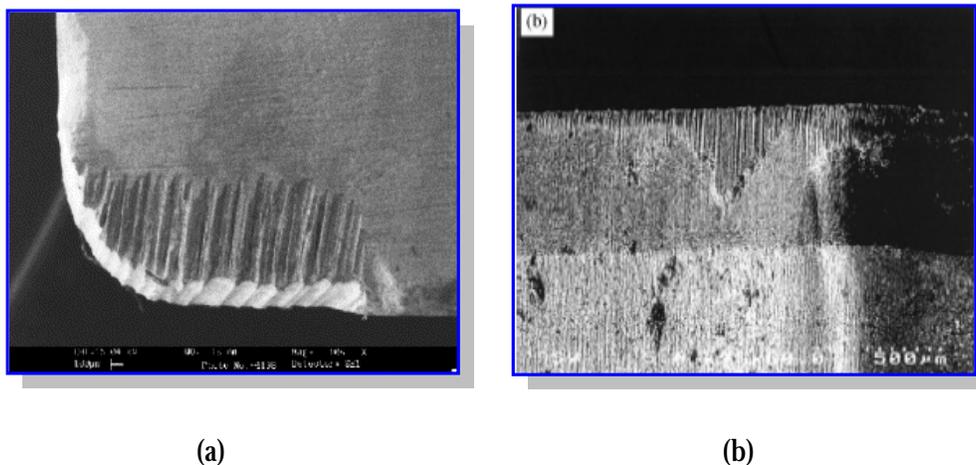


Fig. II.9. Usure par abrasion (a) sur la face de coupe après usinage d'alliage de titane, [47] (b) sur la face de dépouille après usinage de Duralcan [48].

II.4.5. Usure par fissuration (mécanique)

Lors de l'usinage, l'outil est soumis à de très importantes contraintes thermiques et mécaniques. Les contraintes thermiques à l'interface copeau / outil peuvent atteindre le millier de degré. De plus, la déformation plastique du matériau engendre, par réaction, des contraintes qui provoquent flexions et vibrations de l'outil. En effet, les matériaux usinés sont, par nature, rarement homogènes (phase). Il y a donc variation rapide des contraintes. La combinaison des hautes températures (choc thermique en début d'usinage) et des vibrations peut provoquer des fissures au sein de l'outil [40].

II.4.6. Usure par diffusion (physico-chimique)

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

Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil (Fig. II.10).

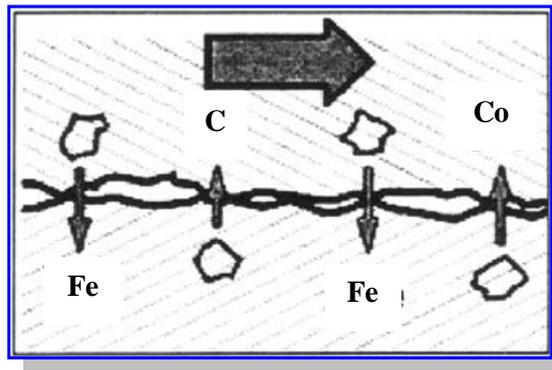


Fig. II.10. Processus d'usure par diffusion [40].

II.4.7. Usure par oxydation (physico-chimique)

Le milieu de l'usinage est constitué :

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

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoquent localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (Fig. II.11). De plus, le potentiel d'oxydoréduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

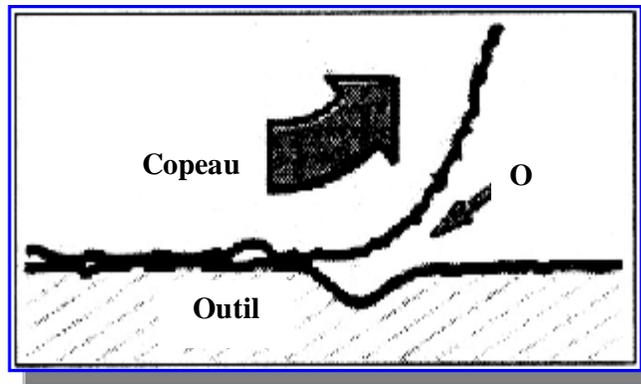


Fig. II.11. Processus d'usure par oxydation [40].

II.4.8. Usure avec effet de chocs

L'écaillage des faces de l'outil peut résulter d'une certaine fragilité ou de fatigue mécanique et thermique. Pour une rupture fragile, un tel endommagement apparaît dans les premiers instants de coupe. Il est dû à un excès d'effort de coupe. La fatigue mécanique entraîne la rupture sous l'effet de variation de sollicitations dues au mode d'usinage (coupe discontinue), à la géométrie des pièces (faux rond, rainure,...), ou encore à la structure du métal usiné (calamine, tôle oxycoupée.....).

Les chocs thermiques supportés par les outils sont très sévères soit pendant les arrêts de coupe soit par le refroidissement dû à un arrosage discontinu. La température décroît très vite en surface et plus lentement dans le cœur. La surface de l'outil est mise en traction et des fissures thermiques peuvent apparaître [5].

II.5. MANIFESTATION DE L'USURE

L'observation de la partie active de l'outil fait apparaître des formes d'usure caractéristiques qui correspondent aux conditions dans lesquelles l'outil travaille, selon la nature des matériaux en présence (outil-pièce), selon les conditions extérieures dues à l'environnement et enfin selon le régime de coupe affiché (Fig. II.12), on peut rencontrer les diverses formes d'usure suivantes [49]:

Indices :

- KM : Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil
- KT : profondeur d'un cratère
- KB : Largeur du cratère
- γ_c : Angle de cratérisation

- VB : Hauteur de l'usure en dépouille
- VN : profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
- V_{BC} : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
- SV : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée

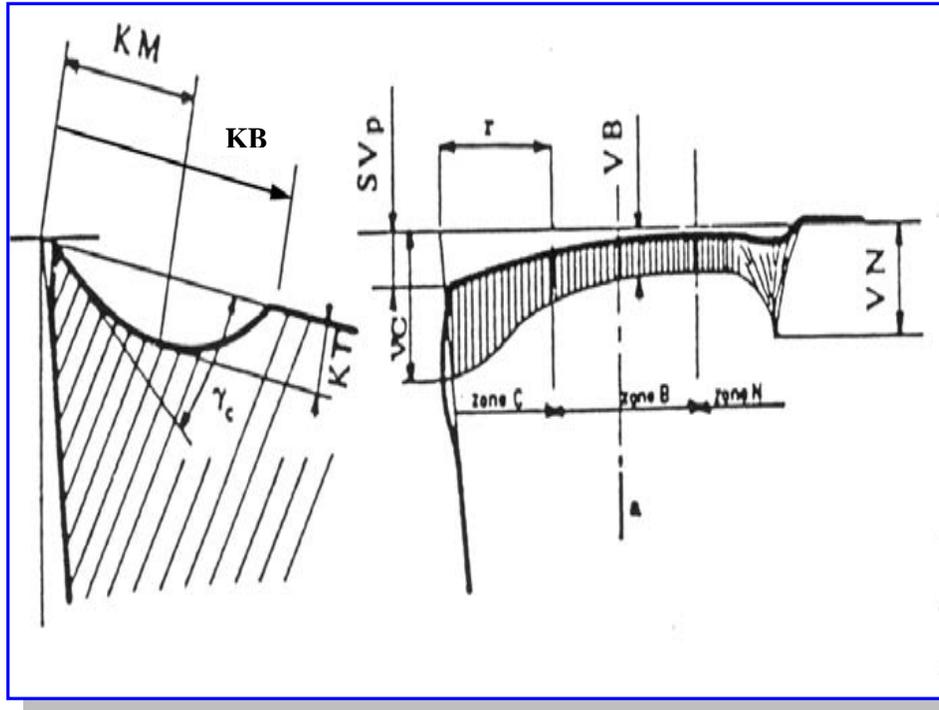


Fig. II.12. Formes d'usure de l'outil de coupe d'après la norme NFE 66 505 [50].

II.5.1. Usure frontale

Elle s'observe sur la face en dépouille principale de l'outil. Elle apparaît suivant une bande striée brillante et parallèle à l'arête de coupe (Fig. II.12). Elle se manifeste lors de travaux de finition, à forte de vitesse de coupe et à faible avance, elle set due conjointement aux températures élevées qui se produisent le long de l'arête de coupe et au frottement continu de la surface de la pièce sur la face en dépouille de l'outil. Sur le plan pratique, cette forme d'usure est la plus importante puisqu'elle conditionne simultanément l'état de surface de la pièce usinée et la précision dimensionnelle. On la caractérise par la distance entre l'arête de coupe initiale et la droite associée aux crêtes situées sur la face en dépouille (V_B) [50].

II.5.2. Usure cratère

Elle s'observe sur la face d'attaque de l'outil sous la forme d'une cuvette obtenue par frottement intense du copeau (Fig. II.12) [50]. Cette forme d'usure se manifeste principalement lors de travaux d'ébauche, à faible vitesse de coupe et à forte avance, sur les matériaux abrasifs. L'effort très important exercé par le copeau-outil, des températures élevées favorables à l'usure par diffusion. L'observation de cette forme d'usure se rencontre plus fréquemment sur les outils en carbure métallique et en céramique qui offrent une structure plus favorable que les outils en acier rapide. L'usure sur ces derniers se stabilise après sa naissance par un écrouissage superficiel du métal (symbole KT, pour respecter les appellations de la norme française NEF66505) [50]. On caractérise l'usure en cratère par la profondeur KT, le rapport KT/KM ou par l'angle de caractérisation.

II.5.3. Usure par déformation plastique

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions régnant dans la zone de coupe. On rencontre en particulier ce type d'usure dans l'utilisation des outils de carbures lors d'usinage des matériaux à hautes résistances mécaniques ou à faible usinabilité.

Cette déformation se traduit par un affaissement plastique de la pointe de l'outil caractérisé par la valeur la flèche SV_p , et par un renflement sur les faces en contre dépouille (Fig. II.12). Il s'en suit une modification importante de la géométrie de la pointe de l'outil qui nuit à la précision et à l'état de la surface usinée.

L'affaissement plastique entraîne une usure frontale vers la pointe de l'outil (zone C, Fig. II.12) de valeur V_C généralement supérieure à la valeur V_B dans la zone centrale B, et, une déformation importante du cratère. Celui-ci présente alors une profondeur maximale au niveau de l'arête secondaire de l'outil [5].

II.6. USURE VISIBLE SUR L'OUTIL**II.6.1. Usure par déformation plastique de l'arête**

Ce type d'usure est caractérisé par l'effondrement de l'arête tranchante [18]. Si la température sur l'arête devient trop élevée. Celle-ci peut se déformer sous l'effet de la contrainte mécanique (Fig. II.13) [40 et 51].

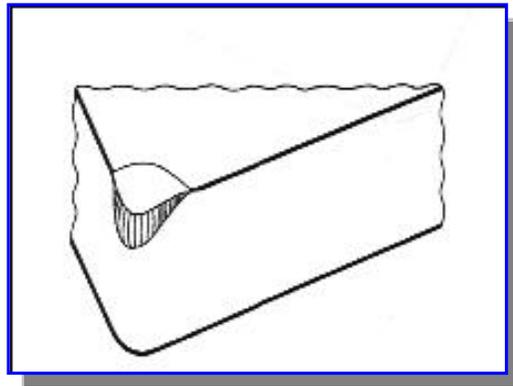


Fig. II.13. Usure par déformation plastique de l'arête [40].

Mesures correctives :

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

II.6.2. Usure par écaillage de l'arête

Se constante quand la fragilité de la nuance employée est trop grande en égard au travail à exécuter, ou également, 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 [52] (Fig. II.14).

Mesures correctives :

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

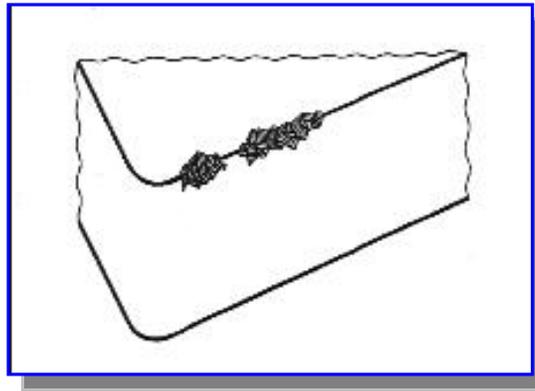


Fig. II.14. Usure par écaillage de l'arête [40].

II.6.3. Usure par arête rapportée ou copeau adhérent

Ce type d'usure est due à une température trop basse dans la zone de coupe, ce qui provoque un mauvais écoulement du copeau et celui-ci se soude à l'arête. Ce copeau adhérent entraîne un accroissement de la puissance nécessaire à la coupe, et une détérioration rapide de l'état de surface de la pièce (Fig. II.15) [52].

Mesures correctives :

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

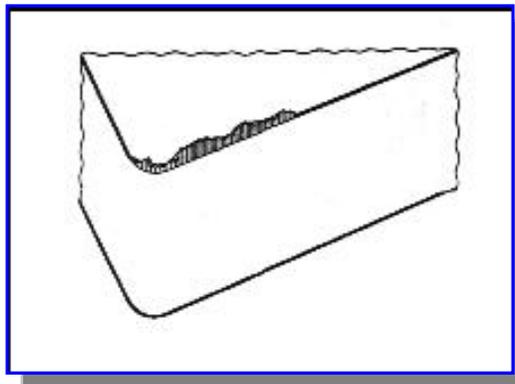


Fig. II.15. Usure par arête rapportée [40].

II.6.4. Usure en dépouille

Il caractérise la durée de vie. Quand il est trop grand les efforts de coupe augmentent et l'état de surface est moins bon (Fig. II.16). C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisée par une valeur d'usure admissible V_B . Les valeurs indiquées se rapportent généralement à une tenue d'outil (durée de vie $T=15$ min).

$$V_{B \text{ critique}} = 0,6 \text{ mm en ébauche et } 0,3 \text{ mm en finition}$$

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

Mesures correctives :

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

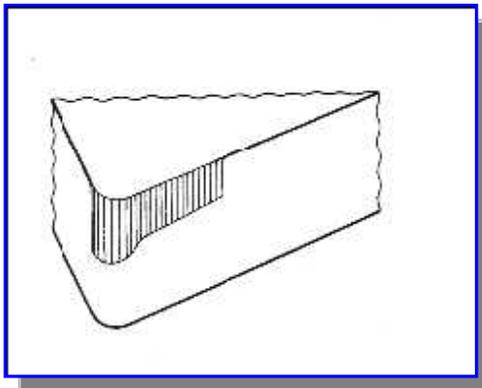


Fig. II.16. Usure en dépouille [40].

II.6.5. Usure en cratère

C'est une usure en creux sur la face de coupe (Fig. II.17), elle est due de frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoque une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion. Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par processus S_{VP} et un renflement de la face de dépouille. L'usure est souvent constatée sur les outils en carbure métallique, elle provoque généralement la rupture de la pointe de l'outil

$$\text{Valeur limite : } K_T \text{ critique} = 0,06 + 0,3 f^2$$

La valeur critique est celle à partir de laquelle l'outil est considéré comme hors d'usage avec risque important de rupture de l'outil (f : avance par tour).

Mesures correctives :

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

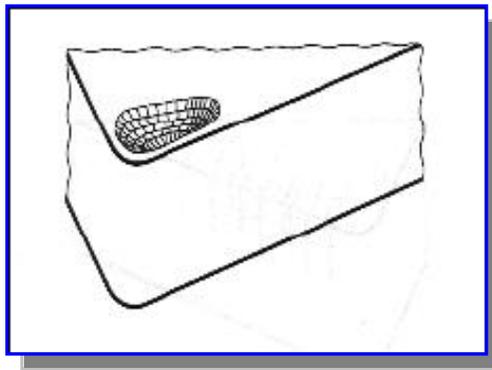


Fig. II.17. Usure en cratère [40].

II.7. CRITERES D'USURE

Les critères usuellement utilisés pour des outils en carbures et notamment ceux recommandés par la norme en vigueur concernant l'usure des outils de coupe la norme, NF-E-66 505, se rangent en deux catégories décrites ci-dessous [5].

II.7.1. Les critères directs

Ils sont basés sur l'évolution de l'usure [5 et 53] (Fig. II.12) :

- Critère d'usure frontale, caractérisé par une largeur limite $V_{B\text{limite}}$ de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil ;
- Critère de cratérisation, défini par la valeur limite de la profondeur du cratère $K_{T\text{limite}}$, ou par la valeur limite du rapport de cratérisation K_T/K_M , ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation α_c ;
- Critère de mort d'outil, utilisé principalement pour les outils en acier rapide ;

- Critère d'usure volumétrique ou massique caractérisé par la perte en poids de l'outil, mesurée par pesée ou à l'aide de traceurs radioactifs ;
- Critère basé sur les variations de cotes des surfaces usinées, actuellement utilisé pour la détermination de l'usinabilité des aciers.

II.7.2. Les critères indirects

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

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

II.8. EFFET DU CHAMP MAGNETIQUE

II.8.1. Susceptibilité magnétique

Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur B, il se crée dans les matériaux un champ d'induction magnétique H dont la valeur est donnée par :

$$B = m.H \quad (\text{II.1})$$

L'aimantation est généralement exprimée par la susceptibilité magnétique c ,

$$c = M/H \quad (\text{II.2})$$

M représente le champ magnétique local induit par l'intensité du champ magnétique extérieur.

La perméabilité μ_m est corrélée à la susceptibilité dans un milieu homogène et isotrope :

$$B = m_m H = m_r m_0 H = m_0 (H + M) \quad (\text{II.3})$$

Cette grandeur, qui est sans dimension, est reliée à la perméabilité relative peut ainsi s'écrire sous la forme :

$$m_r = 1 + c \quad (\text{II.4})$$

L'effet mutuel du champ magnétique et du désordre thermique conduit à une dépendance de la température traduite par la loi de Curie.

$$c = C/T \quad (\text{II.5})$$

Où C : constante de Curie et T : température en Kelvin

La figure II.18 montre la variation de la susceptibilité de quelques matériaux en fonction de température.

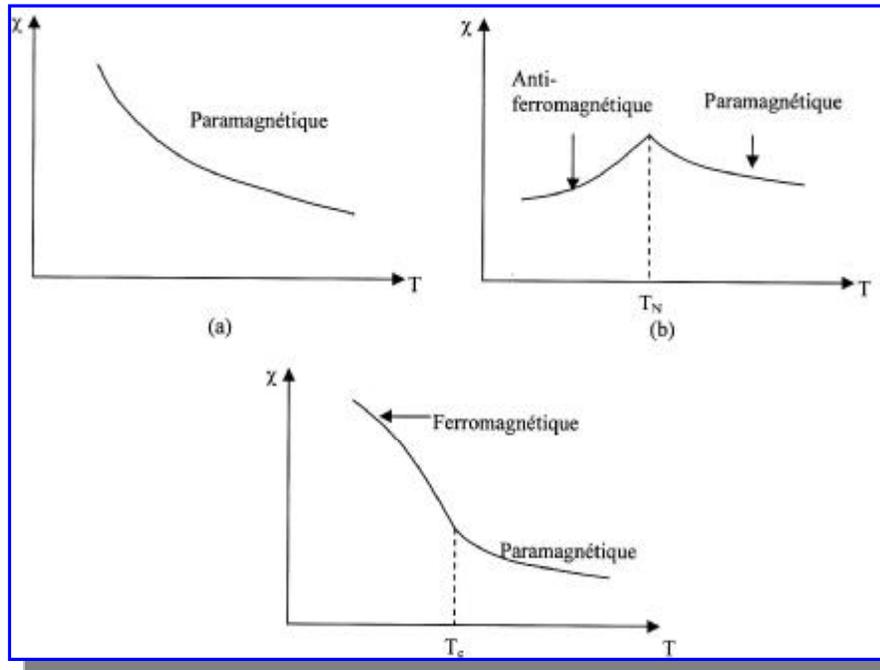


Fig. II.18. Variation de la susceptibilité magnétique en fonction de la température pour quelques substance (a) paramagnétique, (b) antiferromagnétique et (c) ferromagnétique [54].

II.9. CROISSANCE DES DOMAINES MAGNETIQUE

Si un matériau magnétique est plongé dans un champ magnétique extérieur, le moment dans la structure cristalline augmente et les domaines qui se sont alignés sur ce champ possèdent une énergie plus faible que ceux non orientés [57]. Les atomes à leur frontière se réorientent vers la direction la plus stable en fonction du champ magnétique imposé à l'extérieur du matériau. Les domaines non alignés (orientés) diminuent en dimension et ceux favorablement orientés gagnent du volume (Fig. II.19(b)).

L'apparition d'une polarisation macroscopique et d'une magnétisation devient très nette avec l'augmentation de l'intensité du champ magnétique car l'équilibre n'existe plus dans la structure (Fig. II.19).

Pour des valeurs plus élevées de H , le déplacement des parois de Bloch est réversible : l'aimantation macroscopique croît très vite jusqu'à ce que l'échantillon ne constitue plus qu'un seul

domaine (Fig. II.19(c)). Les parois des domaines magnétiques (Bloch) reviennent à leur position initiale si l'on supprime le champ magnétique (Fig. II.19(a)).

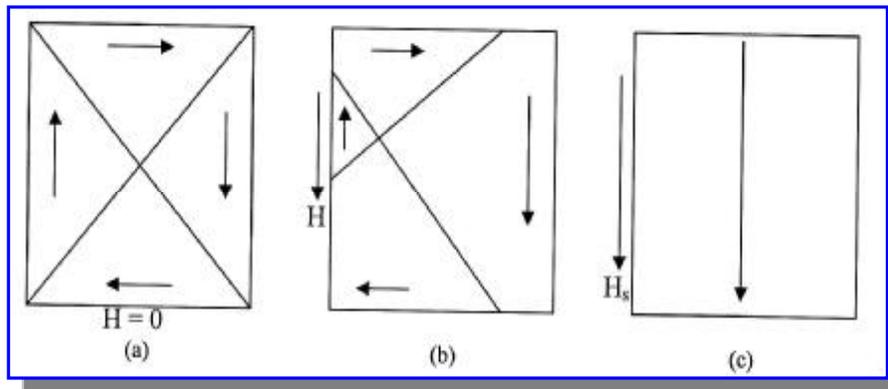


Fig. II.19. Evolution des domaines magnétiques dans un matériau ferromagnétique soumis à un champ magnétique croissant, (a) absence du champ magnétique, (b) les domaines orientés augmentent suivant H , (c) $H =$ intensité magnétique à saturation (H_s) [57].

II.10. CLASSIFICATION DES MILIEUX MANETIQUE

Selon la valeur du moment magnétique et de la susceptibilité magnétique, les matériaux sont divisés en cinq groupes :

- Les ferrimagnétiques,
- Les antiferromagnétiques,
- Les ferromagnétiques,
- Les paramagnétiques,
- Les diamagnétiques.

II.10.1. Ferrimagnétisme

Les propriétés magnétiques de matériaux ferrimagnétiques et celles des matériaux ferromagnétiques se ressemblent. Mais ces deux types de matériaux diffèrent par l'origine de leurs moments magnétiques. Certaines céramiques présentent une aimantation permanente appelée ferrimagnétisme. L'aimantation à saturation des matériaux ferrimagnétiques n'est pas aussi grande que celle des matériaux ferromagnétiques. Les matériaux ferrimagnétiques les plus utilisés sont des composés ioniques de formule chimique MFe_3O_4 . Dans cette formule, M peut représenter divers métaux, la ferrite la plus connue est la magnétite Fe_3O_4 [54].

II.10.2. Antiferromagnétisme

L'antiferromagnétisme concerne des propriétés magnétiques de certains oxydes métalliques, l'oxyde ferreux FeO par exemple. Lorsqu'on les soumet à un champ magnétique croissant, leur susceptibilité magnétique d'abord très faible et positive, du même ordre de grandeur que celle des corps paramagnétiques, commence par croître, passe par un maximum puis décroît selon une loi de Curie-Weiss (Fig. II.18). La température de transition entre les états antiferromagnétiques et paramagnétiques s'appelle point de Néel [57].

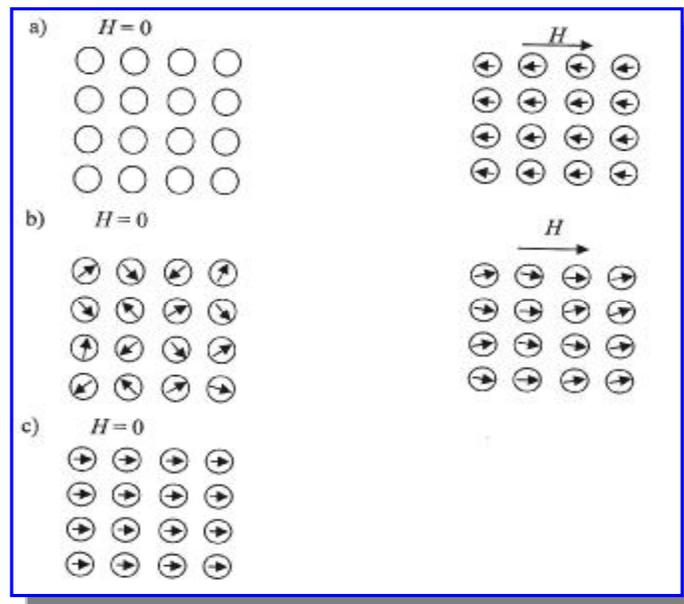


Fig. II.20. Représentation schématique des dipôles atomiques des trois principaux matériaux avec et sans application d'un champ magnétique, (a) diamagnétique, (b) paramagnétique, (c) ferromagnétique [56 et 54].

II.10.3. Ferromagnétisme

Le ferromagnétisme est une propriété très complexe à analyser, caractéristique de l'état solide exclusivement, manifestée notamment par des métaux. Une substance ferromagnétique reste fortement aimantée alors qu'on supprime tout champ magnétisant extérieur. Les matériaux tels que le nickel, le cobalt, la magnétite (Fe_3O_4) sont ferromagnétiques et surtout le fer et ses alliages, d'où vient le nom ferromagnétisme.

Le moment magnétique permanent des matériaux ferromagnétiques résulte des moments magnétiques de spin engendrés par leurs électrons, dont la somme n'est pas nulle. En outre, les

atomes adjacents d'un matériau ferromagnétique interagissent par paires pour produire des moments de spin dont la somme contribue à leur alignement, même en absence d'un champ extérieur (Fig. II.20(c)) [57].

L'aimantation de saturation M_s diminue lorsque la température s'élève et s'annule à la température critique de Curie T_c du matériau. Au-delà de cette température, un corps ferromagnétique cesse d'être ferromagnétique pour devenir paramagnétique. La figure II.21 indique comment la densité de l'induction magnétique B augmente avec l'intensité du champ magnétique H .

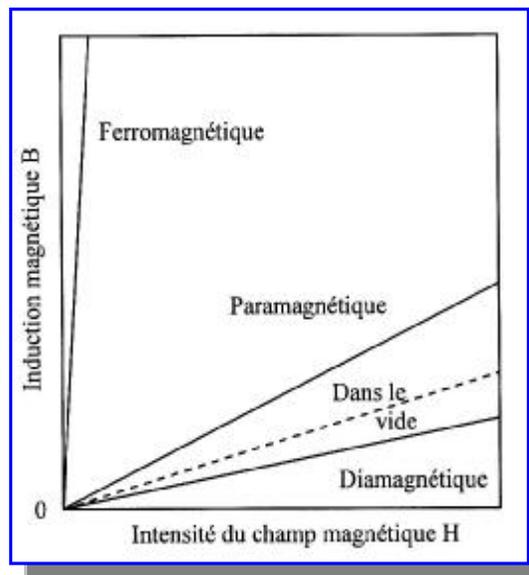


Fig. II.21. Induction magnétique B des matériaux ferromagnétiques, diamagnétiques et paramagnétiques à la température ambiante [54].

II.10.4. Paramagnétisme

Si une molécule comporte un nombre impair d'électrons ou un nombre pair d'électrons qui ne sont pas tous appariés en double, le moment magnétique résultant n'est pas nul. Toute substance paramagnétique, plongée dans un champ magnétique, s'aimante et elle se déplace vers les régions où le champ est fort. Elle acquiert en chaque région une intensité d'aimantation B proportionnelle au champ magnétique local et de même sens que lui (Fig. II.20(b)). On pose $B = P_m = cH$ (P_m polarisation magnétique ; H vecteur excitation magnétique). La susceptibilité magnétique c d'un corps paramagnétique est positive, indépendante de H , c'est une fonction décroissante de la température. Les substances tels que le dioxygène O_2 ($c = 1,9 \cdot 10^{-6}$) et NO ($c = 0,38 \cdot 10^{-6}$) qui possèdent dans leur structure un ou plusieurs électrons célibataires sont paramagnétiques [57].

II.10.5. Diamagnétisme

Le diamagnétisme est un phénomène de très faible intensité magnétique. Il est engendré par une modification des orbitales électroniques due à l'application d'un champ magnétique extérieur. Il disparaît dès que ce champ cesse d'agir. Le moment magnétique induit est extrêmement faible et est orienté dans le sens contraire au champ appliqué. La perméabilité relative μ_r d'un matériau diamagnétique est légèrement inférieure à 1, sa susceptibilité magnétique (volumique) est négative, ce qui signifie que l'induction du champ magnétique B dans un tel matériau est inférieure à celle du vide. La susceptibilité volumique diamagnétique est de l'ordre de -10^{-6} (Fig. II.20) [54].

II.11. PHENOMENE DE MAGNETOSTRICTION DES MATERIAUX

Le couplage entre les déformations et l'état d'aimantation d'un matériau s'exprime par un terme appelé énergie magnétoélastique. La densité volumique globale d'énergie dans un matériau ferromagnétique soumis à une contrainte mécanique et un champ magnétique externe est égale à la somme des énergies élastique et magnétoélastique, de l'énergie due à l'interaction aimantation du champ externe, de l'énergie d'anisotropie magnétocristalline et de l'énergie de démagnétisante.

Une contrainte mécanique appliquée à un matériau ferromagnétique provoque une variation de l'aimantation par action sur les domaines magnétiques. Inversement, l'aimantation introduit une déformation en supplément de la déformation créée par élasticité [60]. La magnétostriction est la propriété que présentent les substances ferromagnétiques de changer de dimensions lorsqu'elles s'aimantent [58]. Ce caractère physique peut diminuer l'anisotropie magnétique d'origine magnétoélastique provenant des contraintes internes au matériau [59]. Dans l'état stable d'un matériau aimanté, celui-ci se déforme spontanément pour minimiser l'ensemble des énergies élastique et magnétique suivant la direction qui donne une aimantation facile. Cette déformation linéaire est caractérisée par un coefficient I représente la variation relative de longueur $I = \Delta l/l$ (par la différence relative entre la longueur d'éléments mesurée sous champ magnétique et celle mesurée sans champ). Les valeurs du coefficient de magnétostriction I sont positives ou négatives suivant qu'il y ait dilatation ou contraction.

Le phénomène de la magnétostriction, change la limite élastique de la surface de contact. Une magnétostriction négative augmente la limite élastique (S_e) du matériau et augmente la fragilité. Elle diminue ainsi la ductilité des surfaces du contact glissant. Une magnétostriction positive diminue la limite élastique et rend la surface plus ductile.

II.11.1. MAGNETOSTRICTION DES FERRITES

La magnétostriction des ferrites de nickel est importante. Ces ferrites ont une forte résistivité par rapport aux alliages métalliques. Ils peuvent alors être utilisés à des fréquences plus élevées sans perte importante par courants de Foucault. Les ferrites ont cependant l'inconvénient d'être fragile. De plus, le coefficient de couplage magnéto-mécanique est faible (30%). L'inclusion de faibles quantités de cobalt permet de contrôler, voire d'annuler, l'anisotropie magnétocristalline du ferrite. Les ferrites au cobalt peuvent avoir des caractéristiques très stables avec la température.

II.12. PRINCIPAUX PHENOMENES DE MAGNETOSTRICTION

L'application d'un champ magnétique (variation de ce champ) produit une modification d'un paramètre mécanique, et les effets inverses, où la variation d'un paramètre ou d'une constante mécanique d'un matériau produit une modification de son aimantation, que ce matériau soit ou non plongé initialement dans un champ magnétique.

II.12.1. Effet joule longitudinal

Pour la plupart des métaux ou alliages ferromagnétiques (Fig. II.22), Δl garde un signe constant, quelle que soit la valeur du champ magnétique H_a . Mais pour certains matériaux, on observe un inversion de signe de Δl , c'est le cas de fer aux environs de 16 à 40 KA/m suivant les conditions de préparations. Pour cette valeur critique, l'effet joule s'annule et le matériau retrouve sa longueur initiale. Pour des valeurs de H_a inférieure à 16 KA/m, le matériau de fer s'allonge. Pour des valeurs de H_a supérieure, c'est l'inverse qui se produit [60].

Dans son état stable, un matériau aimanté est déformé spontanément de manière à minimiser l'ensemble des énergies élastiques et magnétoélastiques avec la direction de facile aimantation. Cette déformation linéaire dans la magnétostriction est caractérisée par un coefficient I représentant la variation relative de longueur $\Delta l/l$ (par la différence relative entre la longueur d'éléments mesurée sous champ magnétique et celle mesurée sans champ) suivant une certaine direction. Ce coefficient I qui peut prendre des valeurs positives ou négatives suivant qu'il y ait dilatation ou contraction.

II.12.2. Effet joule transversal

L'effet joule transversal est observé quand la direction de mesure de la dimension est perpendiculaire à l'aimantation. Les effets joule longitudinal et transversal n'introduisent pas de variation de volume si le matériau est isotrope ou constitué d'un ensemble désordonné de cristaux cubiques. Il n'en est pas de même pour des cristaux élémentaires présentant d'autres symétries [60].

II.12.3. Effet de variation du module d'Young ou effet ΔE

Lorsque l'on applique une contrainte à un matériau ferromagnétique, celle-ci provoque une variation d'aimantation qui introduit une déformation en supplément de la déformation créée par élasticité. Ce phénomène correspond à une modification des constantes élastiques du matériau, donc de son module d'Young E . le module E est toujours réduit quel que soit le signe du coefficient de magnétostriction I_s de matériau ferromagnétiques doux qui présentent un alignement des moments magnétiques pour une très faible contrainte à champ nul. L'effet ΔE est important pour la zone de champ où les domaines magnétiques sont mobiles. Sous champ saturant, une faible contrainte n'affecte pas l'aimantation et introduit uniquement une déformation élastique [60].

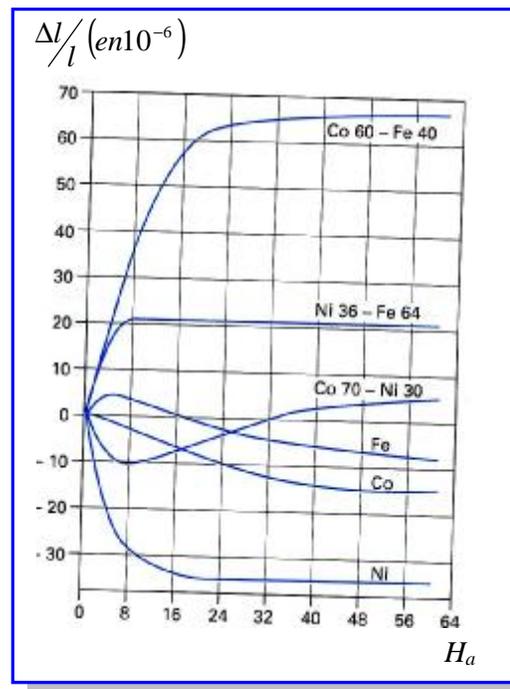


Fig. II.22. Effet joule longitudinal de quelques métaux et alliages métalliques en fonction du champ magnétique appliqué H_a [60].

II.13. EFFET DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE

II.13.1. Matériaux ferromagnétique

Le champ magnétique joue un rôle important sur le comportement tribologique des métaux, en [61] découvre l'effet du champ magnétoplastique qui traduit une modification considérable de la

plasticité des métaux en présence d'un champ magnétique. Cet effet magnétostatique se manifeste sous deux formes opposées. En effet, le champ magnétique peut conduire à un durcissement des cristaux et donc du métal appelé effet magnétoplastique positif. Mais il peut aussi conduire à un adoucissement des cristaux dit effet magnétoplastique négatif. De plus, la nature de l'effet magnétoplastique négatif dépend essentiellement des propriétés magnétiques des métaux [5].

II.13.2. Contact ferromagnétique/ferromagnétique

Le champ magnétique est un paramètre important qui a un effet sur le frottement et l'usure des couples tribologiques. Son effet sur les contacts dynamiques (méta/métal) conduit à une variation de la vitesse d'oxydation superficielle ainsi qu'au changement de la plasticité et de la microdureté des surfaces [62-64]. Par ailleurs, l'application d'un champ magnétique externe à des jonctions d'aspérités déformées active l'agglomération des dislocations près des entailles et augmente ainsi la génération des lacunes supplémentaires.

Muju [65] a suggéré que l'application d'un champ magnétique externe à des contacts ferromagnétiques glissants à sec, active l'agglomération des dislocations du volume du matériau vers la surface de contact.

Hiratsuka [66] a testé des couples des matériaux ferromagnétique (Fe/Fe) et (Ni/Ni) sous l'application d'un champ magnétique à l'air ambiant. Il a montré, que la présence du champ magnétique accélère la transition d'usure (sévère-douce) pendant le contact glissant magnétisé, et que leur taux d'usure diminue dans ces conditions.

Sasada [67] a proposé que lorsqu'un champ magnétique est appliqué au contact glissant à sec du couple Fe/Fe, l'adsorption de et de l'eau, et la désorption d'hydrogène ont été fortement accélérées par rapport à leur taux dans les conditions ordinaires sans champ magnétique.

II.13.3. Contact outil/pièce

Les travaux d'El mansori, Bagchi, Ghosh, Muju et Batainch sur le comportement tribologique d'outil de coupe par l'application d'un champ magnétique, ont révélé que l'application d'un champ magnétique sur le contact d'usinage conduit aux phénomènes surfaciques (O-C-P).

Bagchi et Ghosh [68-69], sont les premiers à avoir étudié l'effet d'une force électromotrice externe (EMF) créée par un champ magnétique sur les caractéristiques d'usure d'outils de coupe en HSS sur l'acier doux. Ainsi, leurs résultats montrent qu'une diminution de l'usure est constatée et que le facteur de gain est toujours positif.

Muju et Ghosh [65, 70, 71], ont présenté un modèle physique afin d'expliquer certains résultats obtenus lors des expériences faites avec un outil magnétisé en HSS (outil tournant sur l'acier doux et le laiton). Dans leurs observations, ils ont montré que cette technique permet une augmentation de la durée de vie des outils d'environ 40%, ainsi qu'une réduction de la taille des particules d'usure.

Batainch [29], a montré que cette technique permet une diminution de 10 % de l'usure de l'outil de coupe, et une augmentation de la température interfaciale de coupe pendant l'usinage en présence du champ magnétique. Ces études indiquent que l'application du champ magnétique se concentre au niveau de la couche superficielle du matériau, ce qui pourrait avoir pour effet de modifier son comportement mécanique ou la tribologie du contact (outil-copeau).

El mansori [26-28], a montré que l'effet du champ magnétique sur les mécanismes de frottement outil-copeau (position, morphologie de la zone primaire et contact outil-copeau) est de diminuer l'usure de l'outil de coupe et d'augmenter la durée de vie de l'outil de coupe.

CHAPITRE III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET TECHNIQUE DE MESURE

III.1. INTRODUCTION

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

L'opération de tournage des pièces mécanique est gouvernée par plusieurs paramètres fondamentaux et universels qui influent d'une façon directe sur les propriétés physiques et mécaniques des outils de coupe tels que : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe, le temps de coupe, et la lubrification.

Ainsi, l'objectif principal de ce travail est de déterminer l'influence du champ magnétique sur le comportement tribologique en usure d'un outil de coupe durant les opérations d'usinage. De plus, nous cherchons à mettre en relation les mécanismes d'endommagement d'outil de coupe avec les sollicitations thermomécanique à l'interface outil-copeau-pièce dans le cas de l'usinage avec et sans champ magnétique (les sollicitations mécaniques et thermiques subies par l'outil sont donc très importantes).

Pour étudier l'influence du champ magnétique H sur l'usure des outils de coupe, nous nous sommes basés essentiellement sur l'étude faite par M. K. Muju et A. Glosch [65, 70, 71] concernant l'action des mouvements de dislocation. Cette étude illustre l'amélioration de la durée de vie de l'outil de coupe en présence d'un champ magnétique. En effet, ces auteurs ont montré que cette technique permet une augmentation de la durée de vie des outils d'environ

40%, ainsi qu'une réduction de la taille des particules d'usure, El Mansori [26-28] a montré que l'effet du champ magnétique sur les mécanismes de frottement outil-copeau (position, morphologie de la zone primaire et du contact outil-copeau) entraîne une diminution de l'usure de l'outil de coupe et Batainch [29] a montré que cette technique entraîne un allongement de la durée de vie de l'outil de coupe de 10 %, malgré une augmentation de la température interfaciale pendant l'usinage. Ces dernières études montrent que l'application du champ magnétique se concentre au niveau de la couche superficielle du matériau, ce qui pourrait avoir pour effet de modifier son comportement mécanique ou la tribologie du contact outil-copeau.

Ce chapitre sera composé de deux grandes parties :

La première partie sera consacrée au travail purement expérimental où on présentera toutes les étapes, ainsi que les plaquettes de coupe utilisées. Une description détaillée du montage proposé pour la manipulation est également présentée.

La seconde partie concernera les différentes techniques et méthodes de caractérisation en utilisant : la perte de masse (l'usure), le microscope optique (Austria, Nr-348-557), la microscopie électronique à balayage (MEB) et la caméra infrarouge de marque ESCIL.

III.2. DEROULEMENT DU TRAVAIL EXPERIMENTAL

Afin de nous permettre de voir l'effet du champ magnétique sur les outils de coupe, on a commencé par révéler son importance sur l'usure au cours de la coupe, et plus spécialement la perte de masse de la plaquette en comparant l'allure de la courbe de la perte de masse avec et sans champ magnétique.

Dans un premier temps, nous avons pesé les plaquettes une par une dans leur état initial, et après chaque opération de coupe (aller et retour de l'outil). On refait la pesée des plaquettes à chaque fois pour avoir ainsi la variation de perte de masse en fonction des paramètres qu'on a changés.

Il est nécessaire de noter que la valeur de l'intensité du champ magnétique est déduite à partir de mesures effectuées à l'aide d'un ampèremètre et d'un calcul mathématique. La

valeur du champ magnétique est modifiée à chaque fois que l'on varie l'intensité du courant qui alimente la bobine.

Dans un second temps, nous avons varié les autres paramètres d'usinage fondamentaux qui régissent la coupe tels que : la vitesse de coupe (m/min), la vitesse d'avance (mm/tr), la profondeur de passe (mm), le temps de coupe (min) et la lubrification, et cela en appliquant un champ magnétique variable ($H = 5,5; 16,5$ et $28,5$ KA/m). On déduit du travail préliminaire précédent la perte de masse (W) à chaque fois qu'on change un des paramètres. Pour mieux voir cette variation, on compare les courbes obtenues en appliquant le champ magnétique avec celles obtenues sans champ, et cela pour trois situations différentes ($H = 5,5, 16,5$ et $28,5$ KA/m) avec et sans lubrification.

III. 3. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

III.3.1. Intensité du champ magnétique

La bobine employée est une bobine au fil de cuivre qui possède les caractéristiques reportées dans le tableau III.1.

NOMBRE DE SPIRES (N)	1600
Longueur de la bobine (L)	64 mm
Diamètre du fil de cuivre (D₁)	1,2 mm
Diamètre du noyau en acier ferromagnétique (D₂)	23 mm
Résistance de la bobine (R_B)	3,9 Ω

Tableau III.1. Caractéristiques de la bobine et du fil de cuivre

On peut donc calculer l'intensité du champ magnétique H pour un courant électrique I comme suit :

$$H = I \cdot \frac{N}{L} = 10,94 \cdot 10^3 \quad (\text{A/m}) \dots \dots \dots (\text{III.1})$$

L'intensité du champ magnétique H varie linéairement avec l'intensité I du courant électrique appliqué à la bobine (Fig. III.1).

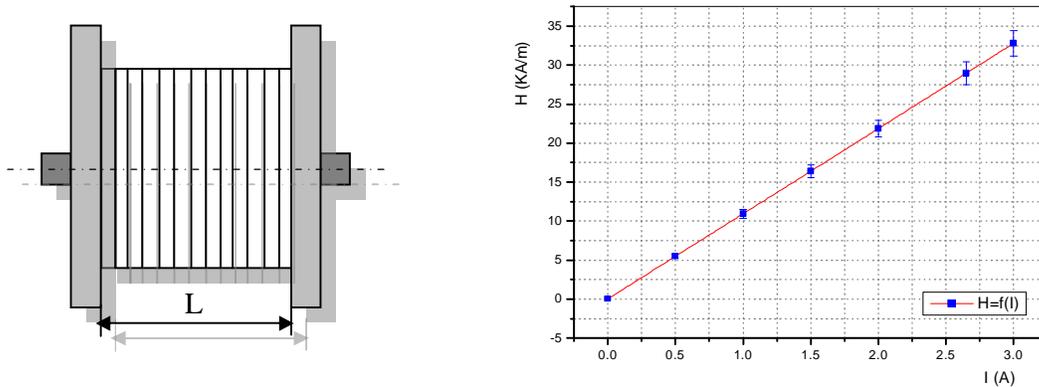


Fig.III.1. Intensité du champ magnétique en fonction du courant I .

III.3.2. Montage du dispositif expérimental

Lors de notre travail expérimental, nous avons utilisé le dispositif représenté sur la figure III.2. Le montage est composé essentiellement des constituants suivants :

- 1 : Caméra infrarouge ;
- 2 : Plaquette amovible en carbure métallique de forme rhombique ;
- 3 : Pièce à usiner ;
- 4 : Porte-pièce ;
- 5 : Ampèremètre ;
- 6 : Régulateur de voltage à courant alternatif, utilisé pour varier le champ magnétique en changeant le courant appliqué à la bobine ;
- 7 : Bobine de 1600 spires et de résistance égale à $3,9\Omega$, sert à la création du champ magnétique à l'intérieur de l'outil ;
- 8 : Corps d'outil en acier.

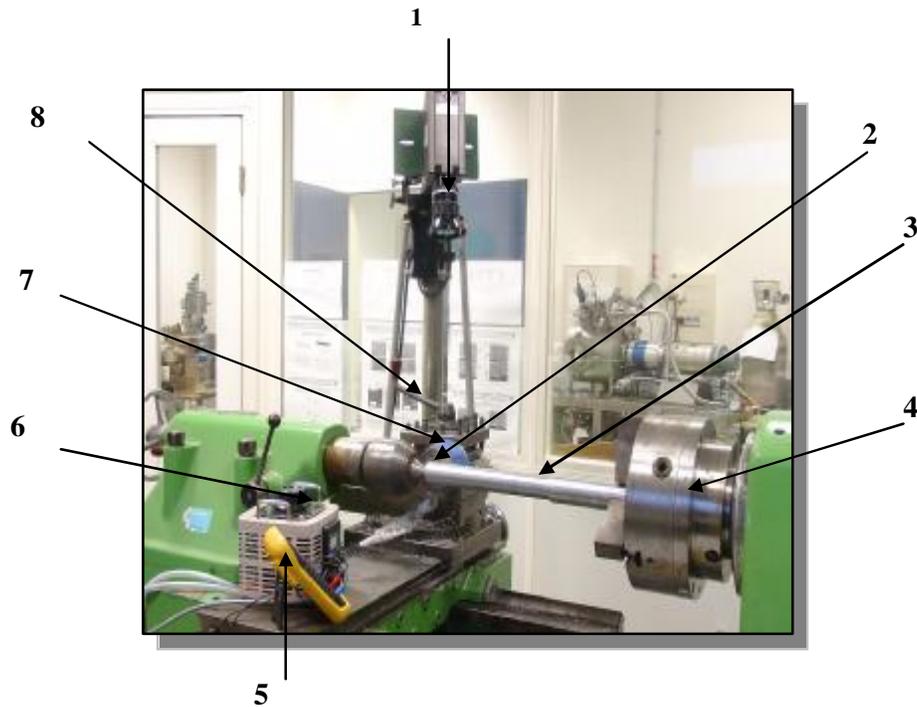


Fig. III.2. Vue générale de la chaîne d'expérimentation.

III.3.3. Description globale de la machine

La machine utilisée dans l'expérience est un tour parallèle universel de marque CAZENEUVE (Fig. III.2), modèle HB575, d'une puissance de moteur de $9,5 \cdot 10^3$ W. Elle possède les caractéristiques suivantes :

- Gamme des vitesses d'avance : 0,009 à 5,6 mm/tr,
- Gamme des vitesses de rotation : 12,5 à 2500 tr/min,
- Longueur de tournage : 1000 à 1500 mm,
- Hauteur des pointes au-dessus du banc : 200 à 250 mm,
- Distance entre pointes : 2000 à 4000 mm.

III.3.4. Description globale de l'outil de coupe : Dimensions des plaquettes, géométrie de la partie active et corps de l'outil de coupe

Les outils de coupe utilisés sous forme des plaquettes sont en carbure métallique obtenue par frittage et sont essentiellement composés de carbure de tungstène WC. Pour améliorer certaines propriétés, des additions de carbure de titane ou de tantale sont faites. Ces carbures sont caractérisés par leur haute réfractivité et des duretés très élevées. Les plaquettes de coupe utilisées (Fig.III.3) sont amovibles et de forme rhombique, de nuance P25 de carbure métallique (type CCMT09T308E-73), avec un rayon d'arrondi correspondant à 80° .



(a) Vue d'ensemble de la plaquette

(b) Vue agrandie de la plaquette

Fig.III.3. Représentation schématique de la plaquette utilisée en chariotage [72].

Durant toutes nos expériences, nous avons utilisé des plaquettes amovibles de forme losange et dont les dimensions sont représentées sur la figure III.4.

Les dimensions de la plaquette et le corps d'outil sont reportées sur les tableaux III.2 et III.3 :

<i>Dimensions (mm)</i>	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>S</i>	<i>h</i>	<i>m</i>	<i>m₁</i>
	0,8	9,52	9,57	3,97	4,40	2,20	1,21
<i>Angle de dépouille (°)</i>	5						

Tableau .III.2. Dimensions de la plaquette [72].

<i>Dimensions (mm)</i>	<i>b</i>	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>
	25	150	25

Tableau .III.3. Dimensions du corps d'outil [72].

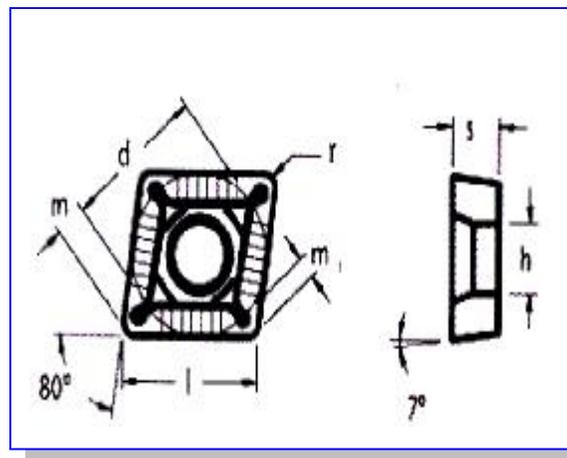


Fig. III.4. Forme et dimensions de la plaquette [72].

Avec :

- r : rayon de l'arête tranchante,
- d : largeur de la plaquette,
- I : longueur de la plaquette,
- S : épaisseur de la plaquette,
- h : trou de la plaquette,
- b : largeur de l'outil,
- L₁ : longueur de l'outil (corps + partie active),

- L_2 : longueur de la partie active.

La plaquette est fixée par vis, et est positionnée dans la direction où s'exercent les efforts de coupe. Le couple de serrage de la plaquette est fixé à 3 N.m. Le porte outil, de référence *SCLC2020K09 (D4010T)* [72] et de désignation *SCLCR/L2525M12* est muni d'une vis de serrage de la plaquette (Fig. III.5). La fixation globale du corps et de la plaquette est faite selon le schéma de la figure III.5.

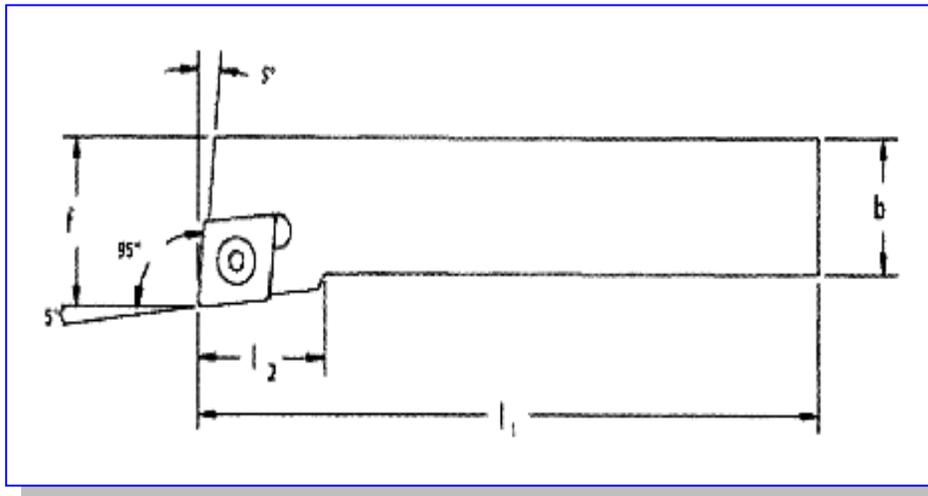


Fig. III.5. Fixation de la plaquette amovible sur le corps d'outil [72].

III.3.5. Description globale de la pièce usinée

Les opérations de tournage relatives aux essais d'usure ont été effectuées sur des éprouvettes rondes en acier non allié de nuance XC38 (Norme NF EN 10 083-1), de 60 mm de diamètre et de 300 mm de longueur et d'une dureté de 52 HRC. On prévoit un trou de centrage de 8 mm de diamètre (fixation entre pointes). Sa composition chimique est donnée dans le (tableau III.4).

<i>Eléments</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
<i>Teneur (%)</i>	0.38	0.66	0.27	0.035	0.035	0.40	0.40	0.10

Tableau III.4. Composition chimique en pourcentage massique du substrat (acier XC38).

III.4. TECHNIQUES UTILISEES POUR L'EXAMEN DES SURFACES

Pour suivre l'évolution structurale et caractériser l'état mécanique de nos échantillons, nous avons employé principalement les moyens suivants : la microbalance, le microscope optique universel à chambre photographique, la microscopie électronique à balayage (MEB) et la caméra infrarouge de marque ESCIL.

III.4.1. Evaluation de l'usure de la plaquette

Pour évaluer l'usure en question, nous avons utilisé la méthode de pesage qui consiste à peser l'échantillon (plaquette) avant et après chaque opération d'usinage à l'aide d'une microbalance de marque DHAUS, d'une précision de 10^{-4} g (Fig. III.6).



Fig.III.6. Microbalance de marque DHAUS.

III.4.2. Microscope optique

Un microscope métallographique de type REICHERT « Austria, Nr-348-557 » (Fig. III.7.) permet l'observation des échantillons, avec un grandissement de 5 (Epi V

16/0,25). Ce microscope est muni d'une caméra et d'une imprimante. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Mais compte tenu de sa faible résolution, il n'est pas possible de l'utiliser pour une observation fine d'objets rugueux de petite taille ; la microscopie électronique à balayage est alors mieux adaptée.



Fig. III.7. Microscope optique de type REICHERT.

III.4.3. Microscopie électronique à balayage MEB

Les microscopes électroniques à balayage (MEB) utilisés sont de type MEB Jeol 5600 LV (Électrons secondaires (SEI)- Electrons rétrodiffusées (BEI)). La tension d'accélération peut varier de 1 à 30 kV et les grossissements utilisés sont compris entre x35 et x50000. Quand aux dépôts, ils ne subissent aucune métallisation afin de ne pas gêner l'analyse quantitative du graphite. A chacun de ces microscopes électroniques est associée une sonde de microanalyse EDXS oxford instruments. Elle permet d'obtenir la répartition pondérale ou atomique des éléments présents sur la surface observée et ainsi de réaliser des cartographies de ces éléments (Fig. III.8.).



Fig.III.8. Microscopes électroniques à balayage MEB.

III.4.4. Mesure de la température d'interface

Pour mesurer la température à l'interface, nous avons utilisé une caméra infrarouge de marque ESCIL qui permet de prendre des photos. Elle présente les caractéristiques suivantes (Fig. III.9) :

- Plage de mesure : -10°C à 1500°C
- Sensibilité : $< 0,1^{\circ}\text{C}$
- Précision : $\pm 1^{\circ}\text{C}$
- Vitesse de prise de vue : $1/30$ s
- Température ambiante pendant les tests de 19°C au début et de 21°C à la fin.



Fig. III.9. Caméra infrarouge de marque ESCIL.

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leur discussion. Après une première partie sur l'étude expérimentale et technique de mesure, une analyse spécifique illustrée portera sur :

- L'influence du champ magnétique sur l'usure de l'outil de coupe ;
- L'influence du champ magnétique sur le mode d'usure de l'outil de coupe ;
- L'influence du champ magnétique sur la morphologie du copeau ;
- L'influence du champ magnétique sur la température de coupe.

IV.1. INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR L'USURE DE L'OUTIL DE COUPE

IV.1.1. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction de la vitesse de coupe

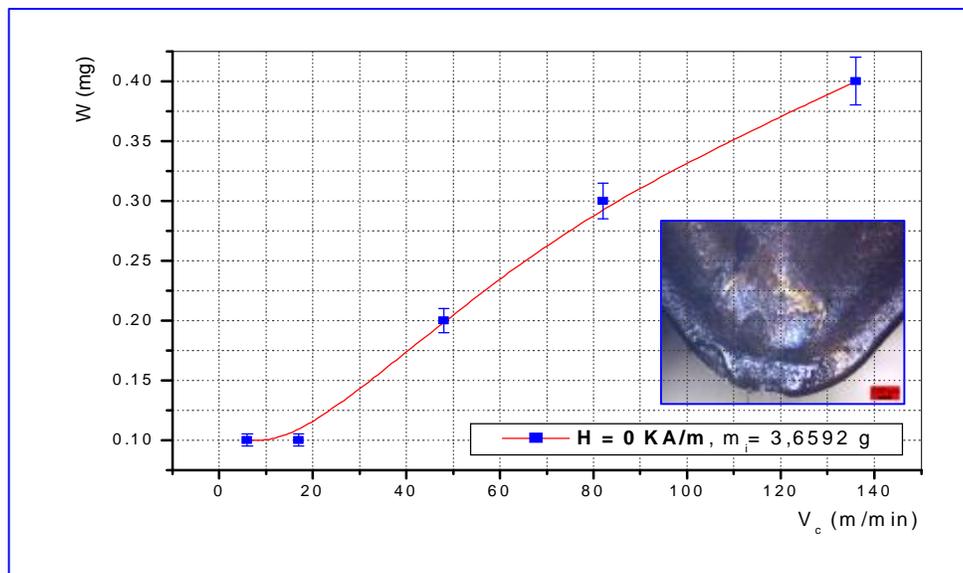
IV.1.1.1. Usinage sans lubrification

La vitesse de coupe est un facteur important dans les procédés d'usinage, plus cette vitesse de coupe est grande, plus le temps d'usinage est petit. La quantité de chaleur résultant du travail de coupe pendant un temps déterminé augmente avec la vitesse de coupe. Comme cette chaleur doit être évacuée en partie par le métal qui constitue l'outil, la température de la partie active de l'outil augmente, sa dureté diminue, son usure se produit plus rapidement (l'outil est rapidement hors d'usage).

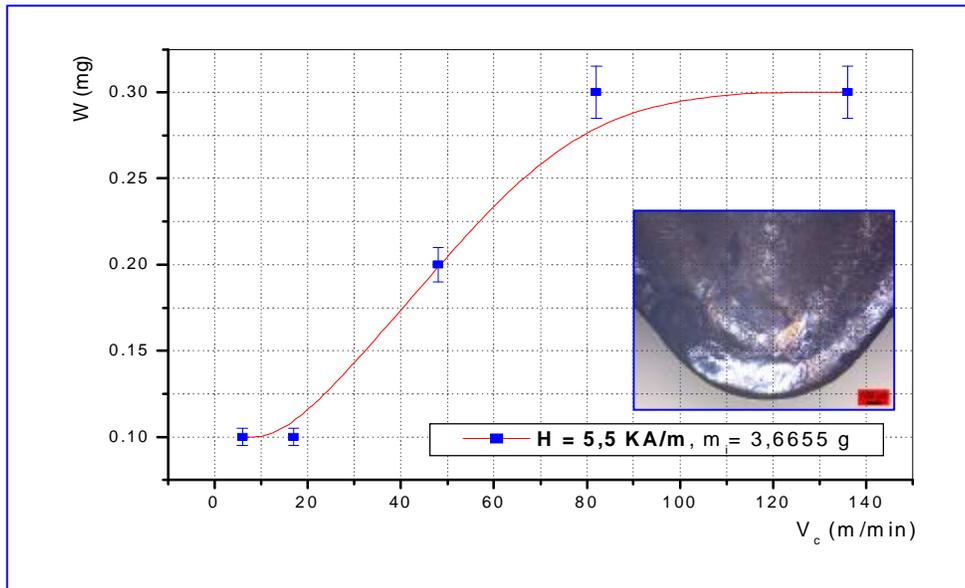
Les résultats obtenus avec et sans champ magnétique, sont représentés sur les figures IV.1 (a), (b), (c) et (d).

La figure IV.1 illustre l'évolution de l'usure en fonction de la vitesse de coupe quand H est fixé (pour chaque courbe). L'examen de la figure IV.1(a) montre que la perte de masse

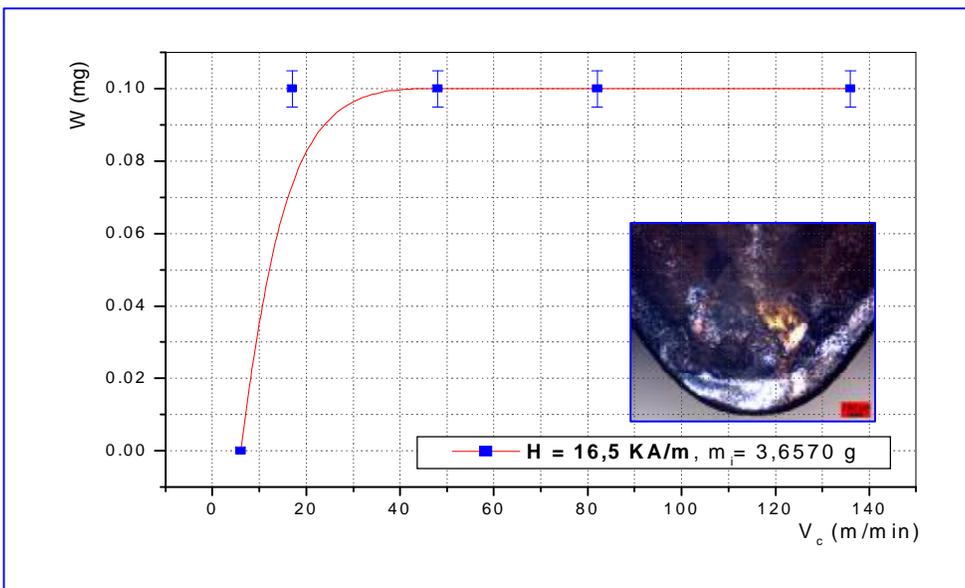
est maximale en absence du champ magnétique, elle vaut $400 \mu\text{g}$. L'usure est frontale (VB) et atteint 0.3mm . En revanche, la perte diminue jusqu'à $300 \mu\text{g}$ pour $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$ (Fig. IV.1(b)). Lorsque $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$ (Fig. IV.1(c)), la perte de masse est réduite à $100 \mu\text{g}$ et demeure loin de la valeur $VB = 0.3 \text{ mm}$ (critères d'usure NFE66505). Enfin, lorsque $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$ (Fig. IV.1(d)), la perte de masse avoisine $300 \mu\text{g}$. Cette valeur est la conséquence de la vitesse de coupe qui augmente l'usure de l'outil. Cette usure de nature mécanique est due aux contraintes permanentes ou cycliques, ainsi qu'à l'action du frottement. Dans ce cas, leur sévérité se trouve accentuée par les effets thermiques importants qui tendent à dégrader les qualités de résistance du matériau coupant. Dans l'essai de l'usinage, on voit que la perte de masse diminue lorsque l'intensité du champ magnétique augmente, montrant ici aussi l'effet bénéfique de la présence de celui-ci sur l'usure.



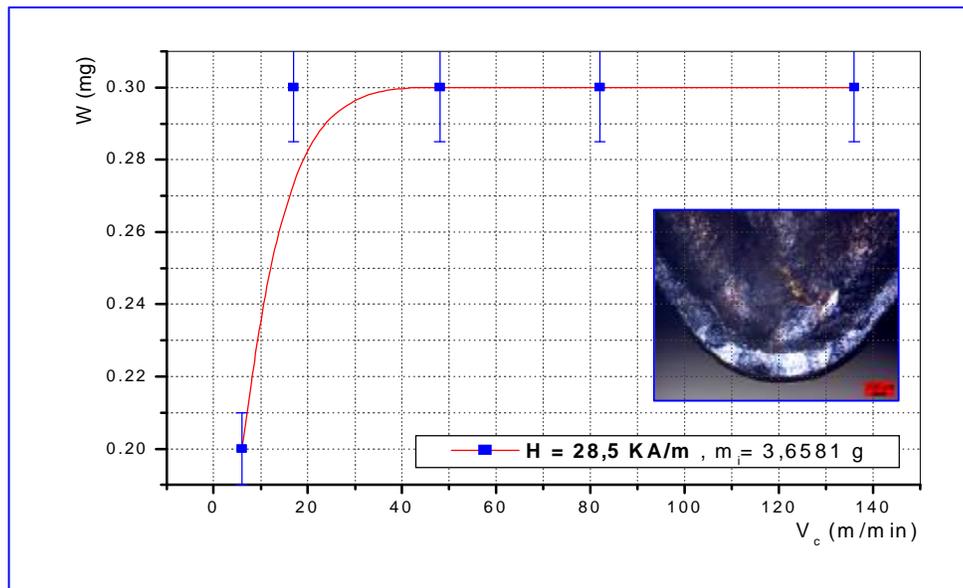
(a)



(b)



(c)



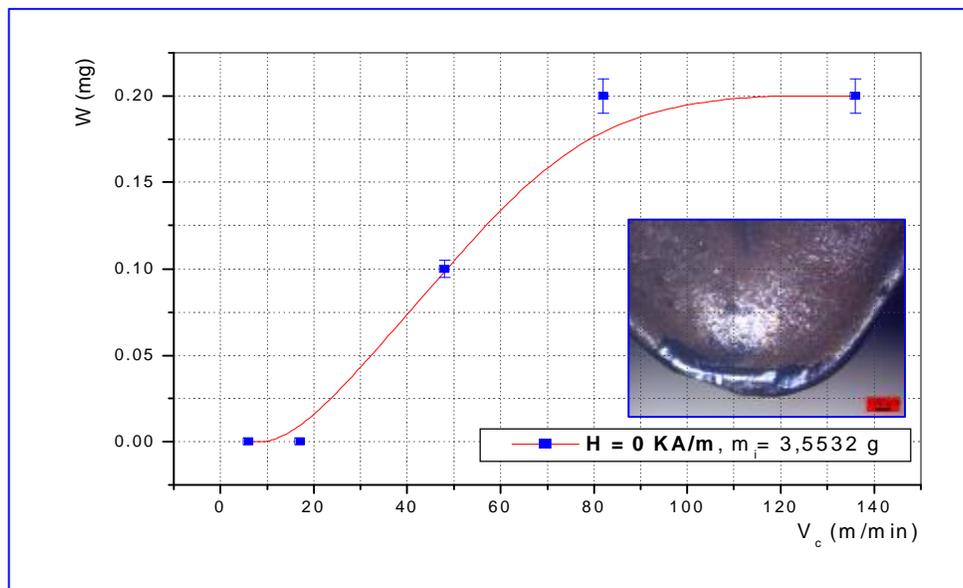
(d)

Fig. IV.1. Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la vitesse de coupe sans lubrification : $a_p = 0,5$ mm, $f = 125 \mu\text{m}\cdot\text{tr}^{-1}$, $l_c = 300$ mm, (a) $H = 0 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$.

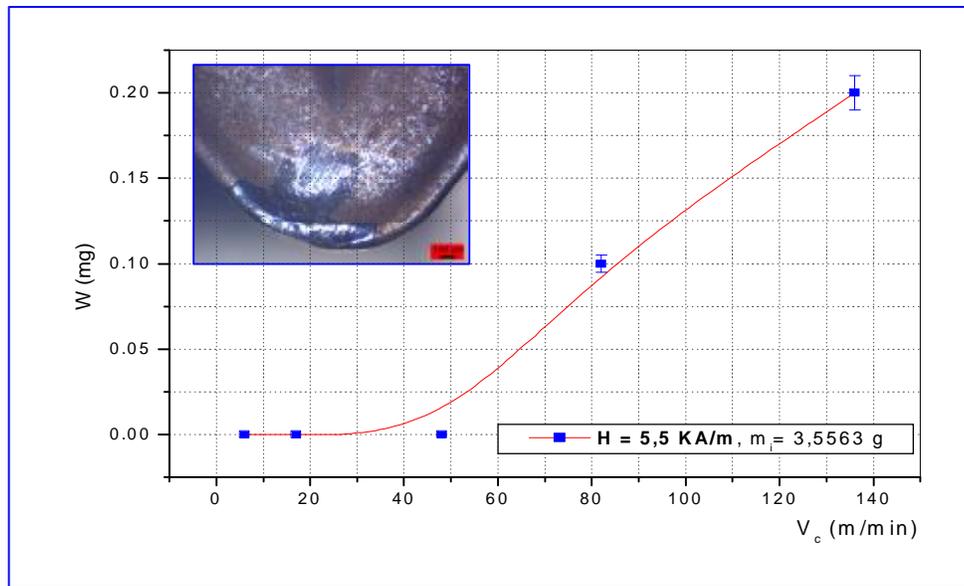
IV.1.1.2 Usinage avec lubrification

Les figures IV.5(a), (b), (c) et (d) montrent l'allure de la variation de la perte de masse (usure) en fonction de la vitesse de coupe. D'après la figure IV.5(a), en absence du champ magnétique, on constate que l'usure de l'outil vaut $200 \mu\text{g}$. Il est due à l'augmentation de la vitesse de coupe et ce malgré la lubrification hydrodynamique. Mais pour la figure IV.5(c), on observe que l'usure est réduite à $100 \mu\text{g}$ lorsque l'intensité du champ magnétique augmente. Ce dernier contribue à l'attraction des particules vers l'arête tranchante de l'outil en s'adhérant sous l'effet de la température interfaciale créée entre l'outil de coupe et la pièce usinée (malgré la lubrification hydrodynamique). Par contre, on constate que la perte de masse prend la même valeur par rapport aux figures IV.5(b) et 5(d) qui est à $200 \mu\text{g}$.

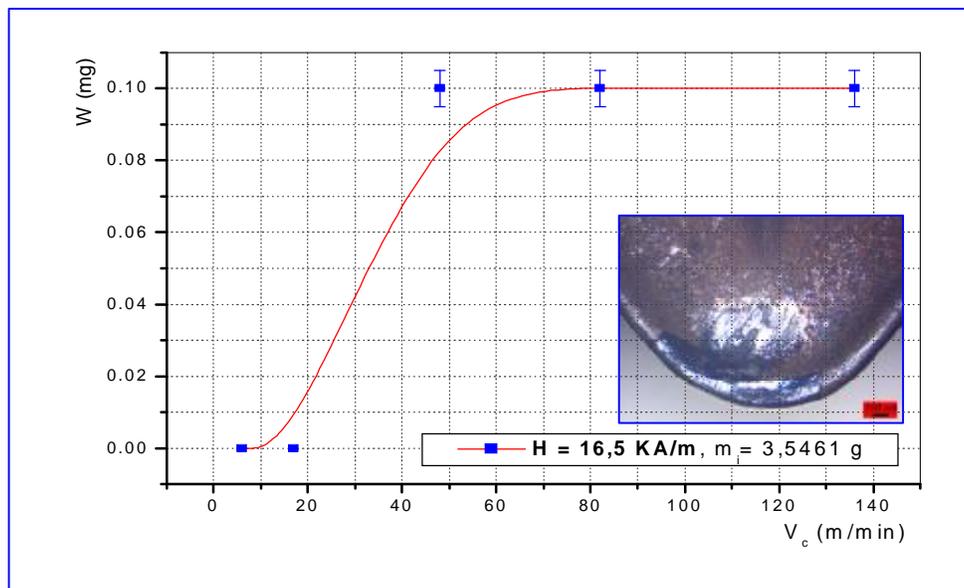
Enfin, la comparaison des deux figures IV.5(a) et IV.5(c), montre une légère diminution de l'usure de l'outil lors de l'élévation de l'intensité du champ magnétique, montrant ici aussi l'effet bénéfique de la présence de celui-ci sur l'usure. En ce qui concerne l'usure de l'outil en absence du champ magnétique est légèrement supérieure à celle avec champ magnétique. Mais d'une façon générale, l'effet de l'intensité du champ magnétique est ici relativement faible. On peut dire qu'en présence d'un champ magnétique, la lubrification n'a pas un grand effet sur l'usure de l'outil.



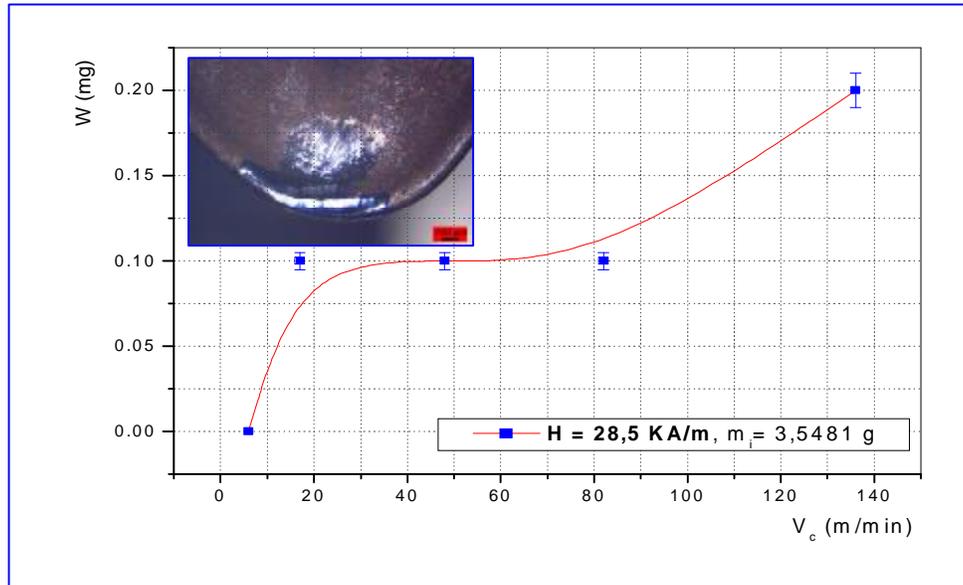
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. IV.5. Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la vitesse de coupe avec lubrification : $a_p = 0,5$ mm, $f = 125 \mu\text{m}\cdot\text{tr}^{-1}$, $l_c = 300$ mm, (a) $H = 0 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$.

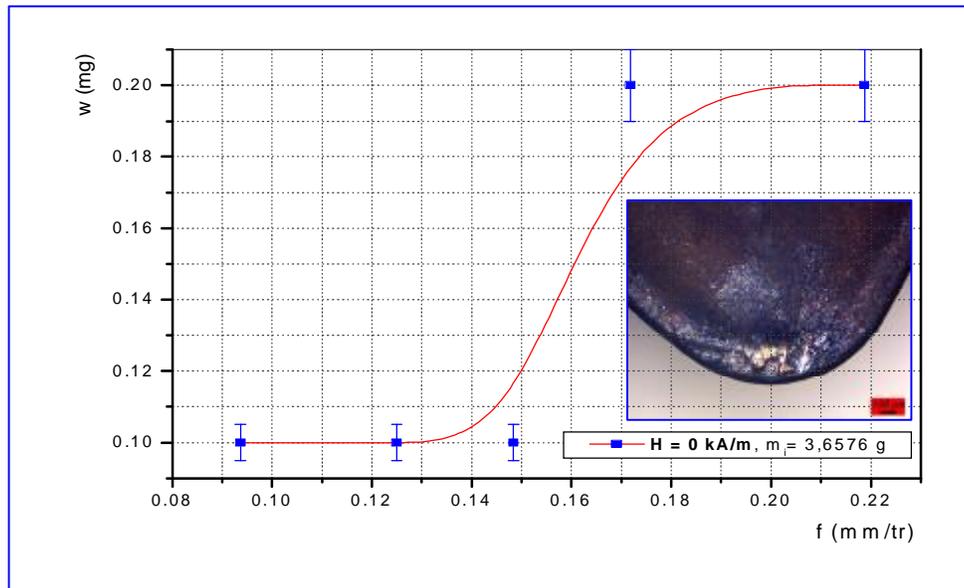
IV.1.2. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction de la vitesse d'avance

Au cours de l'usinage, la vitesse d'avance est aussi l'un des facteurs qui a une grande influence sur la durée de vie de l'outil de coupe du côté de l'enlèvement de copeaux. On constate qu'à chaque fois que la vitesse augmente, le taux de pression du copeau augmente modifiant ainsi sa forme granulaire en une forme de rouleau ce qui crée une pression destructive de l'arête tranchante réduisant la durée de vie de l'outil de coupe

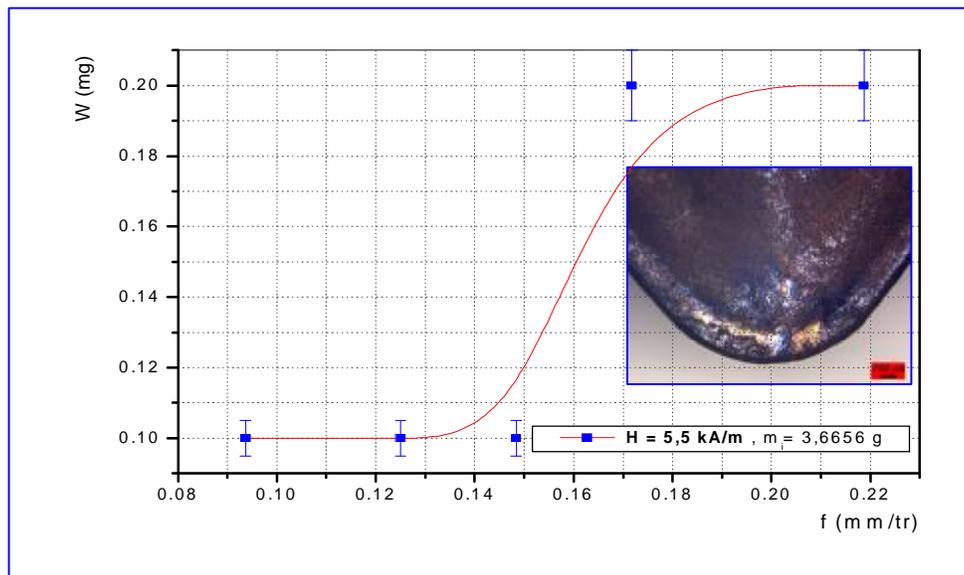
Pour mettre en évidence l'influence du champ magnétique sur la vitesse d'avance (mm/tr), on a réalisé les courbes représentées dans les figures IV.2(a), (b), (c) et (d). On observe que les quatre courbes de la figure IV.2 présentent la même allure.

En examinant la figure IV.2(a), on constate au début que l'usure est presque stable due à l'effet de la vitesse d'avance et à la nature des copeaux d'usinage, ce qui explique l'absence de la pression des copeaux sur la surface d'attaque de l'outil de coupe durant les opérations d'usinage. Dans la deuxième partie, on voit une augmentation de l'usure de l'outil due au phénomène d'adhésion. Dans la dernière partie, la courbe prend une certaine stabilité du fait que le copeau enlevé a une forme hélicoïdale ayant un axe parallèle à la face d'attaque, c'est-à-dire, ne crée aucune pression sur la partie coupée. Pour les mêmes conditions d'usinage, on peut observer que la section de copeau varie, la taille de matière coupée variant linéairement avec l'intensité du champ magnétique et la vitesse d'avance.

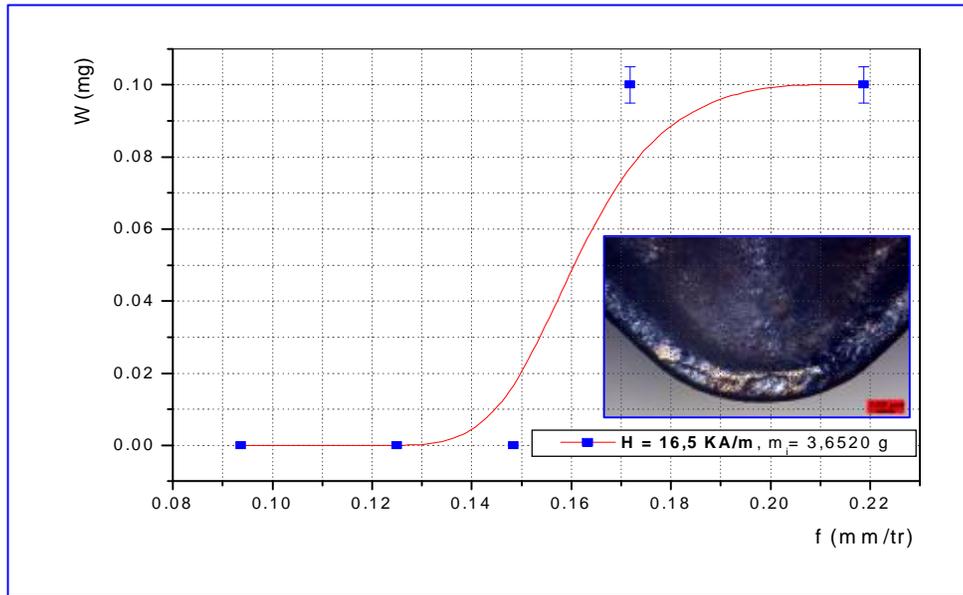
En comparaison avec les figures IV.2(b), (c) et (d), on remarque que la perte de masse est égale à 100 μ g, est plus petite que celle enregistrée sur la figure IV.2(a) qui est égale à 200 μ g. Cela signifie que la dureté augmente en fonction de l'intensité du champ magnétique. Ce durcissement est expliqué par le mouvement des dislocations qui produit une augmentation de défauts [70].



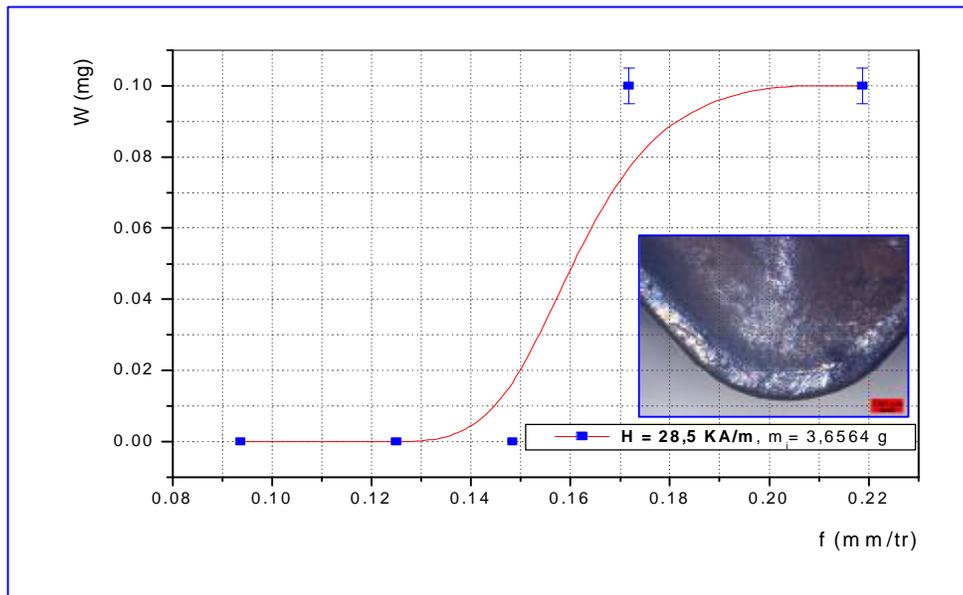
(a)



(b)



(c)



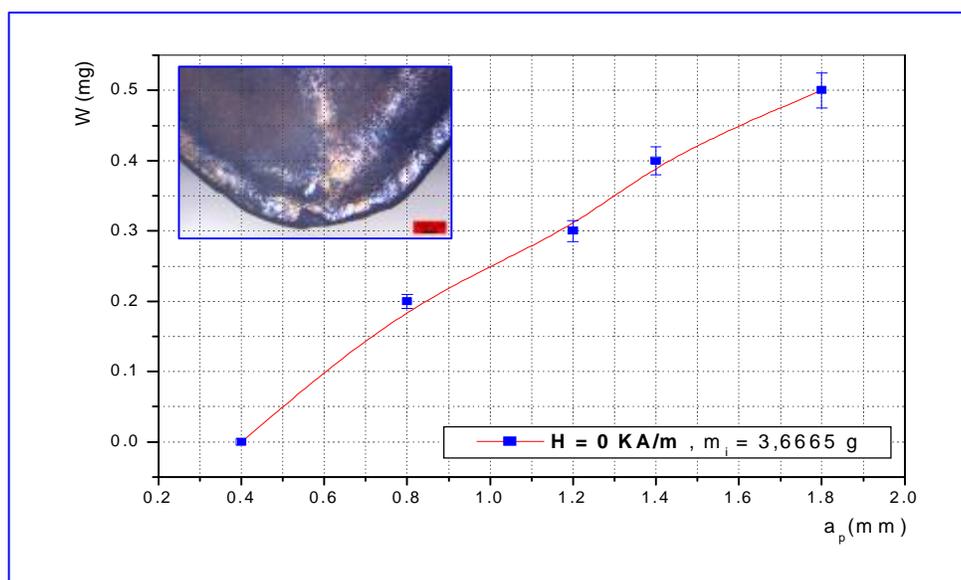
(d)

Fig. IV.2 Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la vitesse d'avance sans lubrification : $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

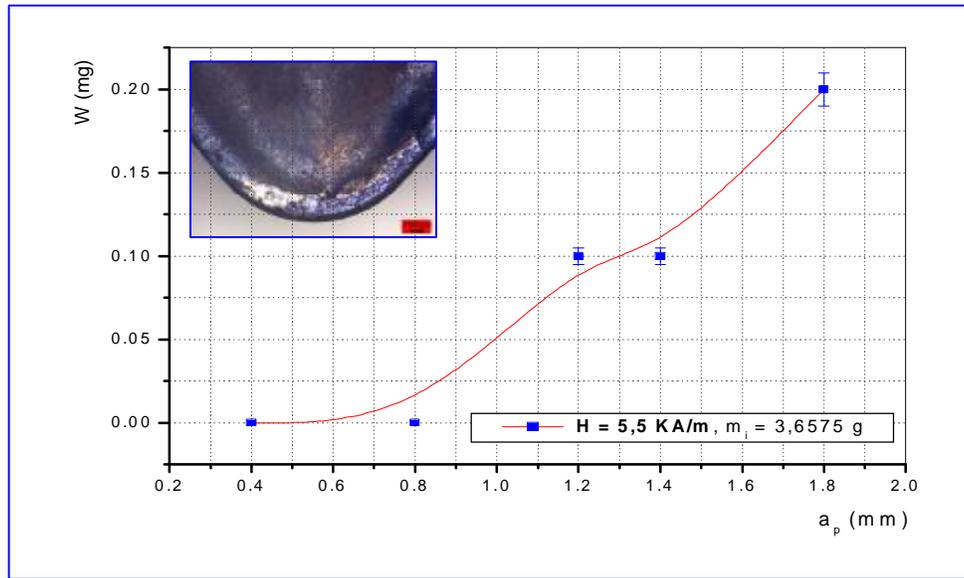
IV.1.3. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction de la profondeur de passe

Les figures IV.3(a), (b), (c) et (d) illustrent l'évolution de l'usure de l'outil en fonction de la profondeur de passe, en mm, avec et sans champ magnétique. Toutes les courbes prennent presque la même allure. D'après la figure IV.3(a), on constate une usure faible dans la première partie, à cause des variations de la profondeur de passe c'est-à-dire la variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur le long de l'arête tranchante. La deuxième partie, on voit une augmentation de l'usure de l'outil due à la pression spécifique des copeaux sur la face d'attaque de l'arête tranchante. D'un autre côté, avec l'augmentation a_p , les conditions d'usinage deviennent sévères avec l'augmentation de la section du copeau (Fig. IV.3). L'accroissement des efforts de coupe est induit par l'élévation de la quantité de matière à enlever. A partir d'une profondeur de passe de 1,2 mm, les efforts de pénétration et d'avance sont très importants (Fig. IV.3(a)). Ils correspondent à des conditions d'usinage non souhaitables compte tenu du rayon de pointe de l'outil.

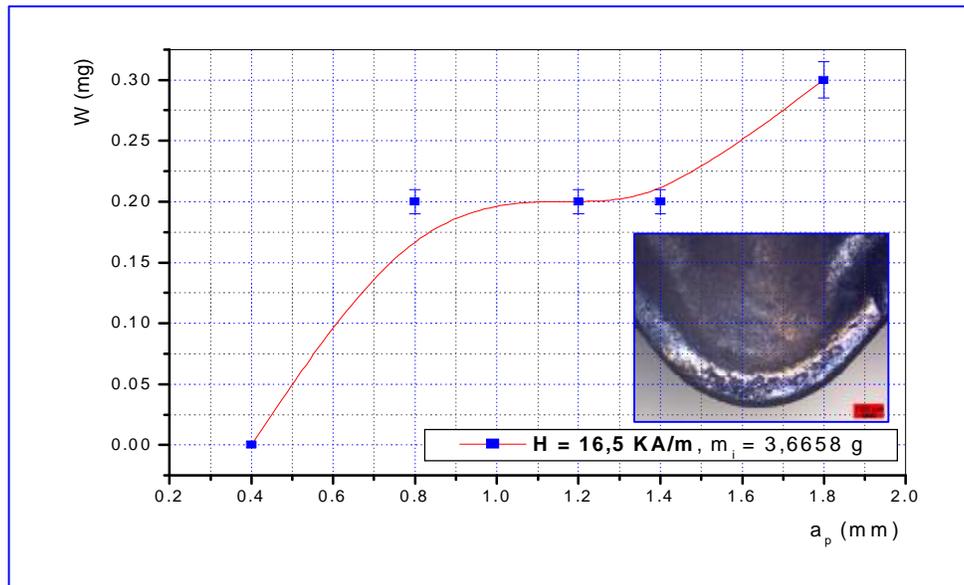
L'observation des figures IV. 3(b), (c) et (d), montre que la perte de masse en présence de champ magnétique est très importante, équivalente à 200 μg . Toutefois, elle reste limitée par rapport à celle mesurée en l'absence de champ magnétique qui est de 500 μg . En plus, on conclut que l'application du champ magnétique réduit les contraintes de cisaillement de contact à l'interface outil-copeau-pièce en facilitant le glissement de l'outil dans le cas où ce dernier est en recul [63-64]. Lors de la coupe, la taille des dents de scie des copeaux est proportionnelle aux pressions spécifiques de coupe.



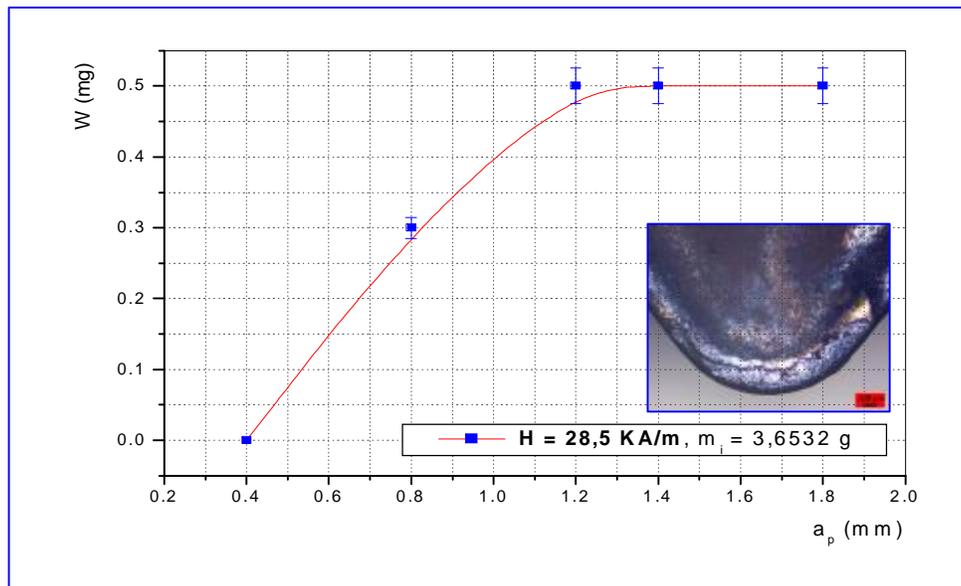
(a)



(b)



(c)



(d)

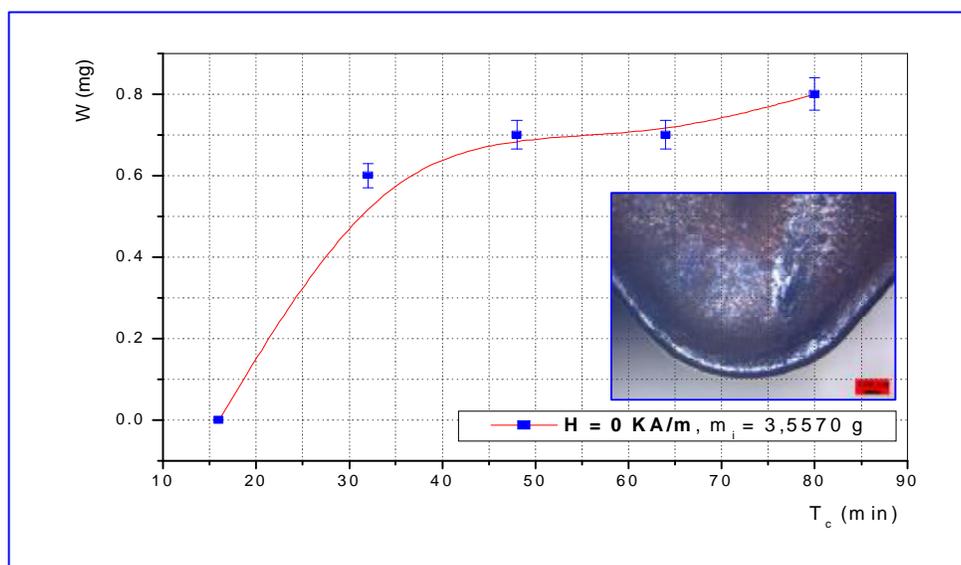
Fig. IV.3 Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la profondeur de passe sans lubrification : $f = 125 \mu\text{m}\cdot\text{tr}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$.

IV.1.4. Evolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction du temps de coupe

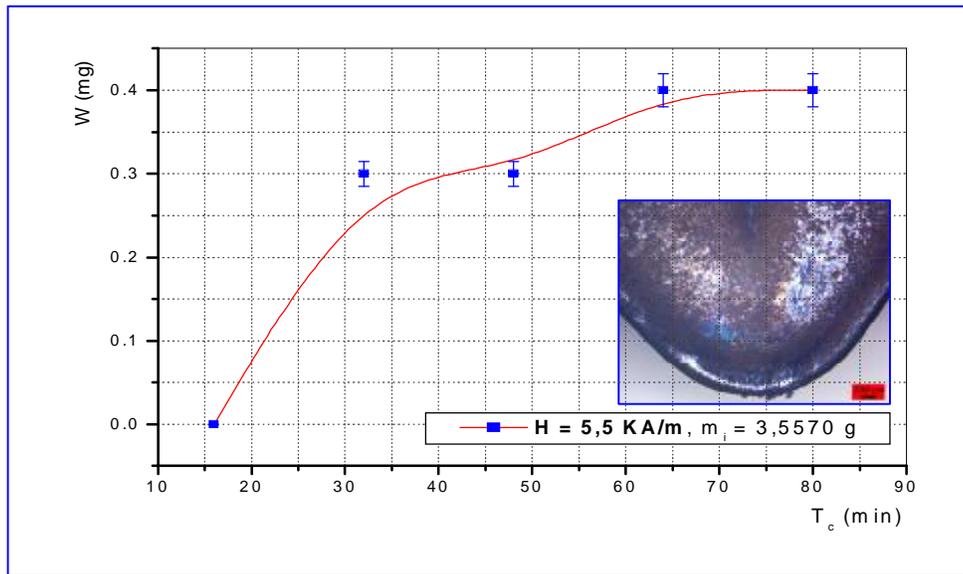
Les courbes de la figure IV.4, représentent l'évolution de l'usure de l'outil de coupe en fonction du temps de coupe (min), pour différentes valeurs de l'intensité du champ magnétique ($H=0$; 5,5 ; 16,5 et 28,5 KA/m).

Au début de la courbe de la figure IV.4(a), on remarque une usure élevée en absence du champ magnétique (diminution rapide de l'usure) à cause de l'effort spécifique. On a aussi constaté, lors de l'usinage une forte augmentation des efforts radial c'est-à-dire les efforts de coupe spécifiques augmentent avec le temps d'usinage (rodage, stabilisation puis usure rapide). Cependant, la perte de masse, est très faible en présence du champ magnétique ce qui a été observé après 80 minutes de l'opération. De plus, l'usure n'est pas proportionnelle à la durée d'usinage, car plusieurs stades d'usure se succèdent ; rodage de l'outil, stabilisation de l'usure puis usure rapide).

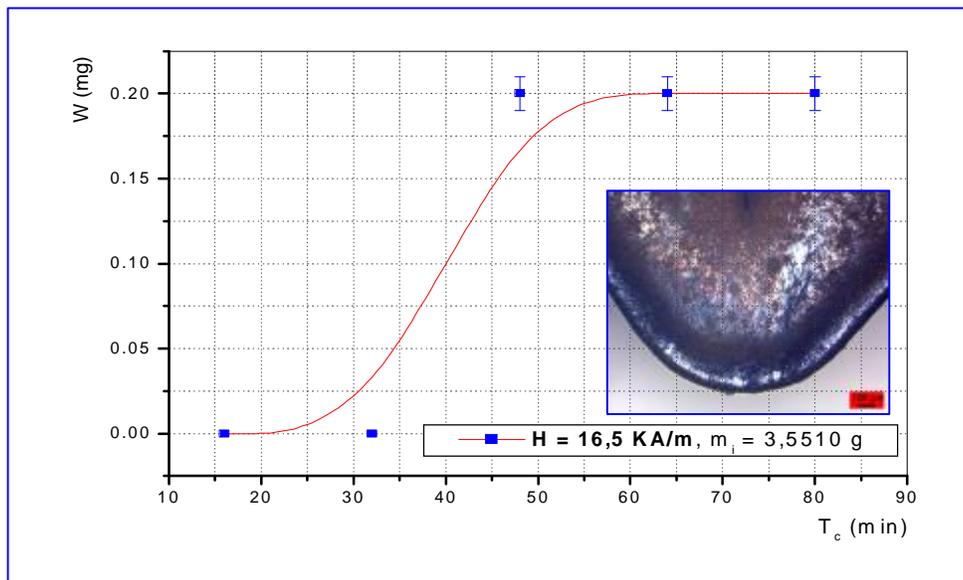
De plus, on observe sur les trois courbes des figures IV.4(b), (c) et (d) que l'usure est égale à $200\mu\text{g}$, par contre sur la figure IV.4(a) la perte de masse est égale à $800\mu\text{g}$. On remarque que l'application d'un champ magnétique dans le contact réduit l'usure de l'outil. Cette dernière présente un minimum pour une intensité du champ magnétique comprise entre 16,5 et 28,5 $\text{KA}\cdot\text{m}^{-1}$. Il apparaît qu'en absence d'un champ magnétique, l'usure de l'outil est plus grande qu'en présence de ce champ magnétique, ce qui indique que ce dernier exerce une influence favorable.



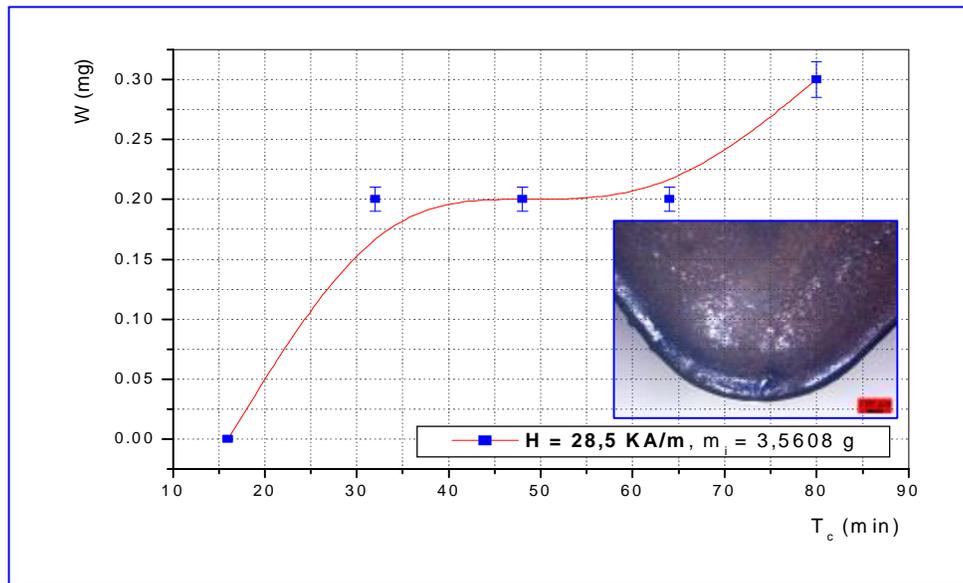
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. IV.4. Evolution de la perte de masse (usure) en fonction du temps de coupe sans lubrification : $a_p = 0,5$ mm, $f = 125 \mu\text{m}\cdot\text{tr}^{-1}$, $l_c = 300$ mm, (a) $H = 0 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA}\cdot\text{m}^{-1}$.

IV.2. OBSERVATIONS ET ANALYSES DU MODE D'USURE DES OUTILS DE COUPE

IV.2.1. Contrôle de l'usure des zones de coupe des outils

Le rayon de pointe de l'outil joue un rôle important dans la qualité de l'état de surface de la pièce usinée qui est directement lié à l'avance. Avec un grand rayon, un bon état de surface peut être réalisé avec des avances plus importantes. Un grand rayon répartit aussi l'effort de coupe sur une plus grande longueur, ce qui améliore généralement la durée de vie de l'outil. Pour conduire une observation précise, nous nous sommes basés sur les différents modes (types) d'usure obtenus.

Celles-ci ont été effectuées par microscopie optique et microscopie électronique à balayage (MEB). La comparaison des mesures de l'outil de coupe a été faite avec et sans lubrification, en présence et en absence de champ magnétique et avec différents paramètres de coupe.

Sur la figure IV.6, on observe l'état initial de l'outil de coupe avant l'usinage (non soumis à aucune contrainte : la surface de coupe, la surface de dépouille et le rayon de pointe ne présentent aucune déformation et sont par conséquent intacts).

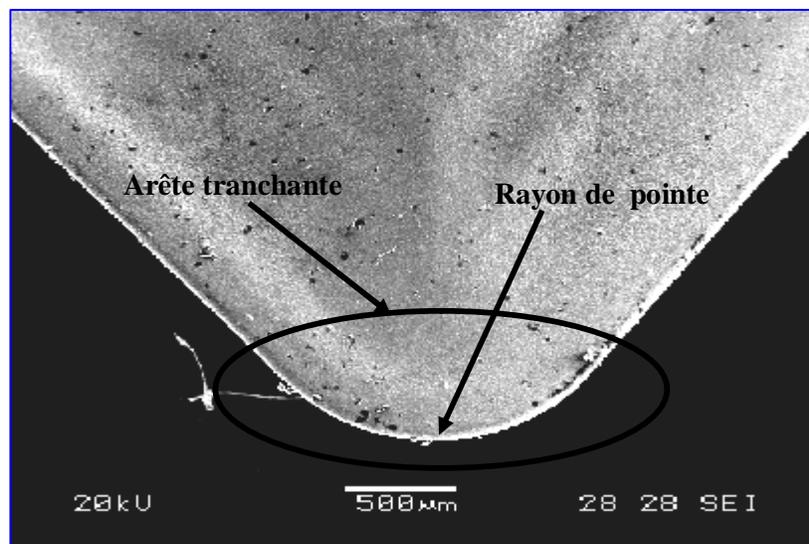


Fig.IV.6. Etat initial de l'outil de coupe.

IV.2.2. Morphologie de l'usure en fonction de la vitesse de coupe sans lubrification**IV.2.2.1. Usinage sans lubrification**

Le mode principal d'usure des outils de coupe est l'usure frontale qui a lieu sur la pointe de l'outil et sur l'arête principale comme conséquence du frottement entre l'outil de coupe, les particules des copeaux d'usinage et la pièce usinée.

Les photographies IV.7 comparent les modes d'usure sur les arêtes principales des outils après usinage de 300mm. De la figure IV.7(a), il ressort que :

- Usure sur la surface d'attaque (usure cratère) moyenne engendrée par l'absence de la lubrification et la vitesse de coupe choisie;
- Usure sur la surface de dépouille très faible causée par deux paramètres important : la température interfaciale entre l'outil-copeau-pièce et l'effet des contraintes sur l'arête tranchante;
- Usure par déformation plastique très faible sur le rayon de pointe due aux efforts spécifiques de coupe et à l'augmentation de température dans le rayon de pointe.

Pour connaître l'influence du champ magnétique sur le mode d'usure des outils de coupe, on a procédé à une analyse des photographies Fig. IV.7(b), (c) et (d) et on a pu observer les modes (types) d'usure. De plus, en observant la variation des photographies, on peut distinguer trois régimes d'usure:

- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend une seule nature : usure en cratère ;
- A intensité moyenne, $H = 16, 5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend une seule nature : usure en cratère ;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28, 5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend deux natures : usure en cratère et usure par arête rapportée (copeau adhérent). Lorsque le copeau

glisse sur la face de dégagement de l'outil, un frottement intense engendre des élévations de température localisées, des fusions et des micro-soudures.

Les résultats montrent que la présence du champ magnétique dans le contact d'usinage conduit à une diminution de l'usure et modifie radicalement la nature d'usure. Il y a une intensité critique du champ magnétique $H = 16,5 \text{ KA/m}$, pour laquelle l'usure de l'outil de coupe est minimale et le rayon de pointe de coupe est préservé. En présence du champ magnétique (Fig. IV.7(d)), les particules des copeaux d'usinage collées à la surface d'attaque de l'outil de coupe sont plus fines et plus nombreuses que dans le cas en la présence de champ magnétique ($H = 28,5 \text{ KA/m}$).

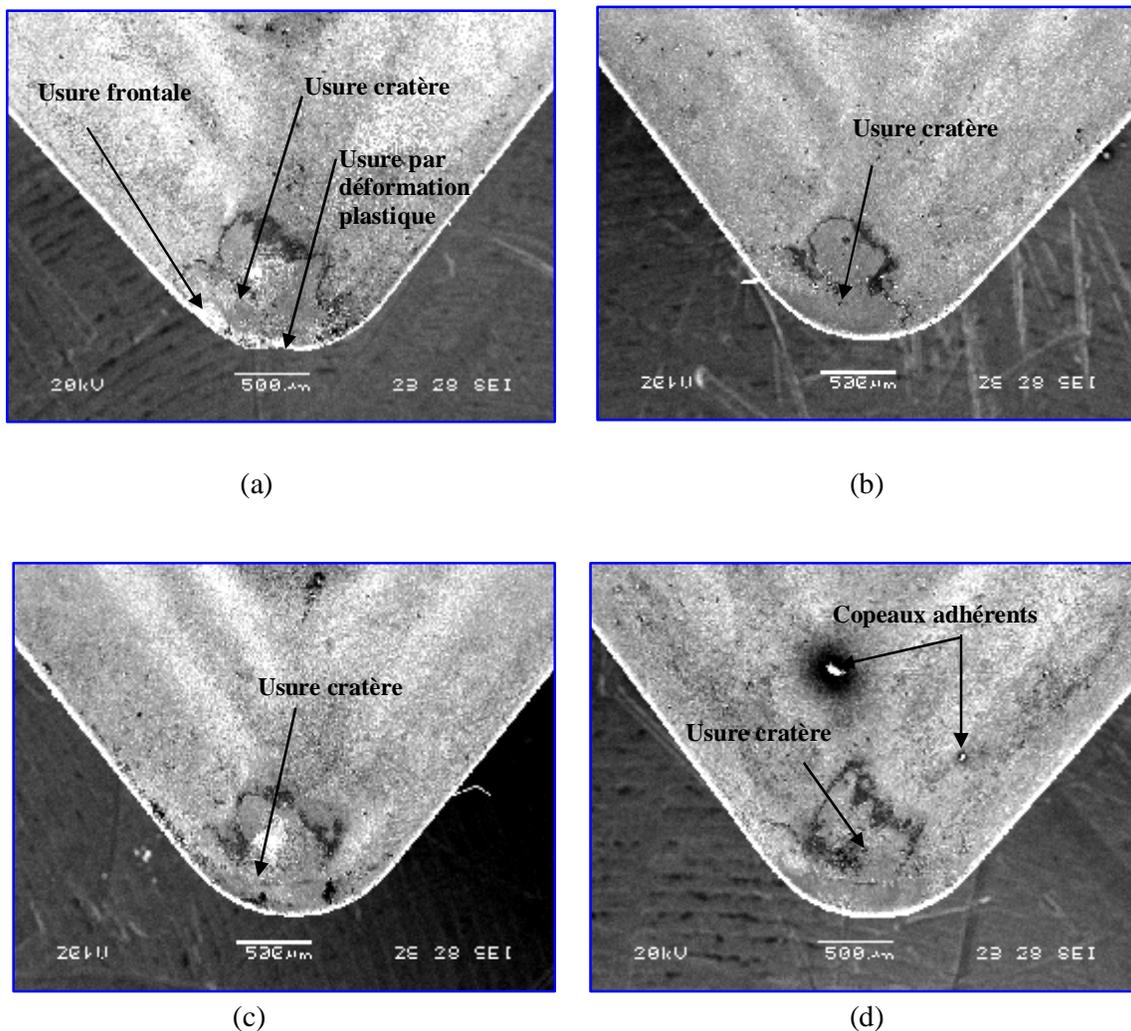


Fig. IV.7. Observations microscopiques au MEB de l'arrondi du bec de l'outil, sans lubrification : $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 125 \text{ } \mu\text{m/tr}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

IV.2.2.2. Usinage avec lubrification

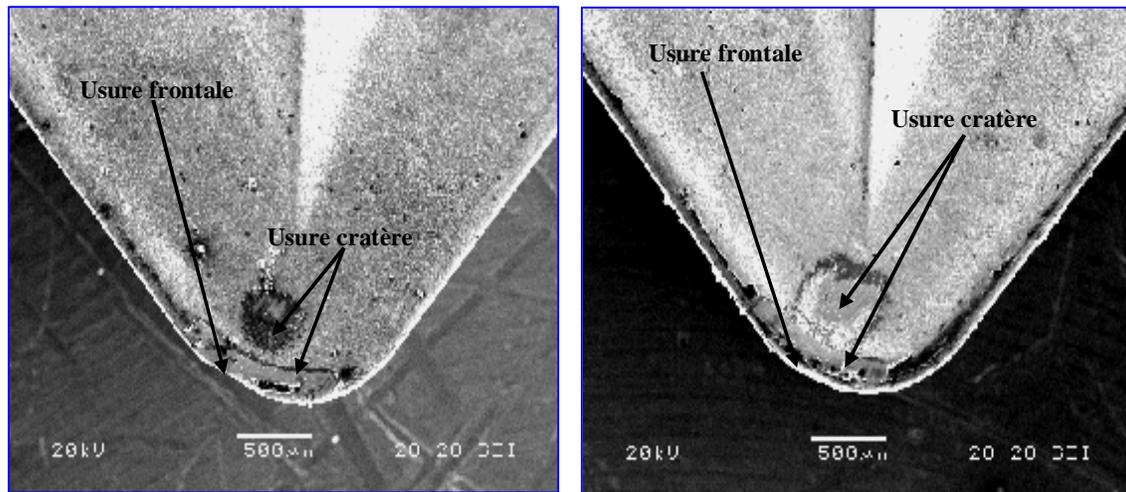
Les photographies IV.8(a), (b), (c) et (d) montrent l'image des surfaces ayant été usinées sous différentes conditions expérimentales, avec ou sans champ magnétique. D'après la figure IV.8(a), on voit que l'évolution du mode d'usure est proportionnelle à la vitesse de coupe. On constate sur cette figure que l'usure prend deux natures :

- Usure sur la surface d'attaque (usure cratère) moyenne engendrée par l'existence de températures élevées au contact copeau-outil entraînant une diffusion importante et l'effort de coupe et la vitesse de coupe choisie ;
- Usure sur la surface de dépouille très faible causée par deux paramètres important : la température interfaciale entre l'outil-copeau-pièce et l'effet des contraintes sur l'arête tranchante.

Pour déterminer le cycle d'influence du champ magnétique sur le mode d'usure des outils de coupe, on examine les figures IV.8(b), (c) et (d) qui montrent bien les trois régimes d'usure:

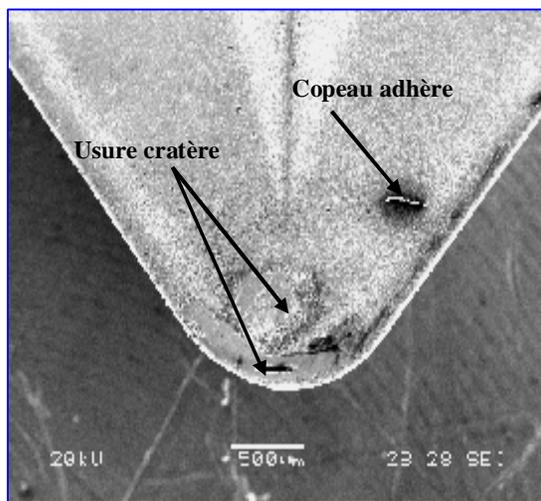
- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend deux natures : usure en cratère et usure en frontale ;
- A intensité moyenne, $H = 16,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend deux natures : usure en cratère et usure par copeau adhérent ;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend une seule nature : usure en cratère.

Ces résultats montrent que la présence du champ magnétique autour du contact d'usinage réduit la force de cisaillement à l'interface, en facilitant le glissement, ce qui peut diminuer l'endommagement des outils de coupe dû à la déformation plastique. De plus, dans le contact soumis à un champ magnétique, on obtient une diminution importante de l'usure avec le changement considérable du mode d'usure.

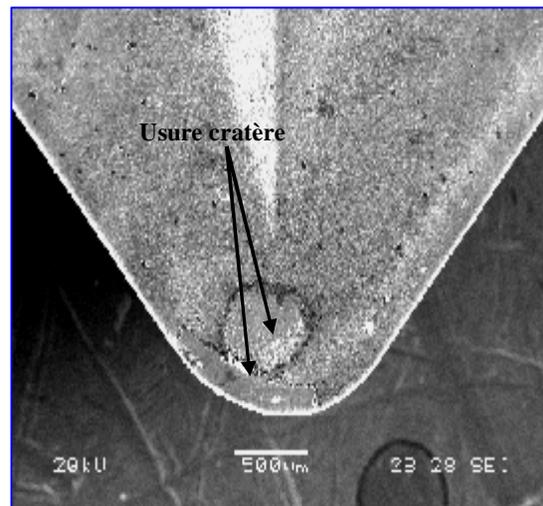


(a)

(b)



(c)



(d)

Fig. IV.8. Observations microscopiques au MEB de l'arrondi du bec de l'outil, avec lubrification : $a_p = 0,5 \cdot 10^{-3}$ m, $f = 125$ μm/tr, $l_c = 300$ mm, (a) $H = 0$ A.m⁻¹, (b) $H = 5,5$ KA.m⁻¹, (c) $H = 16,5$ KA.m⁻¹, (d) $H = 28,5$ KA.m⁻¹.

VI.2.3. Morphologie de l'usure en fonction du temps de coupe

Les photographies IV.9(a), (b), (c) et (d) montrent la morphologie de l'usure sur l'arête tranchante au cours du temps. Sur la figure IV.9(a) on peut observer deux formes de mode d'usure développées à savoir :

- Usure sur la surface de coupe (usure cratère) moyenne engendrée par l'absence de la lubrification et la vitesse de coupe choisie ;
- Usure sur la surface de dépouille très faible causée par deux paramètres important : la température interfaciale entre l'outil-copeau-pièce et l'effet des contraintes sur l'arête tranchante.

Toujours pour connaître l'influence du champ magnétique sur le comportement de mode d'usure, on examine les photographies IV.9(b), (c) et (d) qui montrent bien les trois régimes d'usure:

- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend une seule nature : usure en cratère ;
- A intensité moyenne, $H = 16,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend une seule nature : usure en cratère ;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend deux natures : usure en cratère et usure en frontale.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que la présence du champ magnétique autour de contact conduit à une augmentation de la dureté de l'outil. Ce durcissement est dû au mouvement des dislocations qui génère une augmentation de défauts [70-71]. Par ailleurs, ces derniers résultats montrent que l'application du champ magnétique se concentre au niveau de la couche superficielle du matériau, ce qui pourrait avoir pour effet de modifier le comportement mécanique et la tribologie de l'outil de coupe [29].

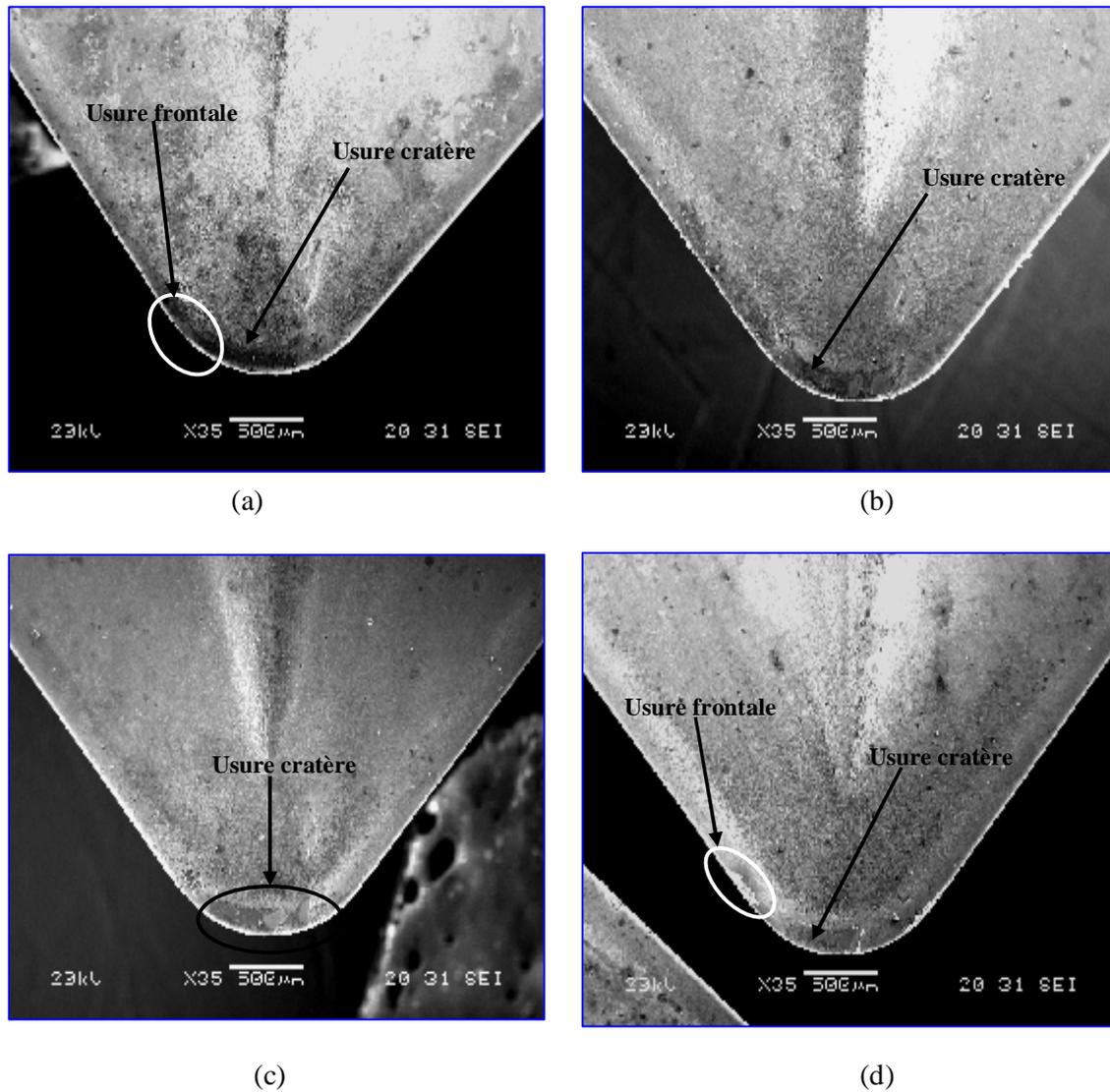


Fig. 4. Observations microscopiques au MEB de l'arrondi du bec de l'outil (Tc):
 $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 125 \text{ } \mu\text{m/tr}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$,
(c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

IV.2.4. Morphologie de l'usure en fonction de la profondeur de passe

Toutes les arêtes de coupe sont testées avec et sans champ magnétique. La photographie IV.10 montre les différentes usures qui ont été observées. D'après la figure IV.10(a), on constate trois types de dégradation qui sont :

- Usure sur la surface d'attaque (usure cratère) moyenne engendrée par l'absence de la lubrification et la vitesse de coupe choisie ;
- Usure sur la surface de dépouille très faible causée par deux paramètres important : la température interfaciale entre l'outil-copeau-pièce et l'effet des contraintes sur l'arête tranchante ;
- Usure par déformation plastique trais faible sur le rayon de pointe due aux efforts spécifiques de coupe et à l'augmentation de température dans le rayon de pointe.

Tandis que sur les figures IV.10(b), (c) et (d), on remarque plusieurs formes de nature d'usure qui montrent bien les trois régimes d'usure:

- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend trois natures : usure en cratère, usure par arête rapportée et usure par écaillage de l'arête tranchante de coupe. Ce dernier est causé essentiellement par deux paramètres importants : la variation de la température interfaciale entre outil-copeau-pièce et l'effet de l'effort spécifique de coupe ;
- A intensité moyenne, $H = 16, 5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend trois natures : usure en cratère, usure par copeau adhérent et usure par écaillage de l'arête tranchante de coupe;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28, 5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend deux natures : usure en cratère et usure par écaillage de l'arête tranchante de coupe.

La profondeur de coupe est aussi un paramètre important. Les photographies (fig. IV.10(b), (c) et (d)) montrent que la nature d'usure change avec l'intensité du champ magnétique. De plus, dans l'essai de l'usinage, on voit que les modes d'usure diminuent

lorsque l'intensité du champ magnétique augmente, montrant aussi l'effet bénéfique de la présence de celui-ci sur l'usure.

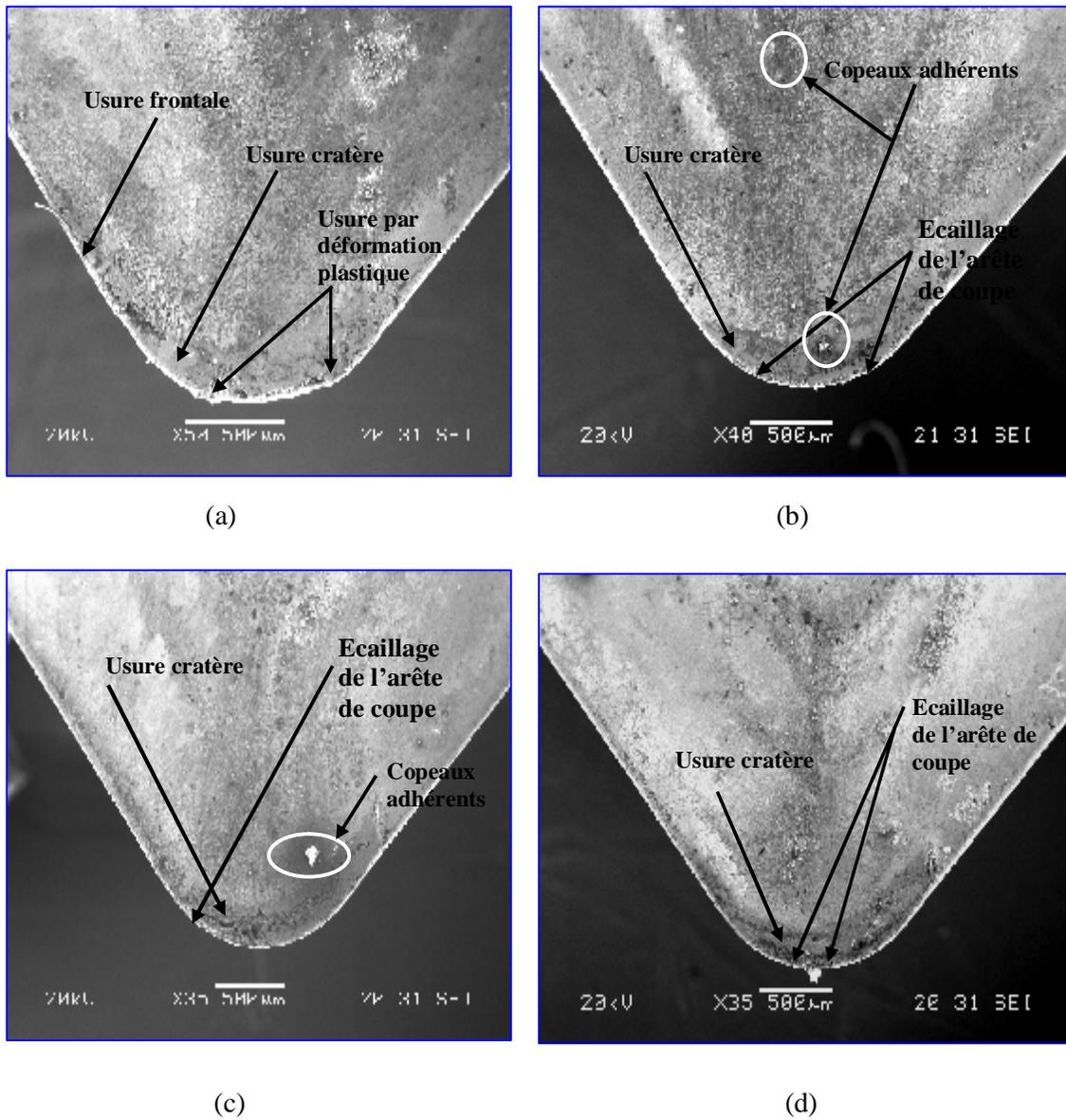


Fig. IV.10. Observations microscopiques au MEB de l'arrondi du bec de l'outil (a_p) :
 $f = 125 \mu\text{m/tr}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$,
 (c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

IV.2.5. Morphologie de l'usure en fonction de la vitesse d'avance

Les photographies IV.11(a), (b), (c) et (d) donnent les images microscopiques MEB des arêtes tranchantes de l'outil de coupe testées avec et sans champ magnétique. D'après la figure IV.11(a), on constate trois types de dégradation qui sont :

- Usure sur la surface d'attaque (usure cratère) moyenne engendrée par l'absence de la lubrification et la vitesse de coupe choisie ;
- Usure par écaillage de l'arête tranchante de coupe causée essentiellement par deux paramètres importants ; la variation de la température interfaciale entre outil-copeau-pièce et l'effet de l'effort spécifique de coupe ;
- Usure par arête rapportée (copeau adhérent), lorsque le copeau glisse sur la face de dégagement de l'outil, un frottement intense engendre des élévations de température localisées, des fusions et des micro-soudures.

Enfin, pour connaître l'influence du champ magnétique sur les modes de comportement tribologique de l'outil de coupe et plus exactement sur le rayon de pointe de l'arête tranchante, on examine les photographies IV.11(b), (c) et (d) qui montrent bien les trois régimes d'usure:

- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend deux natures : usure en cratère et usure par brûlage sur la face de coupe très faible engendrée par l'absence de la lubrification ;
- A intensité moyenne, $H = 16, 5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend trois natures : usure en cratère, usure par copeau adhérent et usure par brûlage de la face de coupe ;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28, 5 \text{ KA/m}$, le mode d'usure prend une seule nature : usure en cratère.

Enfin, ces résultats montrent que la présence du champ magnétique autour du contact d'usinage réduit l'usure de l'outil et les contraintes de cisaillement à l'interface outil-copeau-

pièce. L'analyse de certains faciès d'usure (Fig. IV.11(b) et (c)) montre une élévation de la température du contact. Cette élévation de température peut favoriser des phénomènes de diffusion entre la surface d'attaque et les copeaux. De plus, on remarque qu'il se forme un dépôt de particules des copeaux noires sur la face d'attaque de l'outil (brûlage de la face de coupe) à cause de l'attraction magnétique, de la pression spécifique du copeau sur la surface d'attaque et de l'élévation de température.

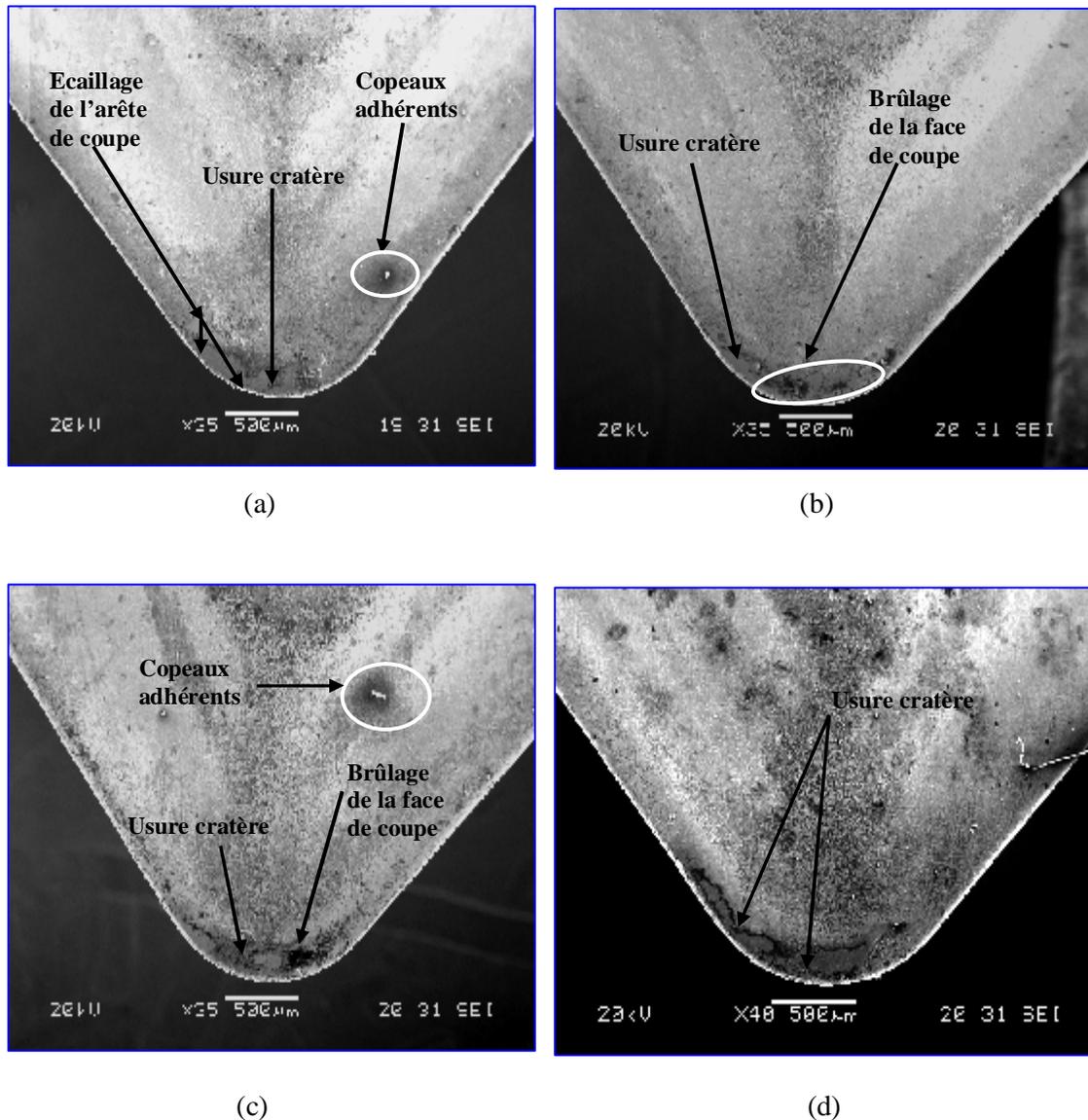


Fig. IV.11. Observations microscopiques au MEB de l'arrondi du bec de l'outil (f):

$a_p = 0,5 \text{ mm}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$, (b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$,

(c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

IV.3. Evolution du champ magnétique sur la morphologie du copeau

IV.3.1. Usinage sans lubrification

La compréhension des mécanismes de coupe passe forcément par l'analyse des copeaux. Ainsi, à la fin de chaque essai, les copeaux sont collectés et sont examinés (les copeaux des essais ont été systématiquement récupérés et analysés) géométriquement à l'aide d'un microscope optique.

Dans cette partie, nous allons essayer de rechercher la relation entre l'intensité du champ magnétique et la morphologie du profil du copeau. A cet effet, nous avons fixé les paramètres d'usinage, la pièce usinée et fait varier l'intensité du champ magnétique.

La vitesse de coupe est un paramètre important qui a un effet marqué sur l'usure d'outil de coupe, les comportements tribologiques de l'outil et de la pièce usinée. Les résultats sont présentés sur les figures IV.12 et IV.13 pour deux vitesses de coupe différentes (6 et 136 m/min), pour les mêmes conditions de coupe, avec et sans champ magnétique.

- Pour $V_c = 6$ m/min :

Les différentes observations micrographiques présentées sur la figure IV.12 révèlent que la vitesse de coupe n'a pas d'influence significative sur la morphologie générale des copeaux. En effet, ces derniers sont toujours continus et ont une forme de dents de scie. En revanche, la forme du profil du copeau dépend de l'intensité du champ magnétique appliqué. La figure IV.12(a) montre des copeaux issus de la coupe, en absence du champ magnétique, avec un profil en grandes dents de scie (le pas entre deux dents est environ 1mm). Pour $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$, la taille de ces dents diminue ($\sim 120\mu\text{m}$). Par contre, les figures 12(b) et 12(c) présentent des copeaux obtenus respectivement à $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$ et $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$ avec des dents de taille plus petite (~ 50 à $100\mu\text{m}$).

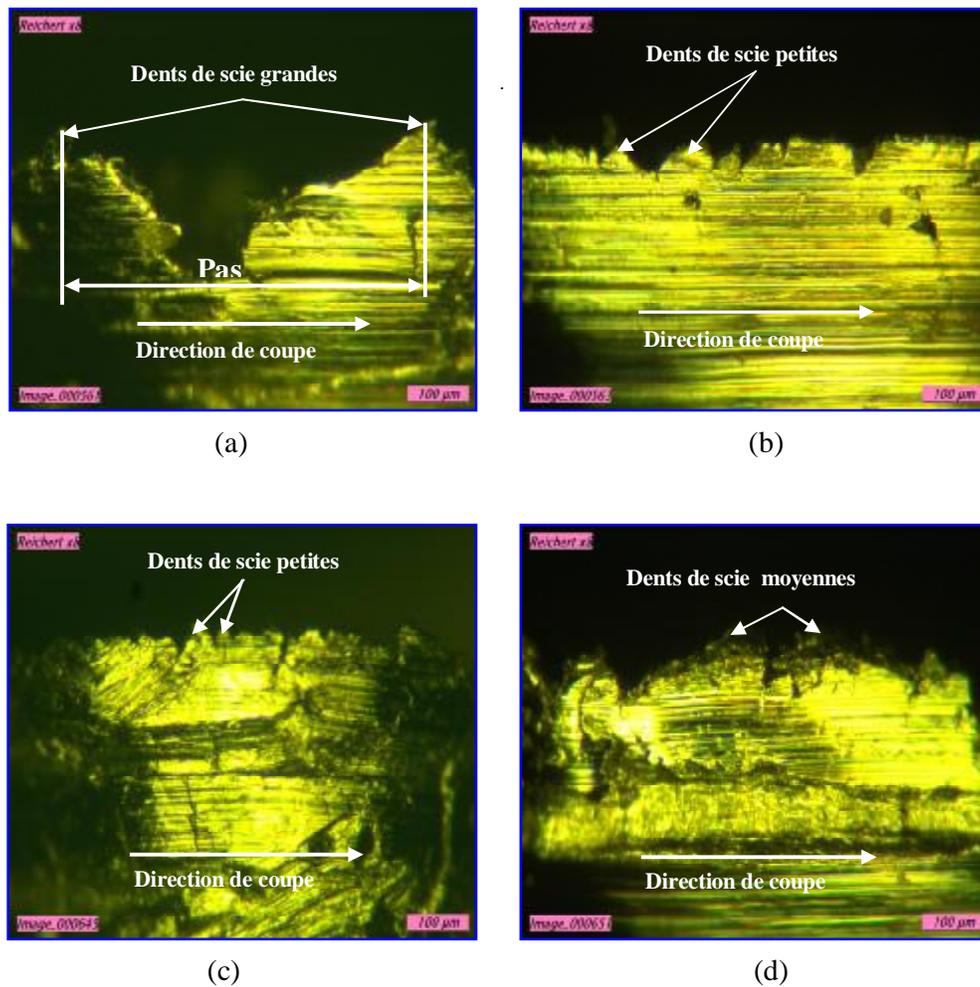


Fig. IV.12. Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau :

$V_c = 6 \text{ m.min}^{-1}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 125 \text{ } \mu\text{m.tr}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$,

(b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

- Pour la $V_c = 136 \text{ m/min}$:

En observant les images (Fig. IV.13), on peut distinguer quatre régimes de morphologie des copeaux à savoir :

- Sans champ magnétique : avec un profil en grandes dents de scie ;

- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5 \text{ KA/m}$, avec des dents de taille petite ;
- A intensité moyenne, $H = 16,5 \text{ KA/m}$, avec des dents de taille plus petite ;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28,5 \text{ KA/m}$, avec des dents de taille plus petite.

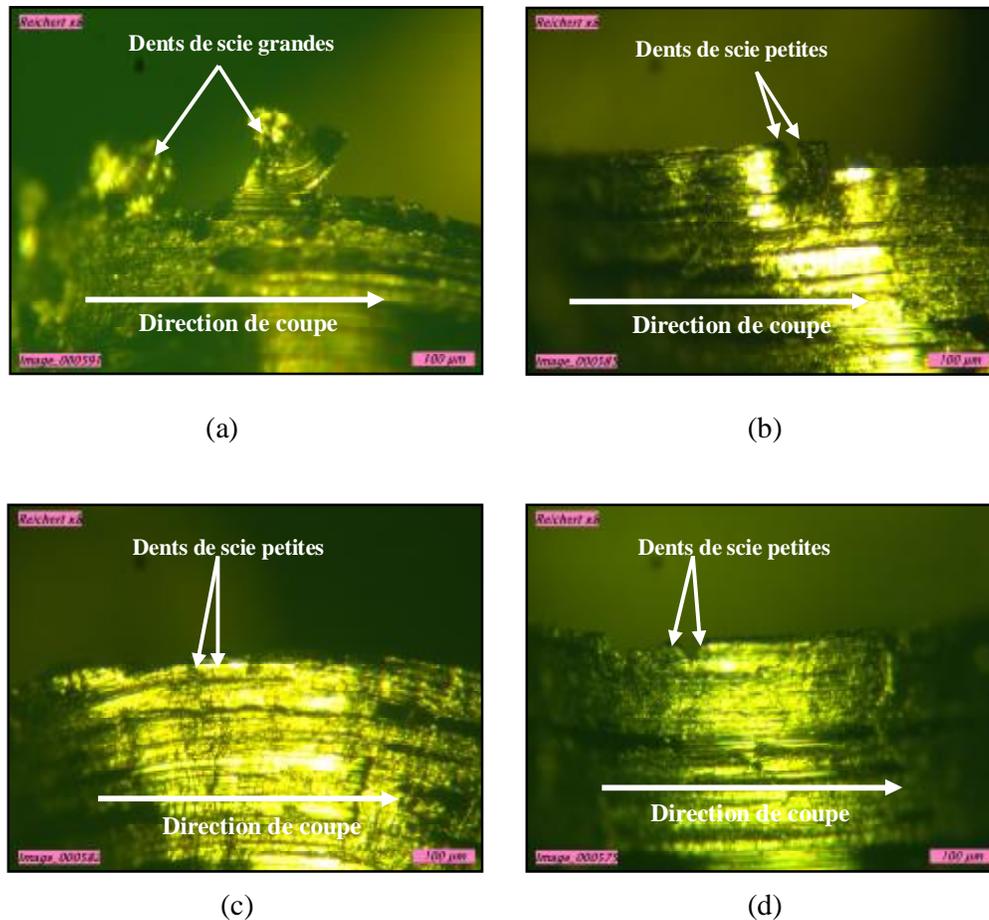


Fig. IV.13. Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau :

$V_c = 136 \text{ m.min}^{-1}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 125 \text{ µm.tr}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$,

(b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

Ces résultats montrent que la variation des copeaux d'usinage, sous l'effet d'un champ magnétique, dépend principalement de l'intensité de champ magnétique. La taille de ces dents autour de contact (P-O) diminue avec l'application de champ magnétique. La présence d'un

champ magnétique accélère le glissement de l'outil dans le cas où ce dernier est en recul. Les copeaux d'usinage sont attirés sur la surface d'attaque de l'outil de coupe à cause de l'effet de la magnétisation. En effet, lorsque le copeau glisse sur la face d'attaque de l'outil, un frottement intense engendre des élévations de température localisées, des fusions et des micro-soudures.

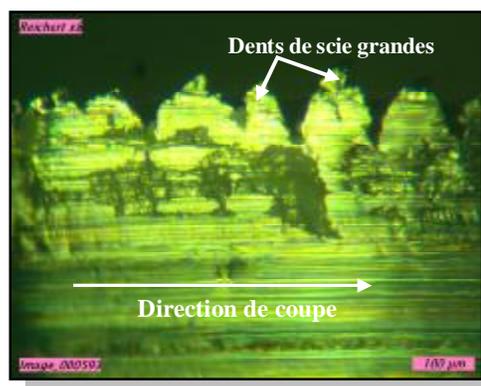
IV.3.2. Usinage avec lubrification

Les photographiques (Fig. IV.14 et IV.15) montrent l'image des morphologies des copeaux ayant été usinées dans différentes conditions expérimentales, pour deux vitesses de coupe différentes (6 et 136 m/min), avec et sans champ magnétique.

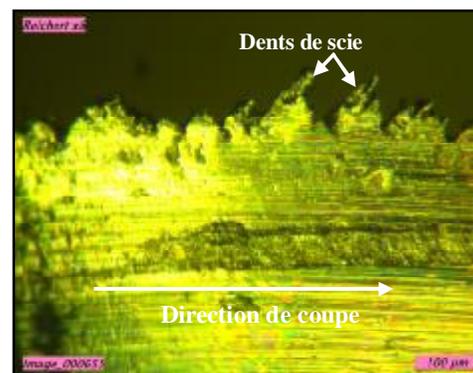
- Pour $V_c = 6$ m/min :

En observant les images (Fig. IV.14), on peut distinguer quatre régimes de morphologie des copeaux à savoir :

- Sans champ magnétique : avec un profil en grandes dents de scie ;
- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5$ KA/m, avec des dents de taille moyenne ;
- A intensité moyenne, $H = 16,5$ KA/m, avec des dents de taille petite ;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28,5$ KA/m, avec des dents de taille moyenne.



(a)



(b)

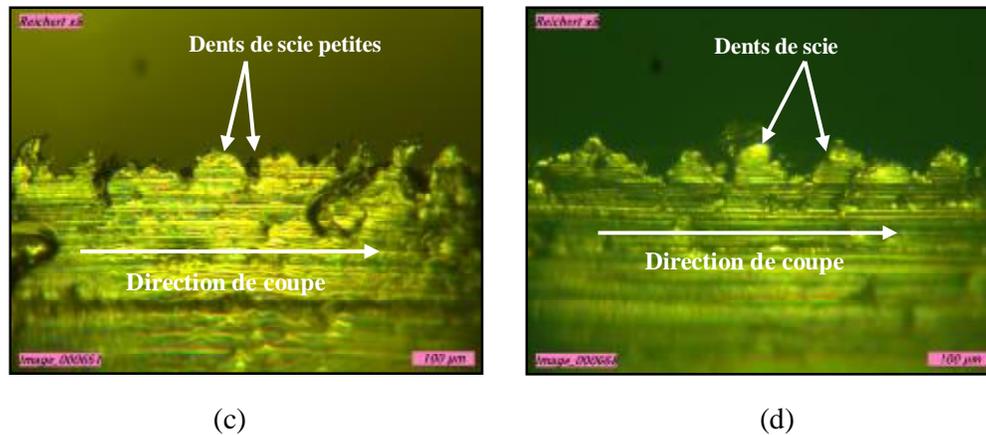


Fig. IV.14. Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau :

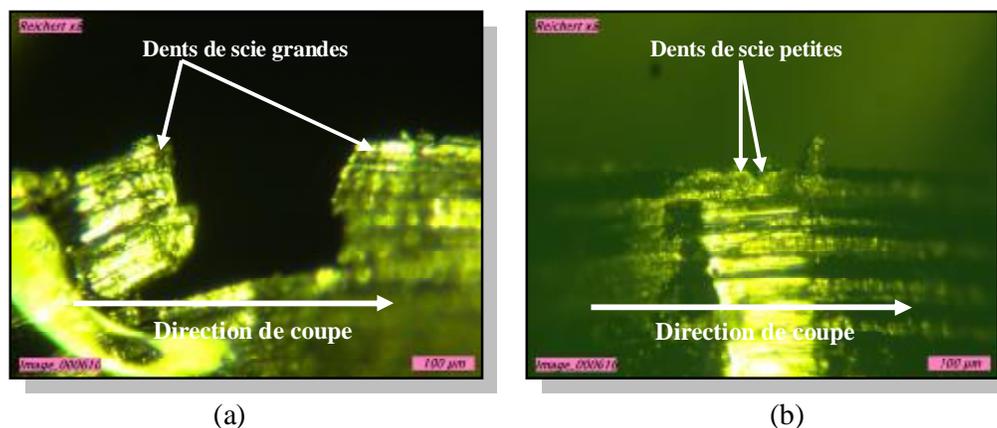
$V_c = 6 \text{ m.min}^{-1}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 125 \text{ } \mu\text{m.tr}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$,

(b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

- Pour $V_c = 136 \text{ m/min}$:

En observant les images (Fig. IV.15), on peut distinguer quatre régimes de morphologie des copeaux à savoir :

- Sans champ magnétique : avec un profil en grandes dents de scie ;
- Pour une faible intensité du champ magnétique, $H = 5,5 \text{ KA/m}$, avec des dents de taille petite ;
- A intensité moyenne, $H = 16,5 \text{ KA/m}$, avec des dents de taille petite ;
- Pour une forte intensité du champ magnétique, $H = 28,5 \text{ KA/m}$, avec des dents de taille moyenne.



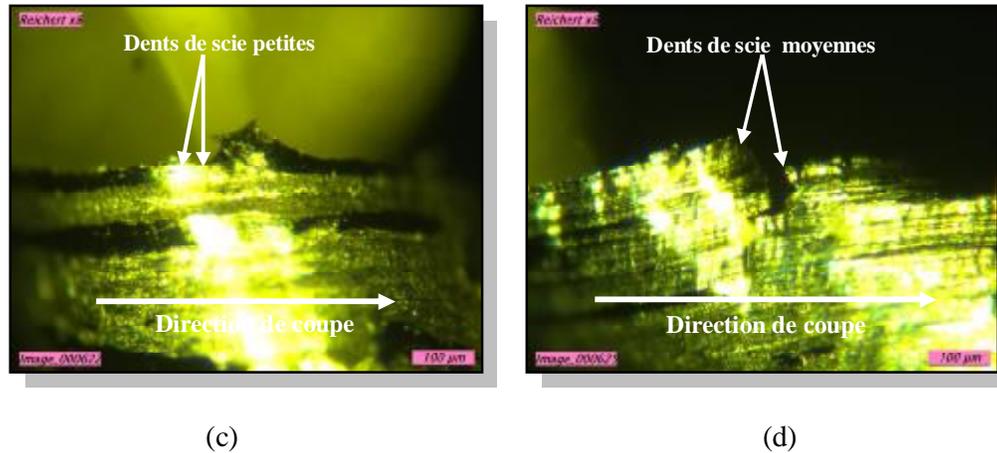


Fig. IV.15. Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau :
 $V_c = 136 \text{ m.min}^{-1}$, $a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 125 \mu\text{m.tr}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ KA.m}^{-1}$,
 (b) $H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (c) $H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$, (d) $H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

Sur les photographies, on peut observer que l'effet du champ magnétique entraîne une diminution de dimension des copeaux, la forme des copeaux d'usinage et la taille des dents (Fig. IV.16). En plus, la figure IV.16 indique que la forme des copeaux d'usinage est différente, en présence d'un champ magnétique. Elles sont continues, par contre, en l'absence du champ magnétique elles sont discontinues. Nous avons observé sur la figure précédente, un changement de morphologie des copeaux à cause de l'intensité du champ magnétique et de la vitesse de coupe.

En outre, l'application du champ magnétique réduit les contraintes de cisaillement de contact à l'interface outil-copeau-pièce en facilitant le glissement de l'outil dans le cas où ce dernier est en recul [63-64]. Lors de la coupe, la taille des dents de scie des copeaux est proportionnelle aux contraintes de cisaillement de ces copeaux. Ceci montre encore une fois que le champ magnétique appliqué dans le contact réduit la contrainte de cisaillement. Cette dernière présente un maximum pour une intensité du champ comprise entre 5,5 et 16,5 KA.m^{-1} .

Macrographiquement, les différents copeaux sont représentés en figure IV.16.

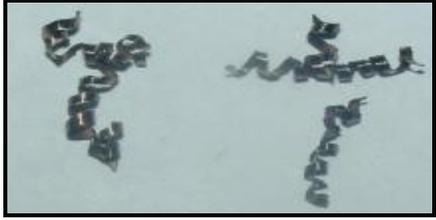
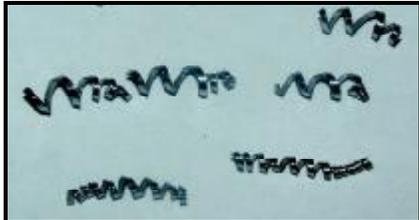
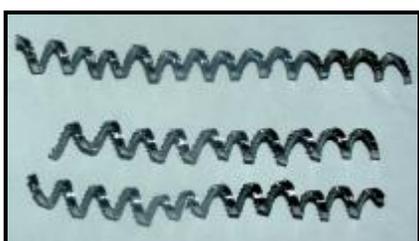
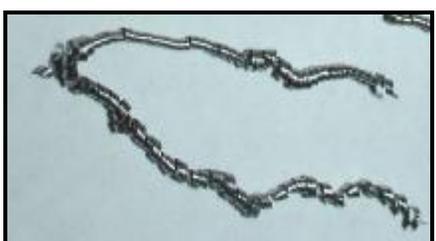
Les paramètres expérimentaux	VC=6 m/min	VC=136 m/min
$H = 0 \text{ A.m}^{-1}$,		
$H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$		
$H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$		
$H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$		

Fig. IV.16. La forme des copeaux en absence et en présence du champ magnétique,

$$a_p = 0,5 \text{ mm}, f = 125 \mu\text{m.tr}^{-1}, l_c = 300 \text{ mm}.$$

IV.4. Evolution de la température en fonction de l'intensité du champ magnétique

IV.4.1. analyse thermique de la zone de coupe

La détermination de la température moyenne de coupe à l'outil de coupe est faite à l'aide de caméra infrarouge ESCIL. La température moyenne mesurée est d'habitude celui du visage supérieur du copeau, et pas la température d'interface par ce que l'interface outil-pièce est inaccessible. Les résultats obtenus sont présentés et confrontés ci-dessous. Elles portent sur les quatre régimes d'usure (avec et sans champ magnétique) pour différentes vitesse de coupe (64 et 136 m/min).

L'image de la figure IV.17 donne l'allure du champ thermique dans la zone de coupe autour de contact de l'outil, de la pièce usinée et du copeau. La figure précédente présente un exemple de cartographie du champ de température obtenue par caméra ESCIL.

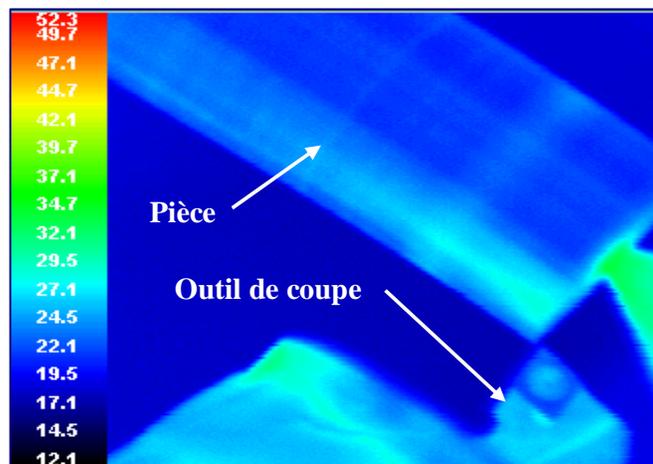


Fig. IV.17. Exemple de cartographie du champ de température obtenue par caméra ESCIL.

IV.4.2. Evolution des températures avec et sans champ magnétique

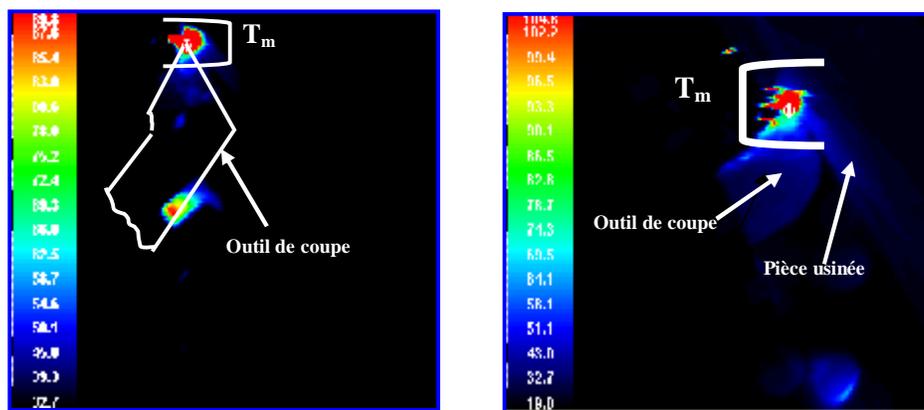
Les valeurs moyennes de la température d'interface, en absence et en présence du champ magnétique H (KA/m), en fonction de la vitesse de coupe V_c sont regroupées sur les tableaux de IV.1.

Les paramètres expérimentaux	H=0 KA/m	H=5,5KA/m	H=16,5KA/m	H=28,5KA/m
Vc = 64/min	89, 8 C°	93, 1 C°	127, 4 C°	157, 2 C°
Vc = 136/min	157, 2 C°	111, 5 C°	172, 4 C°	206, 6 C°

Tableau IV.1. Valeurs moyennes de la température d’interface en fonction de H et Vc.

L’imagerie infrarouge de la figure. IV.18 donne l’allure du champ thermique dans la zone de coupe autour de l’outil de coupe et du copeau. Lorsqu’on augmente les paramètres appliqués la vitesse de coupe et l’intensité du champ magnétique, la température à l’interface croît, la conséquence de l’augmentation de température de contact par la vitesse de coupe, l’effet de magnétisation et l’effet joule dû aux courants de Foucault générés par le champ magnétique alternatifs [68-69]. Les images de la face de coupe montrent que la position du point chaud n’est pas sensible à la vitesse de coupe mais son intensité du champ magnétique augmente.

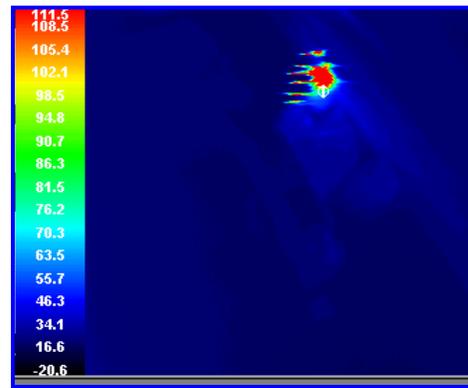
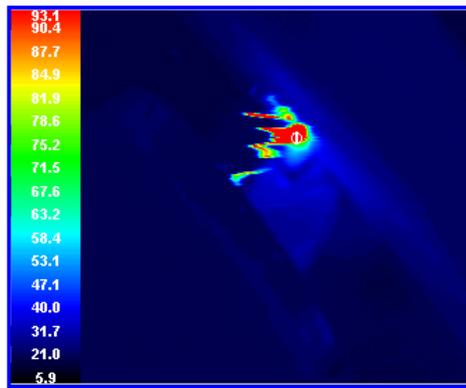
En d’autres termes, l’application du champ magnétique autour de contact conduit à une élévation de la température et le changement attendu dans la coupe thermomécanique c'est-à-dire l’intensité du champ magnétique fait augmenter la température de coupe sans pour autant modifier la morphologie générale du champ thermique de la face de coupe de l’outil.



Vc = 64 m.min⁻¹, Tm = 89, 8 C°

Vc = 136 m.min⁻¹, Tm = 104, 8 C°

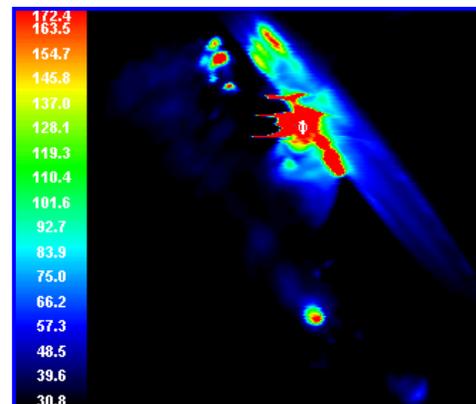
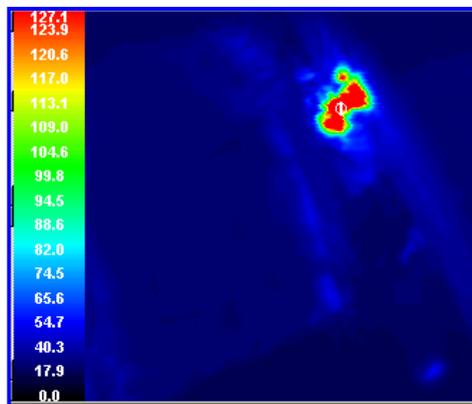
H = 0 A.m⁻¹



$V_c = 64 \text{ m.min}^{-1}$, $T_m = 93,1 \text{ C}^\circ$

$V_c = 136 \text{ m.min}^{-1}$, $T_m = 111,5 \text{ C}^\circ$

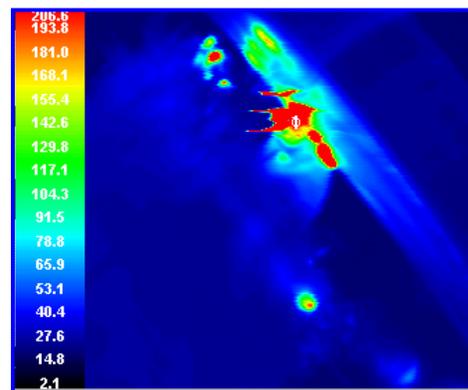
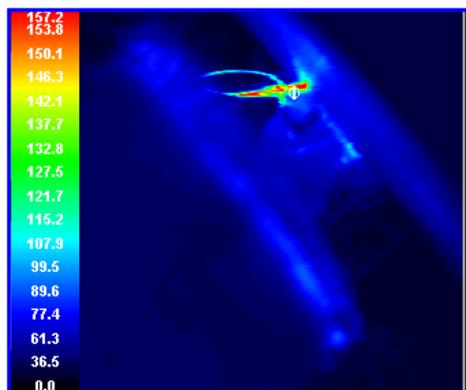
$H = 5,5 \text{ KA.m}^{-1}$



$V_c = 64 \text{ m.min}^{-1}$, $T_m = 127,4 \text{ C}^\circ$

$V_c = 136 \text{ m.min}^{-1}$, $T_m = 172,4 \text{ C}^\circ$

$H = 16,5 \text{ KA.m}^{-1}$



$V_c = 64 \text{ m.min}^{-1}$, $T_m = 157,2 \text{ C}^\circ$

$V_c = 136 \text{ m.min}^{-1}$, $T_m = 206,6 \text{ C}^\circ$

$H = 28,5 \text{ KA.m}^{-1}$

Fig. IV.18. Distribution de la température à l'interface le long de l'outil de coupe :

$a_p = 0,5 \text{ mm}$, $f = 125 \mu\text{m.tr}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce projet de nature essentiellement expérimentale a permis d'étudier la coupe des métaux par l'application du champ magnétique des contacts (outil-copeau-pièce) d'usinage. Le travail présenté ici visait à comprendre l'effet du champ magnétique sur le comportement tribologique d'un outil de coupe durant les opérations de tournage, et observer leurs morphologies d'usure. D'autre part, ce travail nous a permis d'apporter des réponses à certaines questions relatives à l'usinage et à l'usure d'un outil de coupe en présence d'un champ magnétique.

D'après la comparaison des résultats obtenus en usinage avec et sans champ magnétique, il apparaît clairement que l'assistance magnétique a plusieurs impacts sur l'usinage. Ainsi on peut remarquer son influence sur :

- La réduction de l'usure des outils de coupe ;
- La modification des modes d'usure des outils de coupe ;
- La diminution des contraintes de cisaillement de contact à l'interface outil-copeau-pièce ;
- L'élévation de température qui contribue au changement du type de profil des copeaux d'usinage.

De plus, nous pouvons conclure ce qui suit quant à l'influence de l'intensité du champ magnétique sur le comportement tribologique en usure d'un outil de coupe :

1. Morphologie de l'usure de l'outil de coupe en fonction de la vitesse de coupe

En fonction de la vitesse de coupe, l'usinage sans lubrification et en présence du champ magnétique présente une perte de masse minimale par rapport à celui en absence du champ. La nature du mode d'usure observé est celui en cratère dans le cas de l'usinage avec champ, et usure frontale, usure cratère et usure par déformation plastique en absence de champ.

Dans le cas de l'usinage avec lubrification et en présence du champ magnétique, la nature du mode d'usure a été l'usure cratère et l'usure frontale. Par contre, en absence du champ, l'usure observée est l'usure en cratère et l'usure par copeau adhérent

2. Morphologie de l'usure en fonction du temps de coupe

En raison de l'usure en fonction du temps de coupe, et dans l'usinage sans lubrification, nous avons constaté qu'il y a une diminution de la perte de masse avec champ, mais sans champ magnétique l'usure est de 800 μ g. La nature du mode d'usure a été par usure cratère en présence de champ magnétique et a été par usure cratère et usure frontale en son absence.

3. Morphologie de l'usure en fonction de la profondeur de passe

En fonction de la profondeur de passe, en présence du champ magnétique, la perte de masse a été plus faible par rapport à celui en absence du champ. La nature du mode d'usure a été par usure cratère, usure par copeau adhérent et usure par écaillage de l'arête tranchante de coupe, dans le cas de présence de champ. Cependant, l'usure a été par usure cratère, usure frontale et usure par déformation plastique, en son absence.

4. Morphologie de l'usure en fonction de la vitesse d'avance

Suivant la vitesse d'avance, l'usure de l'outil de coupe, soumis au champ magnétique, a été faible par rapport à celui en absence du champ. De plus, la nature du mode d'usure a été par usure par copeau adhérent et par brûlage de la face de coupe dans le cas de présence de champ. Cependant, l'usure a été par usure cratère, usure par écaillage de l'arête tranchante et usure par arête rapportée, en son absence.

Par ailleurs, la présence du champ magnétique autour de contact d'usinage conduit à une augmentation de la dureté de l'outil. Ce durcissement s'explique par le mouvement des dislocations qui génère une augmentation de défauts. Ces derniers résultats montrent que l'application du champ magnétique se concentre au niveau de la couche superficielle du matériau, ce qui pourrait avoir pour effet de modifier son comportement mécanique ou la tribologie du contact outil-copeau. En plus, l'application du champ magnétique sur le

comportement tribologique réduit les contraintes de cisaillement de contact à l'interface outil-copeau-pièce en facilitant le glissement de l'outil dans le cas où ce dernier est en recul. Ainsi, on remarque qu'il se forme un dépôt de particules de copeaux noires sur la face d'attaque de l'outil à cause de l'attraction magnétique et de l'élévation de température d'interface.

La présence du champ magnétique dans le contact d'usinage conduit à une diminution de l'usure et modifie radicalement la nature du mode d'usure. Il y a une intensité critique du champ magnétique $H = 16,5 \text{ KA/m}$, pour laquelle l'usure de l'outil de coupe est minimale et le rayon de pointe de coupe est préservé.

La profondeur de coupe est aussi un paramètre important. Les résultats montrent que la nature d'usure change avec l'intensité du champ magnétique. De plus, dans l'essai de l'usinage, on voit que les modes d'usure diminuent lorsque l'intensité du champ magnétique augmente, montrant aussi l'effet bénéfique de la présence de celui-ci sur l'usure.

Les résultats des expériences révèlent que la vitesse de coupe n'a pas d'influence significative sur la morphologie générale des copeaux. En effet, ces derniers sont toujours continus et ont une forme de dents de scie. La forme du profil du copeau dépend de l'intensité du champ magnétique appliqué. Dans le contact d'usinage, en absence du champ magnétique, les copeaux ont un profil en grandes dents de scie. Et en présence du champ magnétique la taille de ces dents devient plus petite. Le changement de morphologie des copeaux est dû à l'intensité du champ magnétique et à l'élévation de température. En outre, l'application du champ magnétique réduit les contraintes de cisaillement de contact à l'interface outil-copeau-pièce en facilitant le glissement de l'outil dans le cas où ce dernier est en recul. Lors de la coupe, la taille des dents de scie des copeaux est proportionnelle aux contraintes de cisaillement de ces copeaux. Ceci montre encore une fois que le champ magnétique appliqué dans le contact réduit la contrainte de cisaillement. Cette dernière présente un maximum pour une intensité du champ comprise entre $5,5$ et $16,5 \text{ KA.m}^{-1}$.

Il est clair que, sous l'influence d'un champ magnétique, la température de contact augmente. Cette élévation est non seulement due à l'augmentation de la vitesse de coupe, mais aussi à des effets de magnétisation et à l'effet Joule, créés par les courants de Foucault générés par le champ magnétique variable dans la pièce tournante.

Il ressort donc, que l'application d'un champ magnétique aux outils de coupe apparaît comme une solution simple, efficace et peu onéreuse pour augmenter leur durée de vie et ainsi contribuer à l'optimisation de l'outil de production.

Enfin, pour pouvoir mener des expériences comparatives, il est nécessaire de réaliser plusieurs essais d'usinage en faisant varier plusieurs paramètres tels que : l'intensité du champ magnétique, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, les matériaux de la pièce usinée, ...etc, ce qui nécessite un nombre considérable d'outil de coupe identique.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche. Il serait intéressant donc de considérer les points suivants :

- Influence du champ magnétique sur l'état de surface de la pièce usinée (3D) ;
- Influence du champ magnétique sur l'état de surface de l'outil de coupe (3D) ;
- Influence du champ magnétique sur la déformation thermique de l'outil de coupe ;
- Influence du régime de coupe sur l'usure de l'outil par l'application d'un champ magnétique.

Bibliographie

- [1] G.ZAMBELLI, L. VICENT, *MATERIAUX ET CONTACTS* – une approche tribologique (1998), Presses polytechniques et Universitaires Romandes.
- [2] J.DENAPE, *SCIENCE FRICTION* – introduction à la tribologie, DEA sciences des matériaux (2001).
- [3] F.ROBBE-VALOIRE, B. BAFFONI, R. PROGRI, *LOAD TRANSMISSION BY ELASTIC, ELASTO-PLASTIC OR FULLY PLASTIC DEFORMATION OF ROUGH INTERFACE ASPERITIES* (2001), *Mechanics of Materials*, Vol.33, pp.617-633.
- [4] O. BARRAU, *ETUDE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE D'ACIER A OUTILS DE TRAVAIL A CHAUD* (2004), thèse de doctorat en Génie Mécanique, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [5] M.REMADNA, *LE COMPORTEMENT DU SYSTEME USINANT EN TOURNAGE DUR. APPLICATION DU CAS D'UN ACIER TREMPE USINE AVEC DES PLAQUETTES CBN (NITRURE DE BORE CUBIQUE* (2001). thèse de doctorat en Génie Mécanique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [6] G. GERMAIN. *CONTRIBUTION A L'OPTIMISATION DU PROCEDE D'USINAGE ASSISTE LASER* (2006), thèse de doctorat en Mécanique, Matériaux et Procédés, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers d'Angers.
- [7] G. LIST, *ETUDE DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DES OUTILS CARBURE WC-CO PAR LA CARACTERISATION DE L'INTERFACE OUTIL-COPEAU. APPLICATION A L'USINAGE A SEC D'ALLIAGE D'ALUMINIUM AERONAUTIQUE AA2024 T351* (2004), thèse de doctorat en Mécanique, Matériaux et Procédés, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers de Bordeaux.
- [8] E. MERCHANT, *MECHANICS OF THE METAL CUTTING PROCESS, I ORTHOGONAL CUTTING AND A TYPE 2 CHIP*, *Journal of applied Physics*, Vol. 16 (1945), 267-275.
- [9] E. MERCHANT, *MECHANICS OF THE METAL CUTTING PROCESS, I ORTHOGONAL CUTTING*, *Journal of applied Physics*, (1945), 318-324.

- [10] R. KOMANDURI, T.H. BROWN, *THE MECHANICS OF THE CHIP SEGMENTATION IN MACHINING*. Journal of Engineering for Industry, (1981). Vol. 103, N° 1, 33-51.
- [11] F. LEROY, T. BLANCHARD, S. ALEXENDRE, *LES MODIFICATIONS STRUCTURALES APPORTEES PAR LES NOUVEAUX PROCEDES D'USINAGE ET DE MISE EN FORME*. Bulletin du cercle d'études des métaux, Paris, 1992, 64-79.
- [12] G. POULACHON, *ASPECTS PHENOMENOLOGIQUES, MECANIQUES ET METALLURGIQUES EN TOURNAGE CBN DES ACIERS DURCIS* (1999). Thèse de doctorat en Mécanique, ENSAM de Cluny.
- [13] M. HABAK, *ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA MICROSTRUCTURE ET DES PARAMETRES DE COUPE SUR LE COMPORTEMENT EN TOURNAGE DUR DE L'ACIER A ROULEMENT 100 Cr6* (2006), thèse de doctorat en Mécanique, Matériaux et Procédés, Ecole National Supérieure d'Arts et Métiers d'Angers.
- [14] R. LAUHEURTE, *APPLICATION DE LA THEORIE DU SECOND GRADIENT A LA COUPE DES MATERIAUX* (2004), thèse de doctorat en Mécanique, Université Bordeaux.
- [15] C.BARLIER, B. POULET, MEMOTECH, Génie Mécanique – Production Mécanique, 2^{ème} Edition, Paris, Casteilla Ed, 1999.
- [16] V.I. BABITSKY, A.N. KALASHNIKOV, A. MEADOWS, A.A.H.P. WIJESUNDARAC, *ULTRASONICALLY ASSISTED TURNING OF AVIATION MATERIALS*, Journal of Materials Processing, 132 (2003), 157-167.
- [17] V.I. BABITSKY, A.N. A.V. MITROFANOV, V.V. SILBERSCHMIDT, *ULTRASONICALLY ASSISTED TURNING OF AVIATION MATERIALS: SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL STUDY*, Ultrasonics, 42 (2004), 81 – 86.
- [18] V.I. BABITSKY, A.N. KALASHNIKOV, F. V. MOLODTSOV, *AUTORESONANT CONTROL OF ULTRASONICALLY ASSISTED CUTTING*, Mechatronics, 14 (2004), 91-114.
- [19] S. CHANG, G. BONE, *BURR SIZE REDUCTION IN DRILLING ULTRASONIC ASSISTANCE*, Robotics and Computer-Integrated Manufacture, 21 (2005), 442-450
- [20] A.V. MITROFANOV, N. AHMED, V.I. BABITSKY, V.V. SILBERSCHMIDT, *EFFECT OF LUBRICATION AND CUTTING PRAMETERS ON ULTRASONICALLY ASSISTED TURNING OF INCONEL 718*, Journal of Materials Processing Technology, 162-163 (2005), 649-654.

- [21] P. DAHLMAN, M. ESCURSELL, *HIGH-PRESSURE JET-ASSISTED COOLING: A NEW POSSIBILITY FOR NEAR NET SHAPE TURNING OF DECARBURIZED STEEL*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, 10-115 (2004).
- [22] M. HABAK, C. FISCHER, J-L. LEBRUN, *ROLE DE L'ASSISTANCE JET D'EAU HAUTE PRESSION SUR LES CONTRAINTES RESIDUELLES DES PIECES EN ACIERS INOXYDABLE AUSTENITIQUE USINE*. Journée du GFAC/SF2M, ENSAM Aix en Provence (2004).
- [23] R.KOVACEVIC, C. CHERUKUTHOTA, M. MAZURKIEWICS, *HIGH-PRESSURE WATER JET COOLING/LUBRICATION TO IMPROVE MACHINING EFFICIENCY IN MILLING*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 35, N°10, 1459-1473 (1995).
- [24] J. KAMANSKI, B. ALVELID, *TEMPERATURE REDUCTION IN THE CUTTING ZONE IN WATER-JET ASSISTED TURNING*. Journal of Materials Processing Technology, 106 (2000), 68-73.
- [25] C. SHET, X. DENG, A. BAYOUME, *FINITE ELEMENT SIMULATION OF HIGH-PRESSURE WATER JET ASSISTED METAL CUTTING*. International Journal of Mechanical Sciences, 45 (2003), 1201-1228.
- [26] M. EL MANSORI, F. PIERRON, D. PAULMIER, *REDUCTION OF TOOL WEAR IN METAL CUTTING USING EXTERNAL ELECTROMOTIVE*, Surface and Coatings Technology. 163-164 (2003) 472-477.
- [27] M. ELMANSORI, V. LORDACHE, P. SEITIER, D. PAULMIER, *IMPROVING SURFACE WEARING OF TOOLS BY MAGNETISATION WHEN CUTTING DRY*, Surface & Coatings Technology, 188-189 (2004), 566-571.
- [28] M. ELMANSORI, B. KLAMECKI, *MAGNETIC FIELD EFFECTS IN MACHINING PROCESSES AND ON MANUFACTURED PART MECHANICAL CHARACTERISTICS*, Journal of Manufacturing Sciences and Engineering, 128 (2006), 136-145..
- [29] O. BATAINEH, B. KLAMECKI, B. KOEPKE, *EFFECT OF PULSED MAGNETIC TREATMENT ON DRILL WEAR*, Journal of Materials Processing Technology. **134** (2003) 190-196
- [30] B. LESOURD, *ETUDE ET MODELISATION DES MECANISMES DE FORMATION DE BANDES DE CISAILLEMENT INTENSE EN COUPE DES METAUX, APPLICATION AU TOURNAGE ASSISTE LASER DE L'ALLIAGE DE TITANE TA6V*, Thèse de l'EC de Nantes, ED 82-174 (1996).

- [31] G. GERMAIN, F. MOREL, J-L. LEBRUN, A.MOREL, B. HUNEAU, *SURFACE HEAT TREATMENT DUE TO LASER MACHINING AND THE RELATIVE EFFECTS ON FATIGUE STRENGTH*, AT3S, Journées Europeennes, Strasbourg, 22-23 Mars 2006.
- [32] S. Y. HONG, I. MARKUS, W. JEONG, *NEW COOLING APPROACH AND TOOL LIFE IMPROVEMENT IN CRYOGENIC MACHINING OF TITANIUM ALLOY Ti-6AL-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, 2245-2260 (2001).
- [33] SK. POON, TC. LEE, *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING OF PARTICULE METAL-MATRIX COMPOSITES*, Proc. Of Conf. ASM 1993 Materials Congress, Materials Week'93, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct. 17-21, p.43-50.
- [34] H.R. LEEP, D. L. HERDE, *PRODUCTION DRILLING MODELS FOR A COMPOSITE MATERIAL*, Machining of Composite Materials II, Proc. of the ASM 1993, Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct. 17-21, p.132-135.
- [35] R; GILMORE, *ULTRASONIC MACHINING OF CERAMIC-MATRIX AND METAL MATRIX COMPOSITES*, Proc. of the ASM 1993, Materials Congress, Pittsburgh, Pennsylvania, Oct. 17-21, p.132-135.
- [36] V. SONGMENE, *USINAGE DES COMPOSTES A MATRICE D'ALLIAGE D'ALLUMINIUM GrA-Ni^R* (2000), thèse de doctorat en Philosophie, Ecole Polytechnique de Montréal.
- [37] A. BOUCHOU, M. CALIEZ, *ETAT DE L'ART SUR LA MODILISATION DE LA COUPE* (2004), Laboratoire de Mécanique et Rhéologie. 40-45
- [38] P. MARTIN, J. RICHARD, M. VERON, *THE INFLUENCE OF CUTTING SPEED VARIATIONS ON TOOL WEAR FOR OPTIMAL CONTROL OF MACHINING*. Annals of the CIRP, 1979, Vol 28, N° 1, 7-11.
- [39] A.BER, M. GOLDBLAT, *THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE GRADIENT ON CUTTING TOOL'S LIFE*. Annals of the CIRP, 1989, Vol 381, N° 1, 69-73.
- [40] C. PAGES, *COMPORTEMENT DE REVETEMENT CERAMIQUES SUR OUTIL EN TOURNAGE A SEC DE FINITION* (2003). thèse de doctorat en Mécanique, Ecole Centrale de Lyon.
- [41] C. BERDIN, *GENERALITES SUR LA COUPE DES METAUX*. Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon 1971, 5-71.
- [42] J.C. LEMAIRE, W.A. BACKOFFEN, *ADIABATIC INSTABILITY IN THE ORTHOGONAL CUTTING OF STEEL*. Metall. Trans. 1972.

- [43] R. KOMANDURI, R. H. BROWN, *THE MECHANICS OF CHIP SEGMENTATION IN MACHINING*. ASME Journal of Engineering for Industry, 1987.
- [44] E.M. TRENT, P. K. WRIGHT, *METAL CUTTING*. BUTTERWORTH-HEINERMANN. 4th Edition, 2000.
- [45] E.M. TRENT, *CUTTING STEEL AND IRON WITH CEMENTED CARBIDE TOOLS*. Part II, Journal of the Iron and Steel Institute (1963), 923-932.
- [46] H. O. GEKONDE, S. V. SUBRAMANIAN, *TRIBOLOGY OF TOOL-CHIP INTERFACE AND TOOL WEAR MECHANISMS*. Surface and Coatings Technology, Vol.149 (2002), 151-160.
- [47] S. LO. CASTO, E. LO. VALVO, E. LUCCHINI, S. MASCHIO, M. PIACENTINI, V. F. RUISI, *CERAMIC MATERIALS WEAR MECHANISMS WHEN CUTTING NIKEL-BASED ALLOYS*. Wear, Vol.225-229, (1999), 227-233.
- [48] C. J.E. ANDREWES, H. Y. FENG, W. M. LAU, *MACHINING OF AN ALUMINIUM/SIC COMPOSITE USING DIAMOND INSERTS*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 102 (2000), 25-29.
- [49] D. NECIB, *INFLUENCE DU CHAMP MAGNETIQUE SUR LA DUREE DE VIE DE L'OUTIL DE COUPE*. (2002). Mémoire de Magister en Mécanique, Université de Constantine.
- [50] L. MATHIEN, M. RABOYEAU, *PRODUCTION MECANIQUE- FABRICATION MECANIQUE*. Dundee, Edition (1986).
- [51] H. K. TONSHOFF, A. MOHLFELD, C. SPENGLER, *PVD COATED TOOLS FOR METAL CUTTING APPLICATIONS*. Actes de la Conference Internationale, The Coating in Manufacturing Engineering, Thessalonique 1999.
- [52] B.SCHEFFER, *ETAT DES SURFACES, COMPARAISON DES DIFFERENTES NORMES NATIONALES*, Rapport de la régie nationale des usines Renault et la direction générale de la recherche scientifique et technique 1969.
- [53] B. AMRI, *CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX MODERNES POURS OUTILS COUPANT* (1987). thèse de doctorat en Mécanique, INSA de Lyon, 137.
- [54] M. Amirat, *ETUDE THERMOMECHANIQUE ET CARACTERISATION DU COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE DE COUPLE DE MATERIAUX FERROMAGNETIQUE/ FERROMAGNETIQUE ET DIAMAGNETIQUE/ FERROMAGNETIQUE SOUMIS A UN CHAMP MAGNETIQUE DANS UN*

- ATMOSHERE CONTROLEE* (2008). thèse de doctorat en Mécanique, Université de Poitiers.
- [55] J. P. PEREZ, R. CARLES, R. FLECKINGER, *ELECTROMAGNETISME ? Fondements et Applications*, Dunod, Paris, 2002.
- [56] J. P. BAILON, J. M. DORLOT, *DES MATERIAUX*, 3^e Edition, Presses Internationales Polyethnique, 2000, 374-380.
- [57] K. JOON CHIN, *ETUDE THERMOMECHANIQUE ET CARACTERISATION DU COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE D'UN COUPLE DE MATERIAUX FERROMAGNETIQUES ACIER / ACIER DANS UN CONTACT ELECTRIQUE GLISSANT SOUMIS A UN CHAMP MAGNETIQUE* (2003). thèse de doctorat en Mécanique, Université de Poitiers.
- [58] E. DURAND, *MAGNETOSTATIQUE*. Masson et C^{ie}, Editeurs, 120, Boul. Saint-Germain, Paris-VI, 1986.
- [59] E. D. DU TREMOLET DE LACHEISSERIE, *MAGNETISME I*, Fondements, EDP Sciences, 2000,
- [60] P. HARTEMANN, *EFFETS ET MATERIAUX MAGNETOTRICTIFS*, Traité Electronique, Techniques de l'ingénieur, 1990, E-1880.
- [61] V.L. Al'shits et al, *Kristallografiya. SOV. PHYS. CRYSTALLOGR.* 35, (1990), 597.
- [62] F. R. N. NABARRO, *THEORY OF CRYSTAL DISLOCATION*. Dover Publications Inc, 1987.
- [63] H. ZAIDI, M. AMIRAT, J. FRENE, T. MTHIA, D. PAULMIER, *MAGNETOTRIBOLOGY OF FERROMAGNETIC/ FERROMAGNETIC SLIDING COUPLE*, *WEAR*, 263, 2007, 1518-1526.
- [64] K.J. CHIN, H. ZAIDI, M.T. NGUYEN, P.O. RENAULT, *TRIBOLOGICAL BEHAVIOR AND SURFACE ANALYSIS OF MAGNETIZED SLIDING CONTACT XC48 STEEL / XC48 STEEL*, *Wear*, 250, (2001), 470-476.
- [65] M.K. MUJU, A. GHOSH, *EFFECT OF A MAGNETIC FIELD ON DIFFUSIVE WEAR OF CUTTING TOOLS*. *Wear*, 58, (1980), 49-58.
- [66] K. HIRATSUKA, T. SASADA, S. NOROSE, *THE MAGNETIC EFFECT ON WEAR OF METALS*. Proceeding of the JSLE, International Tribology Conference, July 8-10, Tokyo, Japan, (1985), 159-163.
- [67] T. SASADA, K. HIRATSUKA, H. SAITO, *WEAR*, 160, (1993), 119-123.

- [68] P.K. BAGCHI, *EFFECT OF MAGNÉTISATION ON THE WEAR CHARACTERISTICS OF CUTTING TOOLS*, Indian J. Technol. (1970), 264-269
- [69] P.K. BAGCHI, A. GHOSH, *MECHANISMS OF CUTTING TOOL WEAR IN THE PRESENCE OF A MAGNETIC FIELD*, Indian J. Technol. (1971), 165-168
- [70] M.K. MUJU, A. GHOSH, *EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON WEAR*, ASME. 75-PT-5, (1975)
- [71] M.K. MUJU, A. GHOSH, *EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON WEAR MODEL OF ADHESIVE WEAR IN THE PRESENCE OF A MAGNETIC FIELD*, Wear. 41, (1977), 103-16
- [72] STELLRAM, *TOURNAGE*, Star Guide™ Stellram, <http://www.stellram.com>, pp 32-33 et 126.

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Figure I.1 : Synoptique général d'un système tribologique.

Figure I.2 : Vue théorique en coupe d'une surface.

Figure I.3 : Opération de chariotage en tournage.

Figure I.4 : Principales zones de déformation et paramètres de la coupe orthogonale.

Figure I.5 : Morphologie des copeaux en fonction de la vitesse de coupe (copeau obtenus lors d'essais de tournage avec plaquette céramique Al_2O_3 . $f = 0,2$ mm/tr).

Figure I.6 : Modèles du copeau.

Figure I.7 : Copeau en dent de scie formé par tournage dur.

Figure I.8 : Définition de a_p et f en tournage.

Figure I.9 : Géométrie de l'arête de coupe.

Figure I.10 : Définition basique d'un outil de coupe de tournage.

Figure I.11 : Angle de direction d'arête de l'outil.

Figure I.12 : Angle d'inclinaison d'arête.

Figure I.13 : Arête de coupe dans le plan P_0 .

Figure I.14 : Dispositif d'assistance ultrason en tournage.

Figure I.15 : Principe de l'usinage assisté jet d'eau haute pression.

Figure I.16 : Schéma du dispositif d'assistance magnétique.

Figure I.17 : Dispositif d'assistance cryogénique.

Tableau I.1 : Différents modes de dissipation d'énergie en frottement.

CHAPITRE II

Figure II.1 : Désignation des faces ((a) formation du copeau, (b) usure de l'outil de coupe).

Figure II.2 : Paramètres du comportement du copeau.

Figure II.3 : Paramètres du comportement d'outil de coupe.

Figure II.4 : Mécanismes endommageants des outils de coupe.

Figure II.5 : Représentation des différentes zones d'usures de l'outil durant la phase de formation du copeau.

Figure II.6 : Perte de masse en fonction du temps.

Figure II.7 : Diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température d'usinage (parallèle possible avec la vitesse).

Figure II.8 : Coupe orthogonale d'acier. (a) $V_c=0,5$ m/s, $f=0,2$ mm/tr, les flèches blanches indiquent les dépôts de matière laissés sur la pièce après l'évacuation de l'arête rapportée

Figure II.9 : Usure par abrasion (a) sur la face de coupe après usinage d'alliage de titane, [47] (b) sur la face de dépouille après usinage de Duralcan.

Figure II.10 : Processus d'usure par diffusion.

Figure II.11: Processus d'usure par oxydation.

Figure II.12 : Formes d'usure de l'outil de coupe d'après la norme NFE 66 505.

Figure II.13 : Usure par déformation plastique de l'arête.

Figure II.14 : Usure par écaillage de l'arête.

Figure II.15 : Usure par arête rapportée.

Figure II.16 : Usure en dépouille.

Figure II.17 : Usure en cratère.

Figure II.18 : Variation de la susceptibilité magnétique en fonction de la température pour quelques substance (a) paramagnétique, (b) antiferromagnétique et (c)

ferromagnétique.

Figure II.19 : Evolution des domaines magnétiques dans un matériau ferromagnétique soumis à un champ magnétique croissant, (a) absence du champ magnétique, (b) les domaines orientés augmentent suivant H, (c) H= intensité magnétique à saturation (H_s).

Figure II.20 : Représentation schématique des dipôles atomiques des trois principaux matériaux avec et sans application d'un champ magnétique, (a) diamagnétique, (b) paramagnétique, (c) ferromagnétique.

Figure II.21 : Induction magnétique B des matériaux ferromagnétiques, diamagnétiques et paramagnétiques à la température ambiante.

Figure II.22 : Effet joule longitudinal de quelques métaux et alliages métalliques en fonction du champ magnétique appliqué H_a .

CHAPITRE III

Figure III.1 : Intensité du champ magnétique en fonction de courant I.

Figure III.2 : Vue générale de la chaîne d'expérimentation.

Figure III.3 : Forme des plaquettes.

Figure III.4 : Forme et dimensions de la plaquette.

Figure III.5 : Fixation de la plaquette amovible sur le corps d'outil.

Figure III.6 : Microbalance de marque DHAUS.

Figure III.7 : Microscope optique.

Figure III.8 : Microscopes électroniques à balayage MEB.

Figure III.9 : Caméra infrarouge de marque ESCIL.

Tableau III.1 : Caractéristiques de la bobine et le fil de cuivre.

Tableau III.2 : Dimensions de la plaquette.

Tableau III.3 : Dimensions du corps d'outil.

Tableau III.4 : Composition chimique en pourcentage massique du substrat (acier XC38).

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la vitesse de coupe sans lubrification.

Figure IV.2 : Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la vitesse d'avance sans lubrification.

Figure IV.3 : Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la profondeur de passe sans lubrification.

Figure IV.4 : Evolution de la perte de masse (usure) en fonction du temps de coupe sans lubrification.

Figure IV.5 : Evolution de la perte de masse (usure) en fonction de la vitesse de coup, avec lubrification.

Figure IV.6 : Etat initial de l'échantillon.

Figure IV.7 : Observations microscopiques au *MEB* de l'arrondi du bec de l'outil (V_c), sans lubrification.

Figure IV.8 : Observations microscopiques au *MEB* de l'arrondi du bec de l'outil (V_c), avec lubrification.

Figure IV.9 : Observations microscopiques au *MEB* de l'arrondi du bec de l'outil (T_c).

Figure IV.10 : Observations microscopiques au *MEB* de l'arrondi du bec de l'outil (a_p).

Figure IV.11 : Observations microscopiques au *MEB* de l'arrondi du bec de l'outil (f).

Figure IV.12 : Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau, sans lubrification et $V_c = 6 \text{ m.min}^{-1}$.

Figure IV.13 : Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau, sans lubrification et $V_c = 136 \text{ m.min}^{-1}$.

Figure IV.14 : Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau, avec lubrification et $V_c = 6 \text{ m.min}^{-1}$.

Figure IV.15 : Micrographies optiques montrant la taille de profil des dents de copeau, avec lubrification et $V_c = 136 \text{ m.min}^{-1}$.

Figure IV.16 : La forme des copeaux en absence et présence du champ magnétique.

Figure IV.17 : Exemple de cartographie du champ de température obtenue par caméra ESCIL.

Figure IV.18 : Distribution de la température à l'interface le long de l'outil de coupe.

Tableau IV.1 : Valeurs moyennes de la température d'interface en fonction de H et V_c .

ANNEXE N°1

Fonction réalisation

La durée de vie des outils de coupe

La qualité du travail d'un outil de coupe dans le processus d'usinage dépend entre autre de son degré d'usure. Elle a une influence sur :

- La qualité de la surface obtenue.
- La tenue de l'outil dans le temps.
- La puissance nécessaire à la coupe.

1. Les paramètres de coupe ayant une influence sur l'usure

- La vitesse de coupe (+++) : La température étant croissante avec la vitesse de coupe, l'outil devient fragile et l'usure est rapide.
- L'avance (++).
- La profondeur de passe (++).
- Le matériau usiné (++).
- Le matériau de l'outil (++).
- La lubrification (++).

2. Les principaux types d'usure

2.1. L'usure en dépouille

Elle apparaît sur la face de dépouille suivant une bande strillée brillante parallèle à l'arrêt. Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil.

Le critère d'usure est la largeur de l'usure, nommée VB.

$$VB \text{ max} = 0,3 \text{ mm}$$

2.2. L'usure en cratère.

Elle s'observe sur la face de coupe et apparaît sous la forme d'une cuvette créée par le frottement du copeau.

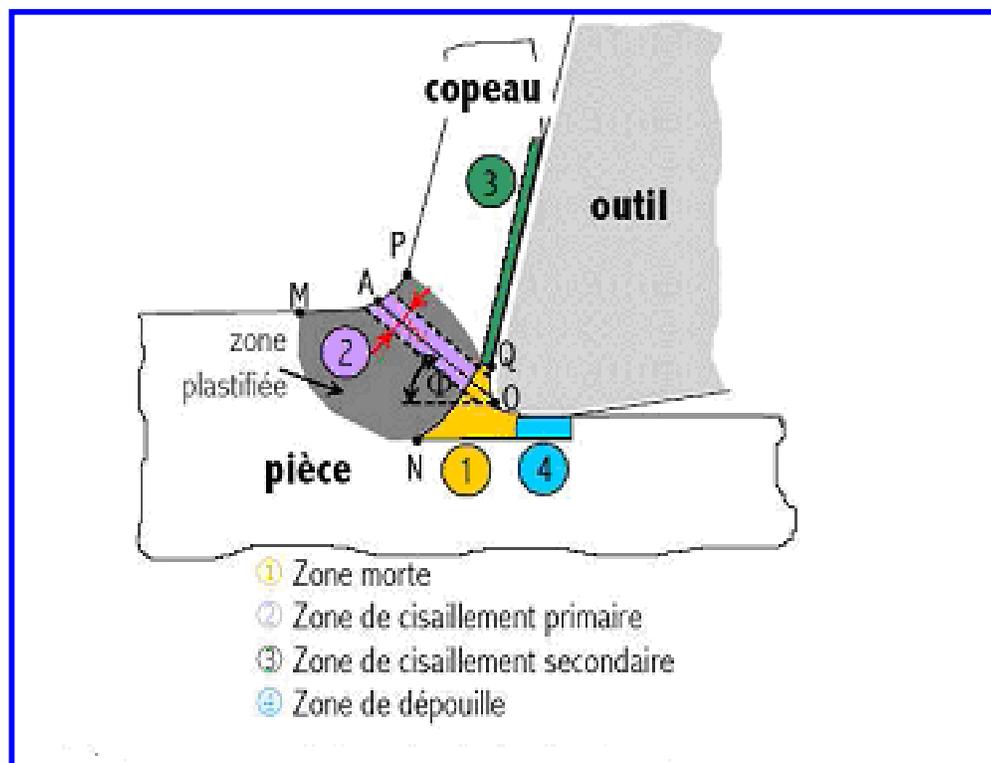
Le critère d'usure est la profondeur de cratère : KT .

3. La loi de durée de vie de l'outil

Un outil est déclaré usé quand le critère d'usure est atteint.

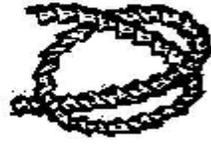
Le plus souvent, on prend le critère d'usure du VB.

La durée de vie est calculée par le modèle de Taylor : $T = C_v \cdot V_c^n$.



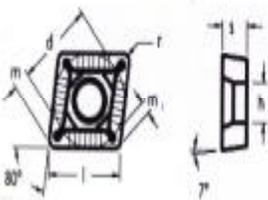
ANNEXE N°2

Tableau de références copeaux d'après norme NFE 66-505

1 Copeau ruban ¹⁾		2 Copeau tubulaire ¹⁾		3 Copeau en spirale		4 Copeau hélicoïdal en rondelle ¹⁾		5 Copeau hélicoïdal conique ¹⁾		6 Copeau en arc ²⁾		7 Copeau élémentaire		8 Copeau aiguille	
1.1 Long		2.1 Long		3.1 Plet		4.1 Long		5.1 Long		6.1 Attaché					
1.2 Court		2.2 Court		3.2 Conique		4.2 Court		5.2 Court		6.2 Détaché					
1.3 Enchevêtré ¹⁾		2.3 Enchevêtré				4.3 Enchevêtré		5.3 Enchevêtré							

ANNEXE N°3

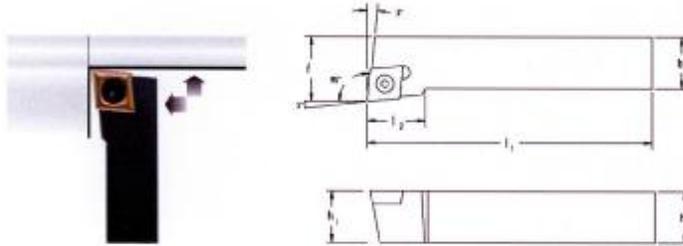
Plaquette de tournage Forme C

Système Posicut^R


Technical drawing of a turning insert (Forme C) showing top and side views. The top view is a square with a central circular hole. Dimensions are labeled: d (outer diameter), l (width), s (width of the central hole), r (radius of the corner), m (width of the side chamfer), and m₁ (width of the side chamfer). A 90° angle is indicated at the corner. The side view shows the thickness of the insert, labeled h.

Dimensions pour CCGT et CCMT							
Grandeur	d mm	l mm	s mm	r mm	m mm	m ₁ mm	h mm
060200	6,35	6,45	2,38	0,00	1,75	0,12	2,80
060201	6,35	6,45	2,38	0,10	1,71	0,21	2,80
060202	6,35	6,45	2,38	0,20	1,65	0,30	2,80
060204	6,35	6,45	2,38	0,40	1,54	0,48	2,80
060208	6,35	6,45	2,38	0,80	1,32	0,72	2,80
09T300	9,52	9,57	3,97	0,00	2,63	1,45	4,40
09T301	9,52	9,57	3,97	0,10	2,59	1,42	4,40
09T302	9,52	9,57	3,97	0,20	2,53	1,39	4,40
09T304	9,52	9,57	3,97	0,40	2,42	1,33	4,40
09T308	9,52	9,57	3,97	0,80	2,20	1,21	4,40
120404	12,70	12,90	4,76	0,40	3,31	1,31	5,50
120408	12,70	12,90	4,76	0,80	3,08	1,69	5,50
120412	12,70	12,90	4,76	1,20	2,86	1,57	5,50

Porte-plaquettes système Posicut^R

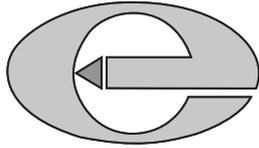


SCLC 95°										
Référence	Dimensions (mm)								Plaquettes	Rayon de référence plaque
	b	l ₁	l ₂	f	h	h ₁	k	z		
SCLCR/L1010E06	10	70	10	12	10	10	-	-	CC_0602	0,4
SCLCR/L1212F09	12	80	16	16	12	12	-	-	CC_09T3	0,8
SCLCR/L1616H09	16	100	16	20	16	16	-	-	CC_09T3	0,8
SCLCR/L2020K09	20	125	16	25	20	20	-	-	CC_09T3	0,8
SCLCR/L2020K12	20	125	25	25	20	20	-	-	CC_1204	0,8
SCLCR/L2525M12	25	150	25	32	25	25	-	-	CC_1204	0,8

Plaquettes - voir pages 32 à 33

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Publications et Communications



Influence of the magnetic field on the wear behavior of a cutting tool during the turning operations

D. Necib¹, A. Bouchoucha¹, H. Zaidi², M. Amirat², D. Eyidi³

¹ *Laboratory of Mechanics, Faculty of Sciences of Engineering, Mentouri Constantine University 25000 Algeria.*

Tel : 00213 31 8188 53, E-mail : necibdjlani@yahoo.fr, bouchoucha_alil@yahoo.fr.

² *Laboratory LMS. UMR-6610-CNRS, University of Poitiers Telecommunications facilities 2-bd Pierre and Marie Curie-BP 30179, 86960 Futuroscope Chasseneuil Zip Code, Poitiers, France.*

*Tel : 00336 5 49 49 65 00, E-mail : zaidi@lms.univ-poitiers.fr.
amirat@lms.univ-poitiers.fr.*

³ *PhyMat Laboratory. UMR-6630-CNRS, University of Poitiers, Telecommunications facilities Pierre and Marie Curie-BP 30179, 86960 Futuroscope Chasseneuil Zip Code, Poitiers, France.*

Tel : 00336 5 49 49 66 53, E-mail : Dominique.eyidi@univ-poitiers.fr.

(Received 11 May 2010; accepted 27 October 2010)

Abstract

This study concerns tests carried out without lubrication on a universal lathe to study the influence of the magnetic field on the wear of a cutting tool made of metallic carbide. The tests parameters are: the intensity of the magnetic field (from 0 to 28.5 kA.m⁻¹), the cutting speed (from 6 to 136 m.min⁻¹), the advance speed and the cut depth (pass). Both of the previous parameters are fixed respectively at 0.125 mm.rev⁻¹ and 0.5 mm. The material being cut is made of XC38 steel. The tool wear is evaluated by weighing method (before and after each test). The results showed that the magnetic field has an influence on wear and that there is a critical value ($H = 16.5$ kA.m⁻¹) for which wear is minimum. Also, the scanning electron microscope (SEM) and optical microscope observations revealed the existence of three types of wear that are: flank wear, crater wear and wear by plastic deformation. Moreover, we concluded that, the increase of the magnetic field modifies the shape and the morphology of chips and rises the contact temperature.

Key words: *Magnetic field, Cutting tool, wear, Cutting speed*

1. Introduction

The turning plays an important role in the mechanical industry, where manufacturers seek to increase production while maintaining the lowest cost possible. These two objectives are limited by several parameters including the lifetime of the cutting part. This has prompted researchers to improve, first the quality of the material of the cutting tool, and secondly, to minimize the negative effect of the cutting speed (Padilla *et al.*, 1986). For this, we sought to optimize the life of cutting tools by a fairly new process. It consists applying to the contact piece-tool a magnetic field during manufacturing. The reduction of wear of the cutting tool can be obtained either by choice of the geometry and hardness of the active part of the tool, or by using a manufactured material that underwent thermal treatment, which softened it. The latter must satisfy two constraints. On the one hand, a quantitative constraint, which leads to reduce the cost of the manufactured pieces; and in the other hand, a qualitative constraint, which consists obtaining surfaces with geometries and optimal micro-geometries. In 1987, Alshits *et al.* (1990) had studied the effect of the magnetic field applied to metal pairs and had showed that its application results in a considerable modification of the plasticity of metals: It is the magneto-plastic. Moreover, it showed that the magnetic field can lead to the hardening of metal crystals, called magneto-plastic positive. But it can also lead to a softening of crystals, called magneto-plastic negative. In addition, the nature of the magneto-plastic effect depends mainly on the magnetic properties of metals (Alshits *et al.*, 1990).

In 1970 and 1971, (Bagchi, 1970; Bagchi and Ghosh, 1971) are the first to have studied the effect of an external electromotive force (EMF) created by a magnetic field on the wear characteristics of cutting tools in HSS on mild steel. Their results showed a diminution of wear of the cutting tool. In 1975 and 1977, Muju and Ghosh (Muju and Ghosh, 1977; Muju and Ghosh, 1977; Muju and Ghosh, 1980) have presented a physical model to explain some results obtained during experiments done with a magnetized tool HSS (tool running on mild steel and brass). In their observations, they confirmed that this technique allows an increase in the lifetime of the cutting tools by about 40%, also a reduction in the size of wear particles (Muju and Ghosh, 1977). Furthermore, (El Mansori *et al.*, 2004; El Mansori

and Klamecki, 2006; El Mansori *et al.*, 2003) showed that the effect of magnetic field on the mechanisms of tool-chip friction (position, morphology of the primary zone and the contact tool-chip) is to reduce the wear of the cutting tool. In 2003, Batainch *et al.*, (2003) has proved that this technique results in a longer lifetime of the cutting of 10%, despite an increase in the interfacial temperature during manufacturing. These recent studies reveal that the application of the magnetic field is concentrated at the surface layer of material, which may be able to modify its mechanical behavior and tribology of tool-chip contact.

The purpose of this study is to show the influence of the magnetic field on the wear behavior of a carbide tool (carbide insert), in a function of the cutting speed during turning operations. The discussion of results is mainly based on microscopic observations of the active tip of the tool and the different forms of chips collected during testing, also on the temperature of cutting tool-piece.

2. Experimental

2.1. Materials

The experimental apparatus shown schematically in Figure 1 includes mainly:

- 1. An infrared camera.
- 2. Cutting tool (inserts).
- 3. The workpiece.
- 4. An Ammeter.
- 5. Regulator of a voltage of alternative current, used to vary the magnetic field by changing the current applied to the coil.
- 6. A coil of 1600 spiral and of a resistance equal to 3.9Ω , serving in the creation of magnetic field inside the tool.

2.2. Mechanical test

The international standard DIN ISO 3685 (Padilla *et al.*, 1986) was used for wear tests of long duration carried out to assess the lifetime of the cutting tools in P25 at different cutting speeds. The Weighing of inserts before and after each cutting operation permit to deduct the loss of mass (W), using a microbalance accurate to 100 μg . The turning operations relative to different tests were realized on round specimens of non-alloy steel grade XC38, of 65 mm of diameter, of 500 mm of length (the length manufactured $l_c = 300$ mm) and hardness 52 HRC.

A centering hole of 6 mm of diameter is realized to ensure rigid fixation of the piece between the two points. A lathe (Figure 1), of a power of 9.5 kW, mounted on 3-jaw chuck was used for the cutting operations. Removable Inserts (Figure 2(a)) of a rhombic form are metal carbide of grade P25 (type CCMT09T308E-73) with a rounding ray corresponding to 80°. The tightening torque insert is fixed at 3 Nm. The insert holder (Figure 2(b)), of a reference SCLC2020K09 (D4010T) (ISO, 2000) and of a designation SCLCR/L2525M12 is provided with a screw of the tightening of insert (Table 1).

$a_p = 0.5$ mm, cutting speeds $V_c = 6, 17, 48, 82$ and 136 m.min⁻¹, the intensities of magnetic field $H = 5.5, 16.5$ and 28.5 kA.m⁻¹; and a cutting time (T_c) is of 14 min for each pass.

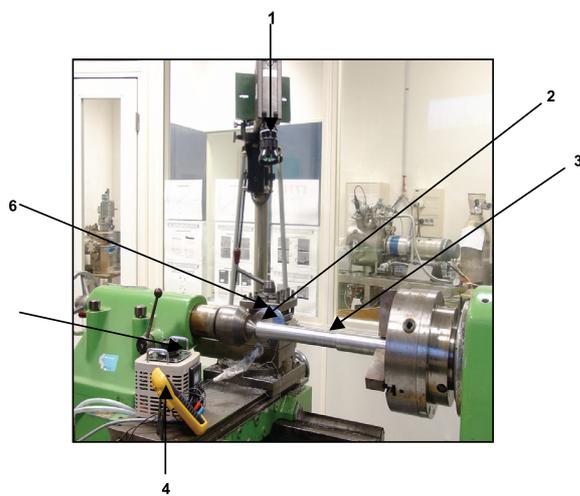


Fig. 1. Experimental apparatus

The insert is fixed by screws and is positioned in the direction where it exercises the cutting efforts. The cutting tests were realized without lubrication, with an advance $f = 0.125$ mm.rev⁻¹, a depth of cut

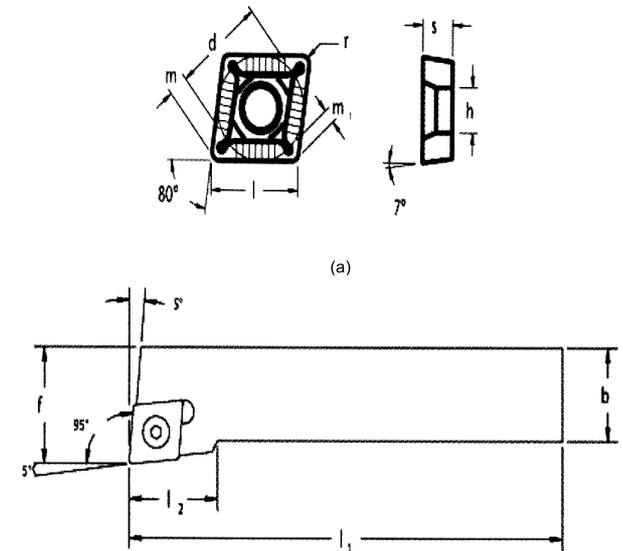


Fig. 2. Forms and dimensions of the carbide insert and tool holder

2. 3. Morphological examination

The images of the scanning electron microscopy (SEM) were realized using a SEM JEOL 5600 LV operating under a tension of 20 kV in secondary electron mode. An infrared thermographic camera brand ESCIL, operating during the cutting operations permitted to determine the temperature between the cutting tool and workpiece.

Table 1
Dimensions of the insert and tool holder

Dimensions of the insert [mm]	r	d	l	s	H	m	m ₁
	0,8	9,52	9,57	3,97	4,40	2,20	1,21
Dimensions of the tool holder [mm]	b		L ₁		L ₂		
	25		150		25		
Angle of the flank face [°]	5						

3. Results and discussion

3.1. Influence of magnetic field on the tool wear

The cutting edge of the tool, active element, by which the deformation work is carried out, is subjected to severe mechanical and thermal solicitation leading to its wear. The latter depends on cutting parameters and the magnetic field intensity. In fact, Figure 3 illustrate the evolution of wear as a function of the cutting speed, when H is fixed (for each curve). Figure 3(a) shows that the mass loss is maximum in the absence of magnetic field, with a value of 400 μg . The flank wear (VB) reached 0.3 mm. In contrast, the loss of mass decreased to 300 μg for $H = 5.5 \text{ kA.m}^{-1}$ (Figure 3(b)). When $H = 16.5 \text{ kA.m}^{-1}$ (Figure 3(c)), the mass loss is reduced to 100 μg and is far from the value of $\text{VB} = 0.3 \text{ mm}$ (criteria of wear NFE66505). Finally, when $H = 28.5 \text{ kA.m}^{-1}$ (Figure 3(d)), the loss of mass is around 300 μg . This value is the consequence of the cutting speed, which increases

the wear of the tool. This wear of mechanical nature is due to permanent or cyclic constraints; also to the action of friction. In this case, their severity accentuate due to significant thermal effects that tend to degrade the qualities of resistance of the cutting material.

3.2. Influence of magnetic field on the mode of tool wear

Examination of Figure 4 permits to identify the wear modes developed on the tool. A first area, called running of the cutting edge, is characterized by flank wear. Then, a crater wear is recorded on the chamfer of this edge, where appears a wear by plastic deformation. In practical terms, the flank wear is the most important because it conditions simultaneously, the surface state of the workpiece and the dimensional accuracy (Figure 4(a)). Figures 4(a) and 4(b) show that crater wear appears much sooner, when the cutting speeds increases. This phenomenon is mainly related to the increase of

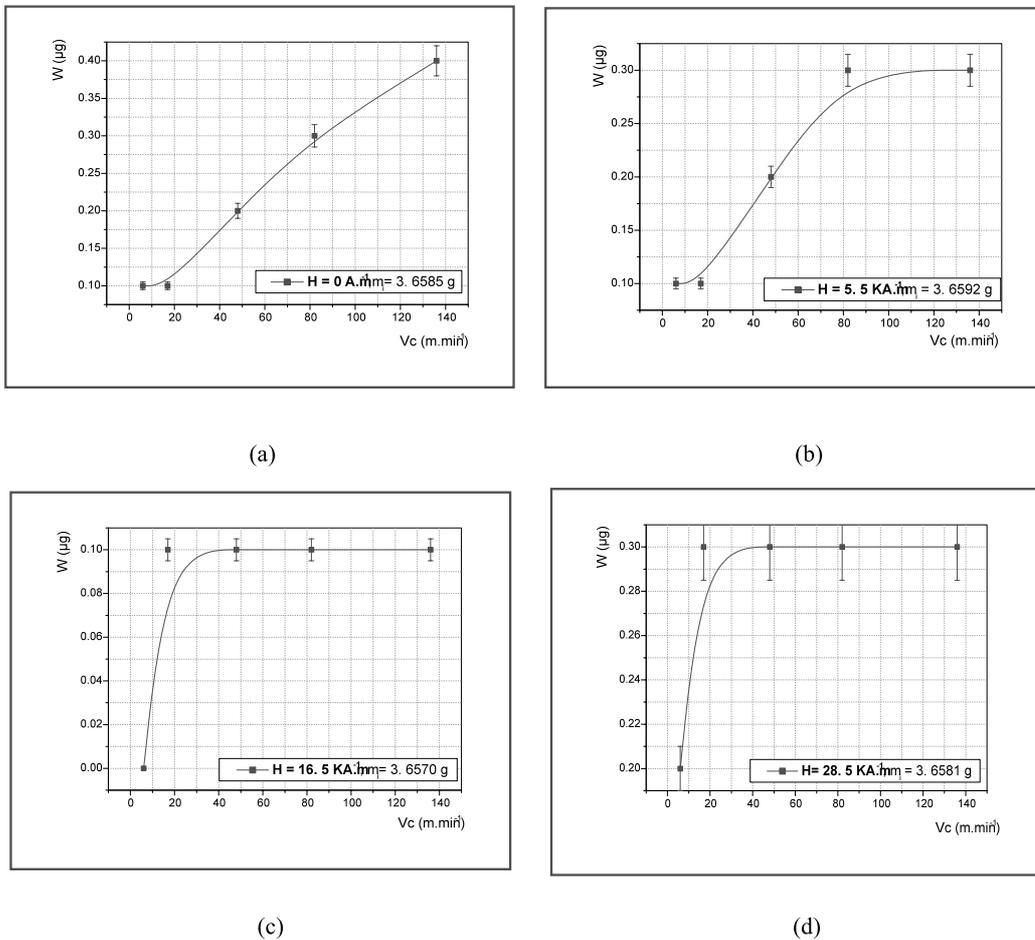


Fig. 3. Evolution of wear verses the cutting speed: $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.125 \text{ mm.rev}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$, (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$ (b) $H = 5.5 \text{ kA.m}^{-1}$ (c) $H = 16.5 \text{ kA.m}^{-1}$ and (d) $H = 28.5 \text{ kA.m}^{-1}$

cutting temperature which favors wear by diffusion. Figure 4(d) indicates the presence of chips having adhered on the cutting surface (rake face). Indeed, when the chip slides over the rake face of the tool, an intense friction generate elevations of localized temperatures, fusions and micro-welding. This may result in bonding of certain particles of the chip on the rake face of tool (Caubet, 1964). The damage of the latter one is weak in the presence of a magnetic field (Figures 4(b), 4(c) and 4(d)), which leads to only a weak wear of crater type. However, in absence of magnetic field, the crater wear becomes important, thus a flank wear and wear by plastic deformation appear on the rounding of the cutting edge.

3. 3. Influence of magnetic field on the morphology of the chip

The different micrographic observations presented in Figure 5 show that the cutting speed has no significant influence on the general morphology

of the chips. Indeed, the latter ones are always continuous and have the form of sawteeth. In contrast, the profile shape of the chip depends on the intensity of the applied magnetic field. Figure 5(a) shows the chips from the cutting, in the absence of magnetic field having a profile with large sawteeth (The step between two teeth is about 1 mm). For $H = 28.5 \text{ kA.m}^{-1}$ (Figure 5(d)), the size of these teeth decreases ($\sim 120 \mu\text{m}$). Furthermore, Figures 5(b) and 5(c) show chips obtained at $H = 5.5 \text{ kA.m}^{-1}$ and $H = 16.5 \text{ kA.m}^{-1}$, respectively, with teeth smaller (~ 50 to $100 \mu\text{m}$). In Figure 6, we observe a change of the morphology of chips due to the magnetic attraction and the temperature elevation. In addition, the application of magnetic field reduces the constraint of shearing at the interface tool-chip-piece, facilitating the sliding of the tool, in the case where the latter one is in declining (Zaidi *et al.*, 2007; Chin *et al.*, 2001). At the time of the cutting, the size of the saw-teeth chips is proportional to constraints of

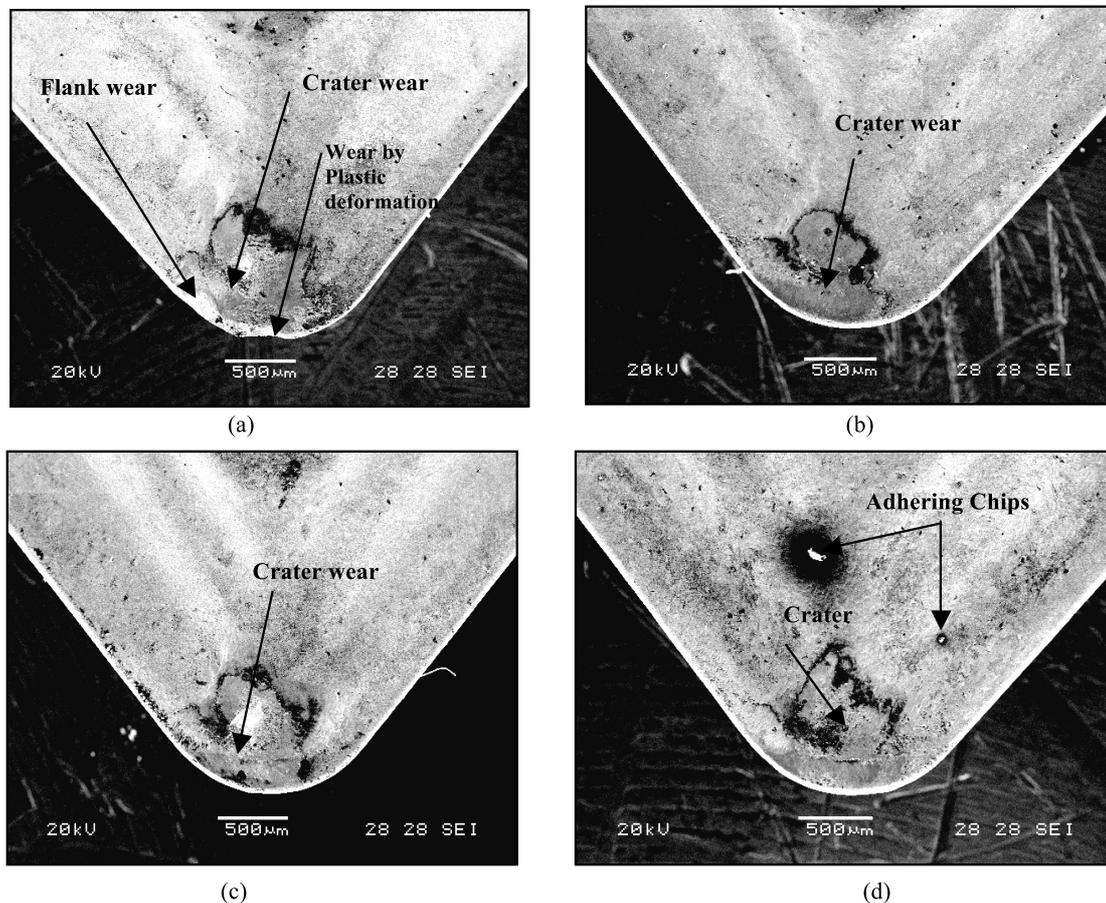


Fig. 4. SEM observations of the tip rounding of the tool: $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.125 \text{ mm.rev}^{-1}$, $l_c = 300 \text{ mm}$ (a) $H = 0 \text{ A.m}^{-1}$ (b) $H = 5.5 \text{ kA.m}^{-1}$ (c) $H = 16.5 \text{ kA.m}^{-1}$ and (d) $H = 28.5 \text{ kA.m}^{-1}$

shearing of these chips. This shows again that the applied magnetic field in the contact reduced the shearing constraints, which present a maximum for magnetic field intensity comprises between 5.5 and 16.5 kA.m⁻¹.

3. 4. Influence of magnetic field on the cutting temperature

The average temperature T_m of the cutting tool obtained using an infrared thermo graphic camera is usually measured on the upper surface of the chip

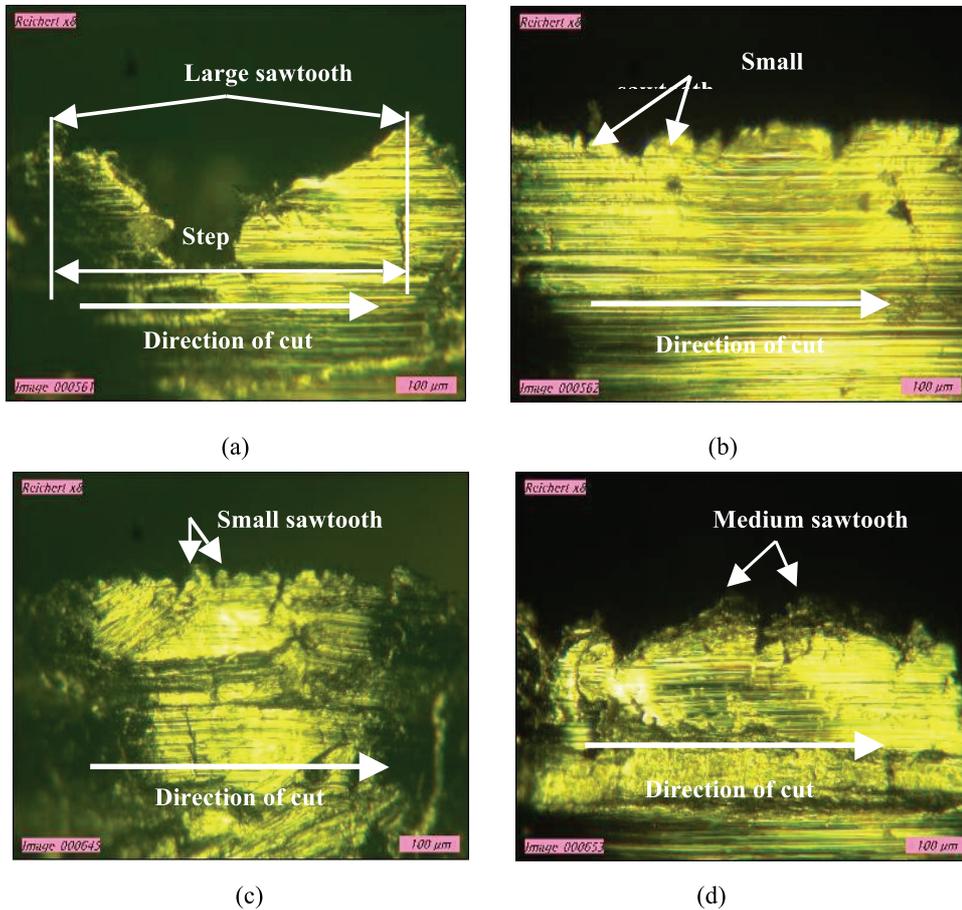


Fig. 5. Changing the form of standard chips based on the magnetic field: V_c = 6 m.min⁻¹, a_p = 0.5 mm, f = 0.125 mm.rev⁻¹, l_c = 300 mm. (a) H = 0 A.m⁻¹ (b) H = 5.5 kA.m⁻¹ (c) H = 16.5 kA.m⁻¹ and (d) H = 28.5 kA.m⁻¹

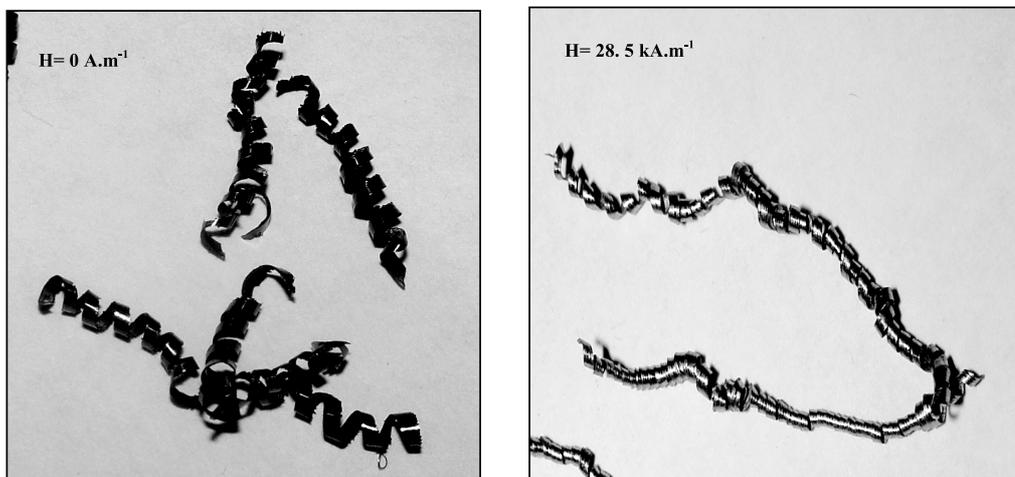


Fig. 6. Influence of the magnetic field on the morphology of the chip: V_c = 6 m.min⁻¹, a_p = 0.5 mm, f = 0.125 mm.rev⁻¹ and l_c = 300 mm

(the temperature is not that of the interface because the contact tool-piece is inaccessible). Infrared imagery of Figure 7 gives the distribution of thermal field in the area of the cutting around the tool and chip. When increasing the applied parameters (V_c and H), the temperature at the interface increases.

This elevation is not only due to the increase of cutting speed, but also to the effects of magnetization and of Joule, created by the Foucault's currents generated by the variable magnetic field in the rotating piece (El Mansori *et al.*, 2004; El Mansori and Klamecki, 2006).

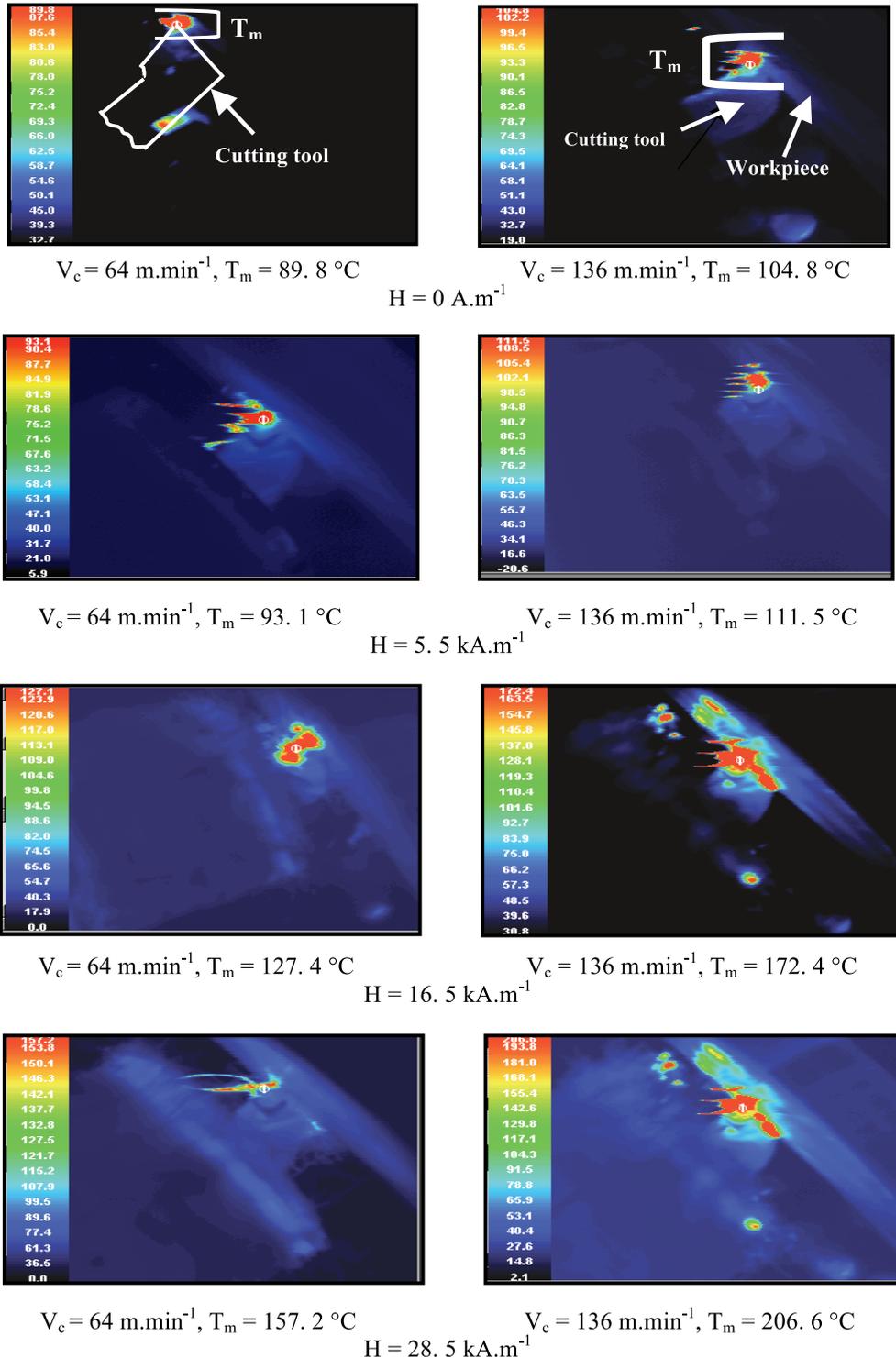


Fig. 7. Distribution temperature at the interface along cutting: $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.125 \text{ mm.rev}^{-1}$ and $l_c = 300 \text{ mm}$

4. Conclusions

This work permitted to study the influence of magnetic field on the mode of cutting and wear behavior of the tool, as a function of the cutting speed during manufacturing operations. It appears clearly that the magnetic field has several impacts on manufacturing. Thus, we can notice its influence on:

- Reducing the wear of cutting tools.
- The modification of modes of wear of cutting tools.
- The elevation of the temperature of contact, which contribute to the change of the profile type of chip of manufacturing.
- Diminution of constraints of shearing at the interface tool-chip-piece.

It stands out therefore that the application of a magnetic field on the cutting tools appears as a simple solution, effective and inexpensive to increase their lifetime and thereby contribute to the optimization of the production tool.

References

- Alshits V.L., and Kristallografiya, 1990. The effect of the magnetic field applied to metal pairs. *Sov. Phys. Crystallogr* **35**, pp.597.
- Bagachi P.K., 1970. Effect of magnétisation on the wear characteristics of cutting tools. *Indian J. Technol*, pp.264-269.
- Bagachi P.K., and Ghosh A., 1971. Mechanisms of cutting tool wear in the presence of a magnetic field. *Indian J. Technol*, 165-168.
- Bataineh O., Klamecki B., and Koepke B., 2003. Effect of pulsed magnetic treatment on drill wear. *Journal of Materials Processing Technology* **134**, pp.190-196.
- Caubet J.J., 1964. Théorie et pratique industrielle du frottement. *Dunod-Technip*, Paris. Pp.94-99.
- Chin K.J., Zaidi H., Nguyen M.T., and Renault P.O., 2001. Tribological behavior and surface analysis of magnetized sliding contact XC48 steel / XC48 steel. *Wear* **250**, pp.470-476.
- El Mansori M., and Klamecki B., 2006. Magnetic field effects in machining processes and on manufactured part mechanical characteristics. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* **128**, pp.136-145.
- El Mansori M., Lordache V., Seitier P., and Paulmier D., 2004. Improving surface wearing of tools by magnetization when cutting dry. *Surface & Coatings Technology* **188-189**, pp.566-571.
- El Mansori M., Pierron F., and Paulmier D., 2003. Reduction of tool wear in metal cutting using external electromotive. *Surface and Coatings Technology* **163-164**, pp.472-477.
- International Norm ISO 9001-2000 (F), 2000. Manufacturing and distribution of precision cutting tools. *Turning*, pp.35-36,126.
- Muju M.K., and Ghosh A., 1980. Effect of a magnetic field on diffusive wear of cutting tools. *Wear* **58**, pp.49-58.
- Muju M.K., and Ghosh A., 1977. Effect of magnetic field on wear model of adhesive wear in the presence of a magnetic field-I. *Wear* **41**, pp.103-116.
- Muju M.K., and Ghosh A., 1977. Effect of magnetic field on wear. *ASME*. 75-PT-5.
- Padilla P., Anselmetti B., Mathieu L., and Raboyeau M., 1986. *Production Mécanique*, Ed. Dunod, Paris, pp.136-145.
- Zaidi H., Amirat M., Frêne J., Mathia T., and Paulmier D., 2007. Magnetotribology of ferromagnetic/ferromagnetic sliding couple. *Wear* **263**, pp.1518-1526.