

ÉCOLE DOCTORALE Santé, Sciences, Technologie

THÈSE présentée par :

Brigitte VASQUES

soutenue le : 17 juin 2008

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université François - Rabelais**

Discipline/ Spécialité : Génie Mécanique et Productique

**ETUDE DU COMPORTEMENT DU
RAYON D'ARÊTE ET DE SON
INFLUENCE SUR L'INTÉGRITÉ DE
SURFACE EN TOURNAGE À SEC.**

THÈSE dirigée par :

Monsieur RANGANATHAN Narayanaswami Professeur, Université de Tours

RAPPORTEURS :

Monsieur FURET Benoît
Monsieur CHEVRIER Pierre

Professeur, Université de Nantes
Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz

JURY :

Monsieur BOUCHOU Abdelhake
Monsieur CHEVRIER Pierre
Monsieur FURET Benoît
Monsieur LEROY René
Monsieur RECH Joël

Docteur Ingénieur Recherche, ENIVL, Blois, co-encadrant
Professeur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz
Professeur, Université de Nantes
Maître de Conférences HDR, Université de Tours, co-encadrant
Maître de Conférences, Ecole Nationale d'Ingénieurs de St Etienne

INVITE :

Monsieur ANDRE Patrick

Sandvik Tooling R&D and Product Management

Remerciements

L'accomplissement d'une thèse implique un effort personnel particulier, mais il s'agit d'un travail d'équipe qui implique aussi la participation de divers intervenants. J'utilise cette page pour remercier toutes ces personnes qui ont permis l'aboutissement de ce travail de recherche.

Je tiens tout d'abord à remercier mon équipe d'encadrement :

Monsieur le professeur RANGANATHAN pour m'avoir accordé une totale confiance et autonomie, pour ses conseils et ses encouragements.

Monsieur René LEROY pour ses conseils, son aide et son soutien tout au long de ces trois années de thèse.

J'exprime toute ma profonde gratitude à Monsieur Abdelhake BOUCHOU, qui m'a accompagné depuis le début, il a su m'inculquer la rigueur scientifique et l'esprit critique nécessaire à l'accomplissement de ce travail mais il a également fait preuve d'une grande patience et d'un immense soutien.

Je tiens également à remercier Messieurs les membres du jury pour leur collaboration durant l'examen de ce travail et leur participation à la soutenance.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur Pierre CHEVRIER, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz et à Monsieur Benoît FURET, Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail, pour l'intérêt et les remarques qu'ils ont apportés à ce mémoire. Je souhaite témoigner ma profonde gratitude à Monsieur Benoît FURET, pour avoir accepté de présider ce jury de thèse.

J'exprime tous mes remerciements à Monsieur Joël RECH, Maître de conférences à l'Ecole National de Saint Etienne (ENISE) d'avoir accepté d'examiner ce mémoire et de m'avoir fait l'honneur de siéger parmi les membres du jury.

Je souhaite remercier Monsieur Patrick ANDRE de m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury. D'avoir été présent dans les moments cruciaux, pour les moyens humains et matériels qu'il a mis à ma disposition et qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe de ValeniteSafety, à l'origine de ce projet, pour avoir participé activement et financé ce travail de recherche.

Je remercie tout particulièrement Alain BONNIN, pour la mise en place des essais d'usage, pour le partage de son savoir faire et pour sa rigueur professionnelle.

Je tiens également à exprimer ma plus vive reconnaissance à Xavier MARECHAL, Richard FOUQUER, Christian LIZE, pour leurs conseils et critiques, leurs encouragements et leur disponibilité qui ont largement contribué à l'avancement de ces travaux. Jean-Marie RATET, Philippe ELIE, Fabien BERTAUD, Dominique VASSEUR et toute l'équipe du « Mouchage », Christophe ALHINC et Arnaud MOREAU pour les revêtements, je les remercie pour leur collaboration et leur disponibilité. J'exprime mes remerciements à Monsieur Pierre DONNADIEU pour le temps passé à répondre à mes questions.

Je tiens à remercier Monsieur Enrico DERAMO de l'entreprise ASCOMETAL, pour avoir fourni la matière première nécessaire à la réalisation de ces essais.

Très spécialement, Monsieur Michel BARBERON qu'il veuille retrouver ici le témoignage de ma profonde et sincère reconnaissance, pour le partage de son expérience, pour ses conseils fructueux et sa grande patience.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous ceux qui m'ont soutenue ou supportée durant ces trois dernières années : Djedjiga AIT AOUIT, Wafaa RMILI, Séverine GAUCHET, Gwen LEGENNEC, Damien JOLY, Stephen HURET, Gaël JACQUIN, Bruno QUILLIN et tous les amis. Je tiens à remercier tout particulièrement ceux qui m'ont fait le plaisir de venir assister à la soutenance.

Je remercie enfin toutes les personnes du laboratoire et de l'entreprise qui m'ont entourées pendant cette thèse, chercheurs, techniciens, personnels administratifs, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

Je tiens particulièrement à remercier chaleureusement ma mère, mon frère et Cyril pour m'avoir soutenue et accepté les sacrifices de ces dernières années.

Pour ceux qui n'ont pas trouvé leur nom dans cette liste et qui ont contribué à ce travail, je les en remercie et m'excuse de cet inacceptable oubli.

Nomenclature

A	aire de surface	(mm ²)
A _{Dmax}	section coupée maxi admissible	(mm ²)
ap	profondeur de passe	(mm)
COM	Couple-Outil-Matière	
E	module d'young	(GPa)
E _i	module de l'indenteur	(GPa)
E _r	module réduit	(GPa)
ERP	paramètre de récupération élastique	
f	avance par tour	(mm/tr)
F _a	effort axial	(N)
F _r	effort radial	(N)
F _t	effort tangentiel	(N)
h	épaisseur du copeau	(mm)
H _{berkovich}	dureté Berkovich	(GPa)
h _p	profondeur plastique	()
H _v	dureté Vickers	(échelle Vickers)
K _c	pression spécifique de coupe	(N/mm ²)
k _r	angle de direction d'arête de l'outil	degré
K _T	usure en cratère	(mm)
N	nombre de tours par minutes	(tr/min)
Ø	Diamètre	(mm)
P _c	puissance de coupe	(W)
P _u	puissance d'usinage/de coupe	(W)
P _v	puissance à vide	(W)
Q _c	débit de copeaux	(cm ³ /min)
R _e	résistance apparente d'élasticité	(MPa)
R _m	résistance a la traction (à la rupture)	(MPa)
r _β	rayon de l'arête principal de coupe	(μm)
r _ε	rayon de bec de l'outil	(mm)
T	durée de vie d'arête	(min)
V _b	usure en dépouille	(mm)
V _c	vitesse de coupe	(m/min)
V _{cmin}	vitesse de coupe minimale	(m/min)
V _f	vitesse avance	(mm/min)

Table des matières

Préambule	7
Introduction générale.....	8
La problématique :.....	10
Organisation de l'étude.....	11
1 L'enlèvement de matière	13
Considérations générales.....	13
1.1 Présentation du procédé d'usinage étudié - le tournage.....	14
1.2 Les paramètres de coupe.....	15
1.3 Les outils de coupe.....	16
1.3.1 Evolution des outils de coupe.....	16
1.3.2 Matériaux pour plaquettes de coupe.....	17
1.3.3 Procédure d'élaboration des plaquettes en carbure de tungstène	19
1.3.3.1 La structure des outils (WC-Co)	20
1.3.4 Les revêtements.....	21
1.3.5 Usinabilité et caractéristiques des matériaux	24
1.3.5.1 Influence des propriétés physiques et mécaniques	24
1.3.5.1.1 Influence de la structure.....	25
1.4 Les grandeurs géométriques et cinématiques en usinage.....	26
1.4.1 Paramètres énergétiques de la coupe	28
1.4.1.1 Phénomènes thermiques - la chaleur dans le processus de coupe.....	30
1.5 Théorie sur la formation des copeaux en usinage	32
1.5.1 Formation du copeau	32
1.5.2 Morphologie des copeaux	33
1.5.3 Paramètre qui influence le cisaillement du copeau.....	36
1.6 Durée de vie et usure des outils de coupe	38
1.6.1 Mécanisme d'usure des outils en WC-Co	40
1.7 La micro géométrie du rayon d'arête.....	42
1.7.1 La préparation du rayon d'arête sur les carbures.....	43
1.7.2 Le traitement d'arête dans la littérature.....	44
1.7.3 Influence de la micro géométrie sur l'intégrité de surface - Définition générale.....	47

1.8	Conclusion.....	50
2	Méthodologie expérimentale	53
2.1	Dispositifs considérés lors de la campagne d'essais.....	53
2.1.1	Description de la plaquette carbure et du porte outil.....	53
2.1.2	Description de l'acier usiné	55
2.1.3	Moyen de réalisation - Machine outil utilisée	56
2.2	Micro géométrie de la plaquette	58
2.2.1	Méthodologie employé pour la préparation des rayons d'arête	58
2.2.1.1	Technique de préparation du rayon d'arête.....	60
2.2.1.2	Technique de mesure du rayon d'arête	60
2.3	Mise en œuvre du tournage	61
2.3.1	Préparation des lopins - Gamme d'usinage	61
2.4	Techniques de caractérisation de surfaces.....	62
2.4.1	Microscopie interférométrique	62
2.4.1.1	Principe de fonctionnement	62
2.4.2	Microscopie électronique à balayage	63
2.4.3	Micro et Nano indentation	64
2.4.3.1	Principe de fonctionnement de la Nano -Indentation.....	65
2.5	Conclusion.....	66
3	Description des tests préliminaires – Définition des conditions de coupe	68
3.1	Détermination des conditions de coupe.....	68
3.1.1	Tests effectués avec arête de coupe non revêtu.....	69
3.1.1.1	Détermination de la vitesse de coupe minimal	70
3.1.1.2	Comportement de l'acier pendant l'usinage - test d'usure.....	71
3.1.1.3	Choix du revêtements - procédure	74
3.1.1.3.2	Influence des revêtements sur le profil des arêtes de coupe.....	74
3.1.1.4	Choix du revêtement - discussion	77
3.1.2	Tests effectués avec arête de coupe revêtue	77
3.1.2.1	Détermination de la vitesse de coupe minimale (V_{cmin})	77
3.1.2.2	Détermination de la zone de fragmentation	78
3.1.2.2.3	Conclusion - choix du couple (ap,f).....	83
3.1.2.3	Comportement de l'acier pendant l'usinage - test d'usure.....	84
3.1.2.3.4	Conclusion - tests d'usure	85
3.2	Dispositif d'essai pour l'étude du comportement des rayons d'arête	85
3.2.1	Paramètres de coupe.....	85

3.2.2	Démarche suivie pour la réalisation des essais	86
3.2.3	Méthodologie de caractérisation.....	87
3.3	Conclusion.....	88
4	Résultats et analyse	90
4.1	Présentation des résultats.....	90
4.1.1	Influence du rayon d'arête sur la durée de vie - Usure en dépouille en fonction des micros rayon d'arête.....	92
4.1.2	Influence de l'usure sur la forme des copeaux.....	95
4.1.3	Influence du rayon d'arête sur les efforts - Analyse des efforts en fonction des ER	99
4.1.3.1	Conclusions - résultat effort de coupe global.....	102
4.1.4	Les efforts sur l'arête de coupe.....	102
4.2	Influence de la micro géométrie ER sur l'état de surface.....	107
4.2.1	Caractérisation topographique des surfaces	107
4.2.1.1	Rugosité arithmétique.....	107
4.2.1.2	Profil de rugosité	108
4.2.2	Caractérisation mécanique de la surface usinée.....	109
4.3	Conclusion.....	112
	Conclusion générale et perspectives	114
	Bibliographie.....	116
	Annexe 1 - Codification ISO des Portes Outils	122
	Annexe 2 - Codification ISO des plaquettes de coupe	122
	Annexes 3 - Fiche technique de tour SOMAB Unimab 500	123
	Annexes 4 - Tableau de mesures des rayons d'arête	124
	Annexes 5 - MEB : Principe de fonctionnement	130
	Annexes 6 - Estimation de la matière et des temps de préparations	132
	Annexes 7 -Exemple : Quantification de l'usure (Vb, Vp, Kt) sur les plaquettes pour le temps d'usinage T6 = 6 minutes, Vc 300 et 400 m/min... 133	
	Annexes 8 -Exemple : Topographie de la surface de la pièce à T6.....	136
	Annexes 9 -Exemple : Profil topographique de la surface de la pièce après 6 minutes d'usinage.	138
	Annexes 10 -Exemple : Image MEB (suivi du profil d'usure dans le temps)..	140
	Listes des tableaux	142
	Listes des figures.....	143

Préambule

La forte concurrence industrielle impose aux industriels de fournir des produits de plus en plus performants à moindre coût. Bénéficier de l'innovation technologique est le meilleur moyen de répondre au besoin d'amélioration des procédés industriels existants. Les matières à usiner évoluent et les outils de coupe doivent suivre cette évolution. Il faut accroître leur connaissance par la caractérisation de leurs comportements mécaniques et chimiques, afin de rationaliser les opérations coûteuses telles que les opérations d'usinage. De ce fait, il est important pour les industriels de nouer des liens étroits avec les organismes de recherche. Dans cette optique, une structure mixte de recherche disposant de matériels de haute technologie est née d'un partenariat entre le Laboratoire de Mécanique et Rhéologie, EA 2640 de l'Université François Rabelais de Tours (Polytech'Tours) et le fabricant d'outils de coupe (ValeniteSafety). Le Centre d'Etude et de Recherche sur les Outils Coupants (CEROC) est le fruit de ce partenariat. Il a été inauguré en avril 2005 et ce présent travail est le premier réalisé en son sein.

Ce travail, entrepris dans le cadre du développement du CEROC, a pour but de *valider* l'application des *méthodes de mesures* employées à *l'analyse* des résultats de coupe. Pour donner suite à cette application, une problématique sur la préparation de l'acuité d'arête, proposée par l'industriel, a été prise en compte. Il s'agit de :

- caractériser l'influence du rayon d'arête (*ER*) et de sa forme (*W/H*) sur *l'intégrité de surface*,
- mesurer l'impact de cette micro géométrie sur la *durée de vie* de la plaquette.

Introduction générale

La caractérisation paramétrique des plaquettes de coupe a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Ces travaux mettent en avant quatre paramètres fondamentaux : la nuance (composition métallurgique du substrat et son association à un revêtement), la géométrie brise copeau, la taille de la plaquette et le rayon de bec.

L'évolution des techniques d'usinage, tel que le micro usinage ou l'usinage de matériaux durs, ont mis en exergue un 5^{ème} paramètre : la micro géométrie de l'acuité d'arête [Shaf'06]. Dans les différentes opérations d'usinage, l'épaisseur du copeau peut approcher l'ordre de grandeur cette micro géométrie d'arête. Plusieurs études expérimentales et théoriques ont montré l'influence significative de ce paramètre sur :

- la formation du copeau,
- l'évolution des efforts de coupe et des gradients de températures,
- l'usure des outils et leur durée de vie,
- l'état de surface en fin d'usinage,

et ceci dans l'optique de contrôler au mieux la qualité de la surface finie [Thi'00] [Fan'04] [Bou'00 & 03] [Zou'01].

Dans le but de contenir les défauts générés sur les rayons d'arête : brèches, fissures, fractures, les fabricants d'outils de coupe en carbure de tungstène proposent différents types de « préparation d'arête ». Dans les faits, ces préparations sont des modifications de la micro géométrie d'arête. Les rayons d'arêtes des outils peuvent donc avoir des configurations géométriques différentes. Par exemple, la profession a normalisé les appellations des différents types d'arête Figure 1:

- le type F arête vive,
- le type T ou chanfreiné,
- le type E dit arrondi,
- le type S combinaison des types T et E.

D'autres types de préparation d'arête, comme le double chanfrein, sont également considérés dans le système de classification [Saf'07] [Gar].

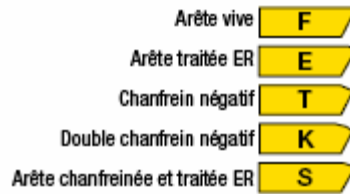


Figure 1 : Les différentes configurations de géométrie des rayons d'arête. [Saf'07]

Pour accroître la résistance mécanique de l'acuité d'arête, les outils de coupe subissent une préparation d'arête du type chanfrein. Ces outils sont plutôt employés dans l'usinage au dur et dans la coupe interrompue. Une préparation d'arête du type E, arrondie, est nécessaire dans les opérations d'usinage de finition, semi finition, ainsi que pour l'usinage de précision et le micro usinage. Les valeurs de l'angle de chanfrein des plaquettes de coupes sont de l'ordre de 5 à 25°, la dimension du chanfrein varie de 0.1 à 2mm. L'arrondi de l'acuité d'arête est compris entre 15 et 100µm (selon la taille de la plaquette et le type d'opération concerné (ébauche ou finition) [Ran'07] [Sub'08].

Les arêtes chanfreinées type T rencontrent principalement sur des plaquettes CBN (nitrure de bore cubique), et sur les plaquettes céramiques. Alors que les arêtes « arrondie » Type E sont un cas très général des plaquettes en carbure de tungstène.

Dans ce travail, nous nous focalisons sur l'impact du rayon d'arête de **type E** (arrondi) pour des plaquettes en carbure de tungstène à substrat gradient.

Généralement dans l'usinage de finition et semi finition, on suppose que l'outil possède une arête de coupe vive [Shaw'05]. Ceci n'est qu'une approximation car les plaquettes non affûtées, dites « brute de pressage – frittage » ne peuvent pas présenter une arête vive [Tableau 1]. En fait l'obtention d'une arête vive n'est possible que par rectification des arêtes après le « pressage – frittage ». La plupart des arêtes des plaquettes de coupe en carbure de tungstène subissent une opération de « *mouchage* » pour maîtriser les valeurs des « *arrondis* » d'arête.

Tableau 1: Valeurs nominales et valeurs réelles des mouchages d'arête mesurées sur les plaquettes carbure.

ER Nominal visé	ER (µm) obtenue et sa tolérance réelle
Brut de pressage	20 ± 10
30	30 ± 15
60	60 ± 20

La problématique :

Le broissage et le micro sablage sont les techniques de mouchage les plus utilisées pour la préparation d'arrondi d'arête. Compte tenu de la pression des jets de sable, l'opération de sablage peut dégrader la couche gradient superficielle. Ainsi, dans le cas des substrats gradients, la préparation du rayon est préférentiellement réalisée par broissage.

Le Tableau 2 montre des mesures de mouchage réalisées sur la partie active de plaquettes de trois fabricants. Ces plaquettes sont commercialisées pour une même application. Nous avons calculé les tolérances de fabrication, elles varient de $\pm 20\mu\text{m}$.

Si nous considérons la distribution des valeurs pour chacun des trois fabricants (30 valeurs de mouchage mesurées), nous observons une dispersion d'environ $20\mu\text{m}$, d'une valeur moyenne d'environ $70\mu\text{m}$, pour chaque fabricant [Tableau 2].

La micro géométrie d'arête doit participer au contrôle et à la stabilité des conditions de coupe. Sur cette base, il se révèle nécessaire de corrélérer quantitativement le paramètre mouchage d'arête aux conditions de coupes. A la lecture du Tableau 2 se pose la question de l'influence des *tolérances* sur le *comportement* de la plaquette et sur *l'intégrité de surface* de la pièce usinée. Ainsi, établir des corrélations entre des paramètres pertinents et analyser l'influence des *tolérances* tels sont les objectifs généraux que nous nous sommes assignés dans ces travaux. Cette étude décrit la démarche entreprise pour les atteindre.

Tableau 2: Mesures de mouchage d'arête effectuées sur la partie active pour trois fabricants de plaquettes pour des applications comparables.

Arêtes	ValeniteSafety		Kennametal		Seco	
	ER – Type E (μm)	Forme W/H	ER – Type E (μm)	Forme W/H	ER – Type E (μm)	Forme W/H
1	78	1.07	81	0.93	48	1.04
2	63	1.11	79	0.87	44	1.08
3	74	0.96	77	0.82	50	1.13
4	68	1.07	80	0.88	53	1.03
5	69	1.20	72	0.93	55	1.02
6	73	1.09	83	0.83	52	1.06
7	68	1.08	95	0.85	56	1.02
8	75	0.96	75	0.84	51	1.02
9	81	0.95	85	0.78	58	0.94
10	71	0.99	80	0.85	53	0.93
Ecart type	5.3	0.08	6.3	0.05	4.1	0.06
Moyenne	72	1.0	80.7	0.9	52	1.0
Min	63	0.95	72	0.78	44	0.93
Max	81	1.2	95	0.93	58	1.13
Etendue	18	0.25	23	0.15	14	0.2

Organisation de l'étude

- Le premier chapitre est un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux. Un bref descriptif des matériaux de coupe et des mécanismes d'usures des outils est également abordé. Une étude bibliographique sur l'influence des rayons d'arête est exposée. Différents cas d'usinage sont développés notamment pour des opérations d'usinage à sec. Nous présentons les différentes contributions scientifiques sur l'influence des rayons d'arête au niveau de l'intégrité de surface et de la durée de vie des outils de coupe.
- Le deuxième chapitre définit les méthodes d'obtention des données techniques pour le choix et la détermination des conditions d'utilisation de l'outil en tournage. Dans ce deuxième chapitre nous décrivons le protocole expérimental suivi dans cette étude. Les différents équipements matériels, les techniques et les méthodes de mesure mises en œuvre pour la caractérisation seront également présentés dans ce chapitre. Les caractéristiques de la matière testée dans cette étude, et celles de la plaquette carbure de tungstène sont présentées dans ce chapitre.
- Le troisième chapitre expose les résultats des tests préliminaires pour l'optimisation des conditions de coupe. Ce chapitre décrit les résultats permettant le choix des conditions d'utilisation de notre outil coupant pour une opération de tournage, ainsi que le mode d'obtention de ces données. Dans ce même chapitre la procédure d'essais spécifique à la caractérisation du rayon d'arête et sa forme sont définis.
- Le quatrième chapitre présente les résultats et l'analyse des essais permettant de qualifier le comportement des différents rayons d'arête. Il se divise en deux parties :
 - l'influence du rayon d'arête sur la durée de vie des plaquettes, par l'analyse des efforts de coupe, l'analyse des courbes d'usure, ainsi que des profils des rayons d'arêtes,

- l'influence du rayon d'arête sur l'intégrité de surface, par l'analyse de la topographie de surface, l'analyse morphologique, l'analyse de dureté superficielle.

Ces analyses permettent de relier les propriétés obtenues avec le comportement des différents rayons d'arête, et de démontrer l'importance des tolérances de fabrication des rayons d'arête sur l'intégrité de surface obtenue.

1 L'ENLEVEMENT DE MATIERE

Ce chapitre est un rappel des bases scientifiques des mécanismes de la coupe des métaux. Un bref descriptif des matériaux de coupe et des mécanismes d'endommagements des outils est également abordé. Une étude bibliographique sur l'influence des rayons d'arête est exposée, où différents cas d'usinage sont développés notamment pour des opérations de tournage à sec. Ceci permet de synthétiser les différentes contributions scientifiques qui ont pour objet l'influence des rayons d'arête sur l'intégrité de surface et la durée de vie des outils de coupe.

Considérations générales

Il existe différentes méthodes pour élaborer une pièce mécanique :

- par addition de matière (+), (ex. assemblage)
- par déplacement de matière d'une zone à une autre (0), (ex. formage)
- par enlèvement de matière (-) : notre objet.

Plusieurs types de mise en forme des pièces sont utilisés. Les actions de moulage ou soudage se font par addition de matière. Le forgeage, le matriçage et les autres procédés de déformation de la matière permettent d'obtenir des pièces proches de leurs formes finales. L'usinage par enlèvement de matière qui nous intéresse ici est utilisé pour parachever les pièces obtenues par les deux premières méthodes.

Il existe plusieurs raisons pour continuer à développer une approche rationnelle du processus d'usinage :

- impossibilité d'utiliser d'autres techniques,
- création de produits de plus grande précision et accroissement de la durée de vie,
- augmentation de la productivité et multiplication des produits de qualité.

Contrairement aux autres procédés, l'usinage à partir d'un bloc de matière assure l'intégrité de volume [Sha'05].

1.1 Présentation du procédé d'usinage étudié – le tournage

L'usinage des métaux par enlèvement de matière est une méthode de production de composants mécaniques. Les nouvelles surfaces générées définissent les surfaces fonctionnelles de la pièce. Les procédés d'usinage associés sont nombreux : fraisage, tournage, perçage, ...

Chaque procédé est particulier et donne lieu à des études scientifiques pluridisciplinaires. Le procédé de coupe étudié dans le cadre de ce travail de recherche est le tournage. Pour ce type d'usinage, l'outil avance parallèlement à l'axe longitudinal de la pièce tournante. Il est aisé de suivre l'évolution de l'arête de coupe. Le point de coupe est fixe par rapport à la tourelle porte-outil et l'usinage est de type « coupe en continue » contrairement au fraisage. Dans ce dernier cas, la coupe est discontinue (chocs), l'épaisseur du copeau est variable et le point de coupe varie par rapport à l'axe de rotation de la broche.

Le tournage consiste fondamentalement à générer des formes de révolutions Figure 2. D'après la norme DIN 8589, partie 1, les nombreuses techniques de tournage peuvent être classées suivant :

- l'état de surface,
- la forme de l'outil,
- la cinématique du processus d'usinage,

et en fonction des éléments suivants :

- la position du point d'usinage : tournage extérieur, tournage intérieur
- la surface d'usinage produite : tournage circulaire, dressage, tournage hélicoïdal, tournage non circulaire, tournage de profils, tournage de forme
- le sens de l'avance : tournage longitudinal, tournage transversal.

Dans le cadre de ces travaux, nous nous intéresserons au tournage extérieur, et plus précisément au chariotage (tournage longitudinal). Ce type de configuration permet une vitesse de rotation constante par rapport au point de coupe de l'outil (reproductibilité plus aisée à réaliser) et une maîtrise des paramètres de coupe. Ceux-ci sont très importants puisqu'ils exercent une forte influence sur le comportement du rayon d'arête, sur la durée de vie de la plaquette et l'intégrité de surface de la pièce générée.

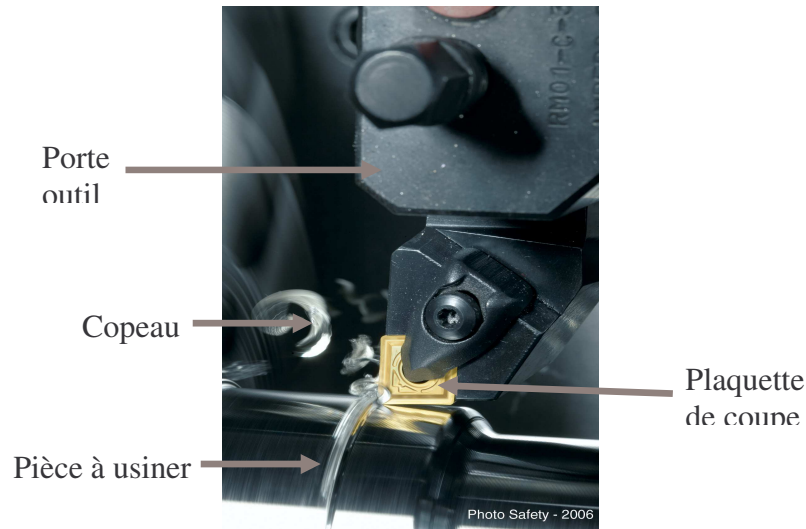


Figure 2 : Outil de coupe lors d'une opération de tournage.

1.2 Les paramètres de coupe

La réalisation d'un usinage de qualité varie selon l'opération à effectuer. De nombreux paramètres influencent la qualité de surface de la pièce finale comme l'illustre le diagramme suivant Figure 3. Ce dernier englobe tous les facteurs de coupe, humains et matériels, susceptibles d'agir sur l'intégrité de surface de la pièce usinée. [Gru'03].

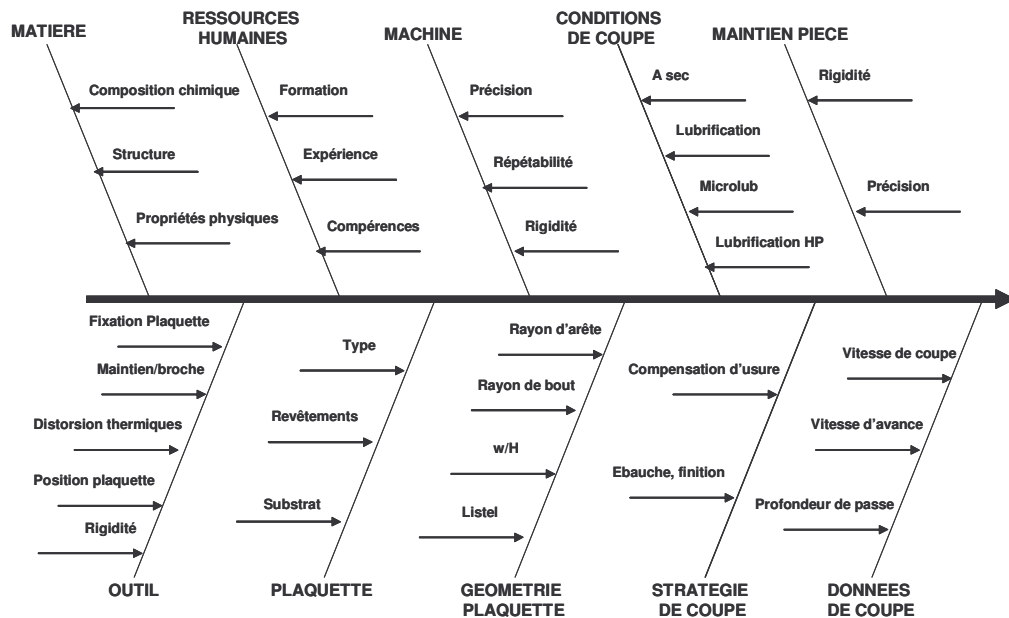


Figure 3 : Paramètres de coupes qui influencent l'intégrité de surface en usinage, sous la forme d'un diagramme d'Ishikawa.

Afin de l'expliquer, dans la suite nous rappelons quelques bases fondamentales. sur la coupe des métaux, et présentons des résultats expérimentaux issus de la littérature sur l'influence de certains de ces paramètres.

1.3 Les outils de coupe

L'amélioration des qualités des matériaux de coupe permet l'évolution des méthodes d'usinage. Il existe une très grande variété d'outils de coupe selon :

- le type de géométrie (simple, avec brise copeau sur la face de coupe, avec ou sans préparation particulière d'arête),
- le matériau (aciers rapides, carbures, céramiques),
- le type de revêtement utilisé.

Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux de coupe ont contribué de manière déterminante à l'efficacité des techniques industrielles modernes. [Sha'05].

1.3.1 Evolution des outils de coupe

La Figure 4 [Val'07] donne une synthèse chronologique du développement des matériaux depuis l'invention, par Schröter en 1923 [Mey'79], du carbure de tungstène cimenté au cobalt. Pendant 30 ans l'évolution a été lente, sans innovations notables. [San'97].

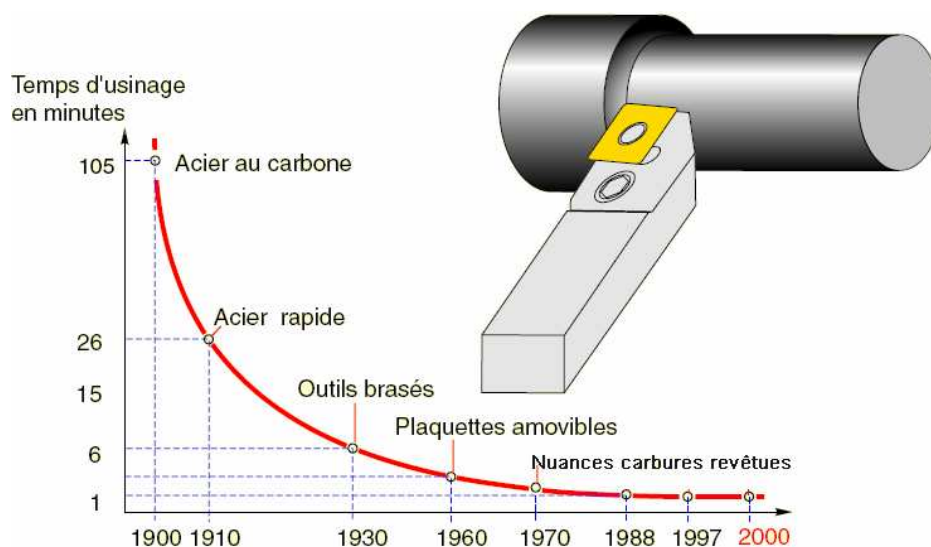


Figure 4 : Historique de l'acier au carbure de tungstène revêtu, chariotage d'un cylindre de $\varnothing 100$, longueur de 500 mm.

Le chemin parcouru entre l'acier au carbone du début de XIXe siècle et les nuances carbure revêtues des années 1980 a conduit à réduire le temps d'usinage, pour une même pièce, d'un facteur 100. Une opération demandant 100 minutes avec un outil en acier à forte teneur en carbone, ne demandait plus que 26 min grâce à l'acier rapide, 6 min avec des outils en carbure (1930) et 1 minute avec les plaquettes en carbure revêtues multicouches (1970). La poursuite des exigences de productivité et d'utilisation de nouveaux matériaux de coupe souligne la continuité des recherches sur les outils de coupe.

1.3.2 Matériaux pour plaquettes de coupe

L'amélioration des performances des outils de coupe passe par l'étude des propriétés des matériaux tels que :

- la dureté pour combattre l'usure,
- la résistance mécanique à chaud pour supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe,
- la ténacité pour résister aux chocs dus aux interruptions d'usinages ou aux vibrations,
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par réaction avec la pièce usinée (diffusion chimique) et avec le milieu environnemental de l'usinage (oxydation).

Généralement ces propriétés sont interdépendantes, et l'amélioration de l'une d'entre elles peut se faire au détriment des autres. Sur la Figure 5, l'outil de coupe idéal est symbolisé par un pentagone qui passe par les maximas des qualités nécessaires à un bon outil [Saf'07].

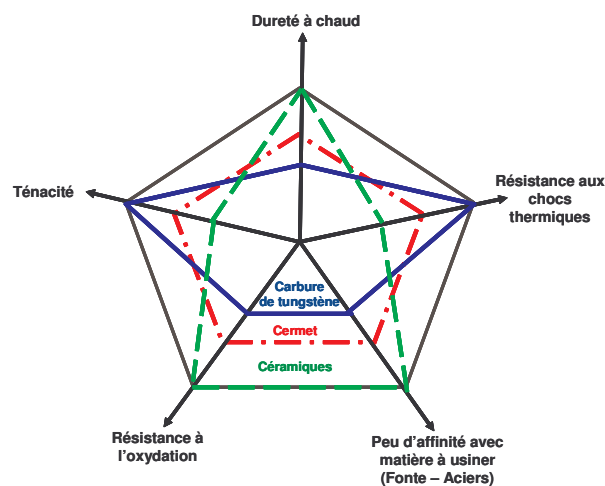


Figure 5 : Positionnement comparatif des propriétés de différents matériaux de coupe.

Ce schéma montre que la céramique est un bon complément du carbure de tungstène pour la tenue thermique, le cermet est en position médiane. Les outils carbures ont une ténacité élevée mais une dureté faible par rapport aux matériaux avancés tels que les outils CBN ou céramiques.

Le choix d'un matériau pour un outil est le résultat d'un certain nombre de compromis. La modification des conditions de coupe, du procédé d'usinage ou du matériau de la pièce suffit à bouleverser ce compromis. C'est pourquoi il existe une grande variété de matériau de coupe. Les différents matériaux pour outils de coupe peuvent être regroupés selon différentes catégories :

- les aciers rapides (HSS),
- les carbures,
- les céramiques,
- les matériaux ultra-durs (Nitrure de bore cubique CBN, diamant polycristallin PCD).

L'acier rapide (AR) est utilisé depuis le début du siècle et il constitue encore aujourd'hui un matériau très utilisé. Il possède la ténacité la plus élevée et demeure donc un choix privilégié pour les opérations instables et à coupe interrompue. De plus, il permet des arêtes très tranchantes, qui permettent la réalisation d'usinage sans bavures, à cet égard il est particulièrement intéressant pour l'usinage des polymères.

Le carbure de tungstène cémenté est devenu le matériau le plus utilisé. Ce substrat cémenté est obtenu par frittage de poudres métalliques constituées d'une « matière » dure (à base de carbure de tungstène WC) et d'un liant fusible lors du frittage (cobalt). Il présente un bon compromis dureté-ténacité et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide. En plus du carbure de tungstène (WC) et du Co, le carbure peut contenir dans des proportions variables des carbures additifs : souvent du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de Niobium (NbC) pour les plus utilisés. Ces carbures additionnels permettent de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier. Le cobalt confère au substrat sa ténacité.

Le mot cermet provient de la contraction des mots céramique et métal CERamique / METal. Dans l'application qui nous intéresse ici, **cermets**, est le nom générique utilisé pour les carbures à base de titane, parmi lesquelles figurent le carbure de titane TiC, le carbonitrure de titane TiCN et le nitrure de titane TiN. Comparé aux carbures cémentés, les cermets possèdent une meilleur thermiques mais au détriment de la ténacité.

Les outils en **céramique** sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevée. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage.

Le **CBN** (nitrure de bore cubique) possède une dureté extrêmement élevée, devancée seulement par le diamant. A chaud, cette dureté demeure excellente et il peut être utilisé jusqu'à $2000^{\circ}C$. Moins fragile que la céramique, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion. Son coût élevé le limite principalement à la production en série. Les cristaux de CBN, similaires à ceux du diamant synthétique, sont maintenus par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique offre une ténacité faible mais une meilleure stabilité chimique et une excellente résistance à l'usure. Le liant métallique offre les caractéristiques inverses (bonne ténacité et moins résistant à l'usure). On recommande le CBN pour l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 48HRC.

Le **PCD** (Diamant polycristallin) est un diamant synthétique qui possède une dureté proche de celle du diamant naturel (dureté 10 dans l'échelle de Mohs). Ce matériau est très onéreux et ces applications sont limitées à l'usinage des matériaux non-ferreux. La haute résistance à l'usure par abrasion les rend économiquement viables pour l'usinage des matériaux hautement abrasifs tels que les composites et le graphite [Bou'05] [Mac'00].

1.3.3 Procédure d'élaboration des plaquettes en carbure de tungstène

Les carbures cémentés ainsi que les cermets sont élaborés selon un processus de métallurgie des poudres Figure 6. Les constituants de base sont introduits sous forme de poudres fines d'une taille de l'ordre du micron. Ces différents carbures, très durs, sont principalement des carbures de tungstène (WC), de titane (TiC), de tantale (TaC), de niobium (NbC)... Le titane peut également être utilisé sous forme de nitrure TiN. Le liant utilisé est essentiellement du cobalt (du nickel pour les cermets).

Après pesage, ces poudres sont mélangées par broyage, puis compactées par pressage dans des presses utilisant des matrices spéciales. Après pressage, les plaquettes présentent une porosité proche de 50% en volume. Elles sont ensuite densifiées par un frittage à des températures situées entre 1350°C et 1550°C sous vide ou sous pression en atmosphère gaz neutre. Pendant le frittage, le carbure de tungstène ainsi que les autres carbures éventuels se mettent en solution partielle dans le liant métallique. L'existence d'un eutectique entre le cobalt, et les carbures, permet de former une phase liquide à une température inférieure à la température de fabrication du cobalt pur.

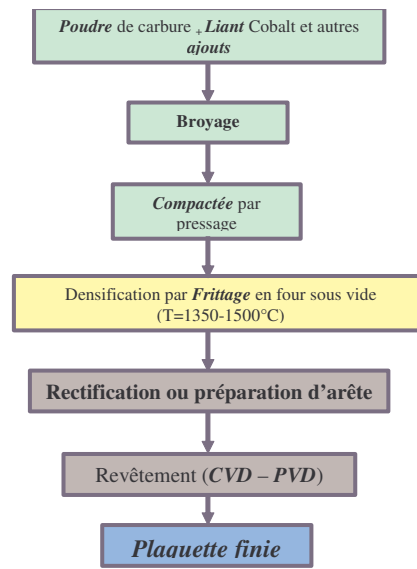


Figure 6 : Procédure de fabrication du carbure de tungstène. [Mey'79].

1.3.3.1 La structure des outils (WC-Co)

La composition chimique du carbure et la taille des granulométries conditionnent fortement les propriétés mécaniques et physiques des outils carbures. D'où l'importance de bien appréhender la métallurgie d'une plaquette de coupe Figure 7. Trois phases principales sont présentes dans les métaux durs :

- la phase α composée de grains monophasés de carbure de tungstène (WC), est une des phases dures.
- la phase β (ou phase métallique liante) est principalement composée de cobalt. C'est cette phase qui donne la ténacité au carbure cémenté.
- la phase γ (ou phase cubique) regroupe essentiellement les autres carbures à base de titane, tantale. Cette phase améliore la tenue à chaud du carbure [Amm'90].

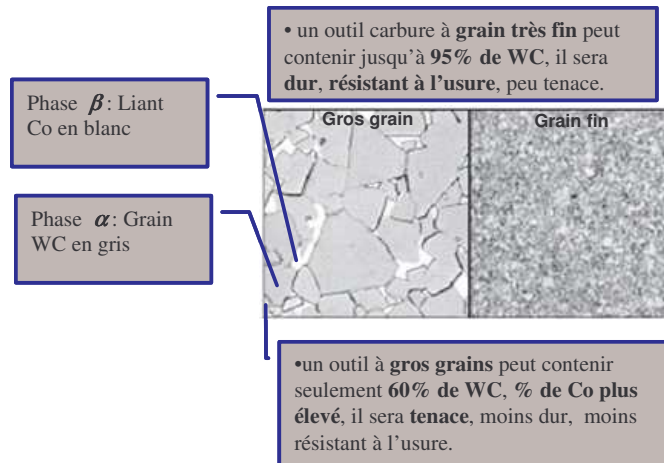


Figure 7: Microstructures de plaquette carbure après frittage. Relation entre la grosseur des grain et le % de Co dans le carbure cémenté [Bou'05].

1.3.4 Les revêtements

La métallurgie des plaquettes repose sur deux composantes : le substrat et le revêtement Figure 8. Le substrat supporte les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage. Le revêtement améliore la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur la plaquette.

Les revêtements sont depuis 1960 un domaine important de recherche. Améliorant les conditions de coupe et la productivité, l'emploi des revêtements s'est généralisé. Aujourd'hui la plupart des nuances de carbure sont revêtues.

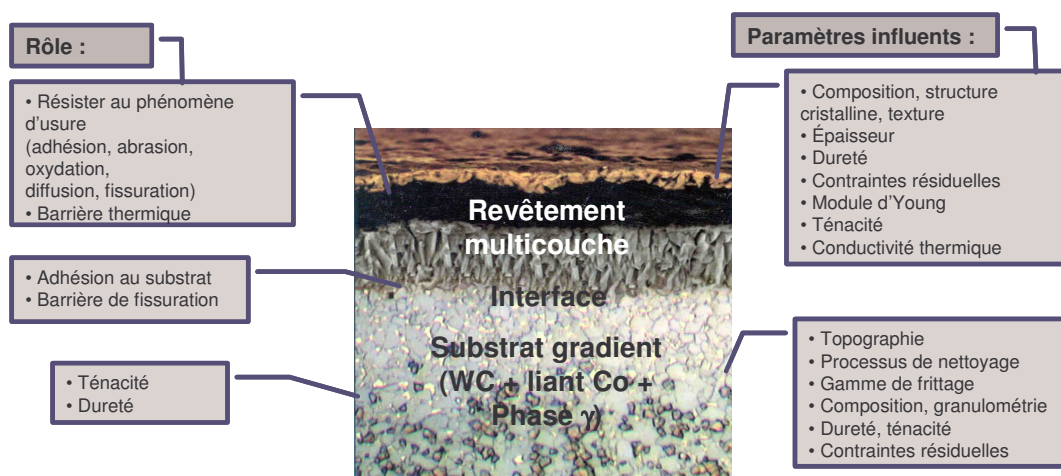


Figure 8: Rôle des revêtements

Le principe consiste à recouvrir le substrat d'un film mince. L'épaisseur totale du revêtement est généralement comprise entre 3 et 15 μm . Les méthodes de dépôt sont de type CVD (dépôt chimique en phase vapeur à température médium, 800 – 1000°C) ou de type PVD (dépôt physique en phase vapeur, 400 – 600°C). La qualité d'adhérence au substrat est un critère essentiel pour le choix du revêtement. Les matériaux déposés sont également sélectionnés par leurs propriétés à haute température (dureté, ténacité, conductivité thermique). La Figure 8 illustre le rôle d'un revêtement. Pour l'essentiel il doit protéger le substrat de l'usure (adhérence, abrasion, oxydation, diffusion entre copeau et matière usinée), protéger thermiquement et résister à la fissuration [Pag'03]. Les matériaux les plus fréquents rencontrés sont :

- Carbure de titane TiC
- Nitrure de titane TiN
- L'alumine Al_2O_3
- Et leurs associations TiCN (carbonitrure de titane), AlTiN, ...

Différents travaux montrent que les outils carbures revêtues en TiCN ont les propriétés requises pour l'usinage des matières qui ont une dureté inférieure à 42 HRC, alors que les outils revêtues à base d'alumine s'utilisent pour des duretés supérieures à 42 HRC. [Alt'98] Les propriétés des principaux matériaux sont indiquées dans le (Tableau 3).

Les outils de coupe et les revêtements peuvent être classés en fonction de la matière à usiner, ainsi:

- Les outils carbures revêtus TiN et TiCN pour l'usinage des aciers < 42 HRC
- Les outils carbures revêtus Al^2O_3 et AlTiN pour l'usinage des aciers > 42 HRC
- Les outils CBN (nitrure de bore cubique) et SiN (nitrure de silicium) pour l'usinage des fontes,
- Les outils PCBN (avec des préparations d'arête appropriée) pour l'usinage des matériaux dur (HRC 60 - 65).

Tableau 3: Propriétés des différents outils de coupe et revêtement [Alt'98].

	Outils de coupes					Revêtements		
	PCD	CBN	WC	SiN	Al_2O_3	TiN	TiCN	TiAlN
Dureté (Hv)	6000	3500	1500-1800	1700	1600	2900	3000	3300
Coefficient de frottement (contacte acier à sec)	-	0.24	0.6	-	-	0.4	0.4	0.3-0.5
Température de travaille max (°C)	600	-	-	-	-	600	400	815
Conductivité thermique (W/m°K)	500	100	40-80	15-35	14-17	-	-	-
Limite de rupture (MPa)	690-960	690	1700-2000	480-750	275-345	-	-	-

Actuellement, les revêtements les plus utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al_2O_3). Les principales propriétés de ces revêtements sont présentées sous forme comparative dans le Tableau 4 :

Tableau 4: Comparatif des propriétés de certains revêtements. [Saf'07]

Revêtements	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	Excellent	Petite	Petite	Bon
TiN	Bon	Bon	Bon	Excellent
Ti(C, N)	Moyen	Moyen	Moyen	Très bon
Al_2O_3	Très bon	Excellent	Excellent	Moyen

Le dépôt peut être mono-couche ou multicouche. Le multicouche combine les propriétés de chaque dépôt et offre une meilleure résistance aux différents phénomènes d'usure. Par exemple, l'emploi de l'alumine Al_2O_3 dans les revêtements multicouches assurera la fonction d'isolant thermique [Figure 9]. Le carbure de titane et l'oxyde d'aluminium, matériaux très durs, offrent une bonne résistance à l'usure. Chimiquement inertes, ils jouent le rôle de barrière chimique et thermique entre l'outil et le copeau. Le nitrure de titane n'a pas la même dureté, mais abaisse le coefficient de frottement sur les faces de la plaquette tout en améliorant la résistance à l'usure en cratère.

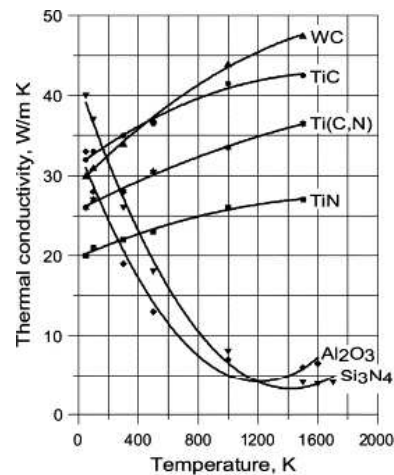


Figure 9 : évolution de la conductivité thermique en fonction de la température des constituants des outils et des revêtements, [Jaw'93][Shaw'05].

1.3.5 Usinabilité et caractéristiques des matériaux

L'usinabilité est l'aptitude d'un matériau à être usiné. Les critères d'évaluation de l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et différents paramètres sont à prendre en compte:

- la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leur usure au cours du temps ;
- les conditions de coupe ;
- les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- le fractionnement du copeau ;
- l'état de surface obtenu sur la pièce, notamment la rugosité ;
- le respect des cotes ;
- la productivité, qui est liée à la plupart des paramètres cités ci-dessus. [Bar'92].

La facilité d'usinage d'un matériau est fonction de nombreux paramètres métallurgiques primordiaux. L'élaboration du métal, sa composition chimique, ses caractéristiques mécaniques et physiques, les effets des traitements thermiques sont autant de critères qui influencent l'usinabilité.

1.3.5.1 Influence des propriétés physiques et mécaniques

Les principales propriétés mécaniques et physiques ayant une incidence sur la coupe sont les suivantes [Saf'07] [Tec Ing] :

Influence sur l'usinage de la matière	
Ténacité	Résistance à la traction – R_m , est une des propriétés fondamentales des matériaux. La difficulté d'usinage varie généralement dans le même sens que la ténacité.
Plasticité allongement A %	Elle qualifie la capacité d'un matériau à subir un maximum de déformation permanente sans se rompre. Une plasticité élevée rend, en règle générale, l'usinage plus difficile. Les efforts de coupe et la chaleur engendrée augmentent et peuvent entraîner le grippage, des arrachements de métal générant un aspect rugueux de la pièce.
Dureté	La dureté est un paramètre important en usinage. Un acier dur s'usine difficilement et entraîne une usure rapide des outils. Mais par contre à un meilleur fractionnement du copeau et une amélioration de l'état de surface.

Sensibilité à l'écrouissage	C'est la faculté d'un métal à se durcir sous l'effet d'une contrainte. L'écrouissage est généralement favorable à l'usinage en facilitant la rupture des copeaux et leur dégagement de l'outil, comme dans le cas des aciers doux étirés à froid utilisés en décolletage. Certains matériaux présentent une sensibilité à l'écrouissage importante. L'accroissement de leur dureté par écrouissage sous l'action de coupe peut être considérable. L'usinage est alors très difficile du fait de la formation de couches dures en avant de l'outil. C'est le cas des aciers inoxydables austénitiques, du nickel, du titane et de leurs alliages... pour lesquels il faut éviter les faibles profondeurs de passe (il faut que celle-ci permettent d'attaquer sous la surface écrouie, et les frottements (entame franche de l'outil et temps morts en fin de course réduits...). Par ailleurs, une surface écrouie peut provoquer une entaille sur l'outil (correspondant à la profondeur de passe), et accélérer sa dégradation.
Compatibilité métallurgique	C'est l'aptitude à la soudabilité par diffusion de deux matériaux (outil-matière). Une compatibilité importante peut entraîner des micros soudures et arrachements dans la zone de contact, ainsi qu'une usure rapide de l'outil, par diffusion. Appelé aussi phénomène de collage.

1.3.5.1.1 Influence de la structure

A dureté comparable, la nature, la morphologie et la répartition des constituants modifient l'usinabilité d'un matériau. Le choix d'un traitement thermique approprié est de grande importance. En rétablissant les caractéristiques structurales et mécaniques perturbées par des opérations antérieures, les recuits ont, pour certains matériaux, une action bénéfique sur la durée de vie des outils. Structure des aciers [San'05] :

Paramètres :	Influence sur l'usinabilité	Cause
% de carbone vs usinabilité	<ul style="list-style-type: none"> Acier à basse teneur en carbone et fer pur \Rightarrow mauvaise usinabilité 	<ul style="list-style-type: none"> plasticité importante de la ferrite
	<ul style="list-style-type: none"> $0.3 < \% C < 0.6$, le pourcentage de perlite (ferrite + carbure de fer) croît \Rightarrow ce constituant dur et tenace atténue les effets de la ferrite \Rightarrow usinabilité améliorée 	<ul style="list-style-type: none"> compromis convenable entre la plasticité de la ferrite et la ténacité de la perlite
	<ul style="list-style-type: none"> $\% C > 0.6$, l'usinabilité décroît et l'outil s'use plus vite 	<ul style="list-style-type: none"> le taux de perlite accroît la ténacité de l'acier
Traitements thermiques	<ul style="list-style-type: none"> acier à forte teneur en carbone \Rightarrow recuit de « globulisation » \Rightarrow améliore la durée de vie des outils 	<ul style="list-style-type: none"> les structures globulaires sont favorables aux opérations de tournage
	<ul style="list-style-type: none"> recuit de recristallisation \Rightarrow supprimer l'effet d'écrouissage lorsque indésirable 	-

Les traitements thermiques ont une action sur la taille ou grosseur de grain des constituants et sur leur répartition, ces derniers paramètres ayant aussi une influence importante sur l'usinabilité.

1.4 Les grandeurs géométriques et cinématiques en usinage

Les grandeurs géométriques et cinématiques conditionnent les phénomènes physiques lors de la coupe. Les principaux paramètres Figure 10 sont définis selon la norme NF E 66-506 :

- la **profondeur de passe a_p** (mm). Pour le tournage, elle correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas de la coupe longitudinal.
- l'**avance** par tour **f** (mm/tr). Elle correspond à la différence de déplacement de l'outil sur une révolution de la pièce. Le choix de l'avance est fait en fonction du rayon de la plaquette, de l'état de surface à obtenir et du type de travail à réaliser. Les paramètres qui influencent le plus la rugosité sont l'avance et le rayon de bec (ondulation).
- la **vitesse de coupe V_c** : paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est un paramètre essentiel car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce.
- la **vitesse de rotation** de la pièce N (nombre de tours), est définie par : $N = (1000 \cdot V_c / \pi \cdot D)$, où D (mm) est le diamètre final de la pièce.
- la **vitesse d'avance v_f** (mm/min). Vitesse à laquelle la machine déplace l'outil dans chaque direction concernée.

La profondeur de passe en interaction avec l'avance va influencer la formation du copeau car elles modifient la section du copeau (A_D) et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière ($A_D = f \cdot a_p \text{ mm}^2$).

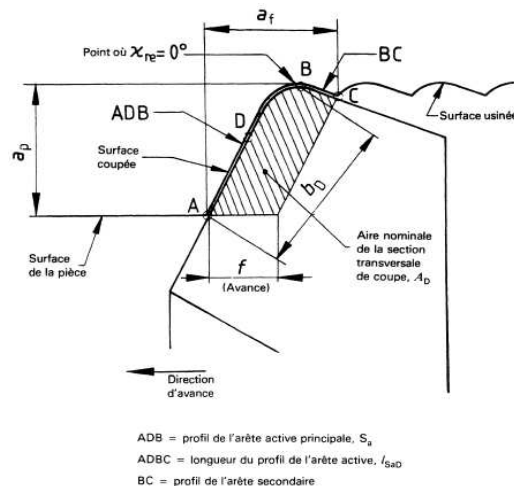


Figure 10: dimension de coupe en tournage (NF E 66-506).

Il est aussi important de comprendre l'influence des différents angles de coupe, de dépouille, ou d'attaque. Ils sont illustrés sur la Figure 11. Un outil de coupe est défini par deux plans : la face de coupe et la face de dépouille. L'intersection de ces deux plans constitue l'arête de coupe. Trois angles, dont la somme est égale à 90° ($\gamma + \alpha + \beta = 90^\circ$), sont nécessaires pour définir les caractéristiques géométriques :

Angle de coupe (γ) : c'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence (perpendiculaire à la direction d'usinage). L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil à cisailer le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul. Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe, tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil [Leroy 1993]. Sa valeur se trouve généralement entre -5° et $+5^\circ$, quelque fois entre -10° et $+10^\circ$ et plus rarement entre -20° et $+20^\circ$.

Angle de dépouille (α) : c'est l'angle entre la face de dépouille et la surface usinée. Sa valeur, nécessairement positive, oscille généralement entre 2° et 10° .

Angle de taillant (β) : c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille.

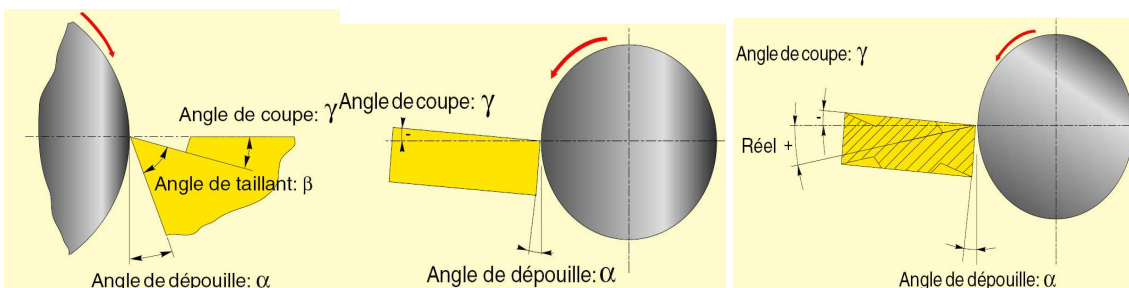


Figure 11 : Angles de coupe d'un outil simple [For'07]

Angle d'attaque (kr) : c'est l'angle formé par l'arête de coupe et la direction de l'avance. L'angle d'attaque kr a une incidence sur la longueur de coupe et sur l'épaisseur du copeau. L'illustration suivante Figure 12 montre que pour $kr=90^\circ$, la longueur sera égale à la profondeur de passe ($L=ap$) et la valeur d'avance sera celle de l'épaisseur du copeau ($h=f$). Pour $kr=60^\circ$: $L=1.15*ap$ et $h=0.86*f$ avec ($h = f*\sin kr$). Cet angle est surtout influant en entrée et à la sortie de la passe.

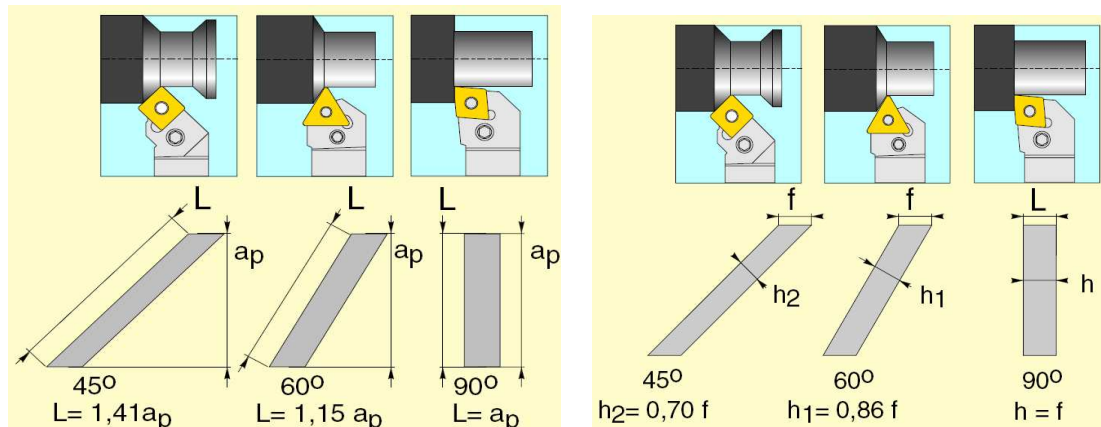


Figure 12: Incidence de l'angle d'attaque κ_r sur la longueur de coupe (L), et sur l'épaisseur du copeau (h) [For'07].

Ces angles ont une influence conséquente sur la puissance consommée par la machine, sur la direction des efforts de coupe, sur l'écoulement des copeaux ainsi que sur les phénomènes d'usure. La littérature est assez riche dans ce domaine et beaucoup de travaux ont été effectués à ce sujet. [Ala'97][Hua'99][Lis'05] [Gun'03] [Öze'05].

L'angle d'attaque κ_r est important dans le choix de l'outil au vu de son influence sur certains paramètres de coupes [Tableau 5].

Tableau 5: Influence de l'angle d'attaque sur certains paramètres de la coupe.

	$\kappa_r \leq 60^\circ$ $\kappa_r \geq 95^\circ$	
Résistance à l'usure	Très bonne (pour matière difficile à usiner)	Moins bonne
Résistance aux chocs	La pointe de l'outil est protégée ⇒ meilleure résistance	Moins bonne
Puissance	Puissance nécessaire plus importante	Moins importante due à la longueur de coupe réduite
Effort de coupe, vibration	Effort de coupe radial (F_R) plus important ⇒ vibration de la pièce	F_R plus petit ⇒ moins de vibration
Tendance à l'écrouissage	Favorable	Défavorable

1.4.1 Paramètres énergétiques de la coupe

La puissance de coupe dépend de la contrainte de cisaillement de la matière usinée. La contrainte dépend de la micro géométrie de l'arête qui est ici le rayon d'arête (plus le rayon est faible et plus le cisaillement est facilité). Cette puissance dépend aussi des paramètres de coupe tel

que l'avance et la profondeur de passe, la vitesse de coupe étant un des paramètres important de la puissance à fournir. La puissance totale consommée pendant la coupe est la somme de l'énergie dépensée pendant le cisaillement et par le frottement de la matière et du copeau sur l'outil. Elle est essentiellement dissipée sous forme de chaleur. La chaleur est évacuée par le copeau, l'outil et la pièce. Ce dégagement de chaleur a des conséquences négatives lors de la coupe, comme l'accélération de l'usure de l'outil.

Pendant la coupe, la pièce usinée est soumise à d'importants efforts. Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc aussi des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Les paramètres qui influent sur la variation des efforts sont la géométrie de l'outil, la dureté du matériau de la pièce et les conditions générales de coupe. [ENS'05].

Les forces de coupe peuvent être calculées théoriquement et mesurées avec un dynamomètre. Elles sont essentiellement générées par le détachement des copeaux et leur évacuation. Les pressions et les frottements considérables intervenant dans le processus donnent naissance à des forces agissant dans plusieurs directions. L'effort imposé sur une arête de coupe en cours d'usinage prend essentiellement la forme d'une compression avec une certaine part de cisaillement. L'effort de compression est maximum au niveau de l'arête, ce qui développe différents schémas de réaction sur la face de coupe [Figure 13]. La zone de contact entre le copeau et la face de coupe est liée aux forces de coupe, d'où l'importance de l'optimisation de la géométrie de la plaquette. Cette dernière joue un rôle clé au niveau de la formation des copeaux, des forces de coupe et de la résistance de l'arête de coupe.

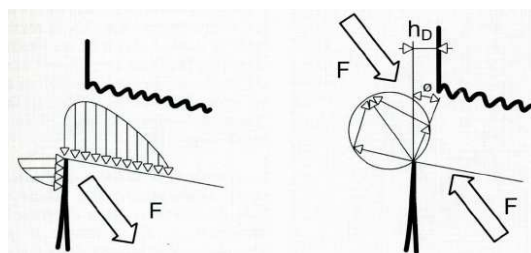


Figure 13: Effort de compression et force au niveau de l'arête de coupe.

Dans une vue tridimensionnelle les forces de coupe peuvent être divisées en trois composantes [Figure 14] : force tangentielle ($F_c - F_z$), force radiale ($F_p - F_x$) et force axiale ($F_f - F_y$).

La force tangentielle dépend dans une large mesure du contact et du frottement non seulement entre la pièce et l'outil, mais également entre le copeau et la face de coupe de l'arête. La qualité du copeau formé et son détachement affectent considérablement la force tangentielle [Zho'01].

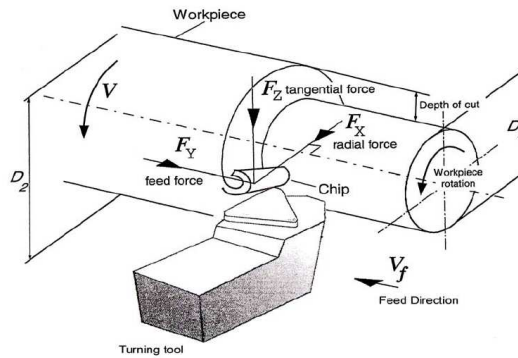


Figure 14 : Composantes des efforts mesurés pendant une opération de tournage (chariotage). [Öze]

Le torseur des efforts de coupe peut s'exprimer suivant différents repères, machine ou outil, et en différents points. Le point le plus couramment utilisé est situé en bout de plaquette et les repères sont liés soit aux mouvements du porte outil, soit à l'arête de coupe:

- par rapport au porte outil, avec F_c l'effort de coupe (la force de coupe est générée essentiellement par le détachement des copeaux et leur évacuation) et F_f l'effort d'avance,
- par rapport à la face de coupe de l'outil avec F_n l'effort normal (à la face de coupe) et F_T l'effort tangentiel ou effort de frottement.

Ceux sont les efforts de coupe F_c , d'avance F_f et radial F_p que l'on mesure expérimentalement à l'aide de tables dynamométriques. On peut utiliser des relations géométriques pour déduire la force normal et la force de frottement en fonction des composantes mesurées expérimentalement :

$$F_n = F_c (\cos\gamma) - F_t (\sin\gamma)$$

$$F_f = F_c (\sin\gamma) - F_t (\cos\gamma)$$

Avec γ correspondant à l'angle de coupe. Ces efforts engendrent des sollicitations telles que torsion, flexion et compression sur l'outil. Il faut en envisager les conséquences sur les défauts de surface, sur les phénomènes vibratoires susceptibles d'apparaître et de perturber l'usinage surtout dans le cas des alésages. Les efforts de coupe sont également un bon indicateur de l'usinabilité.

1.4.1.1 Phénomènes thermiques – la chaleur dans le processus de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour des conditions de coupe équivalentes, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de

coupe (10% de baisse environ [San'97][Gun'03]), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel.

Les sollicitations thermiques sont générées lors de la coupe par échauffement du matériau constituant la pièce et par les frottements à l'interface outil/pièce. En usinage conventionnel, l'énergie calorifique s'évacue dans les copeaux mais également dans la pièce et l'outil dans des proportions plus faibles. Ainsi, le matériau subit un traitement thermique local (trempe superficielle) qui modifie les caractéristiques de la pièce finie. La dissipation de l'énergie de coupe a une influence sur la température de l'outil. Une simulation thermique de la coupe montre la formation d'un point chaud en usinage situé à la pointe de l'outil [Figure 15]. La température de ce point varie de 500°C à 1000 °C. La localisation du point chaud à la pointe de l'outil permet de faciliter la coupe pour les matériaux ductiles car le matériau usiné a tendance à se ramollir à son contact.

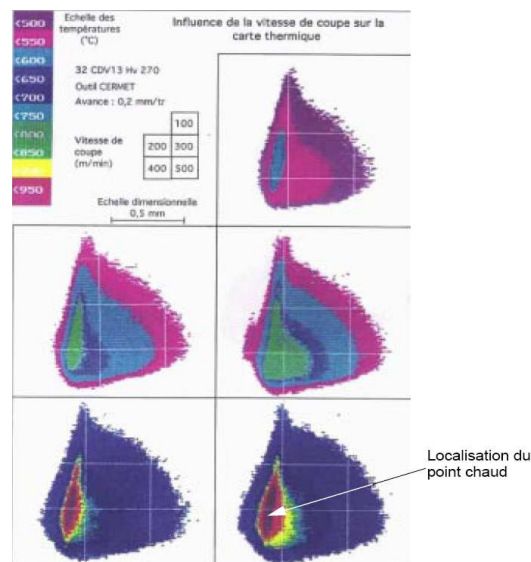


Figure 15: Carte thermiques d'un outil pour différentes vitesses de coupe.

Les températures excessives sont la cause principale de l'usure prématurée des outils et des limitations aux vitesses de coupe élevées. La force de coupe tangentielle agissant à une vitesse de coupe donnée représente une certaine quantité d'énergie, laquelle est consommée dans le processus de déformation et de cisaillement du copeau. Une part d'énergie supplémentaire est également nécessaire pour former le copeau le long de la face de coupe et au contact du brise copeaux. Une très forte quantité de chaleur est générée, principalement dans la zone de cisaillement, sur la face de coupe et sur la face de dépouille de l'arête de coupe. [UGV'99].

Les forces de coupe et la température varient en fonction de la géométrie de l'arête de coupe, de la géométrie brise copeau, ce qui affecte sur le plan pratique la durée de vie de l'outil, la consommation de puissance, les résultats de l'usinage et la forme des copeaux. [Scr'97].

1.5 Théorie sur la formation des copeaux en usinage

Une nouvelle surface métallique est engendrée lors de la formation du copeau. Généralement le copeau est de forme courbe, sa morphologie est fortement influencée par les paramètres de coupe (essentiellement l'avance, la profondeur de passe). Il se forme par refoulement du métal devant la surface d'attaque de l'outil suivie d'un cisaillement d'un élément de copeau et du glissement de cet élément cisailé sur la face d'attaque.

1.5.1 Formation du copeau

En usinage traditionnel, la formation du copeau des matériaux ductiles est caractérisée par la présence d'une zone de déformation plastique intense, appelée zone de cisaillement. La coupe orthogonale est la configuration souvent utilisée pour représenter la formation du copeau [Figure 16]. Dans cette disposition, l'arête de coupe est perpendiculaire aux directions de coupe et d'avance. En cours de processus, une zone qui sépare le métal déformé de celui qui ne l'est pas se matérialise. Cette zone située entre le copeau et la pièce est dénommée plan de cisaillement. Ce plan forme avec la pièce un angle (φ). Le taux de déformation du copeau est principalement fonction de l'épaisseur de sa partie non déformée (h), de l'angle de coupe (γ) entre la face du copeau et la surface normale de la pièce, et des propriétés mécaniques du matériau à usiner. Ces facteurs affectent également l'angle du plan de cisaillement et les forces intervenant dans le processus de coupe. Pendant ce processus nous observons trois zones principales de fortes contraintes (déformations) [Figure 16]:[Hab'06].

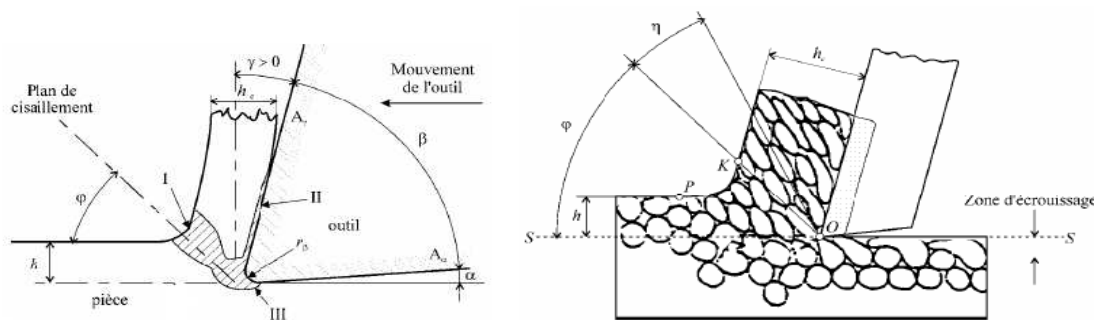


Figure 16: Formation du copeau dans la coupe orthogonale. Définition des zones de cisaillement primaire (I), secondaire (II), tertiaire (III). (φ : angle du plan de cisaillement, α : angle de dépouille, γ : angle de coupe).

- La **zone de cisaillement primaire** où la matière subit une déformation plastique ainsi qu'un échauffement considérable. (déformation plastique intense, frottement) cette zone 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.
- La **zone de cisaillement secondaire** aussi appelée zone d'écrouissage du copeau, elle se situe à l'interface de l'outil et du copeau. C'est une zone de frottement et de glissement qui est responsable entre autre de l'usure en cratère de l'outil. Un écrouissage important de la face interne du copeau s'y produit. 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.
- La zone de **cisaillement tertiaire** ou zone d'écrouissage de la pièce, entre la face de dépouille et la surface usinée. Elle donne naissance à une usure en dépouille, suite au retour élastique de la matière après le passage de la pointe de l'outil. (déformation élastique, frottement) 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).

1.5.2 Morphologie des copeaux

L'étude de la formation du copeau est délicate car la zone d'étude est restreinte, les phénomènes thermomécaniques sont violents, et localisés sur des bandes de quelques micromètres. Dans la littérature, diverses théories concernant la formation des copeaux en usinage ont été présentées [Tro'01]. Depuis des années, beaucoup d'efforts ont été réalisés afin de classer les différents types de copeaux obtenus en usinage, notamment dans le cas de la coupe orthogonale [Yen'04]. Aujourd'hui, les copeaux sont classés suivant qu'ils sont issus de l'usinage conventionnel ou de l'usinage grande vitesse (UGV). On distingue trois zones de vitesse de coupe [Figure 17] [UGV'99], variables suivant le matériau utilisé.

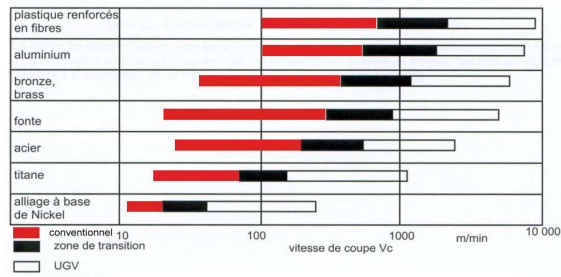




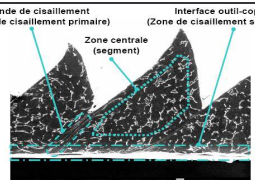
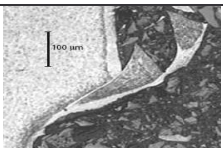


Figure 17 : Ordre de grandeurs des vitesses de coupe pour différents matériaux, en usinage conventionnel, usinage transitoire et usinage grande vitesse.

En usinage conventionnel, le processus de formation du copeau est principalement basé sur les déformations plastiques. En UGV, la formation des copeaux est affectée par des instabilités qui apparaissent avec l'augmentation de la vitesse. Ces sources d'instabilités sont dues aux caractéristiques métallurgiques et thermo-plastiques du matériau usiné, aux variations du cisaillement dans la zone de cisaillement primaire, aux conditions de coupe. Le résultat de ces instabilités est la formation de copeaux discontinus. Le tableau suivant illustre les types de copeaux qui dépendent essentiellement de la matière et des conditions de coupe.

Tableau 6: Type de copeau caractéristique de l'usinage traditionnel et de l'usinage grande vitesse.

Types de copeaux		Schéma utilisé dans la littérature
Usinage traditionnel [Ernst]	Continu , sa formation est due à un écoulement constant de la matière dans lequel les contraintes, la déformation, la vitesse de déformation et la température restent constantes tout au long de la coupe.	 [Vel'07]
	Continu avec arête rapportée , c'est le résultat d'un état d'équilibre dynamique d'un système contenant une zone de stagnation. La tendance à la formation d'arête rapportée lors de l'usinage diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.	 [Vel'07]
	Discontinu , il se caractérise par des profils d'écoulement oscillatoire de la matière lors de la coupe.	 [Vel'07]
[Komanduri] (classement des copeaux :	Segmenté périodique , c'est un copeau qui présente une variation périodique mais asymétrique de l'épaisseur. Il ne se présente que pour des intervalles de vitesses particuliers qui dépendent du matériau à usiner et du dispositif expérimental.	 [UGV'99]
	Cisaillement localisé (dentelé) , ce type de copeau est dû principalement à une instabilité de la déformation plastique localisée dans la zone de cisaillement primaire. Phénomène cisaillement adiabatique.	 [Vel'07]
	Fragmenté (fissuré) il est similaire au copeau segmenté périodique mais avec une séparation complète des segments. C'est le résultat de la rupture périodique du copeau dans la zone de cisaillement primaire. Ce type de copeau se présente principalement dans l'usinage de matériaux fragiles.	 [Pou'02]

L'essentiel de la coupe s'effectue donc au niveau du plan de cisaillement, déterminé dans une large mesure par le rapport de coupe entre la partie non déformée et la partie déformée des copeaux. Nous venons de voir qu'une augmentation de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier provoque une modification morphologique du copeau qui est dépendante du plan de cisaillement. On passe d'un mode d'obtention par déformation plastique à un mode d'obtention par cisaillement puis à un mode de fissuration. [San'97]. Cette évolution morphologique du copeau, en fonction de la vitesse de coupe et de la dureté du matériau, est illustrée par la Figure 18 selon [Pou'02]. Des Q.S.T. (Quick Stop Test) sur des échantillons de différentes duretés ont permis de délimiter la formation du copeau par cisaillement ou par fissuration. Lors d'un Q.S.T. ("Quick Stop Test"), la pointe de l'outil est retirée brutalement par un système explosif ce qui permet d'étudier un copeau en cours de formation pour des vitesses de coupe différentes.

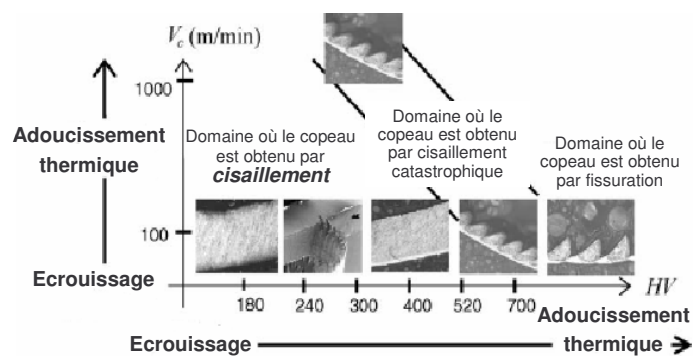


Figure 18 : Evolution de la forme du copeau en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe [Poul'98].

Pour de faibles vitesses de coupe, le copeau est continu, et les déformations plastiques dans les zones de cisaillement sont quasi-stationnaires. Il est considéré que ce type de copeau est obtenu par un cisaillement simple de la matière.

L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne des modifications du comportement du matériau. Les grandes vitesses de déformation et les hautes températures dans la zone de cisaillement primaire conduisent à une localisation de la déformation dans des bandes de cisaillement, se traduisant par une géométrie de copeau de type dentelé. Les mécanismes de formation des copeaux dentelés en usinage à grande vitesse passent par un « *cisaillement catastrophique (intense)* » et par la formation périodique de fissures dans la zone de cisaillement primaire.

La quantité de chaleur dégagée dans les zones de coupe croît avec la vitesse de coupe. Par la suite, la température s'élève et la formation du copeau est donc attribuée au phénomène de cisaillement *adiabatique* catastrophique. Le cisaillement catastrophique se présente quand le taux d'adoucissement thermique dépasse le taux d'écrouissage dans la zone de cisaillement primaire.

Cela entraîne une localisation de la déformation dans des zones très étroites, qui se retrouvent dans le copeau sous la forme de bandes de cisaillement.

Le terme « *cisaillement adiabatique* » est utilisé dans la littérature pour désigner ce phénomène, du fait des très forts gradients de température ayant lieu dans la zone de cisaillement primaire pendant des intervalles de temps très courts, raison pour laquelle il y a peu de transfert thermique.[Vel'07].

1.5.3 Paramètre qui influent le cisaillement du copeau

Le dégagement du copeau est optimisé avec la formation d'éléments courts. On dit alors que le copeau est fragmenté ou brisé. La forme des copeaux est largement influencée par la nature de la matière à usiner et peut varier d'une configuration continue à fragmentée. De ce point de vue, le mécanisme de coupe est un processus de formation et de fractionnement de copeaux.

Il s'agit de contrôler l'écoulement du copeau de la zone de coupe. L'étude du fractionnement des copeaux est un domaine de recherche à part entière [Thi'99& 00]. Le schéma [Figure 19], donne une idée des différents champs d'investigations. La formation du copeau est conditionnée par les paramètres de coupe, par le comportement du matériau usiné et par la nature de l'interface de contact outil/matière.

L'analyse des copeaux donne souvent des indications pertinentes sur le déroulement de l'usinage. Ainsi la couleur du copeau est un indicateur de température. Trop élevée, elle accélère l'usure de l'outil. Un copeau fragmenté à faible rayon de courbure est le signe de fortes contraintes mécaniques qui traduisent des efforts de coupe élevés...

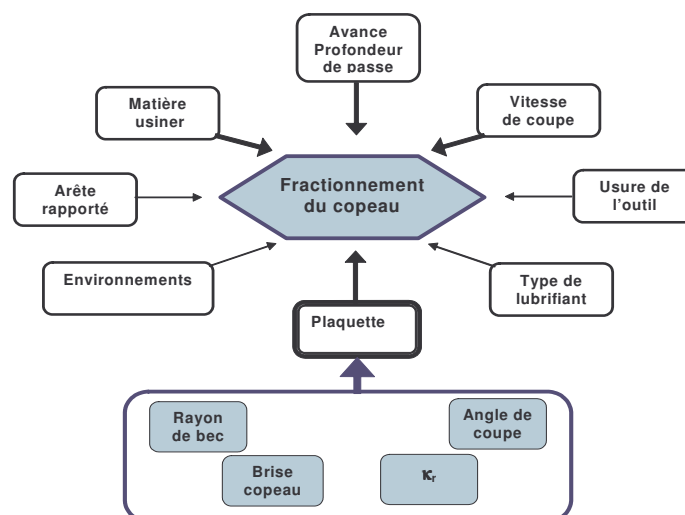




















Figure 19:Champs de recherche sur le fractionnement du copeau. L'intérêt de l'étude des copeaux obtenus en usinage.

La pratique industrielle exige des copeaux courts. Les copeaux longs, lorsqu'ils sont enchevêtrés à la pièce, nuisent à son état de surface. Il existe une classification normalisée de la forme des copeaux. Les formes schématisées dans le [Tableau 7] sont extraites de la norme ISO 3685.

Tableau 7: Classification normalisée des formes des copeaux obtenue en tournage.

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

1.6 Durée de vie et usure des outils de coupe

La durée de vie de l'outil est en pratique considérée en terme de nombre de pièces réalisées, de temps écoulé, de volume de copeaux produit, ... entre chaque changement d'arête. Cette durée de vie dépend de l'usure du tranchant de l'outil. La chaleur dégagée lors de la coupe des métaux influe directement sur le développement de l'usure. Ce processus fait intervenir une transformation d'énergie cinétique en d'autres formes d'énergies (mécanique, thermique) durant la phase de détachement du copeau. La Figure 20 illustre la transformation de la puissance mécanique mise en œuvre pendant l'usinage en énergie thermique. Les zones de cisaillement générées par la coupe sont les 3 sources de production de chaleur (primaire, cisaillement par déformation du métal ; secondaire, par frottement du copeau sur la face de coupe ; et tertiaire, par frottement de la pièce sur la face de dépouille). Les flux de chaleur issus de ces zones sources sont dissipés, inégalement, dans la pièce, l'outil de coupe et le copeau. La plus grande part de l'énergie thermique est évacuée de la zone de coupe par l'intermédiaire du copeau [Hab'06]. La température la plus élevée se situe à proximité de la face de coupe, où elle peut monter jusqu'à 1000°C.

La température de coupe et l'usure de l'outil dépendent dans une large mesure des différentes conditions d'usinage utilisées. L'augmentation de la profondeur de coupe ou de l'avance est directement proportionnelle à la température de coupe et à l'usure. Mais c'est la vitesse de coupe qui a la plus grande influence sur la génération de chaleur et par conséquent, sur le développement des différents mécanismes d'usure. [Nou'01][Bou'04][Far'03]

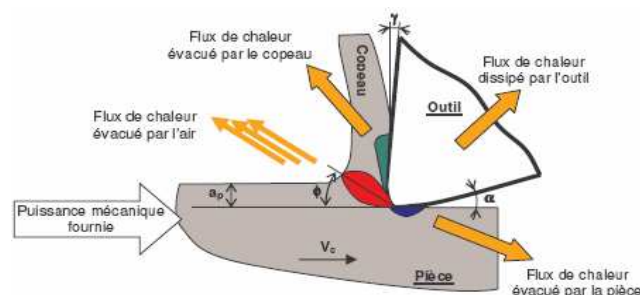
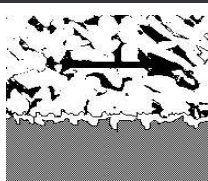
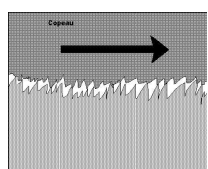

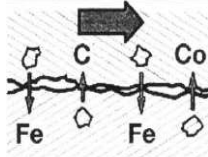
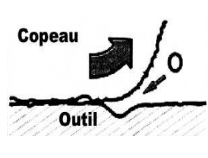


Figure 20: Distribution des flux de chaleurs générés en coupe orthogonale.

La connaissance des mécanismes d'endommagement est un aspect très important de la coupe des métaux car l'usure des outils conditionne le coût des opérations d'usinage.

Les contraintes mécaniques et thermique exercées sur l'arête de coupe en cours d'usinage donnent naissance à un certain nombre de mécanismes d'usure dominants qui sont résumés dans le tableau suivant [Tableau 8]:

Tableau 8: Principaux mécanismes d'usure des outils de coupe en usinage.

		Description du phénomène	Illustration
Mécanisme d'usure mécanique	Abrasion	La matière (pièce usinée et copeau) frotte à des pressions de contacts importantes sur l'outil. La constitution physico-chimique (nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition des composants de l'alliage : forme, dimension, arrangement) conditionnent l'abrasion de la matière. Cette dernière comporte des constituants (écrouissage, aluminate, nitrure, carbure, oxyde, ...) plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil.	
	Adhérence	Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. Lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Les rugosités et micro-rugosités des surfaces, en contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des micro-soudures. Ces micro-soudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère l'apparition d'arêtes rapportées.	
	Fatigue - déformation plastique	Ce type d'usure est lié à la fissuration parallèle de l'arête de coupe. Elles proviennent de variation de pressions excessives exercées sur l'outil au niveau de l'arête, de choc brutal à l'entrer de la matière ou de vibration.	
Mécanisme d'usure physico-chimique	Diffusion	Ce type d'usure ne peut se produire qu'à des températures élevées. Les zones de températures élevées sont également le lieu de fortes pressions. Ainsi sous l'effet des températures et pressions élevées les atomes vont subir une migration de l'outil vers le copeau. Ce processus est grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques entre les atomes de la matière usinée et de l'outil.	
	Oxydation	L'environnement de l'usinage est constitué d'oxygène dans l'air, de hautes températures, de l'eau provenant des huiles de coupe solubles. Cet environnement est propice au phénomène d'oxydation et peut provoquer localement une fragilisation de l'outil. De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.	

Au cours d'un usinage, l'ensemble de ces processus peuvent se produire [Figure 21]. Ceux sont les conditions d'usinage qui fixeront les mécanismes d'usure. Qui manifesteront sous différentes formes dont les principales :

- usure en dépouille (Vb),
- usure en cratère (Kt),
- déformation plastique (BUE),
- usure en entaille,
- écaillage,
- formation d'arête rapportée (BUL).

L'indication des différentes formes provoquées par ces mécanismes d'usure permet d'évaluer la résistance à l'usure de l'outil qui sera par la suite un des critères d'arrêts qui délimitera la durée de vie d'une plaquette. De nombreux travaux [San'97, Sha'05, Gru'03] indiquent qu'aux faibles vitesses de coupe les matériaux qui présente une bonne usinabilité sont plutôt sensible à une usure mécanique. A contrario pour de forte vitesse, ceux sont les mécanismes d'usures par diffusion qui dominant.

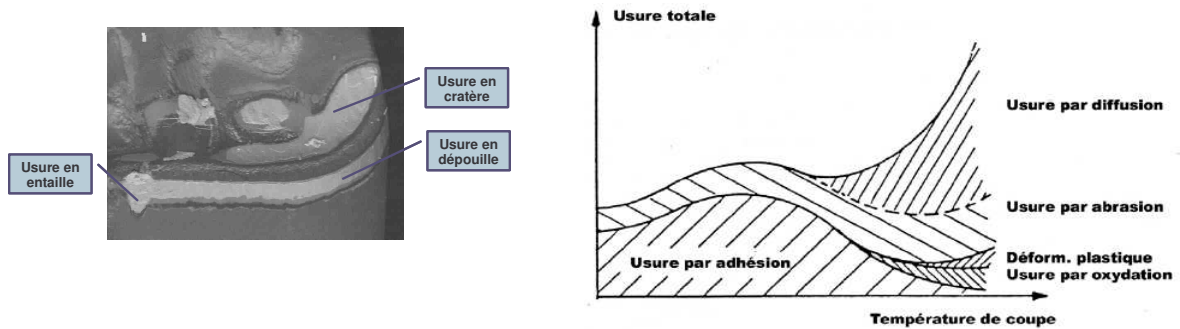


Figure 21 : Image MEB avec usure combinée. Diagramme de combinaison des différents mécanismes d'usure en fonction de la température.

Le changement de la géométrie des outils, résultat de l'usure, modifie les bonnes conditions de coupe et par conséquent détériore la qualité de l'usinage. Les phénomènes tribologiques aux interfaces contrôlent la nature et la sévérité de l'usure [Figure 21].

1.6.1 Mécanisme d'usure des outils en WC-Co

La détérioration d'un outil de coupe peut se révéler sous différentes formes Figure 23. Les types d'usures les plus observées sur les carbures à substrat gradient dans l'usinage à sec des aciers sont l'usure en dépouille (Vb) et l'usure en cratère (Kt). [Rup'98, Far'03, Lis'04]. La première affecte la face de dépouille, la seconde la face de coupe. Ces usures sont mesurées comme l'illustre la Figure 23.

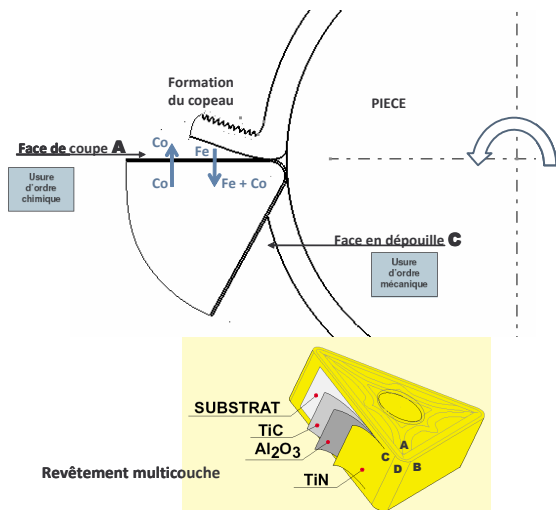
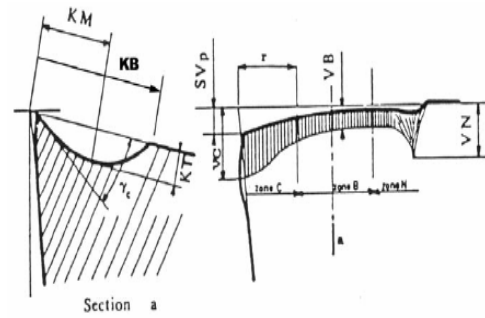


Figure 22: Mécanisme d'usure lié aux plaquettes carbures pour l'usinage de l'acier



Indices :

- K_M : Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil
- K_T : profondeur d'un cratère
- K_B : Largeur du cratère
- γ_c : Angle de cratérisation
- V_B : Hauteur de l'usure en dévaille
- V_N : profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
- V_{BC} : Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
- S_V : Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée

Figure 23: Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil d'après la norme NFE 66 505

Les températures sont plus élevées au niveau de la face de coupe, on y retrouve les mécanismes d'usure chimique et métallurgique (diffusion). Le liant est affecté en premier par cette température élevée. Ces propriétés mécaniques, proches de celle du fer, se dégradent. L'usure en cratère résulte de la diffusion mutuelle du Co de l'outil et du fer du copeau. Ce phénomène peut être retardé par application d'une couche d'alumine qui joue le rôle de barrière chimique. Quand la température est plus faible (sur la face de dévaille), l'usure d'ordre mécanique domine [Figure 22]. Dans ce cas, le revêtement de carbure de titane (TiC) est utilisé pour faire face à ce type d'usure.

1.7 La micro géométrie du rayon d'arête

Le renfort de l'arête de coupe par mouchage fut développé dans les années 60. La compréhension de l'influence de ce paramètre est nécessaire pour les fabricants d'outils de coupe, ainsi que pour les utilisateurs et les chercheurs.

Une classification générale pour la finition d'arête, dans laquelle la grande majorité des plaquettes peuvent être rangées, a été établie [Figure 24] [Fang 2005] :

- Micro géométrie de type E (arrondie)
- Micro géométrie de type T (chanfrein)
- Micro géométrie de type S (combinaison T+E)
- Micro géométrie de type F (arêtes "vives")

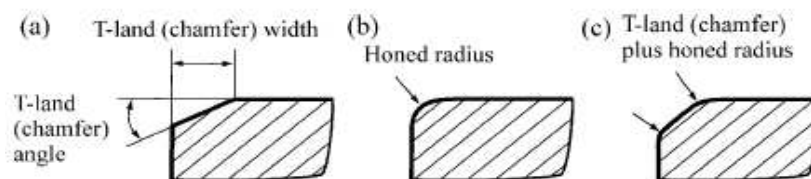


Figure 24: Exemple de préparations d'arête typiques : (a) type T, (b) type E, (c) type S.

Ces types de micro géométrie sont obtenus selon différentes méthodes. La forme, la dimension et la structure superficielle du rayon d'arête sont les éléments décisifs du type de plaquette.

Le micro rayon du type arrondie « E » [Figure 24(b)] est couramment employé sur la plupart des arêtes et des chanfreins négatifs. Les efforts peuvent ainsi être redistribués en direction des parties les plus résistantes de la plaquette. Cependant, un accroissement de mouchage peut provoquer un accroissement des efforts de coupe, de la consommation d'énergie et des contraintes imposées à l'arête. « *La micro géométrie de l'arête de coupe est un domaine exigeant une importante somme de développements technologiques, une longue expérience et des techniques de fabrication de pointe* » [San'97].

Il est délicat de présenter les méthodes de fabrication employées par les industriels qui protègent leur « savoir – faire ».

1.7.1 La préparation du rayon d'arête sur les carbures

L'effet de la micro géométrie du rayon est un paramètre fondamental dans la compréhension du procédé d'usinage. Une arête brut de frittage ne présente pas d'arête vive a cause d'irrégularité du compactage de la poudre à l'intersection de la face de coupe et de la dépouille. Ces défauts entraînent une dégradation des performances de coupe. Pour atténuer leurs conséquences, aléatoires des opérations de finition des arêtes sont réalisées, selon le type de plaquette :

- par rectification des faces d'intersection de l'arête obtenue ainsi vive, suivie ou non d'un mouchage,
- par mouchage de l'arête par micro sablage de rayon d'arête de l'ordre de 15 à 60 μm ,
- par brossage abrasif (rayon d'arête de 15 à 100 μm),

sont les plus utilisées.

La Figure 26 présente une synthèse des étapes de fabrication des plaquettes carbure [Rec'05]. Après l'opération de pressage, une étape de frittage est réalisée pour élaborer la macro géométrie de l'outil. Cette macro géométrie englobe le brise copeau, proche de l'acuité d'arête dans le cas des géométries de tournage. Les géométries brises copeau sont intégrées lors du pressage. Une coupe transversale, permet d'observer la géométrie et les autres caractéristiques tel que l'angle de coupe ou le listel, intégrées à la plaquette [Figure 25] [Figure 26].

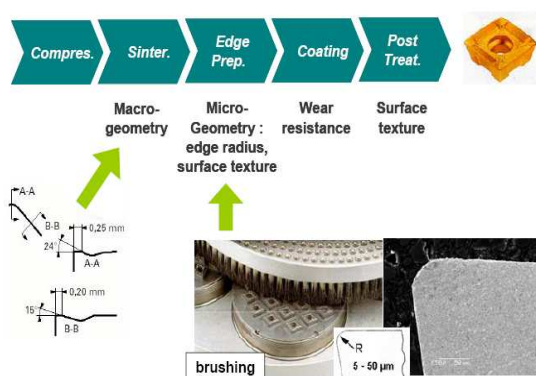


Figure 26: Résumé de la fabrication des outils en carbure de tungstène, suivi d'une préparation d'arête et d'un surfaçage.

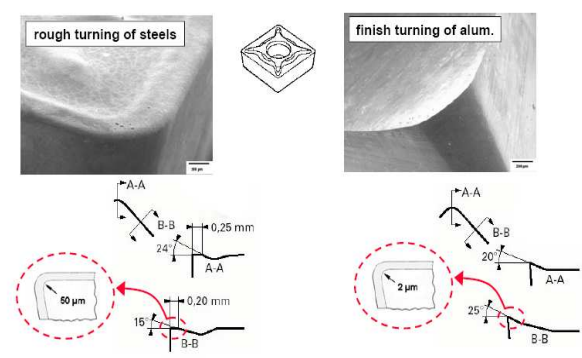


Figure 25: Comparaison des préparations d'arête et de la géométrie brise copeau sur deux plaquettes carbure. [Rech]

La Figure 25 représente une géométrie brise copeau standard sur deux plaquettes carbure employé en tournage avec préparation d'arête. La préparation d'arête observée est fonction de la matière et de l'opération d'usinage préconisée. Une préparation d'arête de type E est par exemple préconisée pour l'ébauche de l'acier et de type F pour la finition des alliages d'aluminium.

A l'issue de l'opération de préparation, la géométrie des arêtes de coupe peut être modifiée par broissage. Trois formes géométriques différentes de préparation d'arête peuvent être observées [Figure 27] [Ger'06]:

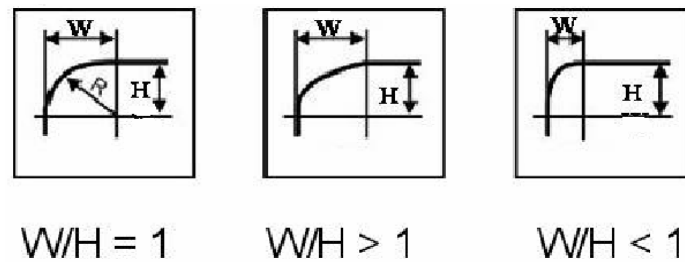


Figure 27: Familles de géométries des arêtes préparées. De gauche à droite : arête circulaire unitaire, avec $W/H=1$, suivie d'une arête à forme plate puis une arête en « chute d'eau ».

Par modification des paramètres de la machine, de la composition et de la direction des brosses, différentes formes géométriques peuvent être réalisées. Ces différentes formes géométriques, corrélées à la géométrie brise copeau, jouent un rôle sur l'écoulement du copeau, les sollicitations mécaniques, et par la suite, sur le développement de l'usure.

1.7.2 Le traitement d'arête dans la littérature

La préparation d'arête est un sujet sur lequel la littérature est rare. En se basant sur les essais empiriques réalisés par les différents fabricants d'outils, les laboratoires de recherche tentent de déterminer les paramètres qui influent sur l'arête et les conséquences de la géométrie d'arête sur le procédé d'usinage.

Lors de l'étude du rapport entre le rayon d'arête et l'épaisseur du copeau pour classer l'outil comme étant tranchant ou arrondi, l'expression « effet du rayon d'arête » a été utilisée pour traduire l'impact du rayon d'arête sur le copeau généré [Sha'06].

L'étude de l'arête a mis en évidence 4 paramètres fondamentaux pour le contrôle de la qualité de la surface des pièces usinées:

- nature du matériau substrat,
- taille de la plaquette,
- géométrie,
- rayon de bec.

Le comportement du rayon d'arête (ER) ne peut être dissocié de ces 4 paramètres et va lui aussi avoir un rôle très important sur la qualité de la surface obtenue.

Les travaux de recherches effectués sur les arêtes concernaient principalement les plaquettes en carbure et, plus récemment, les outils CBN dédiés à l'usinage au dur.

Plusieurs travaux de recherche démontrent l'importance de prendre en compte la micro géométrie de la plaquette en fonction du choix de l'outil pour une application donnée. Le choix de la micro géométrie idéale est fonction de nombreux paramètres dont notamment :

- le type d'usinage,
- le matériau de coupe (nuance plaquette),
- la matière à usiner,
- l'épaisseur copeau (conditions de coupe).

Cependant, la micro géométrie n'est prise en compte que récemment dans les modèles théoriques de la coupe. Le modèle analytique de Merchant, 1945 est établi à partir de l'hypothèse d'une arête tranchante et néglige ainsi l'influence de ce paramètre. Les travaux de recherche visant à intégrer ce paramètre remontent aux années 1950-1960 [(Becker, 1952) (Thomsen, 1953) (Albrecht, 1960) [San'97] [Rech'05]. Certains auteurs ont montré que les efforts de coupe étaient différents entre un outil à arête vif et un outil à acuité d'arête arrondie [Figure 28]. Aujourd'hui diverses études, comme celle de [Woo'08] et [Rah'99], montrent l'importance à intégrer ce paramètre au modèle de la coupe. Ces travaux indiquent que lorsque la valeur de l'avance approche la valeur des rayons d'arêtes, la formation du copeau ainsi que les contraintes de surface générées sur la pièce sont affectées par ce paramètre. Ils mettent en évidence les limites de la théorie de Merchant qui emploie un rayon d'arête de type tranchant.

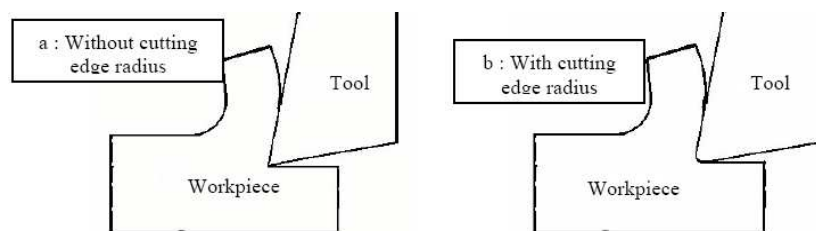


Figure 28: Coupe orthogonale : (a) avec arête tranchante, (b) avec renforcement d'arête.

L'effet de la micro géométrie d'arête a fait l'objet d'un intérêt croissant de la communauté scientifique internationale. Les applications visées sont l'usinage de précision, le tournage au dur des matériaux de l'industrie automobile et aéronautique [Thi'99], le tournage de finition des alliages d'aluminium [Yua'96].

Les premiers résultats complets publiés à ce sujet sur les plaquettes en carbure cimenté émanent de Sandvik Coromant. De ces résultats, il ressort que les rayons d'arête jouent un rôle important sur l'intégrité de surface après usinage. La durée de vie de l'outil dépend de la valeur de cet arrondi :

- un petit rayon, donnant une arête trop fragile, est propice à une longue durée de vie de l'outil mais donne une sécurité insuffisante contre l'ébrèchement.
- un rayon plus important réduit fortement la durée de vie de l'outil pour une application donnée. [San'97].

Certaines matières exigent une arête très vive, avec un minimum d'arrondi. Un arrondi excessif peut, en finition, avoir le même comportement qu'une arête émoussée, c'est-à-dire :

- accélérer les mécanismes d'usure, en dépouille (V_B) ou cratère (K_t),
- entraîner la formation d'arêtes rapportées et
- augmenter les efforts de coupe.

Une fois définie en fonction du type d'application et de la géométrie de la plaquette, le traitement d'arête doit être exécuté avec précision et conformité. Une arête vive non revêtue peut conserver son tranchant tout en développant un profil d'usure correct. Les arêtes revêtues demandent un minimum d'arrondi d'arête pour assurer une adhérence satisfaisante de la couche de revêtement afin d'éviter des contraintes qui conduiront à l'écaillage du revêtement.

Parmi les travaux de recherche effectués sur l'influence du rayon d'arête, certains soulignent l'intérêt d'utiliser une préparation d'arête afin d'améliorer la durée de vie et les performances de l'outil, dans la tenu des revêtements, [Der'98] [Bou'98] [Bou'02] [Mou'07]. La plupart de ces études ont été évaluées sur des outils carbure cimenté et sur des cermets dans le cas d'opération de fraisage, les autres pour des plaquettes en CBN dans le cas de l'usinage dur en tournage [Rech'03].

Parmi les travaux de recherche récemment publiés, sur l'étude de l'influence de la préparation d'arête sur les performances des outils de coupe, le procédé de micro-sablage était le processus le plus répandu, car économiquement productif. (Klo'99) (Bou'02) ces chercheurs ont démontré que le micro-sablage peut améliorer la durée de vie de l'outil en tournage, en perçage et en fraisage des aciers. Le procédé de sablage retarde l'apparition de brèches sur l'arête revêtue et permet une évolution d'usure plus homogène. Cette méthode semble plus efficace que d'autres comme le polissage ou la rectification. [Bou'01'02] a étudié en détails la méthode de micro-sablage sur les carbures cimentés. Il a observé que ce procédé réduisait les pics de rugosités à la surface des plaquettes et permettrait une bonne adhérence du revêtement le long de l'arête de coupe.

1.7.3 Influence de la micro géométrie sur l'intégrité de surface – Définition générale

Les paramètres les plus fréquemment étudiés, permettant de caractériser l'intégrité de surface, peuvent être regroupés en deux catégories : ceux permettant de caractériser géométriquement la surface usinée, et ceux permettant de caractériser microstructure la surface obtenue. Parmi les paramètres géométriques, il est possible de citer l'état de surface, ainsi que le respect des tolérances dimensionnelles et géométriques. En ce qui concerne les paramètres utilisés pour la caractérisation microstructurale de la surface générée, on retient notamment la structure cristallographique, l'état de contraintes résiduelles, les modifications morphologiques des grains constituant la surface, l'analyse de phases, permettant de retrouver des phénomènes comme les transformations de phase et des réactions chimiques en surface, ainsi que la micro dureté des surface usinées [End'02] [Fis'05]. Au niveau du tournage dur, ces paramètres sont les plus influents sur la tenue des pièces à la fatigue et leur résistance à l'usure.

Rech a démontré l'importance de l'étude de ce paramètre sur les aciers rapides pour le taillage de fraises mères. La performance de trois méthodes de préparation d'arête a été testée sur les aciers rapides. Ces préparations d'arête montrent une amélioration de la résistance à l'usure de l'outil dans l'usinage à sec. L'efficacité de la préparation par extrusion d'une pâte abrasive (AFM) est mise en évidence et comparée à la méthode de micro sablage dans cette application. Elle donne à l'outil une meilleure résistance à l'usure [Figure 29].

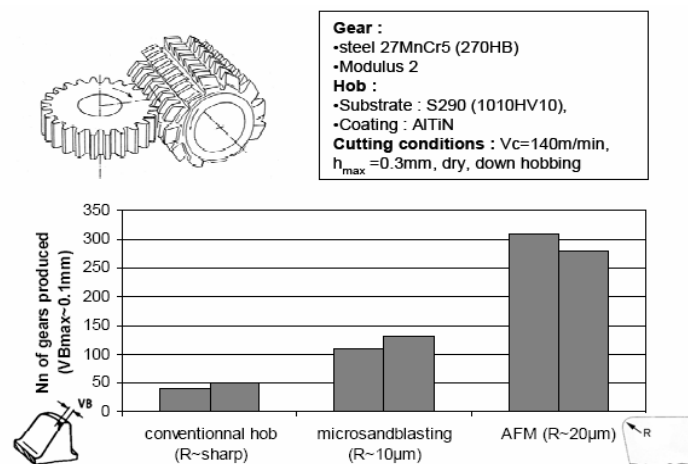


Figure 29:Usure des outils en fonction des différents rayons d'arête.

La plupart des auteurs caractérisent l'intégrité de surface par sa rugosité, par les contraintes résiduelles générées en surface ou par la dureté superficielle [Alam'97]. Dans son étude Alam remarque une évolution de la rugosité de surface proportionnelle à l'évolution des efforts de coupe. D'autres investigations menées sur l'acier 42CD4, montrent que l'augmentation de la vitesse de coupe implique la diminution de l'effort de coupe et d'avance. Ces observations coïncident avec celles d'autres auteurs [Thi'99][Gun'03].

Les recherches effectuées par Thièle en tournage dur sur l'acier AISI 52100 démontrent l'influence différents rayons d'arête sur les efforts et la rugosité de surface. Les Figure 30 et Figure 31 illustrent ces résultats. L'influence de ce paramètre est de nouveau mise en évidence. Les efforts croissent en fonction du rayon d'arête et de la dureté de la pièce à usiner.

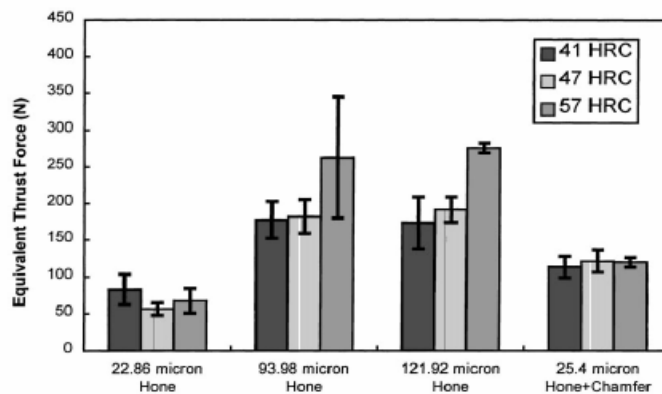


Figure 30: Comportement du rayon d'arête sur les composantes des efforts (radial, axial) et sur les duretés de surface pièce.

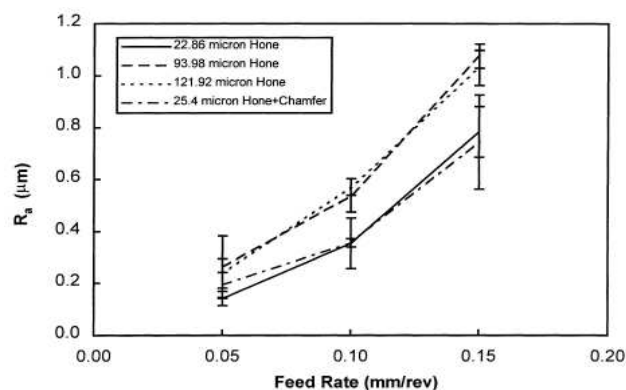


Figure 31: Effet de l'acuité d'arête sur l'avance et la rugosité arithmétique de surface (Ra).

Selon Özel et al.(2003), la micro géométrie d'arête, la dureté de la pièce, l'avance et la vitesse de coupe sont les paramètres qui influent le plus sur les efforts de coupe et sur la rugosité de surface. Ces résultats sont issus d'opération de tournage sur un acier durci. Les efforts de coupe sont dépendants des conditions de coupe, de la géométrie d'arête et de la dureté de surface de la pièce.

Les duretés de surface moins élevées et les petits rayons d'arête impliquent des forces tangentielles et radiales plus faibles. Ils ont démontré que plus le rayon d'arête est grand et plus il génère de tensions en compression. Ils ont observé que la formation des « white-layers », (couche superficielle trempée par l'air ambiant, martensite dans le cas des aciers) est favorisée lors de l'accroissement du rayon. En général, les contraintes résiduelles sont en compression et leur valeur augmente avec la dureté de surface.

L'influence des conditions de coupe et de l'usure de l'outil sur les contraintes résiduelles générées par l'usinage de l'acier 27MnCr5 a été étudiée par Rech et Moison [Rec'03]. Ils concluent que le paramètre le plus influent sur les contraintes résiduelles est la vitesse de coupe. Ceci implique que les choix de l'avance et de la vitesse de coupe sont deux paramètres à découpler. L'un est conditionné par la rugosité tandis que l'autre est conditionné par le niveau de contraintes résiduelles. Ces résultats sont observés lors de l'usinage au dur des aciers bainitiques [Dah'04][Gun'03].

Le Tableau 9 résume les travaux effectués par d'autres chercheurs qui s'intéressent au comportement de l'acuité d'arête et des conditions de coupe sur l'intégrité de surface en usinage dur de finition. L'influence de ces paramètres est évaluée par la mesure des contraintes résiduelles générées après usinage. La tendance industrielle visant à accroître toujours plus les vitesses de coupe est dangereuse dans le cas du tournage au dur, en raison de la dérive des contraintes résiduelles vers des contraintes de traction se traduisant par une diminution de la tenue en fatigue de ces mêmes pièces. Les changements de microstructure sont à l'origine de la dérive des contraintes résiduelles vers la traction. Ces études servent à optimiser les paramètres de coupe de façon à générer sur la surface usinée des contraintes favorables à la tenue en fatigue de la pièce.

Les travaux de ces différents auteurs ont démontré que la dureté de la pièce, les micro géométries d'arête (chanfrein, rayon, listel), la vitesse de coupe, l'avance sont des paramètres qui ont une influence importante sur l'état de surface de la pièce.

Tableau 9: Résumé des travaux de recherche développé par plusieurs auteurs sur le comportement des micros géométries d'arête. Analyse de l'influence des conditions de coupe et des contraintes résiduelles engendrées en surface après usinage [Hua'06].

Researchers		Edge preparation (μm)	Maximum compressive residual stress (MPa) in hoop direction	Depth of maximum stress (μm)
Thiele and Melkote [3]; cutting speed= 121.9 m/min, feed rate = 0.15 mm/rev, depth of cut = 0.254 mm, AISI 5210	57 (HRc)	25.4 chamfer	1800	38
	57 (HRc)	121.9 hone	1150	25
	41 (HRc)	121.9 hone	700	30
	41 (HRc)	22.9 hone	380	0
Matsumoto et al. [1]; cutting speed= 91.4 m/min, feed rate = 0.89 mm/rev, depth of cut = 0.15 mm, AISI 4340	56 (HRc)	Sharp chamfer	630	50
	55 (HRc)	Sharp chamfer	480	30
	53 (HRc)	Sharp chamfer	450	20
	48 (HRc)	Sharp chamfer	320	25
Matsumoto et al. [4]; case carburized steel	58-62 (HRc)	No hone	250	15
	58-62 (HRc)	25 hone	780	20
	58-62 (HRc)	Chamfer	450	15
	58-62 (HRc)	Double chamfer	800	22
Dahlman et al. [5]; HRc = 62, cutting speed = 110 mm/min, depth of cut = 0.1 mm; AISI 52100	0.1 (mm/rev)	Chamfer + hone	180	15
	0.2 (mm/rev)	Chamfer + hone	350	15
	0.3 (mm/rev)	Chamfer + hone	450	15
	0.5 (mm/rev)	Chamfer + hone	800	20

1.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les bases nécessaires à la compréhension de cette étude :

- un rappel des bases scientifiques et des mécanismes de la coupe des métaux
- un bref descriptif des matériaux de coupe et des mécanismes d'endommagements des outils
- un descriptif des techniques d'élaboration du traitement d'arête utilisées industriellement

Nous avons mis en évidence l'importance de l'étude du comportement du traitement d'arête sur la qualité des surfaces usinées. De l'étude bibliographique il ressort que les préparations d'arête ont une grande influence sur les performances des plaquettes. Les travaux entrepris dans ce domaine montre que le rôle du traitement d'arête peut être caractérisé par :

- la mesure des efforts de coupe,
- les mesures des contraintes résiduelles,
- l'analyse topographique de la surface usinée,
- la durée de vie de l'outil.

Le choix du traitement d'arête sera fonction des propriétés de la matière usinée, des matériaux de coupe, du type d'usinage, des conditions de coupe. Pour ces raisons l'étude de ce paramètre doit s'effectuer en suivant une méthodologie stricte dans le but de pouvoir maîtriser son utilisation.

La suite de ce mémoire porte sur la description : des caractéristiques de la matière testées dans cette étude, ainsi que celle de la plaquette carbure, du protocole expérimental, des différents équipements, et méthodes de mesure mise en œuvre permettant d'aboutir à une caractérisation scientifique.

2 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Ce chapitre, présente l'ensemble des moyens expérimentaux mis en œuvre pour l'étude du traitement d'arête. Dans l'ordre, nous décrivons : l'outil utilisé, la matière usinée, la machine et l'instrumentation utilisées en cours d'usinage, la méthodologie expérimentale de la préparation d'arête et de la préparation des lopins, les techniques de caractérisations et d'analyses employées.

2.1 Dispositifs considérés lors de la campagne d'essais

De nombreux paramètres influencent la qualité de surface de la pièce finale comme l'illustre le diagramme de la Figure 3 [page 15]. La caractérisation du traitement d'arête va être influencée par tous les paramètres liés à la coupe. Dans le but d'atteindre des résultats exploitables, nous devons adopter une méthodologie et des techniques d'analyse stricte qui permettront de maîtriser au mieux le maximum de ces paramètres.

2.1.1 Description de la plaquette carbure et du porte outil

La plaquette CNMG 12-04-08 M5 a été sélectionnée selon des critères internes à l'entreprise : c'est la géométrie la plus commercialisée, d'une grande polyvalence, destinée aux opérations de semi-finition et finition. Cette plaquette négative est réversible, elle compte 4 arêtes utiles. Les caractéristiques géométriques de la CNMG 12-04-08 M5 sont détaillées en annexe 2. Cette plaquette est à substrat gradient aux propriétés adaptées à l'usinage des aciers doux. Sa composition et ses principales propriétés sont décrites dans le tableau suivant [Tableau 10] :

Tableau 10: Composition et propriété de la plaquette CNMG 12-04-08 M5.

Substrats poids %		Principales propriétés		Revêtement MT-CVD	
Cobalt	5.5	Substrat		TiN	flash
WC	86.10	Densité	13.82–13.98	TiCN	2-4 µm
TiC	2.55	Dureté Hv20	1550-1650	Al ₂ O ₃	1-2 µm
TaC, NbC	5.85	Granulométrie	3-5 µm	TiN	1 µm

Un substrat gradient est plus tenace en surface, il est appauvri en carbure secondaire et enrichi en cobalt près de la surface. La Figure 32 illustre la microstructure de la plaquette en coupe. Nous distinguons la phase gradient délimitée par les lignes rouge. L'épaisseur de cette phase varie de 7 – 20 μm , elle est moins importante près de l'acuité d'arête. Le revêtement appliqué est de 6 – 7 μm d'épaisseur. Il s'agit d'un revêtement réalisé par déposition chimique en phase de vapeur (CVD). La technique **CVD** (Chemical Vapor **D**éposition) est le résultat de réactions chimiques intervenant entre différents gaz.

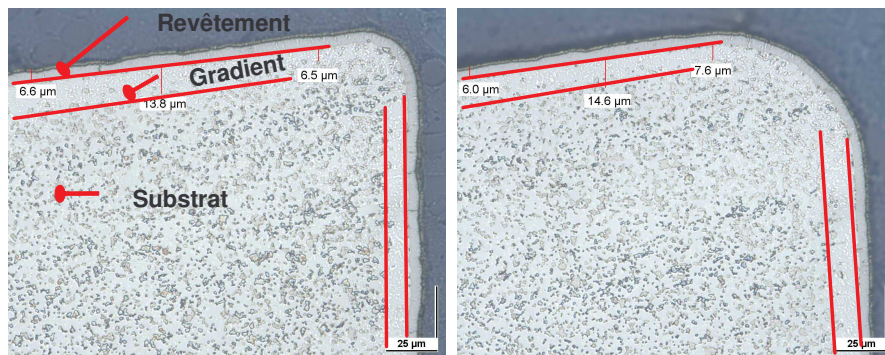


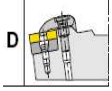

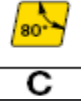

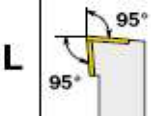



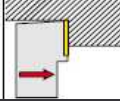
Figure 32: Image métallographique en coupe de la plaquette CNMG 120408 M5. A gauche, acuité d'arête de 25-30 μm , à droite, acuité de 70 μm .

La mise en œuvre industrielles est la suivante : les revêtements CVD sont obtenus par réaction chimique d'un mélange gaz actifs décomposés thermiquement à des températures de 800 à 1000°C, sous vides partiels.

Pour les dépôts TiN, TiC, et TiCN, les gaz réactifs sont le TiCl₄ (tetra chlorure de titane), en mélange contrôlé par débitmètre, avec N₂ et CH₄. Dans sa configuration actuelle, l'équipement permet la réalisation de dépôts monocouche ou multicouche. La technique CVD permet de déposer des couches de quelques microns, homogènes et uniformes. L'interface substrat-revêtement est une zone de diffusion mutuelle qui assure la bonne adhérence du revêtement.

Le porte-plaquette choisit est du type DCLNL-2525M12 Tableau 11. Ce porte-plaquette est caractérisé par un angle d'attaque de 95°. Le détail de ses caractéristiques est présenté en annexe 1.

Tableau 11: Classification du porte outil employé.

Codification ISO du porte plaquette DCLNL-2525M12			
1) Système de fixation		6) Hauteur du corps (25 mm)	
2) Forme de la plaquette		7) Largeur du corps (25 mm)	
3) Angle d'attaque		8) Longueur du porte outil (M)	
4) Angle de dépouille de la plaquette		9) Longueur d'arête de coupe	
5) Sens de coupe		10) Caractéristiques du fabricant	Information complémentaire

2.1.2 Description de l'acier usiné

La plaquette retenue, sera évaluée au cours d'opérations de chariotage d'un acier faiblement allié : le 27MnCr5 JV fourni par ASCOMETAL sous forme de barre de diamètre 80 mm. Issu d'une même coulée, cet acier est utilisé pour la pignonnerie. Il est fourni dans son état recuit. La composition chimique de l'acier en question est donnée dans le Tableau 12. La structure de cet acier a été caractérisée par ASCOMETAL.

Tableau 12: Composition chimique de l'acier, analyse chimique (référence Ascometal).

Coulée	% C	%Si	%Mn	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%Al
72365	0.236	0.225	1.123	0.029	0.011	0.139	1.016	0.051	0.180	0.021

La dureté moyenne mesurée entre la peau et le cœur du lopin, est de l'ordre de 143 HB [Tableau 13]. Les analyses réalisées par ASCOMETAL ont mis en évidence une structure ferrito-perlitique en bande fine au niveau de la peau, et en bandes épaisses à mi-rayon et à cœur. Il a également été constaté une globulisation partielle de la perlite. [Ascometal].

Tableau 13: Dureté de l'acier caractérisé par Ascometal (HB 2.5), (référence Ascometal).

Dureté en peau	Dureté a mi-rayon	Dureté a cœur	Dureté moyenne
145	146	140	143

D'autres échantillons de ce même acier ont été analysés par nos soins. Des micrographies optiques de cet acier révèlent que sa microstructure se compose d'une matrice essentiellement ferritique [Figure 33]. Les tests de micro indentation effectués sur cette structure ferrito-perlitique donnent une dureté moyenne de 170 Hv et un module réduit de 236 GPa, (mesures effectuées par micro indentation sous une charge de 2N).



Figure 33: Structure métallographique de l'acier 27MnCr5 à l'état recuit après indentation. Mis en évidence des phases perlite lamellaire et fer α après attaque au nital (3%).

2.1.3 Moyen de réalisation – Machine outil utilisée

L'opération de chariotage est la plus adaptée à la caractérisation du rayon d'arête. Les essais en tournage ont été réalisés sur un tour à commande numérique, SOMAB Unimab 500 d'une puissance de 24kW, doté d'une vitesse de rotation maximale de la broche de 2500 tr/min [Figure 34]. [Fiche technique [annexe 3]. Au cours des essais de tournage, sont mesurés : les efforts de coupe et la puissance machine fournie en utilisant un wattmètre interne.



Figure 34: Tour CNC SOMAB 500 utilisé pour les essais de chariotage. A droite la photo de la pièce, de l'outil monté sur la table dynamométrique.

En tournage, nous mesurons 3 efforts de coupe, ils sont schématisés Figure 35:

- F_f : la force d'avance ou l'effort axial

- F_c : la force de coupe ou l'effort tangentiel
- F_p : La force de refoulement ou l'effort radial

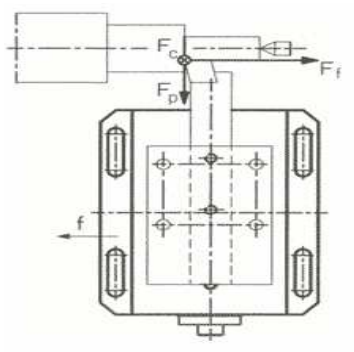


Figure 35: Force de coupe en tournage.



Figure 36: Dynamomètre TAB6

La chaîne de mesure des efforts de coupe comprend :

- Le dynamomètre TAB6 [Figure 36]: il s'agit de l'élément essentiel de la chaîne d'acquisition. Il mesure les 6 composantes du tenseur des efforts de coupe ramené au centre de la table, par un outil au cours de l'usinage à savoir 3 forces et 3 moments.
- Un amplificateur
- Un PC
- Un logiciel spécifique TSR Tab6.

Ce logiciel à plusieurs fonctions : il permet la gestion des fichiers, le lancement des acquisitions et le traitement des signaux. L'exploitation des fichiers est également possible sans TAB6 car les mesures sont enregistrées sous format texte. Ils peuvent être exportés aisément vers d'autres logiciels (Excel, Matlab, ...). L'enregistrement des efforts de coupe a été fait pendant les essais avec une fréquence d'échantillonnage de 100Hz.

Pendant certains essais d'usinage, des observations sur le comportement des copeaux ont été réalisées. Pour effectuer ce suivi, une caméra d'acquisitions rapide a été utilisée. Il s'agit d'une Photron FASTCAM-X 1024 PCI.

2.2 Micro géométrie de la plaquette

Les techniques industrielles de préparation d'arête sont fonction de la nuance et de la taille de la micro géométrie souhaitée. Comme expliqué précédemment, dans le cas des nuances gradients le broissage est la technique appropriée pour la préparation d'arête du type arrondi. Cela évite ainsi la dégradation superficielle de cette couche gradients.

2.2.1 Méthodologie employé pour la préparation des rayons d'arête

Nous avons sélectionné 300 plaquettes issues d'un même lot de fabrication. Les plaquettes nous on été remises brutes de frittages. Dans le but d'élaborer des mouchages d'arêtes du type E, par différentes classes 20 à 70 μ m. Cette démarche est schématisée par la [Figure 37]. Dans la suite des travaux nous utiliserons la notation «ER» pour désigner le mouchage constaté.

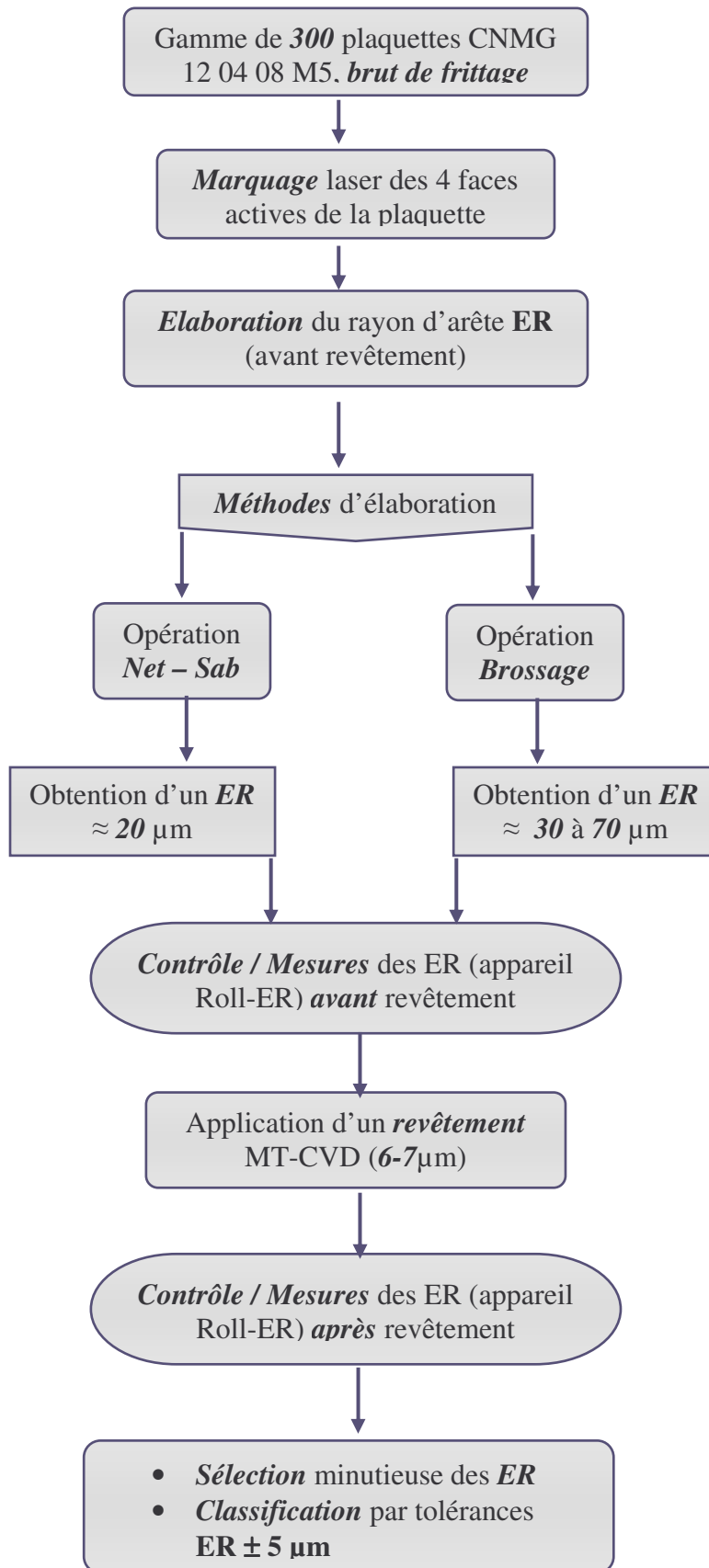


Figure 37: Schéma de la méthodologie suivie pour la préparation du rayon d'arête.

2.2.1.1 Technique de préparation du rayon d'arête

Une partie des mouchages a été réalisée par brossage sur les machines de production (BORO) de l'entreprise. La machine est équipée de trois brosses, constituées Nylon chargé d'abrasif (SiC) de différentes granulométries.

Avant la phase de revêtement les plaquettes subissent une opération de préparation de surface sur un équipement dénommé « Net-Sab ». Cette opération est effectuée par léger sablage. Nous avons mis à profit cette technique pour l'obtention de ER de $\approx 20\mu\text{m}$.

2.2.1.2 Technique de mesure du rayon d'arête

Le contrôle dimensionnel du **ER** est réalisé sur un appareil interne au groupe à l'entreprise, cette valeur est donnée par le programme Roll-ER. Les points de mesures sont définis en fonction des géométries des plaquettes [Figure 38]. Dans le programme la géométrie de la plaquette, est indiquée ainsi que les points à mesurer. La valeur ER retenue est une moyenne des points de mesure effectuée le long de l'arête. Les mesures sont effectuées sur la partie active de la plaquette utilisée pendant la coupe. Dans le cas des plaquettes négatives, les deux faces sont contrôlées. Toutes les plaquettes ont été mesurées pour connaître leurs valeurs propres du ER. Les tableaux correspondant à ces mesures seront représentés en annexe.

Le logiciel du Roll-ER restitue les valeurs des ER et les rapports W/H [Figure 38].

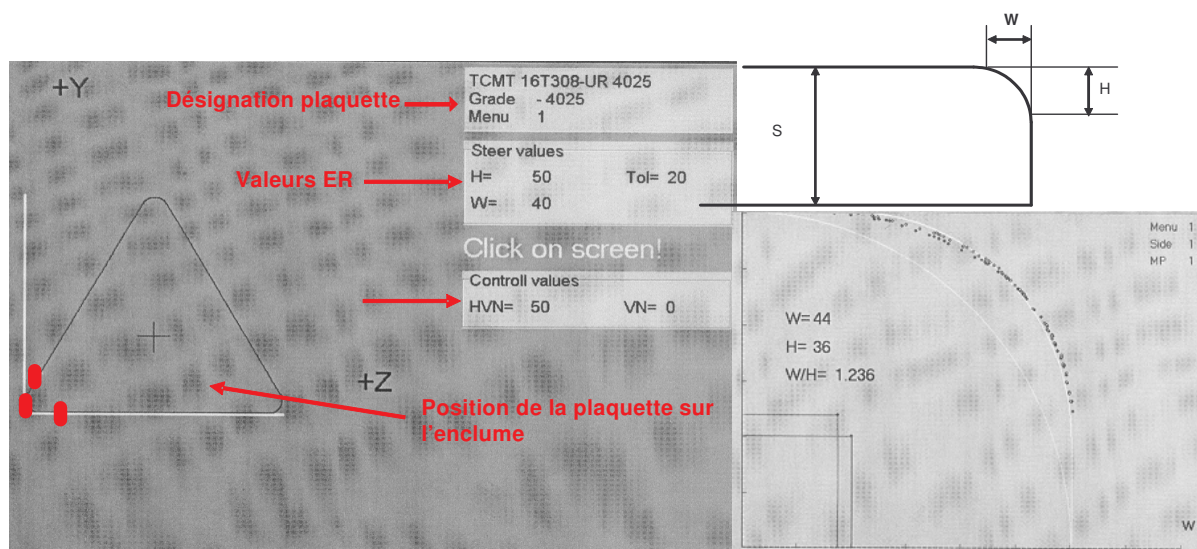


Figure 38: Présentation d'un exemple du menu pour la mesure d'une plaquette TCMT. A droite la définition du profil de H et de W enregistré.

2.3 Mise en œuvre du tournage

La pièce à usiner est un paramètre de grande influence dans la caractérisation du comportement de l'outil. Le diamètre et la longueur usinés sont des éléments qui jouent un rôle au niveau rigidité/vibration (machine/outil/pièce). Dans le but d'atténuer l'influence de ces éléments, une méthodologie stricte a été suivie pour la préparation des lopins.

2.3.1 Préparation des lopins – Gamme d'usinage

Pour effectuer la coupe en chariotage, des pièces cylindriques désignées « lopin » ont été spécialement préparées dans le but de maintenir un usinage contrôlé. La gamme d'usinage effectuée pour leur préparation avant les tests est définie par les étapes suivantes, illustrées par la [Figure 39] :

1. Débit des barres d'acier: longueur, $lg = 122,5$ mm
2. Ebauche prise de mors doux (serrage pièce prise en mors durs)
 - a) dressage face (1 passe)
 - b) chariotage, $lg = 18$ mm, $\varnothing 62$ (3 passes)
 - c) chanfrein à 45° (1 passe)
3. Perçage point de centre coté opposé (serrage pièce en mors doux), \varnothing d'ouverture = 5 maxi. (outil : foret à centré 10x3)
4. Mise à longueur 120 + écroûtage $\varnothing 78$ (serrage pièce en mors doux + contre pointe)
 - a) dressage face jusqu'à $\varnothing 35$ (2 passes)
 - b) chariotage $\varnothing 78$ (1 passe).

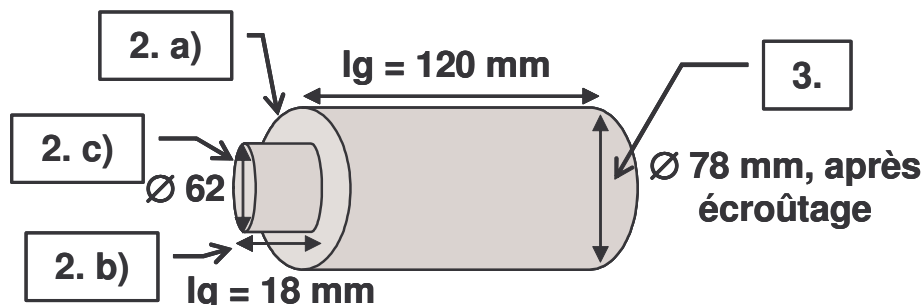


Figure 39: Schéma de préparation des lopins à usiner.

2.4 Techniques de caractérisation de surfaces

L'analyse des surfaces de l'outil et de la pièce avant et après usinage est nécessaire pour piloter les conditions d'usinage et optimiser la durée de vie de l'outil. Dans cette étude l'interférométrie en lumière blanche (profilomètre optique), la microscopie électronique et le système de micro indentation sont les techniques utilisées pour la caractérisation de l'outil ainsi que de la surface usinée, avec l'assistance de logiciels pour le traitement des mesures.

2.4.1 Microscopie interférométrique

L'interférométrie par lumière blanche est une technique qui permet d'obtenir sans contact le relief d'une surface et la mesure de sa rugosité avec une grande précision. Dans le cas de notre étude le profilomètre optique utilisé est un Veeco wyko NT 1100. Ce profilomètre est accompagné d'un logiciel d'analyse de surface « Vision 32 », permettant la mesure et l'analyse de plusieurs paramètres liés à la rugosité. Son utilisation nous permet de caractériser le ER ainsi que l'état de surface générée de la pièce usinée.

2.4.1.1 Principe de fonctionnement

Une lumière blanche passe à travers un séparateur de faisceau qui dirige la lumière sur la surface de l'échantillon et sur un miroir de référence [Figure 40]. Quand les deux surfaces réfléchissent la lumière, un motif d'interférence est formé (franges). La surface de l'échantillon est balayée verticalement (du haut vers le bas) et le réseau de franges est enregistré dans chaque plan focal. Un calculateur détermine la hauteur à partir de la position de l'échantillon et de la position des franges. Il est possible de mesurer des hauteurs verticales allant de quelques nanomètres à plusieurs millimètres avec une vitesse d'acquisition de quelques secondes à quelques minutes.

Les zones analysées vont de $50 \mu\text{m}^2$ (grossissement $G=50$) à 2mm^2 ($G=2,5$). Comme la résolution verticale est indépendante du grossissement choisi, une grande résolution est préservée même pour des surfaces analysées relativement larges, ce qui est le cas des outils de coupe.

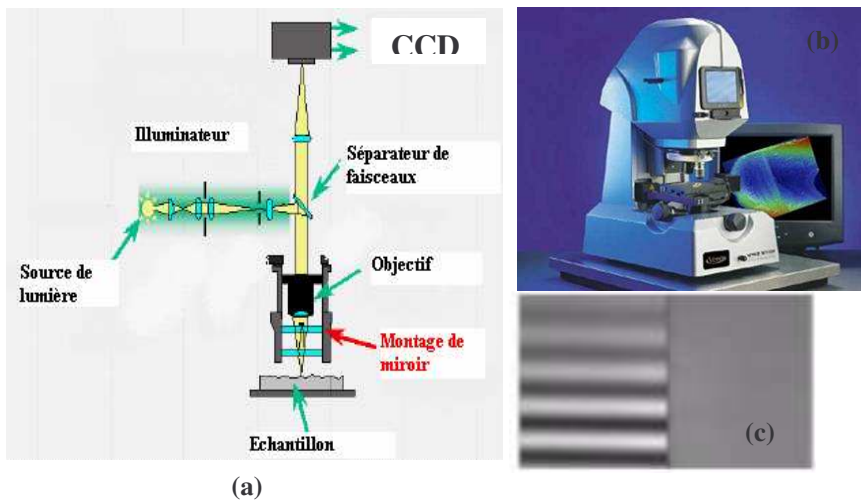


Figure 40: Système d'interférométrie à lumière blanche. a) Schéma conventionnel d'un interféromètre à lumière blanche (balayage vertical), b) Profilomètre Wyko NT 1100Veeco, c) motif d'interférence (frange).

2.4.2 Microscopie électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) est une technique essentielle à l'observation de la topographie des surfaces. Elle fournit des informations sous forme d'images lumineuses, résultant de l'interaction d'un faisceau d'électrons avec un volume microscopique de l'échantillon étudié.

Cet appareil d'analyse, peut fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. Cette technique permet d'obtenir des images de surfaces à très grand grossissement et offre une très grande profondeur de champ (plusieurs centaines de micromètres). Elle ne permet cependant pas la mesure absolue des dimensions dans le sens de la hauteur. Nous utiliserons pour cela la microscopie interférentielle. Ces deux techniques sont complémentaire l'une de l'autre.

Le microscope électronique à balayage utilisé dans cette étude est un appareil JEOL JSM – 6480LV. Il possède trois détecteurs :

- un d'électron secondaire,
- un d'électron rétrodiffusé
- un de photon X

Il peut donc fonctionner en mode électrons secondaires (SEI : secondary electron image) ou en mode électrons rétro diffusés (EBS : Electron Back Scattering). Ce dernier mode permet en particulier de voir des images où le contraste croît avec le numéro atomique des atomes constitutifs de l'échantillon.

Le microscope électronique à balayage est également équipé d'un système de microanalyse « PGT Spirit » permettant de réaliser une analyse en spectroscopie dispersive des rayons X (EDS). Grâce à l'EDS, les éléments chimiques composant l'échantillon peuvent être déterminés qualitativement en surface. Il permet d'analyser l'évolution de l'usure de la plaquette au niveau du rayon d'arête et pendant le frottement du copeau à l'aide des cartographies qui sont élaborées. L'acquisition d'images pour ce type d'analyse se fait par électrons rétro diffusés, elles ont un bon contraste chimique pour la compréhension des cartographies. Cette technique est également utilisée comme complément aux observations faites à la binoculaire pendant l'évolution de l'usure du rayon d'arête. Le principe de fonctionnement est détaillé en annexe 5.

2.4.3 Micro et Nano indentation

La nano indentation est une méthode de caractérisation mécanique des surfaces. En conséquence du cisaillement de la matière pendant le processus de coupe, une déformation plastique superficielle est engendrée sur la pièce usinée. Cette déformation modifie le comportement mécanique de la matière. La caractérisation mécanique de l'état superficiel de la pièce est nécessaire à la compréhension du comportement de l'acuité d'arête.

La nano indentation consiste à faire pénétrer une pointe de géométrie connue, l'indenteur, sur de faibles épaisseurs (1 à 10 μ m) à la surface d'un matériau et à suivre l'évolution du déplacement en fonction de la charge appliquée sur l'indenteur. L'avantage de cette technique réside dans sa capacité à mesurer à une résolution nanométrique, la profondeur de pénétrations allant jusqu'à quelques micromètres. Les indentations à cette échelle permettent de connaître les propriétés mécaniques des surfaces sur des épaisseurs très fines de l'ordre de la centaine de nm. Ceci est particulièrement intéressant pour analyser des couches très fines de traitements de surface ou de revêtement. En réglant la profondeur de l'indentation, on peut connaître les propriétés de la couche mince.

Le système de nano indentation utilisé dans cette étude est un NanoTest de Micromaterials. Sa particularité est son chargement à l'horizontal et son utilisation en température. Il est composé d'un microscope qui permet un positionnement ciblé et de contrôler visuellement la localisation des empreintes. Il existe trois modules de travail pouvant être réalisés avec cet appareil de mesure : les tests d'indentation, l'impact et le scratch. Le module indentation de cet équipement est séparé en deux catégories :

- La Nano indentation, piloté en charge ou déplacement et température. Les forces appliquées varient de 10 – 500 mN avec des profondeurs de pénétration de 2 – 3 μ m. Pour l'obtention de résultats exploitables, ce module est applicable sur des surfaces de faible rugosité.

- La Micro indentation, piloté également en charge ou déplacement. Les forces appliquées varient de 0.5 – 20 N avec des profondeurs de pénétration jusqu'à 10 µm.

2.4.3.1 Principe de fonctionnement de la Nano Indentation

Un indenteur instrumenté pénètre dans la matière. L'utilisateur règle le signal force en fonction du temps ou déplacement. L'indenteur se déplace à l'horizontal dans la matière.

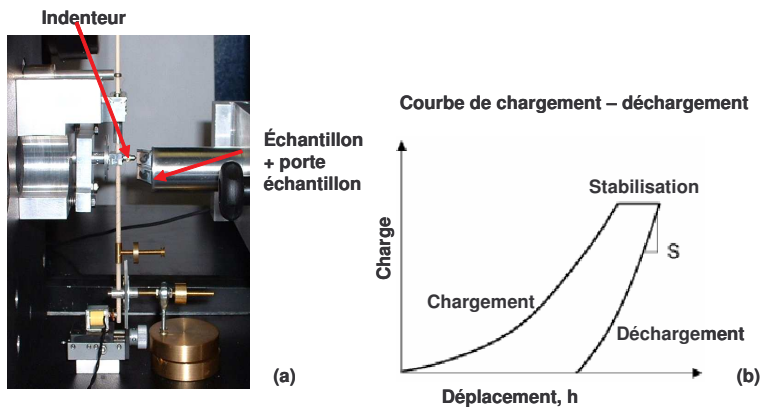


Figure 41: (a) Système de nano indentation, (b) Evolution du déplacement en fonction de la charge.

En analysant la courbe déplacement en fonction de la charge, on peut déduire les propriétés mécaniques de la surface du matériau. La dureté, H , et le module réduit, E_r , sont en effet déduits de l'analyse des courbes charge – déplacement [Figure 41 (b)] en ce référant aux équations suivantes, basée sur le principe de Oliver & Pharr [Fis'05] :

$$H = \frac{P_{\max}}{A} \quad (1)$$

$$\text{avec } A = 3\sqrt{3}h_p^2 \tan^2 \theta \quad (2)$$

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (4)$$

P_{\max} – la charge maximale d'indentation,

h_p – le déplacement de l'indenteur,

A – l'aire du contact projeté (dépendant de la géométrie de l'indenteur),

S – la raideur de contact,

ν – le coefficient de Poisson du matériau indenté

E_r – le module d'élasticité réduit, compte tenu du fait que la rigidité de l'indenteur n'est pas infinie.

E_i et ν_i sont respectivement le module d'élasticité ($E_i = 1140$ GPa) et le coefficient de Poisson ($\nu_i = 0,07$) de l'indenteur.

Des réglages sont effectués avant indentation. Toutes les courbes de charge – déplacement utilisé, pour déterminer la dureté et le module d'Young sont corrigés. En considération de la dérive thermique. Le logiciel qui accompagne cet équipement comprend les codes nécessaires au calcul de ces grandeurs.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre les éléments nécessaires à cette étude ont été brièvement présentés. Chaque technique de caractérisation décrite apportera des informations pertinentes sur l'état de la pièce et sur l'usure de l'outil. Le suivi de certains paramètres (thermomécanique) pendant une opération d'usinage tels que :

- l'évolution des efforts,
- le changement du copeau,
- les phénomènes d'usure,
- la transformation de structure,
- les défauts mécaniques créés,
- la dureté superficielle générée après cisaillement,

est indispensable pour la compréhension de l'influence du traitement d'arête. Toutes les techniques décrites auparavant sont donc importantes et complémentaires entre elles.

3 DESCRIPTION DES TESTS

PRELIMINAIRES – DEFINITION DES CONDITIONS DE COUPE

Les différentes conditions d'usinage telles que : la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe mais aussi la géométrie de la plaquette (brise copeau, résistance de l'arête), conditionnent la caractérisation de la micro-géométrie et par la même le compromis à réaliser pour garantir l'intégrité de surface. Afin de limiter le temps d'investigation ces paramètres opératoires seront maintenus constants.

Avant d'établir la procédure d'essais spécifique à la caractérisation du rayon d'arête et de sa forme, nous avons procédé à des tests préliminaires dans le but de fixer les conditions de coupe. Le présent chapitre décrit les résultats permettant le choix des conditions d'utilisation de notre outil coupant pour une opération de tournage, ainsi que le mode d'obtention de ces données.

3.1 Détermination des conditions de coupe

Un plan d'expérience a été élaboré en considérant l'évolution d'un seul paramètre de coupe à la fois, les autres étant maintenus constants. Il s'agit du principe du « Couple Outil Matière » (COM) normalisés par l'AFNOR (E66-520). Cette méthodologie permet de cerner le domaine d'utilisation d'un outil de coupe. Les cinq étapes à suivre pour déterminer le domaine de fonctionnement d'un COM en tournage sont les suivantes :

1. déterminer un point de fonctionnement, à partir des données du fabricant,
2. fixer expérimentalement la plage de vitesse de coupe,
3. définir la zone de fragmentation du copeau,
4. quantifier l'usure en générale,
5. définir les paramètres auxiliaires : puissance, pression spécifique de coupe.

Le concept couple outil-matière définit un domaine de fonctionnement d'un outil coupant pour une application déterminée, à travers trois types de paramètres :

- Les paramètres limites, par exemple : V_c , a_p , f définissent le minimum et le maximum de tous les paramètres d'utilisation de l'outil en les considérant indépendamment les uns des autres ;
- Les paramètres de liaison, décrivent les interactions des paramètres limites, sachant qu'on ne peut utiliser tous les paramètres limites à leur maximum et/ou leur minimum en même temps ;
- Les paramètres auxiliaires (ex : P , K_c) permettent, par voie de calcul, la définition des conditions de coupe en fonction des caractéristiques des moyens de production.

Les variations de la pression spécifique de coupe, K_c sont analysées selon :

- La matière, la géométrie de coupe, la nuance, les conditions de coupe,
- L'état d'usure de l'outil. [AFNOR E66520].

3.1.1 Tests effectués avec arête de coupe non revêtu

L'acier 27MnCr5 utilisé dans cette étude est un acier faiblement allié [2.1.2]. Il s'agit d'un acier pour traitements thermiques couramment utilisé dans l'industrie automobile, notamment dans la pignonnerie. Les opérations d'usinage sont effectuées à l'état recuit ou après traitement thermique. Dans notre étude, nous travaillerons l'acier dans son état recuit, où il présente une structure composée de perlite et ferrite. Il s'agit d'un acier très ductile et « collant ». Avant d'entamer la procédure expérimentale, nous analysons le comportement de cet acier pendant l'usinage avec des plaquettes non revêtues.

Selon la norme AFNOR (E66-520), la procédure COM nous permet de fixer la plage de vitesse de coupe par des expériences pour l'utilisation d'un outil dans une matière. Nous l'avons appliqué pour choisir la plage de vitesse correspondante à notre couple outil matière (COM).

3.1.1.1 Détermination de la vitesse de coupe minimal

Pour chaque vitesse de coupe testée, l'effort tangentiel a été enregistré pour permettre le calcul de l'effort spécifique de coupe. Cette effort, notée K_c est exprimé en (N/mm^2) . C'est le quotient de l'effort de coupe tangentiel par la section coupée (A). Dans le cas du tournage, il peut se déduire des équations suivantes:

$$A = ap \cdot f \quad A - \text{section (mm}^2\text{)}, ap - \text{profondeur de passe (mm)}, f - \text{avance (mm/tr)}$$

$$Q = ap \cdot f \cdot v_c, \quad Q - \text{débit copeau (cm}^3\text{/min)}, v_c - \text{vitesse de coupe (m/min)}$$

$$P_c = K_c \cdot Q = (K_c \cdot ap \cdot f \cdot v_c) / 60 \quad P_c - \text{puissance de coupe (watt)},$$

$$K_c = P_c \cdot 60 / Q = F_T / A \quad K_c - \text{pression spécifique de coupe (N/mm}^2\text{)}, F_T - \text{effort tangentiel (N)}$$

L'évolution de la pression spécifique de coupe a été tracée en fonction de plusieurs vitesses de coupe pour des paramètres constants représentés dans le Tableau 14. Sur cette courbe, nous apprécions la zone de fonctionnement qui correspond à la plage des vitesses de coupe où la pression spécifique de coupe est stable [Figure 42].

Tableau 14: Tableau des conditions de coupe testées pour l'étude de V_{cmin} .

	Paramètres variables	Paramètres constants		
	V_c (m/min)	Acuité d'arête (μm)	ap (mm)	f (mm/tr)
$K_c = f(V_c)$	35, 50, 80, 100, 150, 200, 250, 300	40 μm	2	0.3

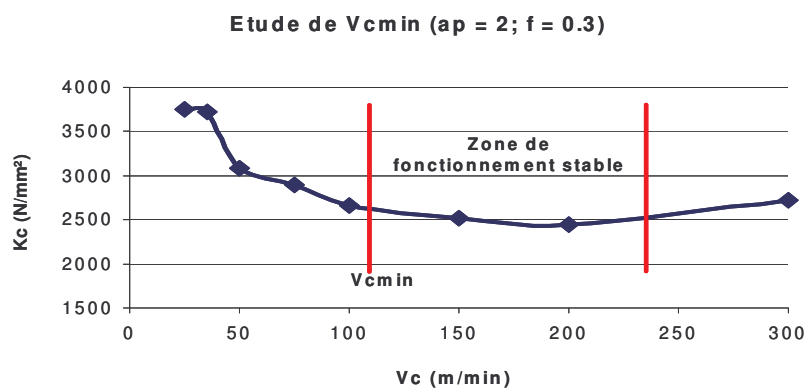


Figure 42: Détermination de la vitesse de coupe minimale en fonction de la pression spécifique de coupe. Définition de la zone de fonctionnement.

Avant de décrire la méthodologie expérimentale qui permettra de caractériser l'influence du rayon d'arête (ER), il faut estimer la durée de vie des plaquettes et prendre connaissance des phénomènes d'usure qui peuvent se développer pendant l'usinage.

3.1.1.2 Comportement de l'acier pendant l'usinage – test d'usure

Des tests d'usure ont été réalisés sur des plaquettes non revêtues munies de différents rayons d'arête (ER). Le Tableau 15 décrit les éléments préconisés pour ces essais préliminaires de classification de notre couple outil – matière. La vitesse de coupe considérée est issue du précédent test (Vcmin) Tableau 14 : Vc min 110m/min ; Vc du test 150m/min.

Tableau 15: Conditions de coupe et rayon d'arête utilisées pour les essais d'usure sans revêtement.

Conditions d'usinage				
Vc (m/min)	ap (mm)	f (mm/tr)	Ø pièce	ER (µm)
150	1.6	0.2	constant	30
				40
				60

Dès le début de l'usinage, une première forme d'usure est mise en évidence. Il s'agit du phénomène d'arête rapportée. Une arête rapportée se forme par adhérence continue du métal sur l'outil en présence d'une pression élevée. Nous pouvons observer cette forme d'usure sur les images MEB représentées ci-dessous [Figure 43].

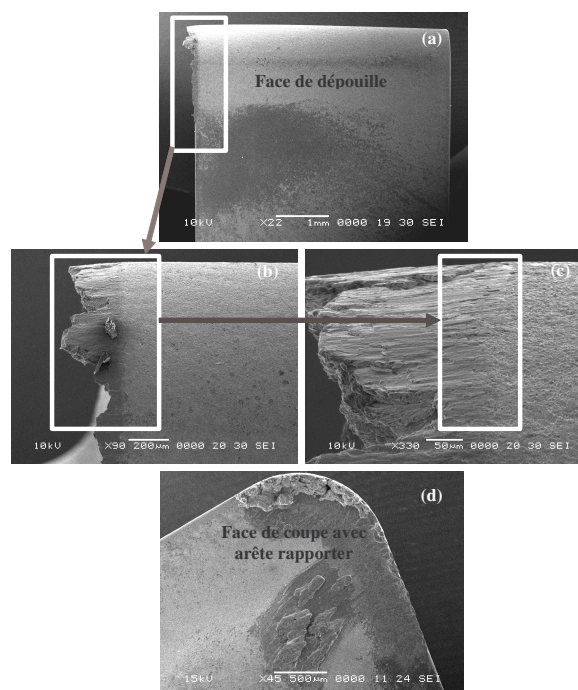


Figure 43: Image MEB correspondant à une plaquette carbure non revêtue, ER 30µm, après usinage de l'acier 27MnCr5 : (a) arête rapportée sur la face de dépouille, (b) grossissement sur la zone de dépouille, (c) arête rapportée collée par pression sur le rayon d'arête, (d) arête rapportée sur la face de coupe qui longe le rayon de bec de la plaquette.

Des couches successives de matière provenant de la zone d'écoulement s'accumulent et adhèrent sur la micro géométrie [Figure 43(c)]. Ce processus se renouvelle sans cesse construisant ainsi une arête rapportée entraînant ainsi l'écaillage de l'arête de coupe. Cette nouvelle arête est suffisamment dure pour devenir une deuxième micro géométrie d'arête et faire fonction d'arête de coupe. La Figure 44(a) représente l'évolution de l'usure en dépouille (Vb) en fonction du temps d'usinage. Ces courbes d'usure ont été réalisées selon les conditions représentées dans le Tableau 15. Dès les premiers temps d'usinage, ce phénomène d'endommagement est observé pour les trois rayons d'arête illustrés par la Figure 44(b). Dans un schéma habituel, nous devrions observer une courbe d'usure différente pour chaque valeur de rayon d'arête. Mais, comme le montre la [Figure 44 (a)] le phénomène d'arête rapportée annihile les différentes valeurs de rayons d'arête. C'est pour cela que nous ne constatons aucune différence significative sur la courbe comparative de l'usure en dépouille [figure 45 (a)]. Cette observation est corroborée par la courbe [Figure 45] qui représente les efforts appliqués sur les différents axes pour un rayon d'arête de 30 μ m et 60 μ m. La littérature indique que les efforts de coupe évoluent en fonction du renforcement du renforcement du ER. Les efforts de coupe analysés correspondent à l'usinage avec arête rapportée.

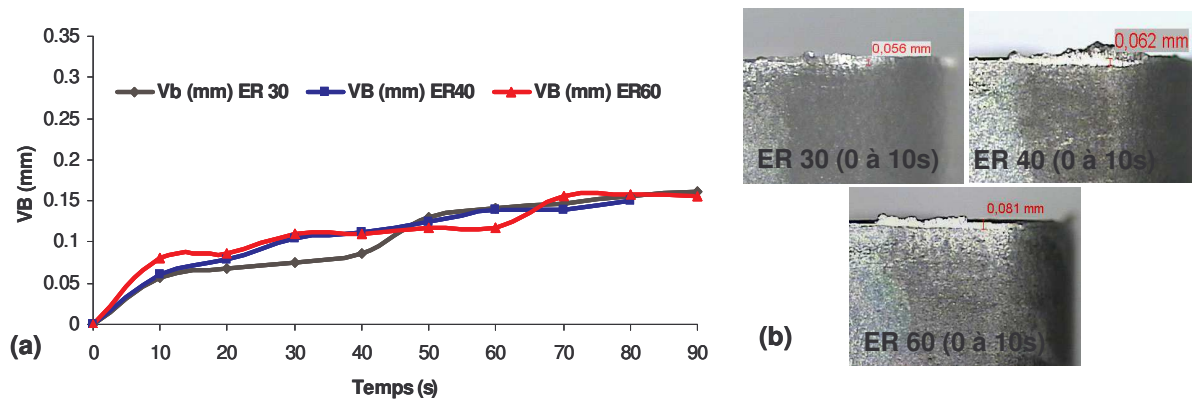


Figure 44: (a) – Courbe d'usure en dépouille (Vb) en fonction du temps d'usinage, (b) représentation de l'arête rapportée sur la face de dépouille de la plaquette, pour un ER 30, 40 et 60 μ m après 10 seconde d'usinage.

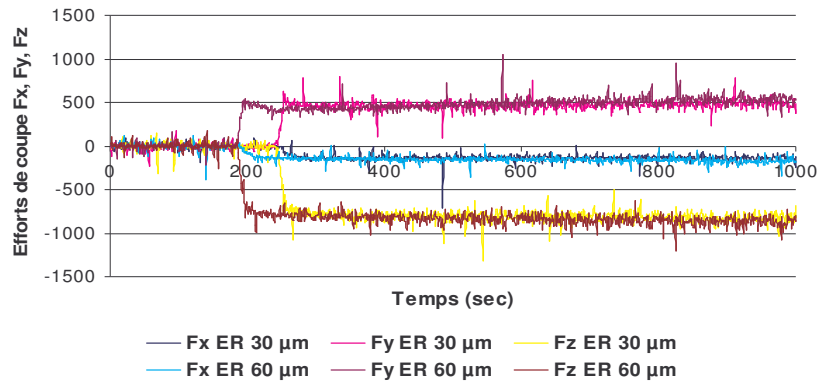


Figure 45: Composantes des efforts de coupe mesurées pour un rayon d'arête de 30 et 60 μm superposé avec une arête rapportée.

Les résultats précédents montrent que ce phénomène d'arête rapportée perturbe l'étude. Cette arête rapportée :

- modifie le profil du rayon d'arête,
- entraîne l'écaillage de l'arête de coupe,
- génère un mauvais état de surface de la pièce usinée.
- ...

Ces paramètres constituent le critère d'arrêt de cette campagne d'essai. La caractérisation des ER n'est donc pas envisageable sur le substrat gradient non revêtu.

Les basses vitesses de coupe utilisées, dues à l'emploi du carbure non revêtu, n'engendrent pas de température suffisamment élevée pour empêcher l'apparition de l'arête rapportée. Une température de coupe plus élevée engendre un adoucissement thermique de la zone de cisaillement du copeau permettant un glissement sans adhérence de matière sur le matériau de coupe. De cette manière, il sera possible de supprimer l'élément perturbateur qu'est l'arête rapportée. Pour augmenter la vitesse de coupe et garder les caractéristiques de notre plaquette, il sera nécessaire d'appliquer un revêtement dont les propriétés chimiques, mécaniques et thermiques, éviteront :

- le phénomène d'arête rapportée,
- une dégradation prématurée de l'arête de coupe due à la chaleur engendrée par les vitesses de coupes plus élevées.

Une nouvelle campagne d'essai préliminaire a été menée dans le but de choisir un revêtement adapté.

3.1.1.3 Choix du revêtements – procédure

Parmi les 300 plaquettes mises à disposition pour cette étude, les plaquettes à ER compris entre 40 et 50 μm ont été sélectionnées pour les revêtir.

Dans cette campagne d'essai, 4 revêtements ont été testés [Tableau 16]. Ils sont élaborés en production et ont été choisis pour répondre aux critères suivants :

1. éliminer le phénomène d'arête rapportée par augmentation de la vitesse de coupe afin de permettre la caractérisation des rayons d'arête,
2. préserver au mieux le ER initial et sa forme micro géométrique.

Tableau 16: Revêtements et systèmes de déposition employés pour cette étude.

Revêtement	Système	Température de déposition	Epaisseur (μm)	Revêtement
TiAlN monocouche	PVD	400 – 500 °C	3 – 5	Latérale \Rightarrow épaisseur irrégulière
TiAlN-TiN	PVD	400 – 500 °C	3 – 5	Latérale \Rightarrow épaisseur irrégulière
TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN	MTCVD (fin)	800 – 1000 °C	(2-4) (1-2) (1)	Uniforme \Rightarrow épaisseur régulière
TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN	MTCVD (épais)	800 – 1000 °C	(6-12) (3-6) (1.5)	Uniforme \Rightarrow épaisseur régulière

Des mesures de ER ont été effectuées après revêtement et avant les tests d'usinage à des vitesses de coupe plus élevées.

3.1.1.3.2 Influence des revêtements sur le profil des arêtes de coupe

















De nouvelles mesures ont été réalisées pour cerner l'influence du revêtement sur le rayon d'arête initialement préparée et sur la forme W/H [Tableau 17]. Le revêtement élaboré par le système PVD se dépose latéralement sur la plaquette, ce qui engendre une épaisseur irrégulière du revêtement plus épais sur la dépouille que sur la face. Sur cette géométrie de plaquette, ce mode de dépôt latéral influence la forme W/H qui se retrouve donc modifiée. Le mode de dépôt MT-CVD, permet la réalisation d'un revêtement uniforme sur toute la plaquette. Les mesures réalisées sur les arêtes, après revêtement épais par MTCVD montre une augmentation significative des rayons d'arêtes. De valeurs comprises entre 40 et 50 μm avant revêtement, les ER passent à 60-70 μm après revêtement. Cependant, la forme W/H du profil du ER reste constant. Le revêtement MT-CVD est alors homologué pour la poursuite de l'étude.

Tableau 17: Résumé des mesures des ER et forme W/H, avant et après revêtement.

Dépôt	Arête mesurée	Avant dépôt		Après dépôt		ΔER	$\Delta W/H$
		\overline{ER} (μm)	$\overline{W/H}$	\overline{ER} (μm)	$\overline{W/H}$		
PVD	93.1	50	0.83	48	1.03	-2	0.20
	93.2	44	0.84	40	1.12	-4	0.28
	93.3	47	0.83	44	1.12	-3	0.29
	93.4	45	0.84	48	1.12	3	0.28
PVD	94.1	44	0.82	50	1.03	6	0.21
	94.2	50	0.85	45	1.02	-5	0.17
	94.3	44	0.93	42	1.22	-2	0.29
	94.4	45	0.88	46	1.16	1	0.28
MTCVD (épais)	99.1	51	0.84	69	0.90	18	0.06
	99.2	51	0.85	68	0.93	17	0.08
	99.3	51	0.76	62	1.28	11	0.52
	99.4	48	0.83	65	0.94	17	0.11
MTCVD fin	97.1	44	0.90	47	1.02	3	0.11
	97.3	43	0.96	47	1.12	4	0.16
	124.1	39	0.92	43	1.28	4	0.36
	124.3	43	0.87	44	1.14	1	0.26
	124.4	45	0.99	48	1.11	3	0.12

Les tests d'usinage ont été effectués selon les conditions représentées dans le Tableau 18. L'analyse des clichés montre que le revêtement MT-CVD fin s'avère le plus adapté. Pour les conditions de coupe préconisées, aucun écaillage ou collage de matière n'a été observé sur les quatre arêtes de coupe utilisées. Dans le cas des revêtements MT-CVD épais, des brèches et un écaillage du revêtement le long de l'arête de coupe sont observés. Le même comportement est observé pour la plaquette revêtue PVD (TiAlN-TiN). Même si le revêtement PVD monocouche se montre aussi performant que le revêtement MTCVD fin, il ne satisfait pas notre critère de choix principal car il modifie le profil du rayon d'arête.

Tableau 18: Image du rayon de bec de la plaquette. Différences de comportement entre les revêtements testés à différentes conditions de coupes.

PVD (TiAlN monocouche)	PVD (TiAlN-TiN)	MT-CVD épais (TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN)	MT-CVD fin (TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN)
150 m/min, ap 1.6 mm f = 0.2 mm/tr			
			
200 m/min, ap 1.2 mm f = 0.2 mm/tr			
			
200 m/min, ap 1.2 mm f = 0.2 mm/tr			
			
250 m/min, ap 1.6 mm f = 0.2 mm/tr			
			

3.1.1.4 Choix du revêtement – discussion

Le revêtement MT-CVD fin est retenu pour la suite de l'étude. L'analyse du comportement des revêtements montre que le type « MT-CVD fin » apporte le plus de stabilité. Pour les tests futurs, il est important de ne pas avoir de perturbations en cours d'usinage qui seraient liées à des phénomènes extérieurs tel que : collages, brèches et écaillages. Le revêtement est disposé de la façon suivante, une couche de TiCN (2 – 4 μm) sur le substrat suivi d'une couche de Al_2O_3 (1 – 2 μm) et une dernière couche de TiN (0.5 – 1 μm). Le contrôle dimensionnel de l'acuité d'arête est réalisé de nouveau après revêtement. Trois rayons d'arête ont été minutieusement sélectionnés pour la poursuite des essais préliminaires : 25, 40 et 70 μm .

3.1.2 Tests effectués avec arête de coupe revêtue

A ce stade, il est possible de procéder aux tests préliminaires qui permettent de fixer les conditions de coupe.

3.1.2.1 Détermination de la vitesse de coupe minimale ($V_{c\text{min}}$)

Comme énoncé précédemment, seule la vitesse de coupe évolue, au cours des essais. Pour chaque vitesse de coupe testée, la puissance à vide et la puissance d'usinage sont mesurées pour en déduire la puissance consommée. L'effort tangentiel a été enregistré pour le calcul de l'effort spécifique de coupe : K_c (N/mm^2).

L'évolution de l'effort spécifique de coupe en fonction de la vitesse de coupe a été tracée pour les conditions représentées dans le Tableau 19. Pour différents rayons d'arêtes et différentes conditions de coupe il est trouvé, la zone de fonctionnement où la pression spécifique de coupe (K_c) est stable. La plage de vitesse de coupe minimale est ainsi définie.

Tableau 19: Tableau des conditions de coupe testées et des acuités ER utilisées pour l'étude de $V_{c\text{min}}$.

	Paramètres variables		Paramètres constants	
	Acuité d'arête (μm)	V_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/tr)
$K_c = f(V_c)$	25, 40, 70 μm	75, 100, 150, 200, 230, 250, 300, 400	1	0.2
			2	0.3

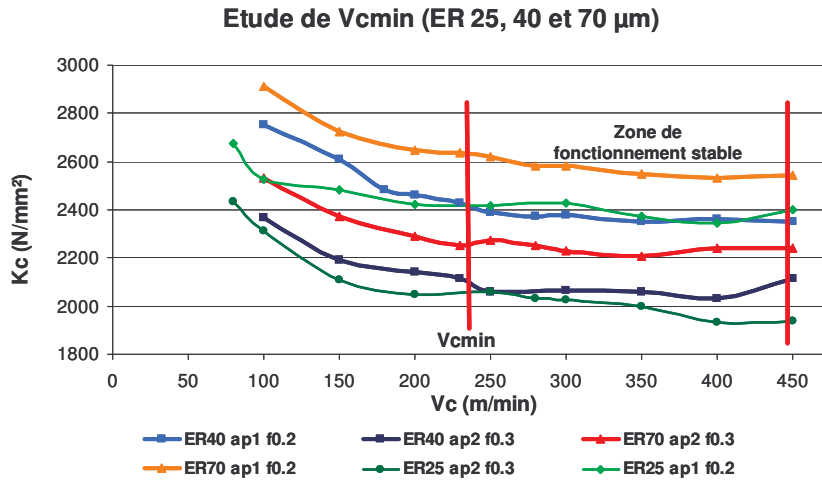


Figure 46: Détermination de la vitesse de coupe minimale en fonction de la pression spécifique de coupe pour les conditions de coupe (f 0.2mm/tr, ap1mm) (f 0.3mm/tr, ap 2mm). Evolution de la pression spécifique de coupe en fonction des ER 25, 40 et 70 μm .

La Figure 46 permet d’analyser l’évolution de l’énergie spécifique de coupe, K_c (N/mm^2) en fonction de la vitesse de coupe, de différentes avances et profondeurs de passe pour différents ER.

On observe :

1. avec l’augmentation de V_c (de 75 à 450 m/min), k_c a tendance à diminuer puis à se stabiliser.
2. k_c diminue clairement lorsque l’avance augmente (de 0.2 et 0.3 (mm/tr)).
3. k_c croît lorsque la profondeur de coupe diminue (de 1 et 2 (mm)).
4. K_c diminue avec le rayon d’arête.

Nous constatons que le rayon d’arête et les différentes conditions de coupe n’ont pas d’influence sur la détermination de la vitesse de coupe minimale (V_{cmin}).

3.1.2.2 Détermination de la zone de fragmentation

Des diagrammes copeaux ont été élaborés suivant les conditions représentées par le Tableau 20. A partir d’une zone de copeau contrôlée, cet essai permet de fixer les deux derniers paramètres de coupe (ap et f). Nous réalisons un quadrillage où l’abscisse représente l’avance (f) et l’ordonnée la profondeur de passe (ap). Pour chaque couple (ap, f) le type de copeau obtenu lors des usinages est relevé.

Tableau 20: Conditions de coupes utilisées pour la réalisation des diagrammes copeaux.

Paramètres constants			Paramètres variables
Acuité d'arête (μm)	V_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm/tr)
25 40 70	300	0.4	0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32
		0.63	0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32
		0.8	0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32
		1.2	0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32
		1.6	0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32
		2	0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32
		2.5	0.12, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32

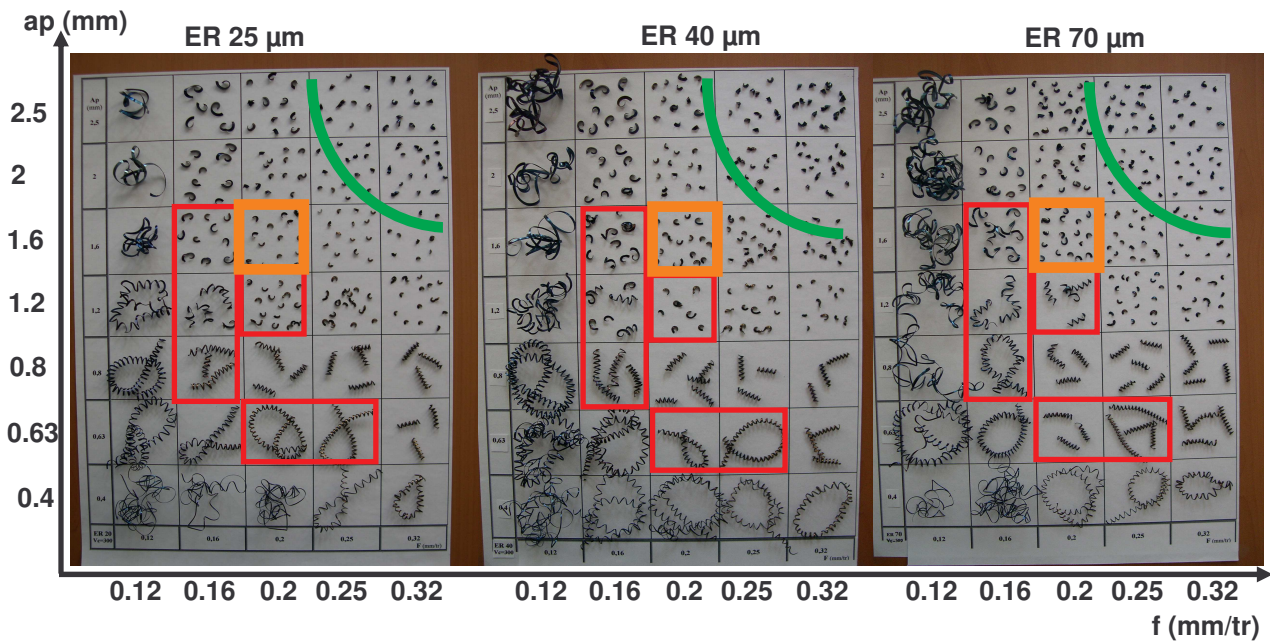


Figure 47: Diagramme copeau correspondant aux rayons d'arête 25, 40 et 70 μm .

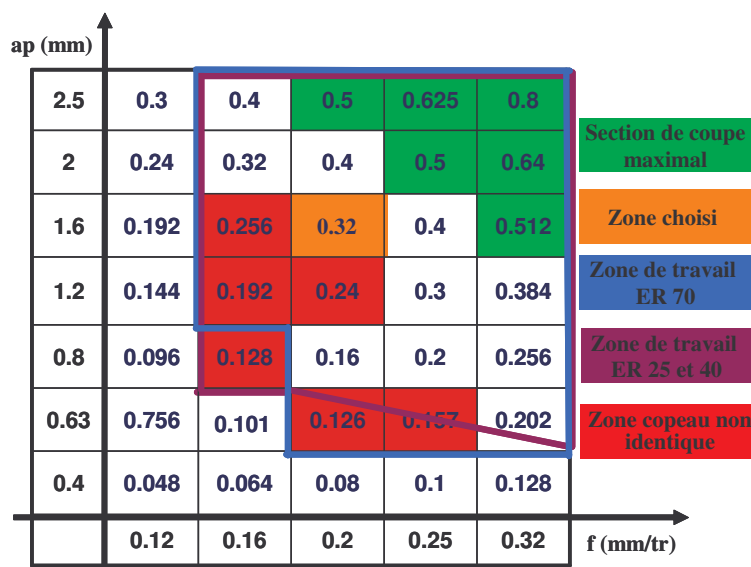


Figure 48: Diagramme correspondant aux sections copeau avec mis en évidence de la zone de travail préconisée pour les trois rayons d'arête : 25, 40 et 70 μm .

Les formes de copeau font l'objet d'une classification normalisée, décrite suivant la norme ISO 3685 représentée par le Tableau 7. La zone de copeau contrôlée est définie pour les rayons d'arête (ER) de 25, 40 et 70 μ m. La Figure 47 représente les diagrammes copeau correspondant à ces rayons d'arêtes. L'objectif est de relever la zone de fragmentation commune aux trois rayons d'arête. La forme géométrique du copeau, (longueur, épaisseur) conditionnant le développement des différentes formes d'usure, il est donc important que ce paramètre soit reproductible pour les rayons d'arête sélectionnés. Sur la Figure 47, la zone de fragmentation commune est représentée en orange. Pour des couples (ap, f) fixés, on constate une influence des rayons d'arêtes sur la forme du copeau (contour rouge). Par exemple, pour le couple (1.2, 0.2), on observe un copeau du type 6.2, en arc détaché pour un ER 40, un copeau du type 4.2 hélicoïdal en rondelle court pour un ER 70 μ m. La Figure 48 met en évidence la zone de travail préconisée pour chaque rayon d'arête. Pour les rayons 25 et 40 μ m, les mêmes zones sont définies, par contre, pour le rayon de 70 μ m, la zone de travail qui permet un usinage correct est élargie.

Les Figure 49, Figure 50, Figure 51 illustrent les graphes représentant les pressions spécifiques de coupe pour chaque ER en fonction de la section copeau (ap, f). Nous constatons que les valeurs de Kc sont toujours plus fortes pour le rayon de 70 μ m. En général, la différence entre ces 3 valeurs ER est plus significative aux avances faibles. Nous pouvons ainsi dire que l'influence des ER sur les pressions spécifique de coupe est plus marquée à des avances faibles. Par contre, pour une section donnée, on note que les valeurs de Kc sont plus élevées pour ER 70 μ m.

L'analyse des graphiques met aussi en évidence une variation non constante de ces valeurs à des profondeurs de passes : 0,4 – 2 et 2.5 mm. Si nous observons le plan de la géométrie M5, nous pouvons attribuer ce comportement à la forme courbe de cette géométrie brise copeau. Le plan représenté sur la Figure 52 montre clairement que les distances entre le bord de l'arête de coupe et le mur du brise copeau évoluent différemment selon les profondeurs de passe. La géométrie présente aussi des angles qui évoluent en fonction des sections de l'avance. Ces valeurs, n'étant pas identiques, peuvent expliquer l'instabilité des Kc pour des profondeurs de passe variables à des avances constantes.

Effort spécifique de coupe ER 23 μm

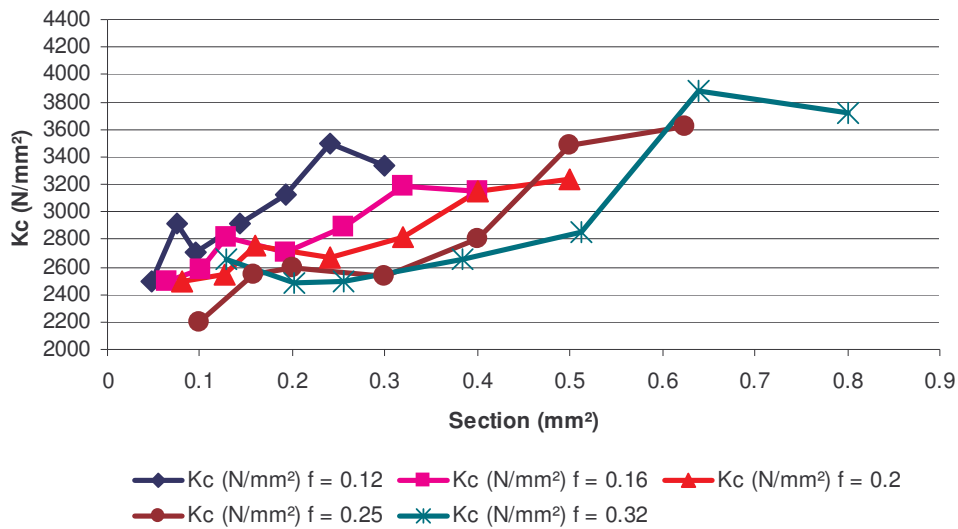


Figure 49: Graphique correspondant à l'évolution de la pression spécifique de coupe (K_c) en fonction des avances pour un ER 23 μm .

Effort spécifique de coupe ER 40 μm

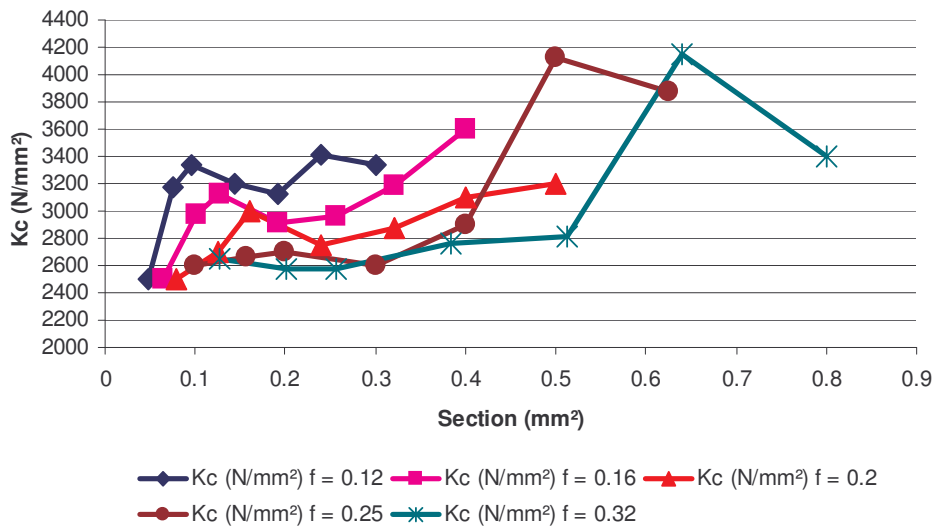


Figure 50: Graphique correspondant à l'évolution de la pression spécifique de coupe (K_c) en fonction des avances pour un ER 40 μm .

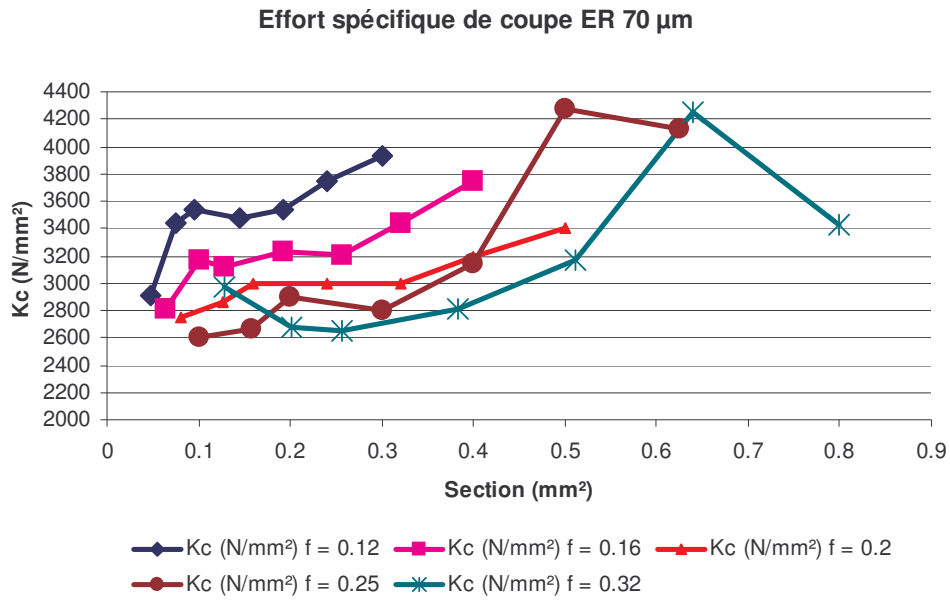


Figure 51: Graphique correspondant à l'évolution de la pression spécifique de coupe (K_c) en fonction des avances pour un ER 70 μm .

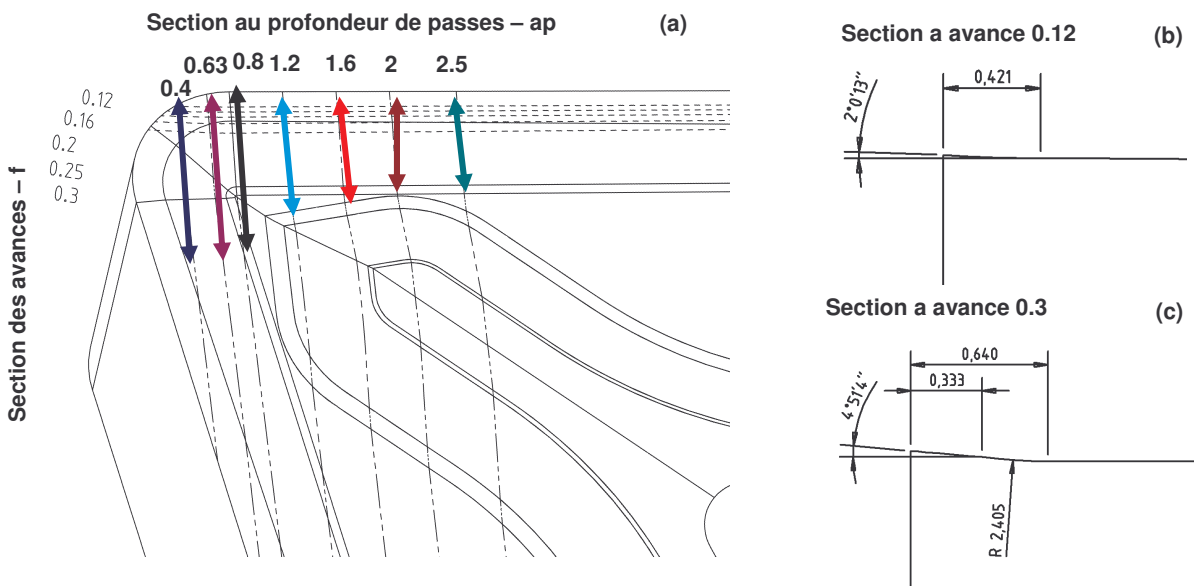


Figure 52: (a) Plan de la plaquette CNMG120408 M5 avec les sections a_p et f , (b) section de la plaquette pour une avance 0.12, (c) section de la plaquette pour une avance 0.3.

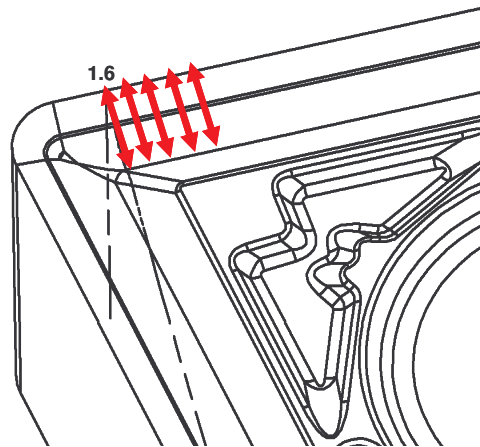


Figure 53: Plan de la plaquette CNM G120408 M4

La Figure 53 représente la plaquette CNMG120408 M4. La géométrie M4 est une géométrie parallèle. Pour ce type de géométrie la distance de l'arête de coupe à la paroi brise copeau est maintenue constante le long des sections de profondeur de passe.

3.1.2.2.3 Conclusion – choix du couple (a_p, f)

L'analyse de ces essais préliminaires montre pour une section copeau donnée :

- des formes de copeau différentes
- des valeurs la pression spécifiques de coupe instables.

Nous avons également observé que la géométrie brise copeau joue un rôle important sur l'effort spécifique de coupe. Tous ces paramètres interfèrent dans l'évolution de l'usure. Pour une caractérisation optimale du comportement des rayons d'arêtes, il est important de reproduire des usures identiques. Le Tableau 21 décrit la valeur du couple (a_p, f) sélectionnée (en fonction des formes de copeau identiques). Pour ce couple, on constate des valeurs de pressions spécifiques de coupe très proches et qui augmentent légèrement avec le rayon d'arête.

Tableau 21: Présentation du couple (a_p, f) choisi avec valeur de l'effort spécifique de coupe correspondant pour chaque rayon d'arête.

a_p	f	A (mm ²)	ER (μm)	K _c (N/mm ²)
1.6	0.2	0.32	25	2800
			40	2900
			70	3000

3.1.2.3 Comportement de l'acier pendant l'usinage – test d'usure

Les conditions de coupe fixées, des tests d'usure préliminaires ont été réalisés dans le but d'appréhender la durée de vie et les phénomènes d'usure associés pour le suivi de l'usure. Elle est utilisée afin de quantifier les usures en dépouille principale (V_b) et dépouille secondaire (face de planage). Une courbe de l'évolution de l'usure en dépouille principale en fonction du temps est tracée pour un rayon d'arête de $40\ \mu\text{m}$ et pour deux vitesses de coupe (300 et 400 m/min) [Figure 54].

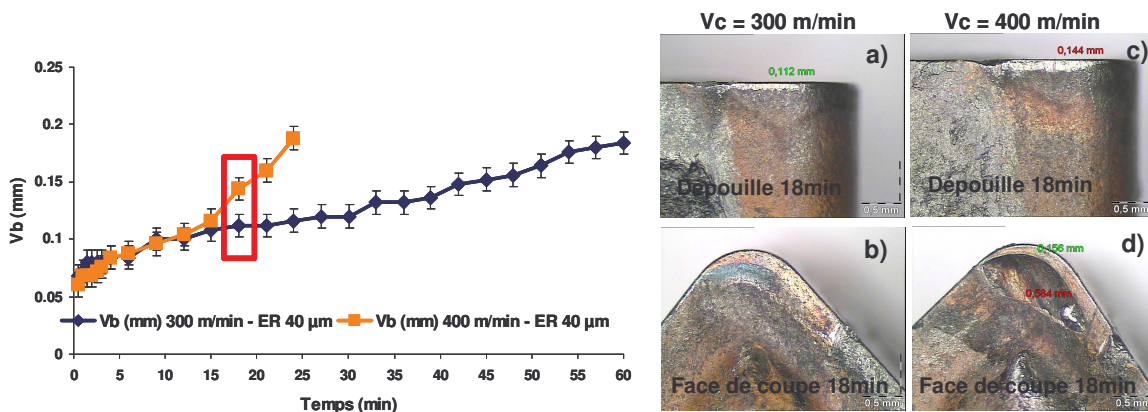


Figure 54: Courbe d'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min. (a) (b) (c) et (d) représente les formes d'usure paru après 18 minutes d'usinage sur la face de coupe et sur la face de dépouille de la plaquette. (a) et (b) correspondant a la vitesse 300 et (c) et (d) à la vitesse 400 m/min.

La courbe d'usure représentée Figure 54 pour une vitesse de coupe de 300 m/min, restitue une usure en dépouille régulière. Après 30min d'usinage environ, on observe un début d'écaillage de l'arête de coupe au delà de la zone d'engagement de l'outil, provoqué par la sortie du copeau. A la vitesse de coupe de 300 m/min la plaquette peut atteindre une durée de vie de 50-60 minutes avant cratérisation ou écaillage sensible de l'arête. Afin d'accélérer les test d'usure et d'optimiser le temps d'analyse, nous décidons d'augmenter la vitesse de coupe.

A la vitesse de coupe de 400 m/min, nous observons une usure en dépouille régulière pendant 15 minutes d'usinage. Entre 15 et 18 minutes la courbe V_c 400m/min diverge de celle à 300m/min. Cette limite marque la croissance rapide de l'usure en dépouille pour 400 m/min. A cette vitesse et après 6 min d'usinage, nous observons un début de cratérisation qui évolue très rapidement comme le montre la Figure 54(d). Cette usure est plus importante que l'usure en dépouille et constituera donc le critère d'arrêt des tests (approximativement fixé à 24 minutes). La profondeur de cratère joue le rôle d'un nouveau brise copeau qui modifie la direction de sortie du

copeau, ainsi que sa forme. Le copeau frappe la surface usinée de la pièce et occasionne ainsi une détérioration de la surface.

3.1.2.3.4 Conclusion – tests d’usure

Les tests d’usure préliminaires effectués avec plaquette revêtue comportant un rayon d’arête de 40 μ m ont permis :

- d’estimer la durée de vie des plaquettes,
- d’observer les phénomènes d’usures qui caractérisent notre usinage.

Par conséquent, nous sommes en mesure d’estimer la quantité de matière nécessaire à la poursuite de cette étude. Cette estimation est représentée en **annexe 6**.

La section suivante de ce chapitre décrit la démarche suivie pour la réalisation des essais de caractérisation du comportement des différents rayons d’arête.

3.2 Dispositif d’essai pour l’étude du comportement des rayons d’arête

Nous avons borné le domaine d’investigation en fixant les paramètres opératoires. Dans ce domaine, nous souhaitons collecter un nombre conséquent de mesures afin de qualifier les modes d’évolution des différents rayons d’arête. L’analyse quantitative des résultats permettra de souligner les paramètres importants et d’établir d’éventuelles corrélations. La finalité étant de quantifier l’influence des rayons d’arêtes et de la forme sur l’intégrité de surface et la durée de vie de la plaquette.

3.2.1 Paramètres de coupe

D’après l’étude préliminaire, nous pouvons fixer les paramètres à maintenir constants qui seront les suivants :

- la nuance acier (27MnCr5),
- le diamètre de la pièce,

- la profondeur de passe,
- la plaquette : géométrie, nuance gradient, ...,
- l'opérateur,
- la machine outil ainsi que le montage porte outil,
- la vitesse d'avance.

Les paramètres exploités sont ceux représentés par le [Tableau 22]. Ce tableau décrit les cinq cas de rayon d'arête sélectionnés pour cette étude. Pour assurer une reproductibilité des résultats, chaque micro géométrie a été testée trois fois. Les rayons d'arête de 40 et 70 μm possèdent deux morphologies différentes : rayon équilibré ($W/H = 1$) et rayon plat ($W/H > 1$).

Tableau 22: Acuité d'arête sélectionnée pour l'étude.

Microgéométrie ER (μm) élaborer	Forme W/H	Méthode d'élaboration
25 (x3)	-	NET – Sab
40 (x3)	$W/H = 1$	Brossage
40 (x3)	$W/H > 1$	Brossage
70 (x3)	$W/H = 1$	Brossage
70 (x3)	$W/H > 1$	Brossage

3.2.2 Démarche suivie pour la réalisation des essais

La démarche suivie pour réaliser les essais est décrite dans la Figure 55. Cette procédure est appliquée pour les cinq ER sélectionnés.

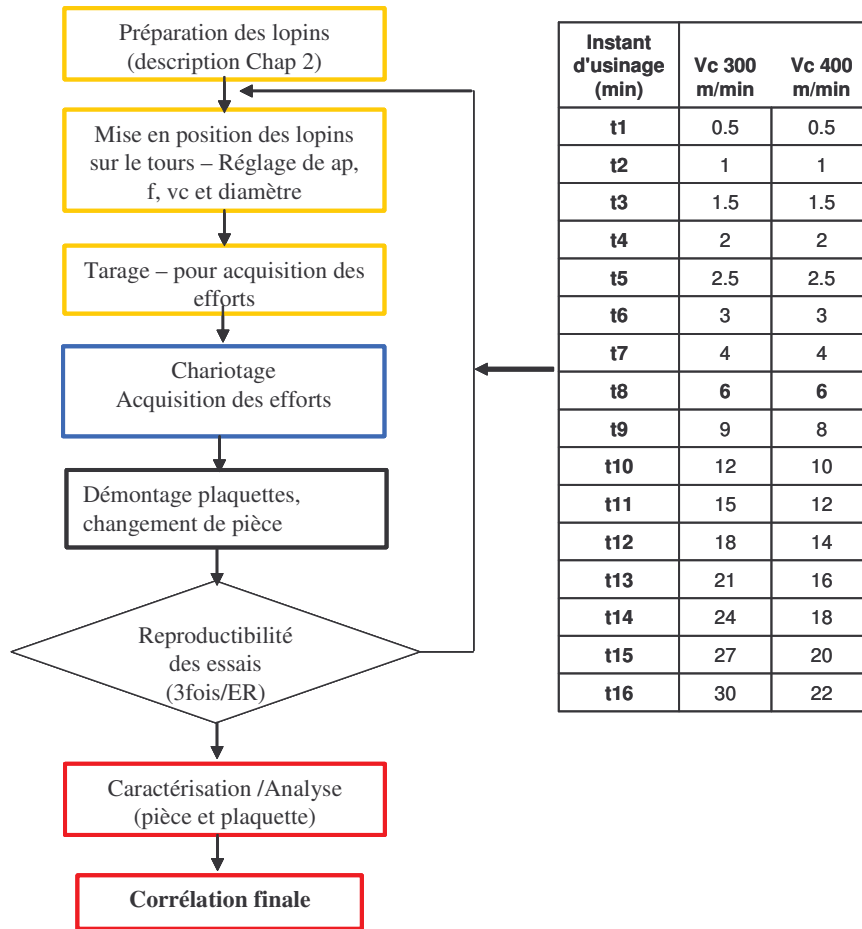


Figure 55: Organigramme de la démarche suivie pendant les tests d'usinage.

3.2.3 Méthodologie de caractérisation

Les mesures effectuées sur l'état de surface de la matière usinée et sur la plaquette sont décrites par la Figure 56. Cette figure présente la méthodologie pour quantifier le comportement du rayon d'arête. Toutes ces mesures permettront d'aboutir à des résultats sur l'intégrité de la surface usinée et sur l'usure de la plaquette.

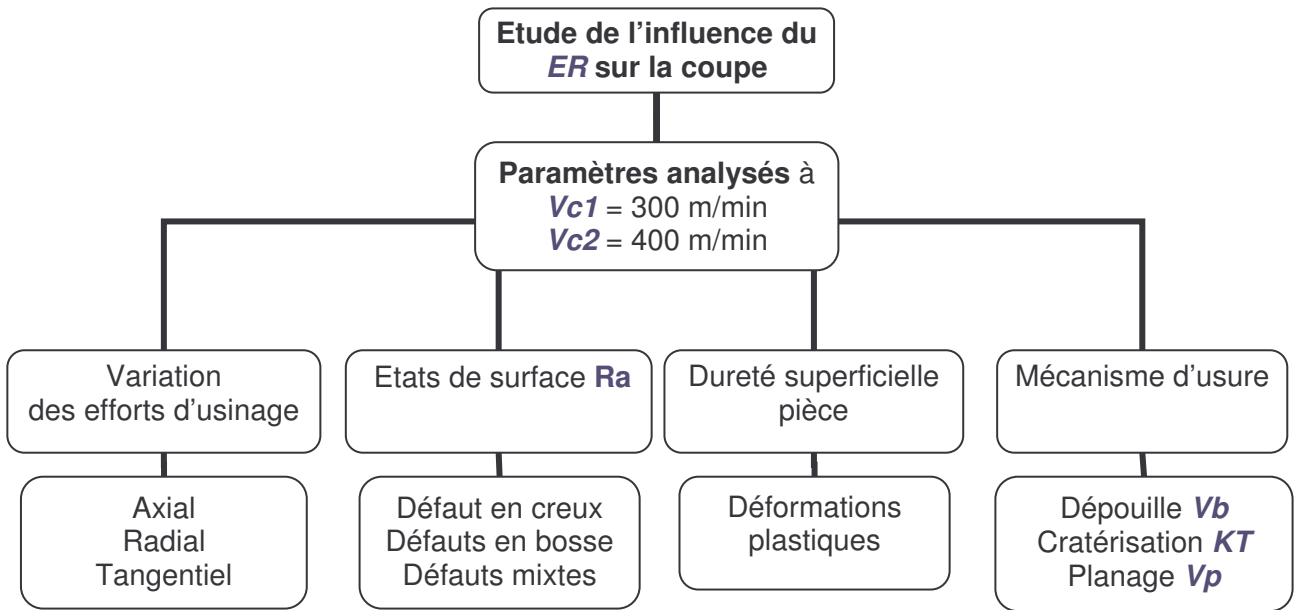


Figure 56: Organigrammes représentant la méthodologie de caractérisation et d'analyse.

3.3 Conclusion

Les résultats des tests préliminaires ont permis d'obtenir et de fixer les conditions de coupe satisfaisantes à notre recherche. Nous avons analysé pour chaque rayon d'arête, les efforts de coupe spécifiques en fonction de la vitesse de coupe, de la section du copeau. Nous avons interprété l'influence de ces paramètres sur le comportement de l'outil pendant l'usinage.

Nous sommes en mesure de qualifier les modes d'évolution des différents rayons d'arête. La finalité étant de quantifier l'influence des rayons d'arêtes et de la forme sur l'intégrité de surface et la durée de vie de la plaquette.

4 RESULTATS ET ANALYSE

Ce chapitre décrit les résultats de caractérisation du comportement des rayons d'arête.

L'analyse des résultats est scindée en deux parties :

- influence du rayon d'arête sur la durée de vie des plaquettes, par l'étude des courbes d'usure et des efforts de coupe [4.1].
- influence du rayon d'arête sur l'intégrité de surface, par analyse de la topographie de surface [4.2.1], de la morphologique structurale [4.2.2] et de dureté superficielle.

4.1 Présentation des résultats

L'étude a nécessité 30 plaquettes pour lesquelles les rayons d'arête sont compris entre 20 et 70 μm .

Le Tableau 23 identifie les 30 plaquettes sélectionnées et les cinq rayons d'arêtes associés. Pour tenir compte de la dispersion, chaque micro géométrie est donc testée trois fois. Pour assurer au mieux la reproductibilité des résultats, les rayons d'arêtes triés disposent de tolérance dimensionnelle très serrées : $\pm 2 \mu\text{m}$. Les arêtes ont été repérées suivant leurs dimensions et leur formes géométriques ($W/H = 1$ et $W/H > 1$ pour les ER de 40 et 70 μm). Dans l'annexe 4, nous présentons les tableaux de mesures de l'ensemble des plaquettes.

Tableau 23 : Valeur et identification des acuités d'arête exploitées pendant les tests d'usinages

	N° arête	H (ER) μm	W/H
Vc = 300 m/min	272.3	23 \pm 2	1.03
	273.3	23 \pm 2	1.03
	275.3	23 \pm 2	0.99
Vc = 400 m/min	278.2	23 \pm 2	1
	281.1	23 \pm 2	0.96
	284.2	23 \pm 2	1
Vc = 300 m/min	42.2	40 \pm 2	1.062
	45.3	39 \pm 2	1.076
	46.3	40 \pm 2	1.01
Vc = 400 m/min	46.4	40 \pm 2	1.05
	48.1	40 \pm 2	1.08
	49.3	39 \pm 2	1.097
Vc = 300 m/min	72.1	40 \pm 2	1.27
	72.3	39 \pm 2	1.28
	73.2	39 \pm 2	1.37
Vc = 400 m/min	76.2	40 \pm 2	1.32
	78.1	39 \pm 2	1.29
	78.4	40 \pm 2	1.29
Vc = 300 m/min	222.2	70 \pm 2	1.01
	222.4	70 \pm 2	1.01
	223.4	69 \pm 2	1.02
Vc = 400 m/min	224.4	70 \pm 2	1.03
	226.2	70 \pm 2	1.03
	229.4	70 \pm 2	0.98
Vc = 300 m/min	254.2	70 \pm 2	1.28
	254.3	70 \pm 2	1.29
	255.2	69 \pm 2	1.19
Vc = 400 m/min	258.4	69 \pm 2	1.23
	259.2	69 \pm 2	1.24
	260.1	71 \pm 2	1.23

4.1.1 Influence du rayon d'arête sur la durée de vie – Usure en dépouille en fonction des micros rayon d'arête

Une première quantification des rayons est réalisée par le tracé des courbes d'usure. Nous mesurons l'usure en dépouille au cours du temps d'usinage en fonction des rayons d'arête, pour les deux vitesses de coupe $V_{c1} = 300$ m/min et $V_{c2} = 400$ m/min. Une étude minutieuse a été réalisée pour les premières minutes d'usinage avant modification du profil du rayon consécutif au développement de l'usure.

L'usure des outils étant inévitable, il ne s'agit pas d'un processus négatif en soi. La question n'est pas de savoir si l'usure s'installera, mais à quel instant et dans quelle proportion elle peut influencer le rayon d'arête.

La Figure 57 représente les courbes de durée de vie correspondant aux 5 microgéométries. Chaque valeur de l'usure en dépouille correspond à la moyenne de trois mesures.

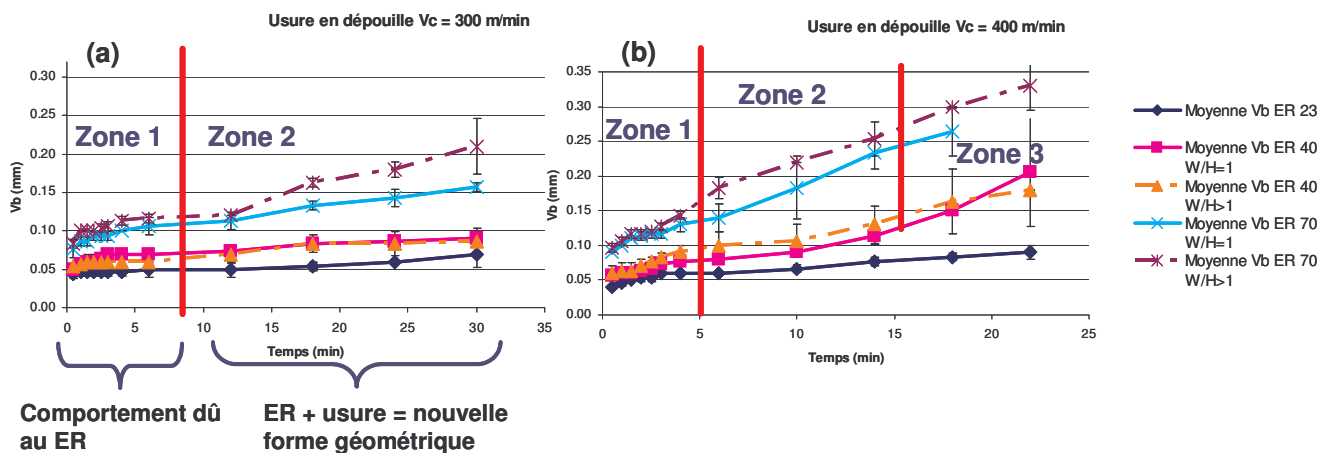


Figure 57: Courbe d'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 (a) et 400 (b) m/min.

Les courbes d'évolution de l'usure en dépouille se divisent en trois zones de comportement. La zone n°1 correspond à la phase de rodage de la plaquette, la zone n°2 à l'usure progressive et la zone n°3 à l'usure catastrophique.

➤ Usure à 300 m/min :

Sur la [Figure 57] nous constatons clairement que l'usure en dépouille augmente avec la valeur du rayon d'arête. Cette caractéristique est vérifiée quelque soit l'instant considéré. Dans la zone de rodage, les valeurs d'usure en V_b des rayons 23 et 40 sont relativement proches. La différence d'amplitude est plus marquée pour le rayon 70, son usure en dépouille est deux fois plus importante. Cette tendance est visible dès les premiers instants d'usinage.

L'influence de la forme (w/h) est surtout appréciable pour le rayon de 70 où l'on constate un accroissement du V_b . Ce résultat est conforme à nos attentes, « la forme plate » du rayon accentuant naturellement l'usure V_b .

La zone d'usure progressive est marquée par une différenciation de l'usure entre les rayons 23 et 40 μm . **Nous constatons que le taux d'usure en V_b (pente de la courbe) augmente avec le rayon d'arête** et avec sa forme $W/H > 1$ pour le rayon de 70 μm . La forme géométrique $W/H > 1$ montre son influence sur les valeurs d'usure en dépouille. L'influence est d'autant plus marquée que la valeur du rayon d'arête est élevée.

➤ Usure à 400 m/min :

L'usinage à 400 m/min a permis de mener les essais au delà du stade d'usure progressive, jusqu'à l'endommagement catastrophique de la plaquette. A cette vitesse de coupe, l'usure est accélérée et la durée de vie de la plaquette est écourtée. Dans la zone de rodage, on observe une similitude de comportement vis à vis de la vitesse de coupe à 300m/min. L'usure en dépouille croît avec les rayons d'arête, elle est maximale pour le rayon d'arête de 70 μm et une forme $W/H > 1$. Concernant le taux d'usure, il augmente également avec le rayon d'arête et sa forme. Mais ce taux est plus élevé qu'à 300m/min. La zone 2 confirme les tendances de la zone 1. La zone d'usure catastrophique est difficilement interprétable en terme d'usure en dépouille seul. En effet, la valeur du V_b augmente et les courbes en zone 2 présentent une linéarité croissante plus accentuée que dans le cas de l'usinage à 300 m/min.

L'usure en dépouille pour le rayon d'arête de 23 μm se développe progressivement dans des proportions très acceptables. Quelle que soit la vitesse de coupe, l'évolution de l'usure est remarquable de stabilité.

L'analyse des courbes d'usure en dépouille montre clairement que ce type d'usure dépend de la valeur du rayon d'arête et dans une moindre mesure de sa forme. L'amplitude du V_b augmente avec la valeur du rayon d'arête, le taux d'usure est une fonction croissante du rayon d'arête et de sa forme [Figure 58].

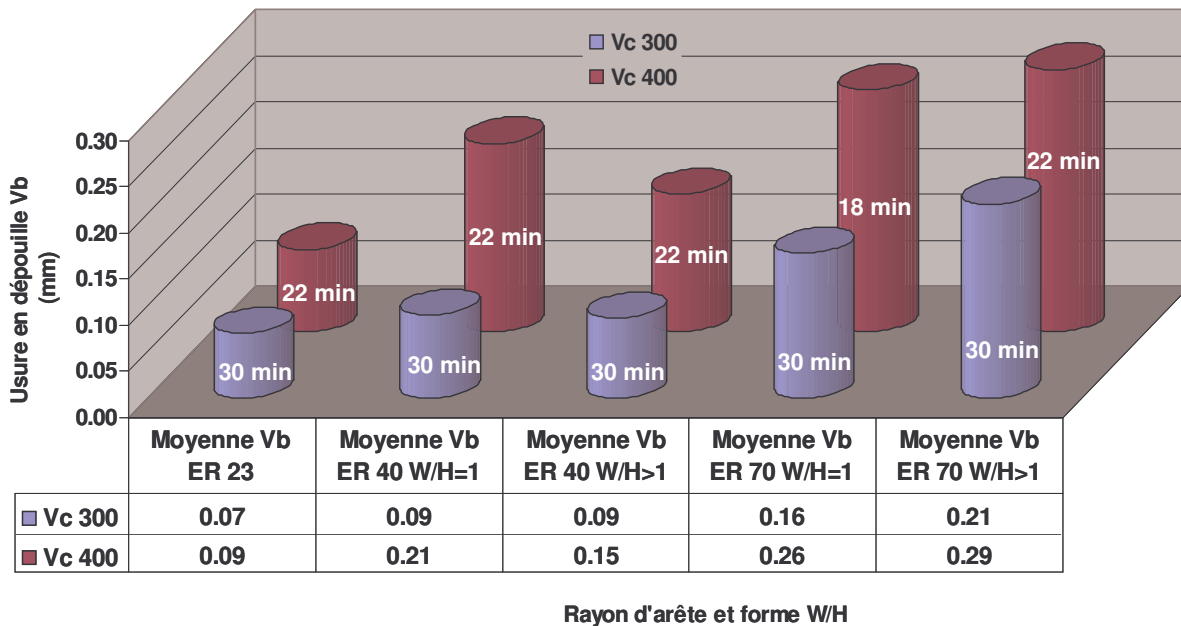


Figure 58: Valeur moyenne de l'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min.

Au cours de l'usinage, nous avons identifié un deuxième phénomène d'usure : l'usure en cratère. Ce type d'usure est illustré par des images MEB acquises pour les rayons 23 et 70 μm aux deux vitesses de coupe [Figure 59]. Nous avons constaté que ce type d'usure croît progressivement au cours de l'usinage. L'analyse des images MEB montre que l'usure en cratère croît plus rapidement que l'usure en dépouille. La cratérisation est d'autant plus marquée que le rayon d'arête est élevé. Dans la formation du cratère, l'abrasion se combine à la diffusion. L'augmentation de la vitesse de coupe accentue l'usure en cratère.

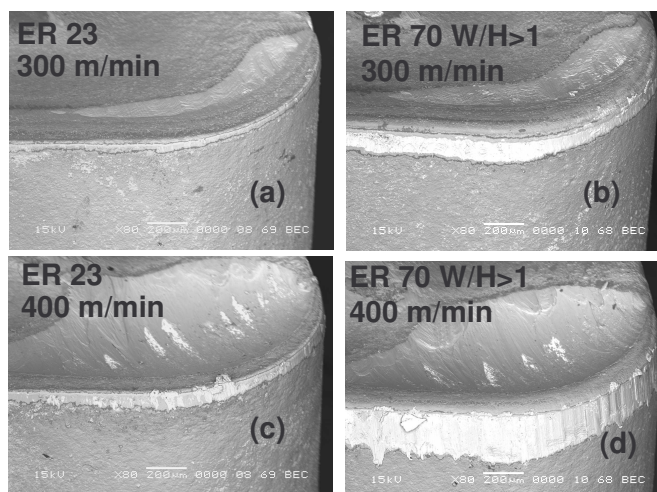


Figure 59: Images MEB des plaquettes illustrant l'usure en dépouille et l'usure en cratère.

Sur la Figure 60 à 400 m/min, l'usure en cratère est accélérée et la durée de vie de la plaquette est écourtée. L'apparition de cette usure est plus tardive à la vitesse de coupe à 300m/min. L'usure en cratère croît avec les rayons d'arête, elle est maximale pour le rayon d'arête de 70 μm et une forme $W/H > 1$. Concernant le taux d'usure, il augmente également avec le rayon d'arête et avec sa forme W/H . Environ à 18 minutes d'usinage ce taux croît de 40% entre un rayon de 23 et 70 μm .

L'analyse des courbes d'usure en cratère montre clairement que ce type d'usure dépend de la valeur du rayon d'arête et de la vitesse de coupe. L'amplitude du cratère augmente avec la valeur du rayon d'arête.

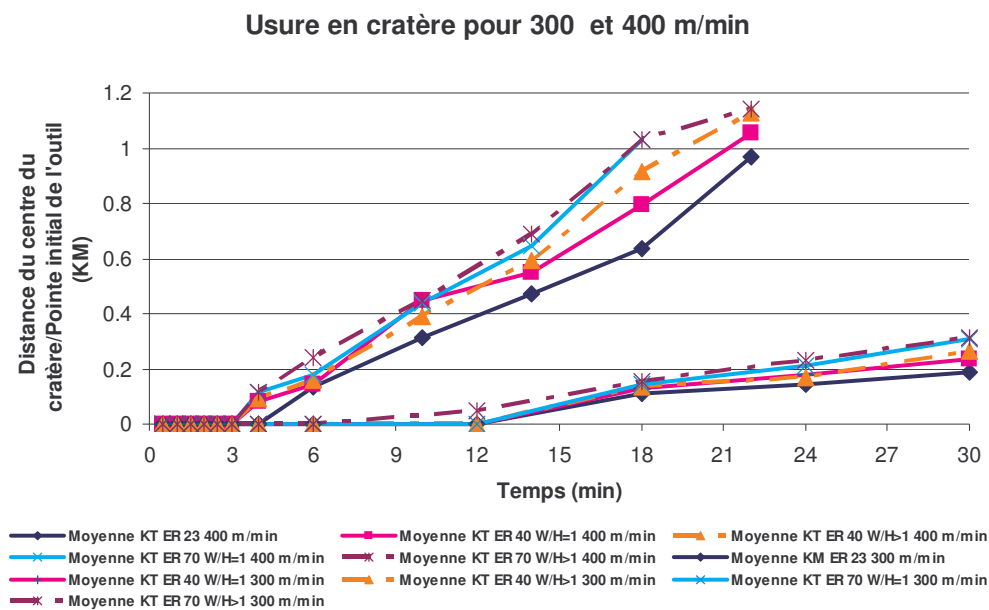


Figure 60: Valeur moyenne de l'usure en cratère (KM) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min

4.1.2 Influence de l'usure sur la forme des copeaux

Durant l'usinage, les phénomènes d'usure jouent un rôle conséquent sur la forme des copeaux.

Les images MEB représentées par la Figure 61 correspondent à une plaquette de rayon d'arête 23 μm , analysée après 1 minute d'usinage à une vitesse de 300 m/min. En fonction des conditions de coupes employées, le frottement du copeau génère l'usure de la face de coupe de la paquette.

Les zones blanches marquent la présence de fer déposé par l'acier usiné (image Fe). Le noir représente la couche d'alumine révélée par l'identification de l'élément aluminium (Al), ce qui indique une dégradation de la première couche de titane (TiN). Durant la phase d'usinage, les frottements provoquent des flux de matière, mis en évidence par l'observation de l'élément chimique fer (Fe) qui adhère à la surface de la plaquette. En ce qui concerne le rayon d'arête, son influence n'est pas manifeste à cet instant d'usure.

La Figure 62 représente l'état d'usure avancé d'une plaquette avec un rayon d'arête 70 μ m. Par l'analyse cartographique, nous constatons la disparition de la couche de revêtement (TiN, Al₂O₃) sur la face de coupe. Dans cette zone d'analyse, nous identifions le cobalt du substrat gradient. L'usure en diffusion génère un cratère recouvert de matière identifiée par l'élément chimique fer (Fe), la présence d'oxygène dans cette zone permet d'identifier qu'un processus d'oxydation du fer a eu lieu. L'usure en dépouille est masquée par le collage de la matière.

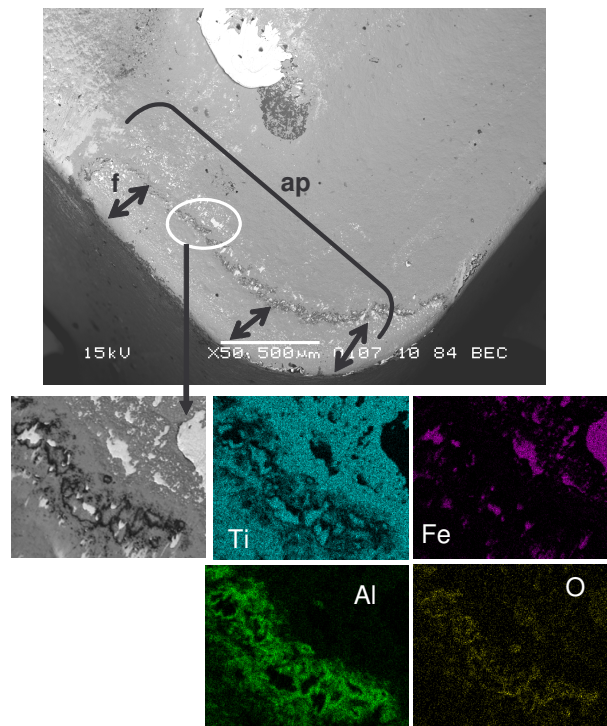


Figure 61: Image MEB d'une plaquette de rayon d'arête 23 μ m après 1 minute d'usinage à la vitesse de coupe 300m/min, ap=1.6 mm et f = 0.2 mm/tr. Représentation de la cartographie des éléments chimiques retrouvés en surface.

Nous pouvons aussi remarquer qu'une partie du profil de l'arête de coupe (ER) reste intacte.

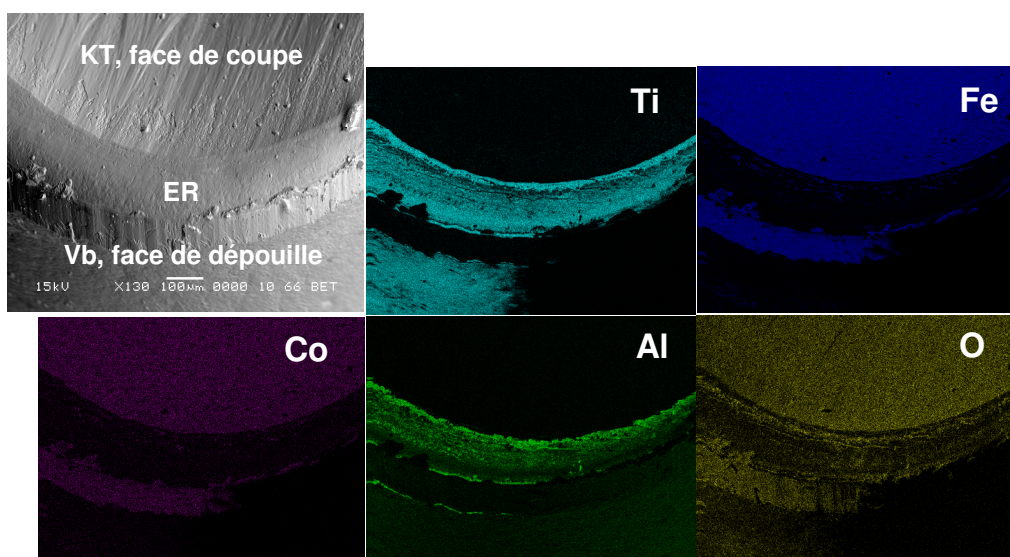


Figure 62: Image MEB topographique du profil d'usure de l'arête de coupe après 12 minutes d'usinage à 400 m/min.

La Figure 63 montre que la vitesse de coupe est la cause principale de la croissance du cratère.

A 400 m/min la face de coupe est plus endommagée à cause des sollicitations thermomécaniques plus élevées. Au delà d'une certaine limite (10 min pour ER 70), le cratère atteint des proportions qui affecte l'arête de planage. Nous pouvons facilement identifier le frottement de l'acier sur la plaquette, le décrochement du copeau s'effectue différemment pour les vitesses de 300 et 400 m/min. L'empreinte laissée par le frottement du copeau au niveau de la face de coupe sur la longueur de la profondeur de passe (a_p) montre ce phénomène.

Du microcollage de matière est observé sur le rayon d'arête de cette zone. Ce microcollage est plus net pour les rayons d'arête élevés.

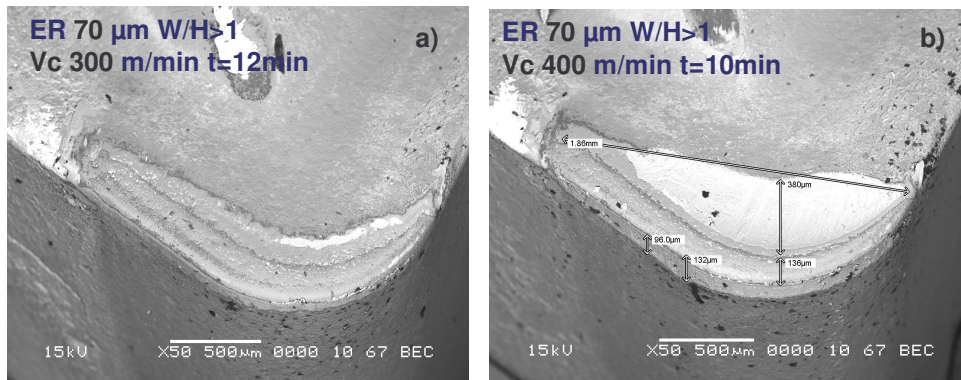


Figure 63: Image MEB représentant l'usure développée par l'arête de coupe aux vitesses de coupe 300 et 400 m/min respectivement.

L'usure de la plaquette conditionne la forme des copeaux.

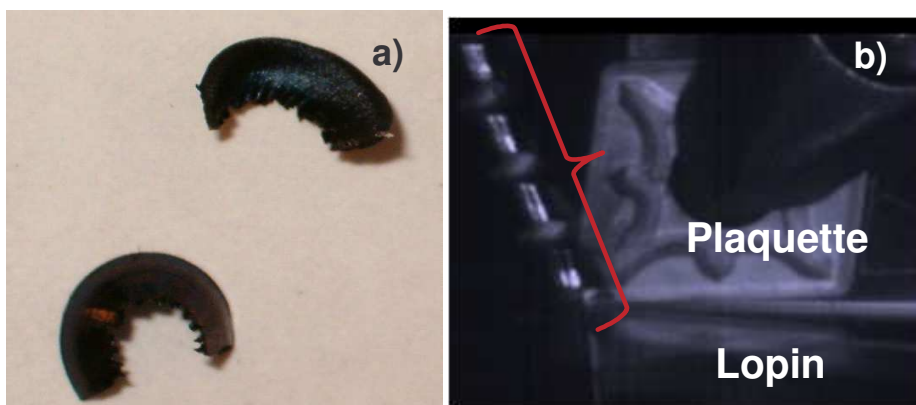


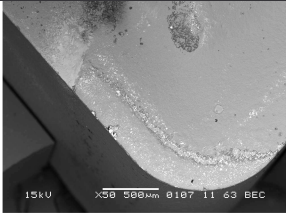
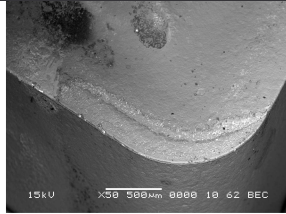
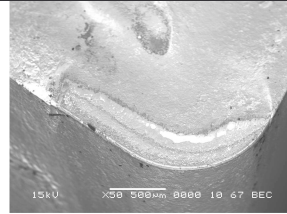
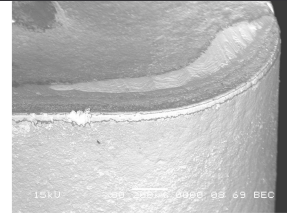
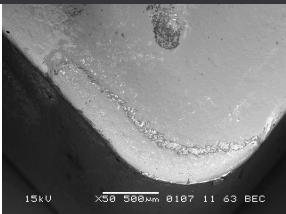
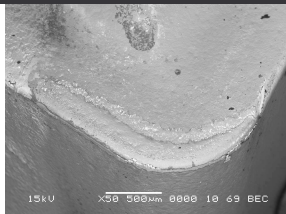


Figure 64: (a) Image d'un copeau avant formation de l'usure en cratère. (b) Image prise par caméra d'acquisition rapide pendant un usinage après formation du cratère sur la face de coupe de l'outil.

Tableau 24: Résumé de l'évolution de la forme géométrique du copeau en fonction de l'usure au long du temps.

Conditions de coupe : $a_p = 1.6 \text{ mm}$, $f = 0.2 \text{ mm/tr}$, $vc = 400 \text{ m/min}$.				
Plaquette usée ER 23 μm Arête 278.2				
Plaquette usée ER 70 μm Arête 258.4				
ER	T3 = 1.5 min	T7 = 4 min	T12 = 14 min	T14 = 18 min
23 arête 278.2				
40 arête 46.4			Défaut sur la plaquette qui implique la « mort » de l'arête. Suite des essais avec l'arête 48.1.	
40 W/H>1 arête 76.2				
70 arête 224.4				
70 W/H>1 arête 258.4				

L'usure d'outil résulte de la combinaison de plusieurs types de contraintes imposées à l'arête de coupe. La durée de vie d'arête est déterminée par plusieurs forces tendant à modifier sa géométrie. Le Tableau 24 illustre l'influence de l'usure en cratère sur la forme du copeau au cours de l'usinage à 400 m/min pour un rayon d'arête de 23 et 70 μ m. Après 14 minutes d'usinage, nous passons d'un copeau court à un copeau hélicoïdal long. Ce phénomène est visible pour les rayons d'arête de 40 et 70 μ m. Nous observons également que la formation du cratère progresse vers l'arête de coupe. Après 18 minutes d'usinage, le cratère est plus accentué occasionnant une nouvelle forme de copeau enroulée, signe d'un processus de coupe à fortes contraintes. L'analyse des image MEB illustrée par le Tableau 25 montre que pour des petits rayons d'arête les phénomènes d'usures se développent plus tard. A 300 m/min de vitesse de coupe, la durée de vie de la plaquette peut se prolonger de 30%.

Tableau 25: Image MEB de l'évolution de l'usure sur la plaquette au cours du temps d'usinage pour les rayons ER 23 et 70 μ m à la vitesse 300 m/min.

Conditions de coupe : $a_p = 1.6$ mm, $f = 0.2$ mm/tr, $v_c = 300$ m/min.					
Plaquette usée ER 23 μ m					
	coté dépouille				
	Plaquette usée ER 70 μ m				
		coté dépouille			
Temps		T3 = 1.5 min	T7 = 4 min	T12 = 18 min	T14 = 24 min

4.1.3 Influence du rayon d'arête sur les efforts – Analyse des efforts en fonction des ER

L'acquisition des efforts a été effectuée à l'aide d'une table dynamométrique. Le référentiel considéré sera celui du porte-outil [Figure 68]. Rappelons que les conditions de coupe sont fixes avec une profondeur de passe de 1.6 mm et une avance 0.2 mm/tr.

Les résultats représentés sur les graphiques des efforts qui suivent, se réfèrent au comportement des rayons d'arêtes durant l'usinage pour deux vitesses de coupe. Les tests effectués à 300 m/min ont été arrêtés avant usure totale de la plaquette. Les tests effectués à 400 m/min sont menés jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt suivant :

- rupture de l'arête,
- dégradation de la surface usinée par changement de la direction du copeau sur la pièce.

Chaque essai est reproduit 3 fois pour chaque rayon d'arête sélectionné. Les résultats représentant la moyenne des 3 essais.

La Figure 65 et la Figure 66 représentent respectivement l'évolution de l'effort radial et de l'effort axial pour des vitesses de 300 et 400 m/min. Nous observons, pour une vitesse de 300 m/min, une tendance à la décroissance de l'effort radial, plus marquée après 12 minutes d'usinage. Au-delà, l'effort axial augmente. Ces variations se traduisent par une évolution de la direction de l'effort résultant. Ce comportement est vérifié pour les 5 rayons d'arête.

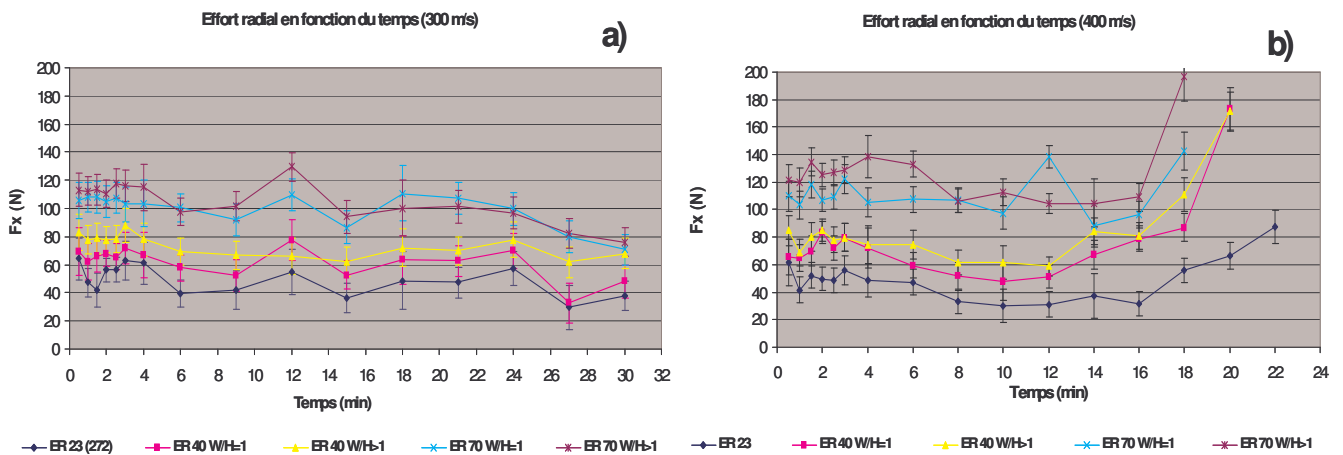


Figure 65: Evolution de l'effort radial au long du temps d'usinage en fonction de chaque rayon d'arête analysé : (a) pour $V_c = 300$ m/min et (b) pour $v_c = 400$ m/min.

Nous pouvons aussi remarquer que les efforts augmentent en fonction des rayons d'arête et que la forme géométrique W/H a une influence mineure. Pour une vitesse de 400 m/min, tous les phénomènes s'accroissent pour atteindre un des critères d'arrêt précédemment définis. Nous observons, pour des temps d'usinages plus courts, la même tendance que décrite antérieurement. L'évolution des efforts varie donc en fonction du profil d'usure de la plaquette. Les efforts acquis à 400 m/min pour les plaquettes avec microgéométrie plus faible, 23 et 40 μ m, sont moins importants ce qui est favorable à la durée de vie. A partir de 16 – 18 minutes, l'augmentation des efforts est accélérée.

La croissance du cratère va augmenter l'angle de coupe ce qui peut influencer le comportement des efforts et accélérer l'usure. Le microcollage de matière joue également un rôle sur la direction des efforts.

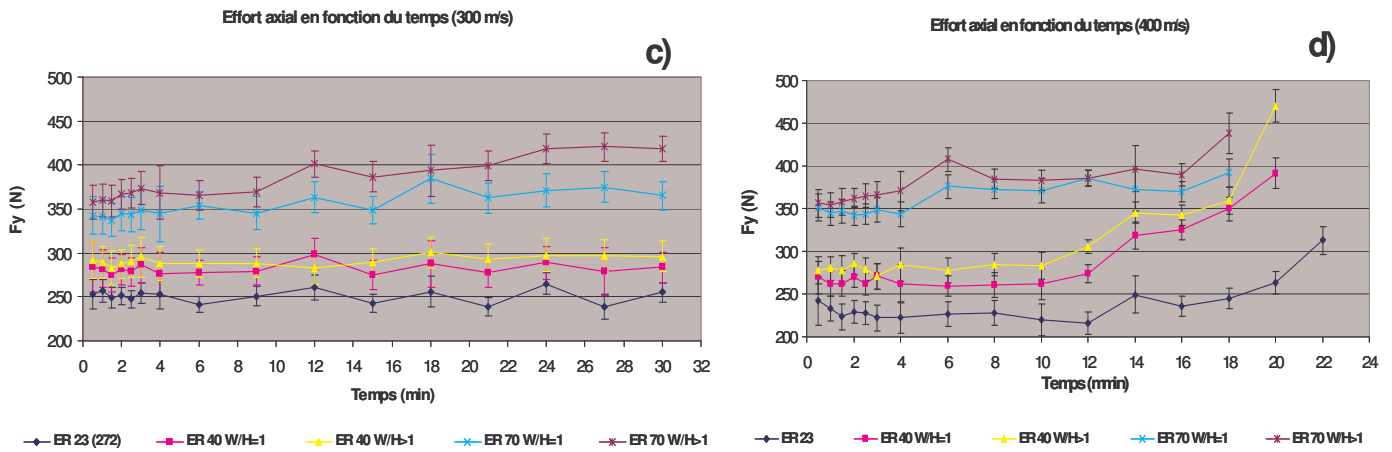


Figure 66: Evolution de l'effort axial au long du temps d'usinage en fonction de chaque rayon d'arête analysé : (c) pour $V_c = 300$ m/min et (d) pour $v_c = 400$ m/min.

La Figure 67 décrit le comportement de l'effort tangentiel pour les différents rayons d'arête au cours de l'usinage. L'effort tangentiel présente un comportement linéaire pendant tout l'usinage. Il est croissant en fonction des rayons d'arêtes, la valeur la plus élevée étant observée pour le rayon de 70 μm . La forme W/H n'est pas un paramètre influant sur ces efforts.

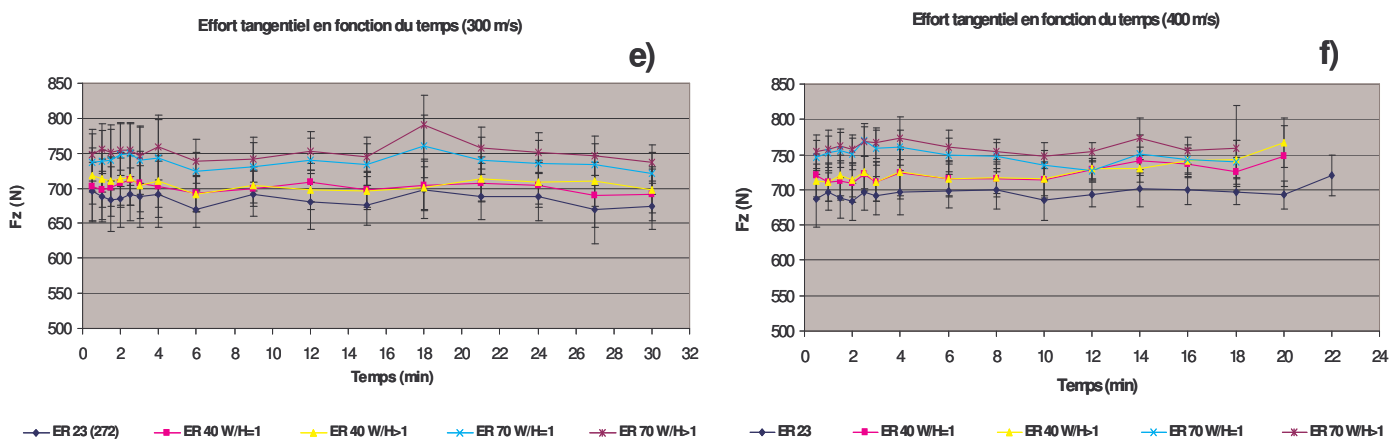


Figure 67: Evolution de l'effort tangentiel durant l'usinage en fonction de chaque rayon d'arête analysé : (e) pour $V_c = 300$ m/min et (f) pour $v_c = 400$ m/min.

4.1.3.1 Conclusions – résultat effort de coupe global

Les résultats précédents montrent que :

- Les efforts radiaux, axiaux et tangentiels augmentent en fonction des rayons d'arêtes.
- La forme géométrique W/H n'a pas d'influence notable sur les efforts radiaux, axiaux ou tangentiels.
- La direction des efforts radiaux et axiaux est dépendante de l'usure en dépouille, de l'usure en cratère et de la dégradation de l'arête de coupe.

4.1.4 Les efforts sur l'arête de coupe

Durant les essais, les mesures d'efforts ont été réalisées par une platine placée sous la tourelle porte outil. La figure suivante donne la position du repère de mesure de la table en effort radial, effort axial et effort tangential Figure 68. Seule la résultante du torseur des efforts est mesurée. Cette même résultante du torseur des efforts a été ensuite ramenée dans le repère local de la plaquette de coupe pour lequel F_x est l'effort porté par l'arête de coupe, F_z l'effort de coupe porté par l'arête du nez de la plaquette et F_y est l'effort perpendiculaire aux précédents. Le repère final est direct et l'on peut noter une différence de sens entre l'effort tangential et l'effort porté par l'axe z du fait de ce choix de repère. La Figure 69 montre la position des repères, local plaquette et table d'effort.

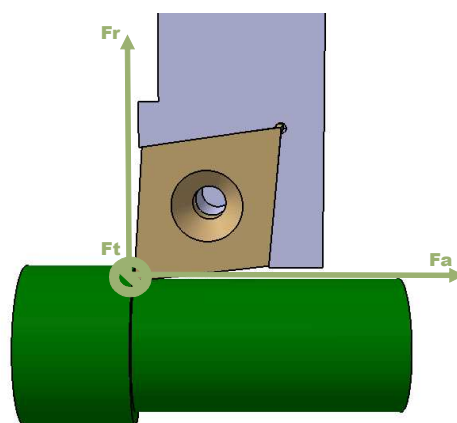


Figure 68: Répartition tridimensionnel des efforts acquis par la table dynamométrique. Repère : référentiel outil avec la position de l'effort radial F_r , l'effort axial F_a et l'effort tangential F_t .

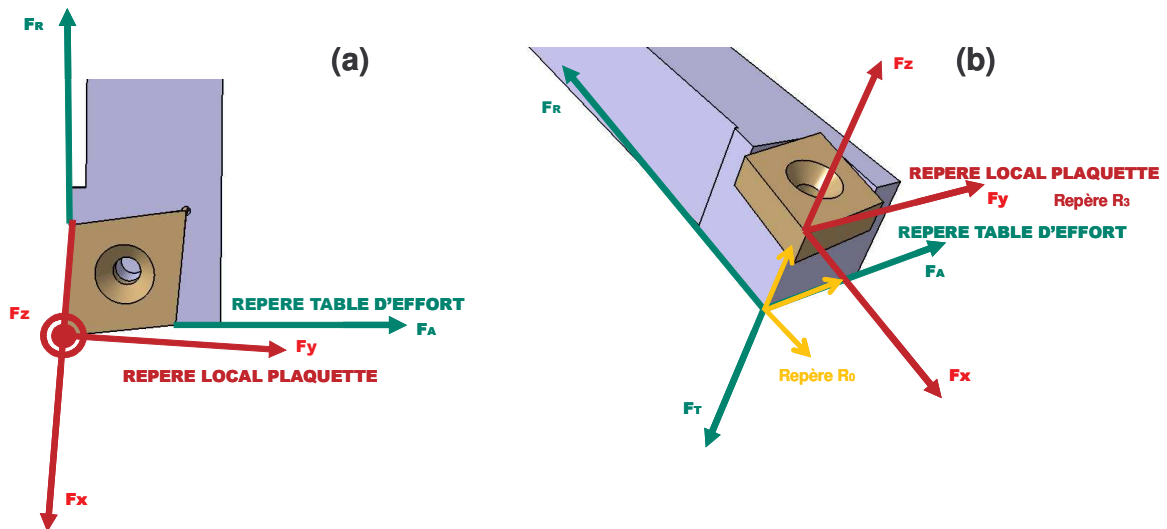
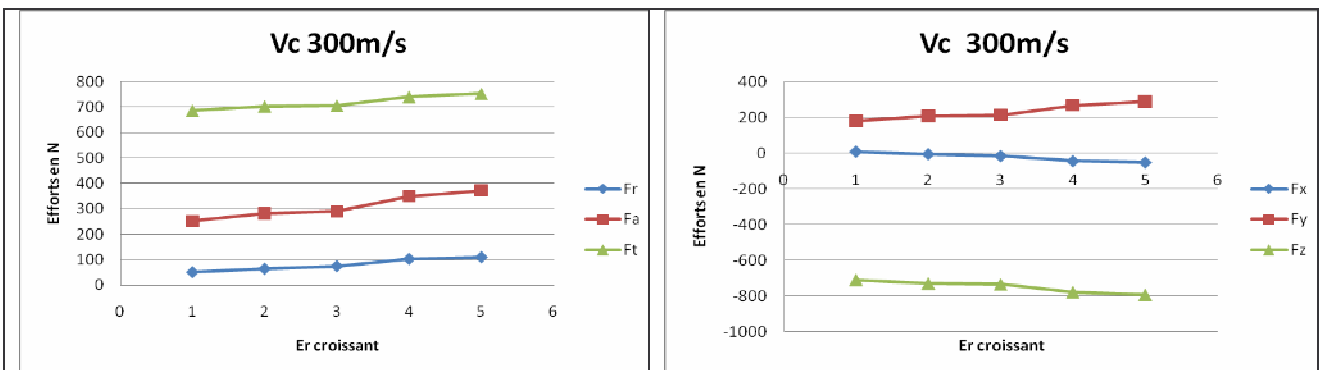


Figure 69: Repère de mesure de la table d'effort et repère local lié à la géométrie de la plaquette.

Les résultats obtenus montrent que les efforts sont croissants avec la taille du rayon d'arête. Par contre, il n'y a pas de différence significative entre les vitesses de coupe 300 et 400 m/min pour des valeurs moyennes d'efforts entre tous les temps de mesure. Ces mêmes efforts amenés à la plaquette ne montrent pas de différences notables, ce qui est normal dans le cas présent. Les trois rotations qui permettent de passer d'un repère à l'autre sont de : repère R_0 à R_1 par rotation z_0 de 4.69° , repère R_1 à R_2 par rotation x_1 de 5.49° et repère R_2 à R_3 par rotation y_2 de 6.44° .

Le seul résultat qui se dégage des efforts et la valeur de l'effort porté dans la direction de l'arête de coupe (proche de l'effort radial) qui entoure la valeur nulle. Dans ce cas, la forme de la plaquette est importante et le listel joue un rôle non négligeable.

Les courbes de chaque composante de l'effort local ramené à la plaquette ont été tracées pour les deux temps extrêmes de mesure : T_1 : 1 min et T : 12 min.



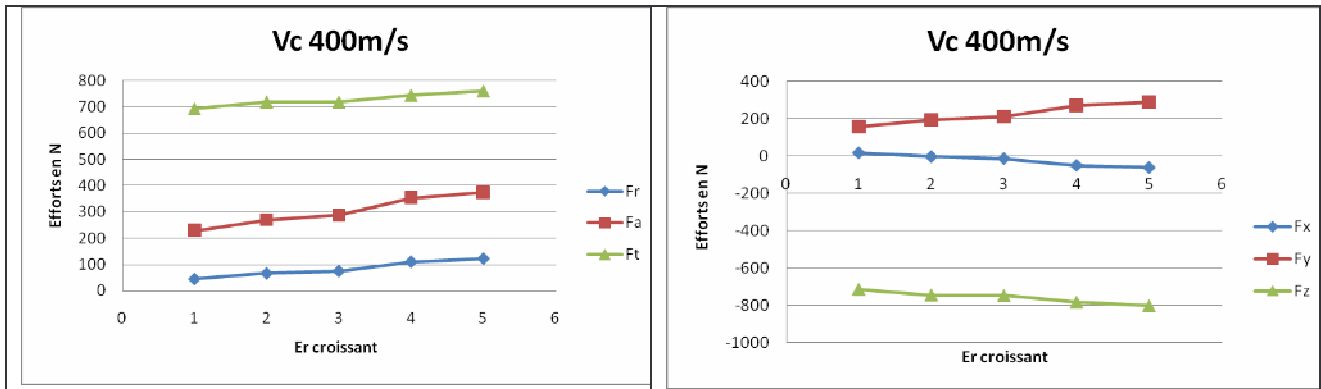


Figure 70: Courbe de chaque composante de l'effort local ramené à la plaquette pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min. A gauche pour 1 minute et a droite après 12 minutes d'usage.

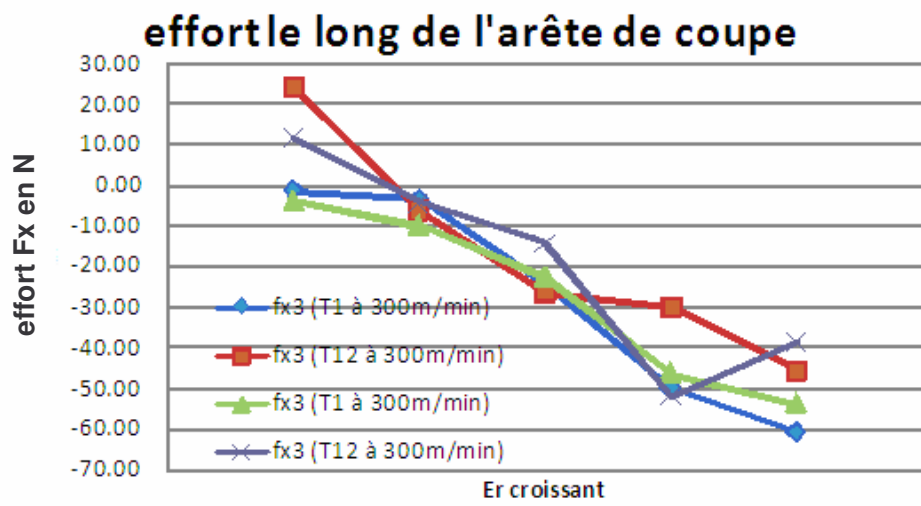


Figure 71: Effort rapporté à l'arête de coupe.

L'effort porté parallèlement à l'arête de coupe montre une augmentation de la compression pour des rayons d'arête plus importants. Plus le cisaillement est facilité et plus l'effet du listel (géométrie d'arête) est important. Dans ce cas, la plaquette est absorbée.

effort perpendiculaire à l'arête de coupe

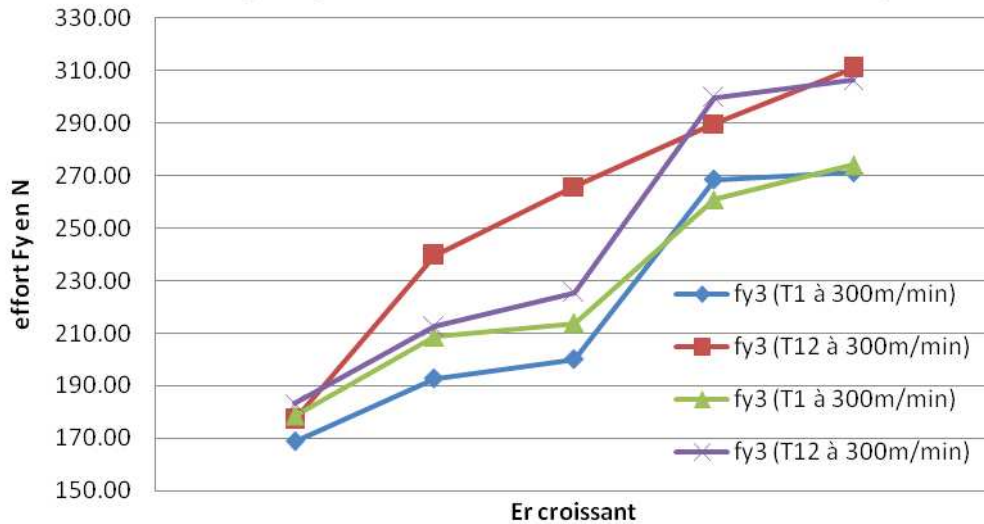


Figure 72: Effort perpendiculaire à l'arête de coupe.

L'augmentation de l'effort axial est importante par rapport à l'augmentation du rayon d'arête. 82% d'augmentation d'effort, ce qui est important et qui montre l'effet de la facilité au cisaillement pour des petits rayons d'arête. Entre 1 et 12 minutes l'effet d'augmentation d'effort de l'ordre de 15% n'est notable que pour des rayons de 70 μ m.

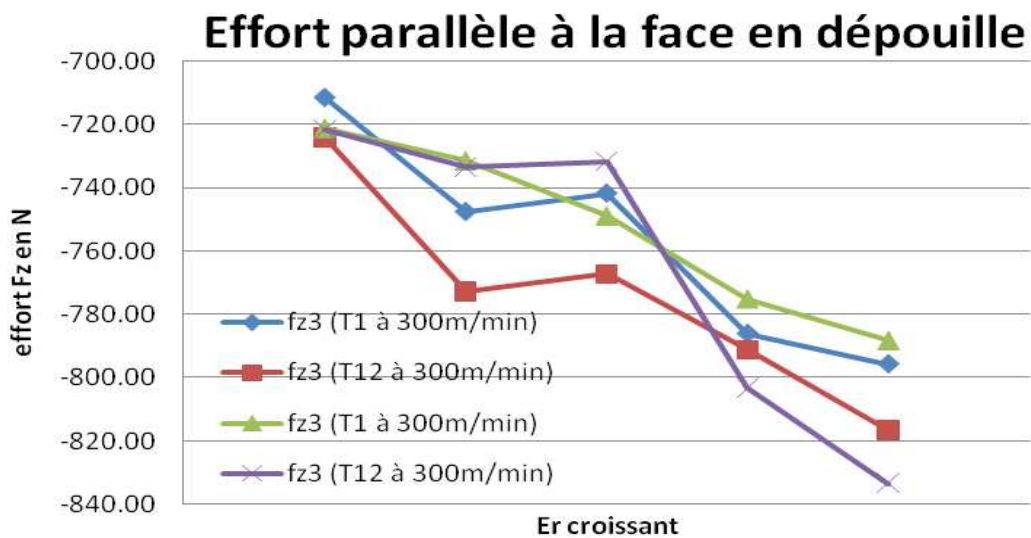


Figure 73: Effort rapporté à l'arête de coupe.

Même remarque pour l'effort porté le long de la face en dépouille (nez de plaquette). 8% d'augmentation pour 14% entre la première minute d'usinage et la douzième minute d'usinage. Les écarts sont croissants entre les temps d'usinage pour des rayons supérieurs à 35 μ m.

Parallèlement à ces mesures, des simulations ont été réalisées à partir du logiciel Thirdwave Systems Advantedge. Les conditions entrées en 2D sont les mêmes que les conditions de coupe

utilisées. Les résultats obtenus sont de 630N et 300N pour les efforts perpendiculaires à l'arête de coupe et parallèle à la face en dépouille. Les résultats sous évaluent les efforts en Fz. Le problème du logiciel utilisé ne permet pas de manipuler les conditions générales du comportement de la matière. Les valeurs sont prises d'une bibliothèque de matières. Ces conditions limitent l'utilisation du logiciel. Par contre, les données prélevées donnent une base de données qui pourra être réutilisée pour des simulations ultérieures à partir d'autres logiciels.

L'étude des efforts rapportés localement sur la plaquette montre l'importance de la géométrie de la face de coupe.

Par contre pour l'effet du rayon d'arête, l'étude des efforts montre que plus une arête est tranchante et plus les efforts sont faibles et plus particulièrement l'effort porté par l'avance de l'outil.

Ces travaux ont été réalisés pour implanter une base de données qui pourra ensuite servir à regarder comment se fait la répartition de pression sur la zone de la plaquette qui sert à la coupe. Un effort ponctuel n'existe pas physiquement et les pressions engendrées par la coupe qui donnent cette résultante sont complexes. Les surfaces qui sont en jeu sont connues mais, dans notre cas, leurs orientations sont nombreuses et à la variation de rayon d'arête viennent ajouter au moins deux paramètres supplémentaires (taille et forme).

4.2 Influence de la micro géométrie ER sur l'état de surface

Nous allons maintenant caractériser l'influence du rayon d'arête sur l'état de surface de la pièce usinée.

4.2.1 Caractérisation topographique des surfaces

4.2.1.1 Rugosité arithmétique

La microscopie par interférométrie en lumière blanche a été utilisée pour la caractérisation topographique des surfaces. Nous allons commencer par analyser la rugosité arithmétique (Ra) au cours de l'usinage. Les résultats représentés par les graphiques Figure 74 et Figure 75 font référence à l'influence des rayons d'arêtes pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min respectivement. Ces mesures ont été effectuées à différents temps d'usinage. Chaque pièce analysée correspond à un rayon d'arête. Les essais sont reproduits 3 fois pour chaque rayon d'arête sélectionné. Les résultats représentent la moyenne des trois essais.

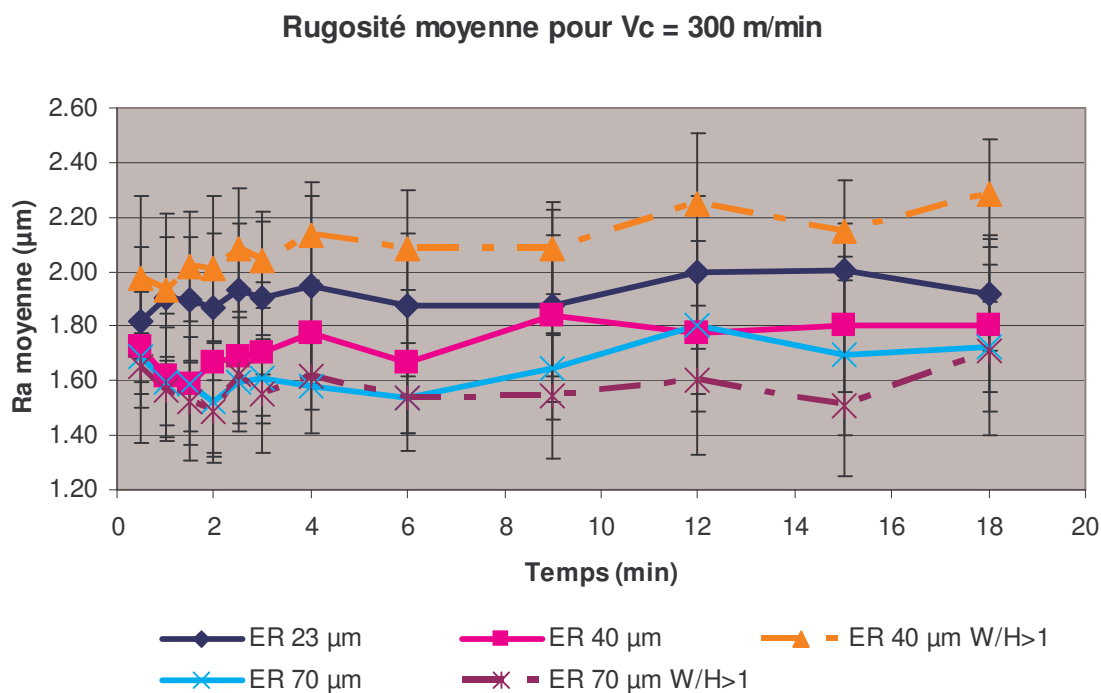


Figure 74: évolution de la rugosité moyenne au cours de l'usinage en fonction des rayons d'arête pour une vitesse de coupe 300 m/min.

L'analyse de la rugosité en fonction des rayons d'arête est délicate car les écarts de mesures sont importants. Le fait d'avoir la présence de micro collages de la matière sur l'arête secondaire peut être à l'origine de ces écarts. Cette analyse permet de conclure que la rugosité évolue en fonction de l'usure de la plaquette et qu'elle est plus accentuée à 400 m/min où les phénomènes sont plus accélérés. Le rayon d'arête de 70 μm va engendrer un profil caractérisé par une faible rugosité de surface. Pour les rayons 23 et 40 μm la rugosité est plus élevée. Nous pouvons aussi noter que la forme W/H influence la rugosité de la pièce. Elle est plus faible pour les rayons d'arêtes à 70 μm , ce n'est pas le cas pour le rayon d'arête 40 μm de forme W/H>1.

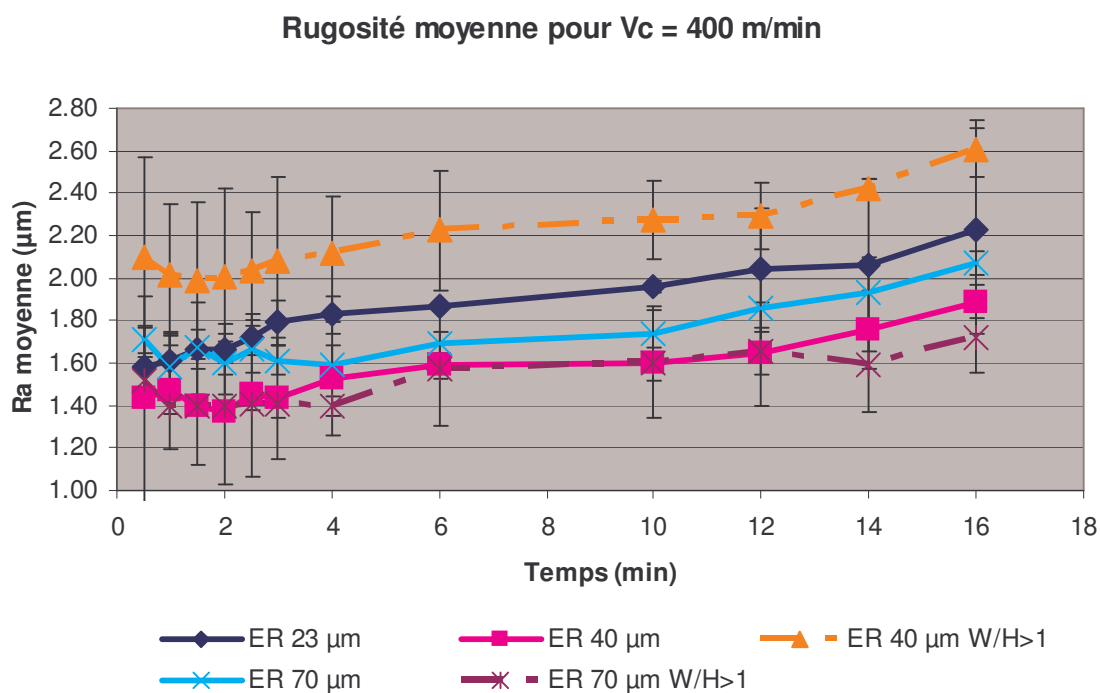


Figure 75: évolution de la rugosité moyenne au cours de l'usinage en fonction des rayons d'arête pour une vitesse de coupe 400 m/min.

4.2.1.2 Profil de rugosité

L'analyse de la Figure 76 permet d'interpréter les profils de surface engendrés par les rayons d'arête ER 23 et 70 μm pour une vitesse de coupe de 400 m/min. En début d'usinage, le profil de rugosité est plus stable pour un petit ER même si les saillies sont plus prononcées. Après 18 minutes d'usinage, le profil évolue en fonction de la dégradation de l'arête de coupe. L'usure en planage conditionne le profil de la surface. Cette usure se situe dans l'arête secondaire de la plaquette. L'usure en cratère va, après un certain temps d'usinage, joindre le rayon d'arête coté planage et va provoquer sa dégradation par rupture de l'arête provoquant une mauvaise qualité de surface de la pièce usinée.

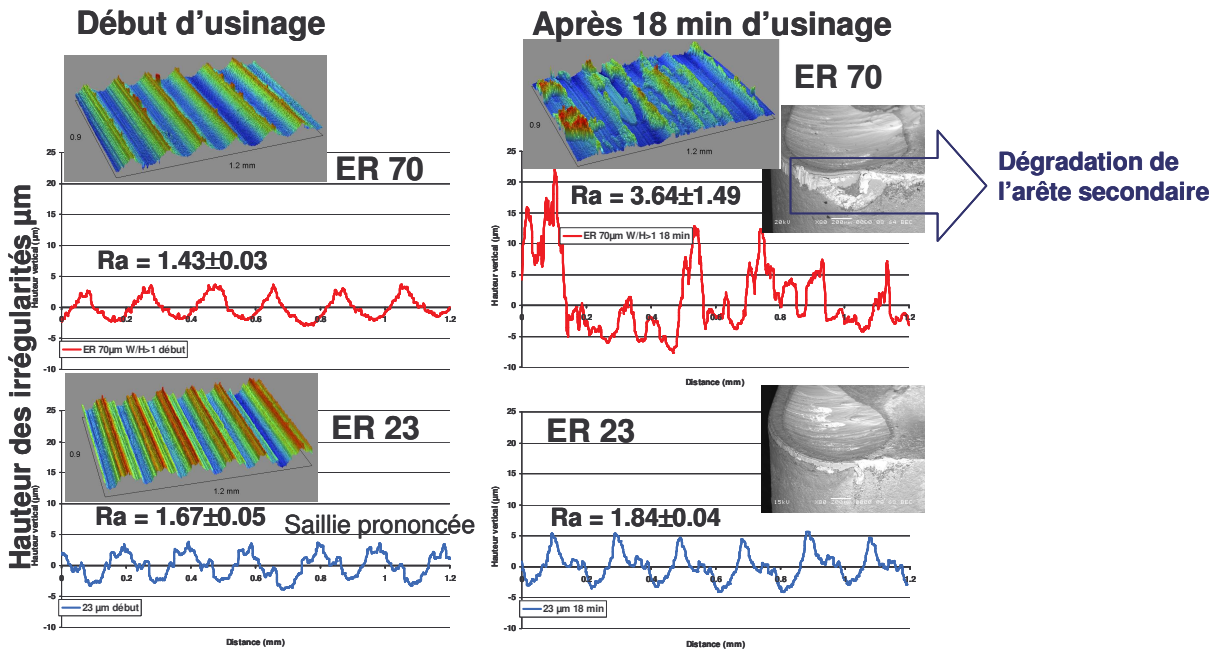


Figure 76: Profil de rugosité de surface en début d'usinage et après développement des phénomènes d'usure pour les rayons ER 23 et 70 μm à la vitesse 400 m/min.

Le microcollage de matière sur le rayon va aussi affecter l'état de surface. L'influence de ces phénomènes révèle un état de surface catastrophique après 18 minutes d'usinage avec un rayon d'arête de 70 μm qui présentait un meilleur état de surface en début d'usinage. Une augmentation des rayons d'arêtes ER se traduit par une rugosité plus faible, mais s'accompagne d'une durée de vie réduite.

4.2.2 Caractérisation mécanique de la surface usinée

La caractérisation de la dureté superficielle après usinage a été effectuée par micro-indentation. La micro-indentation est une technique conditionnée par la rugosité de surface. Cette caractérisation de la dureté superficielle, est effectuée sur des pièces après 2 minutes d'usinage pour quantifier l'influence des rayons d'arête encore pendant la phase de rodage du rayon et sans influence de l'usure. Les valeurs de dureté correspondant à chaque ER, sont issues d'une moyenne de 30 empreintes.

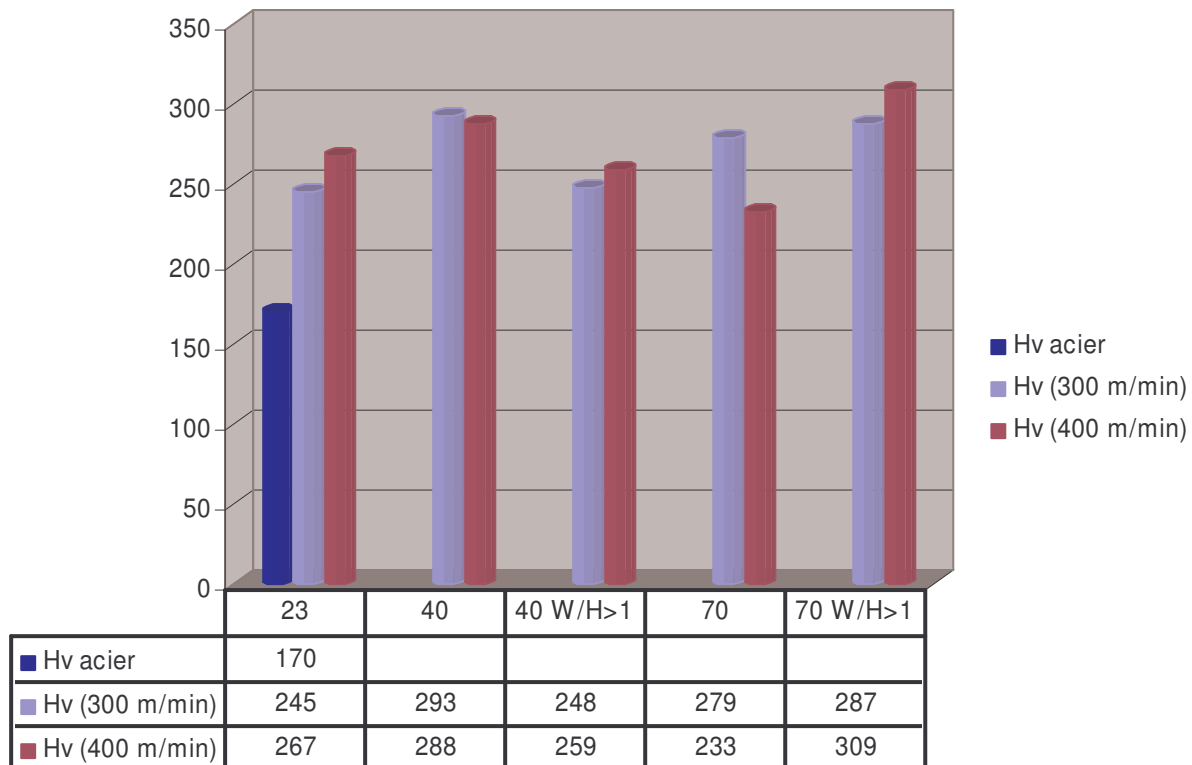


Figure 77: Moyenne des mesures de dureté sur la surface usinée a 300 et 400 m/min, en fonction des rayons d'arête.

La Figure 77 illustre ces mesures et permet d'observer une augmentation de dureté superficielle par rapport à la dureté initiale de la matière passant de 170 Hv à environ 250 – 290 Hv. Les écarts de mesures liés aux valeurs de dureté représentées par le Tableau 26 ne permettent pas une qualification distincte entre les rayons d'arêtes. Ces écarts de mesures peuvent effectivement être dépendants de la rugosité superficielle engendrée après usinage.

Tableau 26 : valeurs de dureté mesurée sur la surface avec l'écart de mesures correspondant.

ER (μm)	Hv (300 m/min)	Hv (400 m/min)
23	245 \pm 43	267 \pm 38
40	293 \pm 43	288 \pm 39
40 W/H>1	248 \pm 23	259 \pm 45
70	279 \pm 27	233 \pm 35
70 W/H>1	287 \pm 31	309 \pm 40
Moyenne	270.4	271.2

La Figure 78 permet tout de même d'observer la qualité des empreintes effectuées sur la surface et de confirmer la profondeur de pénétration appliquée par le système de micro indentation pendant les tests. La profondeur d'indentation, qui est de 6 à 8 μm , pour un effort d'indentation de 2N, s'intègre dans les valeurs d'épaisseur correspondantes à la déformation engendrée par les arêtes de coupe.

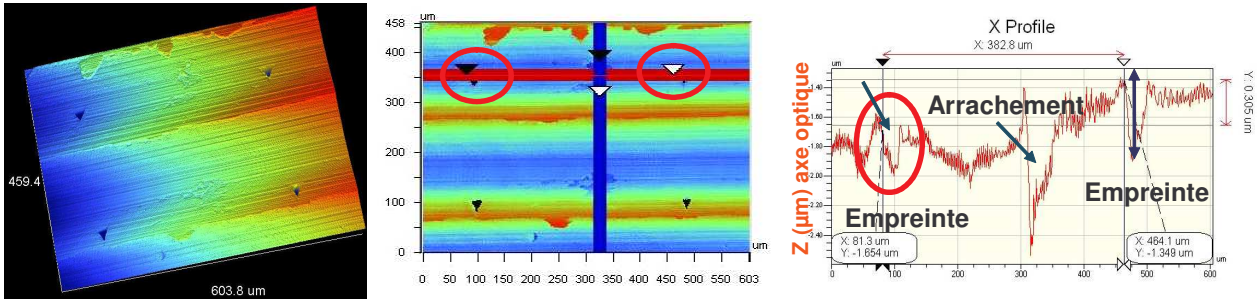


Figure 78: Analyse des empreintes de dureté sur la surface usinée.

Le Tableau 27 illustre l'analyse métallographique effectuée sur les pièces sectionnées coupées. La dureté superficielle étant proche pour les 5 rayons d'arête, nous mènera à effectuer cette analyse sur les surfaces usinées par les rayons d'arête 23 et 70 μm pour les deux vitesses de coupe. Nous constatons que l'épaisseur écrouie croît en fonction du rayon d'arête et que l'augmentation de la vitesse de coupe génère un cisaillement plus performant qui entraîne une épaisseur d'écrouissage plus faible.

Tableau 27 : Images métallographiques en coupe de la pièce usinée représente la déformation superficielle engendrée en début d'usinage.

	$V_c = 300 \text{ m/min}$	$V_c = 400 \text{ m/min}$
ER 23 μm		
ER 70 μm		

Les efforts générés par l'outil, le rayon d'arête et les conditions de coupe vont engendrer une épaisseur d'écroissage sur la surface usinée. La Figure 79 schématise l'influence de la zone écroüe. Cet écroissage étant plus dur va accentuer l'usure de l'arête et la cratérisation.

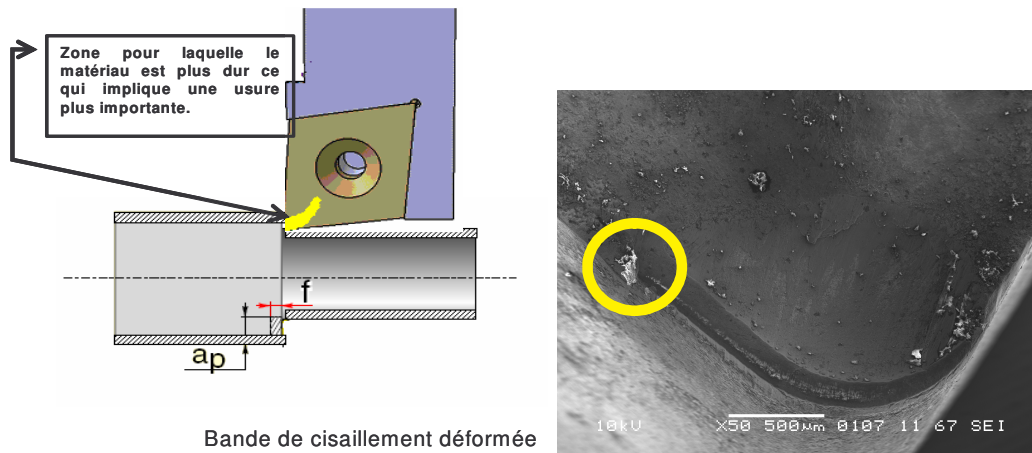


Figure 79: Bandes de cisaillements déformées après usinage. Influence sur l'usure de la plaquette.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons qualifié le comportement des rayons d'arête sur la durée de vie des plaquettes. L'analyse des résultats montre que l'usure en dépouille est plus importantes pour les rayons de $70\mu\text{m}$ avec forme $W/H > 1$. Le même comportement a lieu pour l'usure en cratère qui est plus conséquente et très dépendante de la vitesse de coupe. Les analyses MEB ont permis d'identifier les mécanismes d'usure en cratère (oxydation, diffusion, adhérence) et l'usure en dépouille. Nous pouvons aussi remarquer que le rayon d'arête est affecté après développement de l'usure en cratère. La face de coupe de la plaquette composée du gradient est la première à se détériorer. L'usure développée pendant les essais conditionne la forme du copeau.

L'analyse des efforts radiaux, axiaux et tangentiels permet de conclure qu'ils augmentent en fonctions des rayons d'arête et que la forme W/H n'a pas d'influence sur le comportement des efforts. L'étude des efforts rapportés au repère local « arête », nous a permis de créer une base de données pour pouvoir développer ultérieurement des travaux sur les répartitions de pressions sur les parties participant à l'usinage. Les efforts donnent une idée globale des puissances par contre, ils ne permettent pas de présumer des pressions (tangentielle et normales) entre la plaquette et la pièce usinée.

L'analyse MEB permet d'observer la présence de micro collage de matière le long de l'arête secondaire. Ceci influence l'analyse de la rugosité en fonction des rayons d'arête, mais, il est évident que la rugosité évolue en fonction de l'usure de l'arête secondaire. Nous pouvons tout de même remarquer que la rugosité est plus faible pour un rayon de 70 μ m. Une augmentation des rayons d'arête ER se traduit par une rugosité plus faible, mais s'accompagne d'une durée de vie réduite.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail, mené dans le cadre d'une thèse CIFRE en collaboration avec le fabricant d'outil de coupe ValeniteSafety et le Laboratoire de Mécanique et Rhéologie EA 2640 de l'Université François Rabelais de Tours (Polytech'Tours), a été réalisé au sein du Centre d'Etude et de Recherche sur les Outils Coupants (CEROC).

Le travail proposé consistait à étudier le *rayon d'arête* noté *ER* et son influence sur *l'intégrité de surface* lors d'une opération de tournage à sec sur l'acier 27MnCr5.

Nous avons effectué des tests préliminaires pour un choix optimal des conditions de coupe. Pour cette étude, nous avons considéré deux vitesses de coupe, trois rayons et deux formes d'arêtes différentes. Nous avons utilisé les moyens techniques modernes du CEROC et en particulier :

- Une table d'efforts pour le suivi de l'évolution des efforts.
- Une caméra d'acquisition rapide qui permet de suivre la formation du copeau en continu et l'évolution de sa forme en fonction des phénomènes d'usure.
- Un Microscope Electronique à Balayage (MEB) qui apporte les informations scientifiques pertinentes sur l'état de la pièce et sur l'usure de l'outil, par analyse des éléments composants la surface (différence entre collage et abrasion).
- La micro indentation pour la quantification de la dureté superficielle de la pièce.
- L'interférométrie en lumière blanche pour la quantification des rugosités de surfaces des pièces, et pour l'observation de l'usure de la plaquette avec précision.

L'analyse générale des résultats corrobore les quelques données de la littérature sur le comportement des rayons d'arête :

- Les efforts augmentent en fonction des ER et de la forme W/H.
- L'usure dépend de la vitesse de coupe et croît en fonction des rayons d'arêtes et de la forme W/H. Un petit rayon d'arête est favorable à la durée une durée de vie de plaquette et occasionne un meilleur état de surface de la pièce usinée.

Nous avons observé une déformation superficielle engendrée après cisaillement de la matière, quelque soit le rayon et la vitesse de coupe, une augmentation de la dureté en surface signe d'un écrouissage local. L'épaisseur de cette couche croît avec le rayon. Enfin les efforts locaux montrent l'importance de la géométrie de plaquette.

Nos résultats montrent obtenus l'importance de la micro géométrie de l'arête (qui n'est pourtant pas prise en compte par la loi de Taylor). L'intégrité de surface et la bonne reproductibilité de l'enlèvement de matière demandées par le client nécessitent de pouvoir maîtriser la tolérance de finition d'arête.

Cette étude nous a permis de mettre en avant des points importants à développer dans le futur. Par exemple l'étude du comportement mécanique de l'arête par rapport aux efforts et donc aux pressions locales mises en jeu. Une autre caractéristique à développer concerne l'étude de l'écrouissage local par nano indentation. Il semble important de corroborer les résultats par la mesure des contraintes résiduelles et de mesurer la distorsion des grains de perlite et ferrite.

D'un point de vue personnel, ce travail m'a permis d'enrichir mes compétences. Ces compétences sont de l'ordre du management avec la gestion d'un projet de longue durée, du relationnel grâce aux contacts avec de nombreux industriels et universitaires ainsi qu'avec le personnel R&D de grandes entreprises. Ce travail de recherche m'a permis d'acquérir des compétences pluridisciplinaires en mécanique et matériaux, ainsi qu'un savoir scientifique théorique et pratique avec l'utilisation de matériel High-Tech d'un Centre d'études et de Recherche en cours de création. Enfin ce travail m'a permis d'acquérir une expérience professionnelle au sein d'une entreprise et d'un laboratoire universitaire avec toutes les particularités qui existent entre ces différentes entités.

Bibliographie

- [Alt'98] Taylan Altan, Peter Fallböhmer, Ciro A. Rodriguez and Tugrul Özel, *High Speed Cutting of Cast Iron and Alloy Steels – State of Research*, VDI BERICHTE NR. 1399, (1998).
- [Ala'97] Alam A.M., Chieragatti R., M. Akamatsu, Caumel Y., *Effect of machining procedures on the surface state of a low carbon steel*, PII S1359-6462(97)00284-4
- [Amm'90] Ammann J. *Etude des propriétés mécaniques du matériau composite WC-Co par frottement intérieur*. Physique. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (1990), p
- [Ascometal] Rapport technique – Ascometal
- [Bar'92] Barlier C. Girardin L., *Memotech Productique matériaux et usinage*, Editions Casteilla, Paris, ISBN 2-7135-1186-0, (1992), p 406.
- [Bou'04] Lakhdar Boulanouar, Mohamed Athmane Yallese, Kamel Chaoui, Effet du matériau à outil et des conditions d'usinage sur la qualité de surface de l'acier 100Cr6 trempé, Symposium International : Qualité et Maintenance au service de l'Entreprise QUALIMA01 – Tlemcen 2004
- [Bou'05] Boutin Y., L'usinage a Grande Vitesse (6 de 6), section : les matériaux d'outils de coupe <http://magazinemci.com/supmetal/articles/2005/08/aout0506.htm> _ 16/01/2008
- [Bou'00] K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, N. Vidakis, K. Efstathiou, T. Leyendecker, G. Erkens, R. Wenke, H.-G. Fuss, Optimization of the cutting edge radius of PVD coated inserts in milling considering film failure mechanisms, *Surface & Coatings Technology* 133-134 (2000) 501-507
- [Bou'03] Bouzakis K.-D., N. Michailidis, G. Skordaris, S. Kombogiannis, S. Hadjiyiannis, K. Efstathiou, E. Pavlidou, G. Erkens, S. Rambadt, I. Wirth, *Optimisation of the cutting edge roundness and its manufacturing procedures of cemented carbide inserts, to improve their milling performance after a PVD coating deposition*, *Surface & Coatings Technology* 163-164 (2003) 625-630
- [Bou'03] K.-D. Bouzakis, S. Hadjiyiannis, G. Skordaris, J. Anastopoulos, I. Mirisidis, N. Michailidis, K. Efstathiou, O. Knotek, G. Erkens, R. Cremer, S. Rambadt, I. Wirth, The influence of the coating thickness on its strength properties and on the milling performance of PVD coated inserts, *Surface & Coatings Technology* 174-175 (2003) 393-401
- [Bou'04] K.-D. Bouzakis, S. Hadjiyiannis, G. Skordaris, I. Mirisidis, N. Michailidis, G. Erkens, Wear development on cemented carbide inserts, coated with variable film thickness in the cutting wedge region, *Surface & Coatings Technology* 188-189 (2004) 636-643
- [Che-Haron 2001] C.H. Che-Haron, Tool life and surface integrity in turning titanium alloy, *Journal of materials Processing technology* 118 (2001) 231-237

- [Daw'05] Ty G. Dawson, Rthomas R. Kurfess, Quantification of tool wear using white light interferometry and three-dimensional computational metrology, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 591-596
- [Dev'04] A.Devillez, S. Lesko, W. Mozer, Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry, *Wear* 256 (2004) 56-65
- [End'02] Endres, William J., Kountanya, Raja K., Effects of corner radius and edge radius on tool flank wear, *Journal of Manufacturing Processes* (2002)
- [ENS'05] ENSAM *Usinage par enlèvement de copeaux*. Eyrolles, Paris. (2005), ISBN 2-212-1164869, p 294.
- [Fal'96] Fallböhmer, P., Altan, T., Tönshoff, H.K., Nakagawa, T., Survey of the Die and Mold Manufacturing Industry, *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 59 158-168
- [Fang '04] G. Fang, P. Zeng, Effects of tool Geometrical Parameters on the Chip Formation and cutting force in Orthogonal Cutting, *Trans. Tech. Publications, Switzerland* (2004)
- [Fang '05] Fang N. & Wu Q., The effect of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, (2005), 1178-1187.
- [Farh'03] Z.N. Farhat, Wear mechanism of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel, *Materials Sciences and Engineering A361* (2003) 100-110
- [Fis'05] Fischer-Cripps, A. C., Ed. *Nanoindentation*. Mechanical Engineering Series, Springer. (2004), p.
- [For'07] Lizé C., Formation en Tournage. Formasaf, documentation interne ValeniteSafety (2007).
- [Gerb'06] http://www.gerber-maschinen.ch/English/frames/frameset_test_en.htm (2006)
- [Ger'06] Germain, G. *Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser*. Mécanique, Matériaux et Procédés. Angers France, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Angers. (2006),
- [Grum '03] J. Grum, M. Kisin, Influence of microstructure on surface integrity in turning – part I : the influence of the size of the soft phase in a microstructure on surface-roughness formation, *International journal of machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1535-1543
- [Gun'03] Gunnberg, F.. *Surface Integrity Generated by Hard Turning*. Departement of Product and Productions Development, Chalmers University of Technology (Göteborg - Sweden). (2003), p
- [Hab'06] Habak, M. *Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100Cr6*. Mécanique - Matériaux - Procédés. France, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Angers. (2006)
- [Hua'05] Hua J., Bedekar V. & al., Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on

subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry. *Materials Science and Engineering A*, 394 (2005), 238-248.

- [Hua'99] Huang Luke H., Dr. C Joseph C. & Dr. Chang Tao, *Effect of Tool/Chip contact length on orthogonal turning performance*, *Journal of Industrial Technology*, vol. 15 N°2 Feb.1999 to April 1999
- [Hua'99] Luke H. Huang, Joseph C. Chen & Tao Chang, *Effect of Tool/Chip Contact Length on Orthogonal Turning Performance*, *Journal of Industrial Technology* Vol. 15 N°2, 1999
- [Kom'98] R. Komanduri, N. Chandrasekaran, L.M. Raff, *Effect of tool geometry in nanometric cutting : a molecular dynamics simulation approach*, *Wear* 219 (1998) 84-97
- [Kra'07] Krakhmalev P., Sukumaran J., Gaard A., *Effect of microstructure on edge wear mechanisms in WC-Co*. *International Journal of Refractory Metal & Hard Materials*, 25 (2007) 171-178.
- [Kud'99] Kudapa S., Narasimhan K. & al., *Characterisation and properties of MTCVD TiCN and MTCVD ZrCN coatings*, *Surface and Coatings Technology*, 120-121, (1999), 259-264.
- [Lar'02] Larsson A., Ruppi S., *Coatings produced by moderate temperature chemical vapour deposition*, *Thin Solid Films*, 402, (2002), 203-210.
- [Lis'04] List, G. (2004). *Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbures WC-Co par la caractérisation de l'interface outil-copeau - Application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351*. Science de l'Ingénieur - Mécanique. France, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.
- [Lis'05] List, G., M. Nouari, et al. (2005). *Wear behaviour of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy*. *Wear* 259: 1177-1189.
- [Mach'Pro 1978] Outils: optimisation du rendement des arêtes de coupe. Edition 16 novembre 1978.
- [Mach'Pro 1992] Outils: mort d'une arête en tournage. MACH'PRO. Edition 7 octobre 1992.
- [Mach'Pro 2000] Qui coupe quoi. Edition 15 novembre 2000.
- [Mey'79] Meyer R., *Evolution des outils de coupe: Aciers rapides et métaux durs*. *Matériaux & Techniques*, deuxième partie, juin 1979
- [Mou'04] A.Moufki, A. Devillez, D. Dudzinski, A. Molinari, *Thermomechanical modelling of oblique cutting and experimental validation*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004) 971-989
- [Mou'07] David Moulin, *Etude expérimental et numérique de l'adhésion d'un revêtement diamant CVD sur un substrat carbure de tungstène : application a l'usinage*. *Mécanique*, Université Paul Vervaine – Metz , 2007, p158.
- [Net-CVD] <http://www.groupe-thermi-lyon.com/fr/fiche-technique/CVD.pdf>
- [Net-MEB] MEB ch2 [<http://www.mssmat.ecp.fr/Principe-du-microscope-a-balayage,513>]
- [Nou'01] Nouari M., Molinari A., *Prediction of tool wears by diffusion in high speed*

machining. Edited by Dudzinski D., Molinari A. and Schultz, Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining, Metz France, 27-28-29 June 2001, Volume II, p284.

- [Oka'05] Okamoto S., Nakazono Y., Takada J. & al., Mechanical properties of WC/Co cemented carbide with larger WC grain size. *Materials Characterisation*, 55, (2005) 281-287.
- [Öst'06] Östberg G., Buss K., Reineck I. & al., Effect of TaC on plastic deformation of WC-Co and Ti(C,N) – WC – Co. *International Journal of refractory Metals & Hard Materials*, 24 (2006) 145-154.
- [Ôze'05] Tugrul Özel, Tsu-Kong Hsu, Erol Zeren, Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2005) 25: 262-269, DOI 10.1007/s00170-003-1878-5
- [Özel] Tugrul Özel, Tsu-Kong Hsu, Erol Zeren, Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 Steel, The State University of New Jersey, New Jersey 08854 USA
- [Pag'03] Pagès, C. (2003). *Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. Mécanique*. France, Ecole Centrale de Lyon.
- [Pou'98] Technique de l'Ingénieur, Principe et caractéristiques fondamentaux des procédés de coupe, cf.
- [Pou'02] Gérard Poulachon, Alphonse L. Moisan, Michel Dessoly, Contribution à l'étude des mécanismes de coupe en tournage dur, *Mécanique & Industries* 3 (2002) 291-299
- [Pou'03] Poulachon G., Bandyopadhyay B., Jawahir &al., The influence of microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. *International journal of Machine Tools & Manufacture*, 42 (2003), 139-144.
- [Pou'05] G. Poulachon, A. Albert, M. Schluraff, I.S. Jawahir, An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 211-218
- [Rah'99] M. Rahman, S. Ramakrishna, J.R.S. Prakash, D.C.G. Tan, Machinability study of carbon fiber reinforced composite, *Journal of Materials Processing Technology* 89-90 (1999) 292-297
- [Rec'03] Rech Joël, *Tournage dur : son influence sur la tenue des pièces mécaniques*, TraMetal Nov.2003
- [Rec'03] J. Rech, A. Moisan, Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 543-550
- [Rec'05] Rech J., Schaff M-J., Hamdi H., Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing. CPI, Marocco (2005)
- [Rec'05] Rech, J. *Cutting edge preparation and surface issues*. HSS Forum's International conference - Smart solutions for metal cutting, Aachen. 2-3 February (2005), p12.

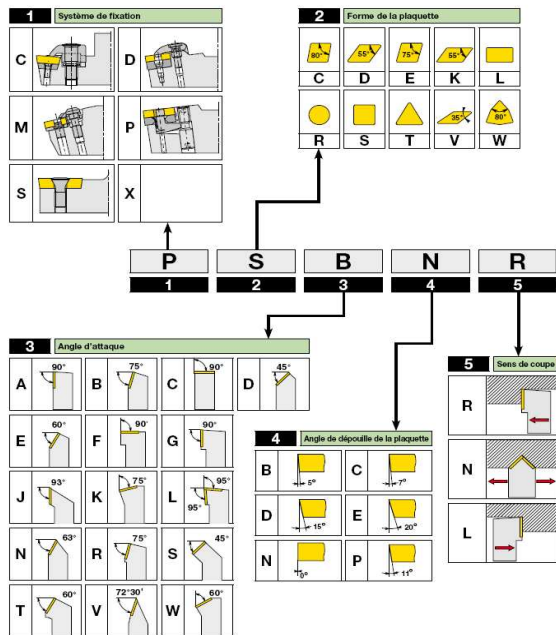
- [Rup'98] Ruppi S., Högrelius B., Wear characteristics of TiC, Ti(C,N), TiN and Al₂O₃ coatings in the turning of conventional and Ca –trated steels, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 16, (1998), 353-368.
- [Saf'07] Catalogue de tournage, 2007 – Documentation ValeniteSafety.
- [San'97] Sandvik, A. and Coromant. *Techniques modernes d'usinage - Guide Pratique*, Sandvik, ISBN 91-97 22 99 – 2, (1997).
- [Sath'08] Sathyan, S. and Melkote (2008). "Effect of finite edge radius on ductile fracture ahead of the cutting tool edge in micro-cutting of Al₂O₂-T₃." *Materials Science and Engineering A* **474**: 283-300.
- [Scr'97] Scripta Materials, vol 37. N°10 1559-1567 1997
- [Shaf'06] William R. Shaffer, *Cutting tool edge preparation*, Technical paper, Technical Paper for the (SME) Society of Manufacturing Engineers by <http://www.conicity.com/paper.htm> (28/03/2006), Conicity Technologies
- [Sha'05] Shaw, M. C. *Metal Cutting Principles*, OXFORD University press, second edition, ISBN 0-19-514206-3 (2005), p 651.
- [Sub'08] Subbiah S., Melkote N., Effect of finit edge radius on ductile fracture ahead of the cutting tooledge in micro-cutting of Al₂O₂-T₃. *Materials Science and Engineering A*, 474 (2008), 283-300.
- [Tech Ing] Passeron A. "Tournage" *Technique de l'Ingénieur*, traité Génie mécanique, BM 7 086.
- [Tech Ing] Bagur F., "Matériaux pour Outils de Coupe". *Technique de l'Ingénieur*, traité Génie mécanique, BM 7 080.
- [Thi'99] Thiele D., Melkote N., Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel, *Journal of Material Processing Technology*, 94 (1999), 216-226.
- [Thi'00] Thiele, Jeffrey D, Melkote, Shreyes N, *Effect of tool edge geometry on workpiece subsurface deformation and through-thickness residual stresses for hard turning of AISI 52100 steel*, *Journal of Manufacturing Processes*, 2000, p .
- [Toh'04] C.K. Toh, Surface topography analysis in high speed finish milling inclined hardened steel, *Precision Engineering* (2004)
- [Trombert] Trombert C., Usinabilité des aciers inoxydables. *Technique de l'Ingénieur*, traité Matériaux métalliques, M 726.
- [UGV'99] <http://www.si.ens-cachan.fr/ressource/r23/r23b.htm> « Usinage à grande vitesse » François GEISKOPF, Yann LANDON et Emmanuel DUC, LURPA, Décembre 1999
- [Vel'07] Velasquez, J. D. P. Etude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V. *Sciences des matériaux - Physique*. France, Université Paul Verlaine de Metz, (2007), p .
- [War'06] Warren A., Guo Y., Weaver M., The influence of machining induced residual stress and phase transformation on measurement of subsurface mechanical behaviour using

nanindentation. *Surface Coatings and Technology*, 200 (2006), 3459-3467.

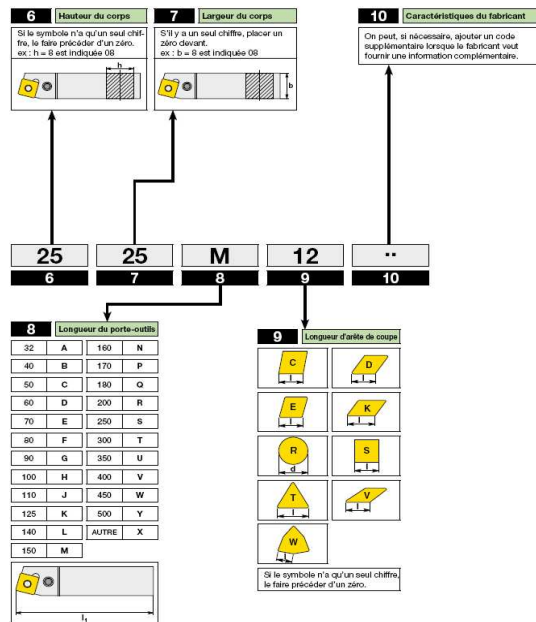
- [Woo'08] Woon K., Rahman M., Fang F. & al., Investigations of tool edge effect in micromachining: A FEM simulation approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 195, (2008), 204 -221.
- [Yan'02] Jiwang Yan, Katsuo Syoji, Tsunemoto Kuriyagawa, Hirofumi Suzuki, Ductil regime turning at large tool feed, *Journal of materials processing technology* 121 (2002) 363-372
- [Yan'01] L.J. Yang, Determination of the wear coefficient of tungsten carbide by a turning operation, *Wear* 250 (2001) 366-375
- [Yen'04] Yen , Jain, Altan, A finit element analysis of orthogonal machininh using different tool edge geometries. *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2004), 72-81.
- [Zho'01] Zhou, L. *Machining chip-breaking prediction with grooved inserts in steel turning*. Manufacturing Engineering. Angleterre, WORCESTER Polytechnic Institute. (2001)

Annexe 1 - Codification ISO des Portes Outils

PORTE-OUTILS Codification ISO



PORTE-OUTILS Codification ISO



Service client - Tél. +33(0)1.46.10.54.00 Fax: +33(0)1.46.10.54.54

Service client - Tél. +33(0)1.46.10.54.00 Fax: +33(0)1.46.10.54.54

ValeniteSafety

Catalogue tournage

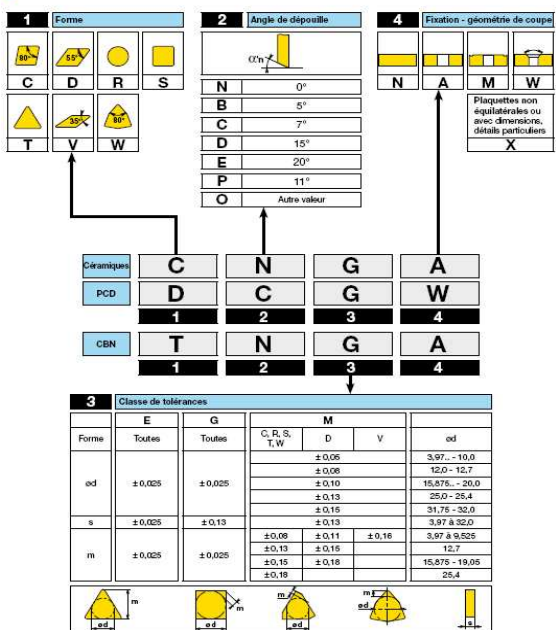
Catalogue tournage

ValeniteSafety

Annexe 2 - Codification ISO des plaquettes de coupe

PLAQUETTES DE TOURNAGE GENERAL Présentation des plaquettes en matériaux avancés

Codification ISO :

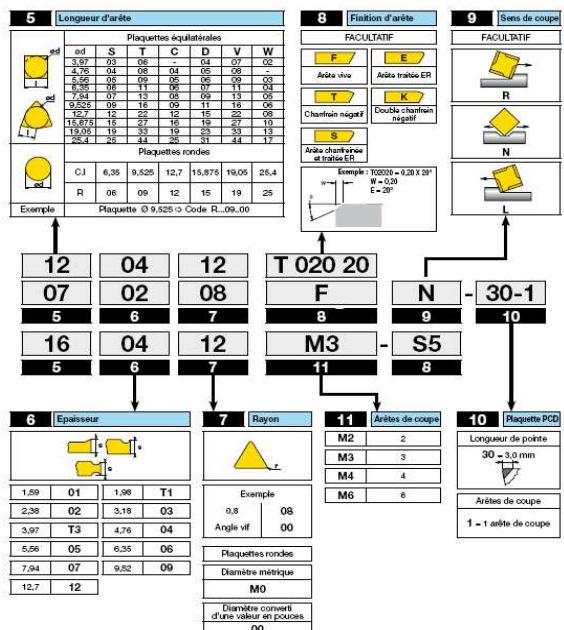


Service client - Tél. +33(0)1.46.10.54.00 Fax: +33(0)1.46.10.54.54

ValeniteSafety

Catalogue tournage

PLAQUETTES DE TOURNAGE GENERAL Présentation des plaquettes en matériaux avancés



Service client - Tél. +33(0)1.46.10.54.00 Fax: +33(0)1.46.10.54.54

Catalogue tournage

ValeniteSafety

Annexes 3 - Fiche technique de tour SOMAB Unimab 500

II. CARACTERISTIQUES

CAPACITES

Diamètre maxi de passage sur banc	500 mm
Diamètre maxi usinable en dressage	430 mm
Diamètre maxi usinable entrepointes	300 mm
Course transversale	272 mm
Course longitudinale	1300 mm
Distance maxi usinable avec mandrin	1270 mm
Distance maxi nez de broche/extrémité pointe de C.P.	1500 mm

POUPEE

Type du nez de broche	A1 8° ISO
Alésage de la broche	∅ 72 mm
Cône de la broche	∅ 80 cône 5 %
Vitesse de broche	60 à 2500 tr/mn

MOTEUR DE BROCHE

Vitesse maxi	8750 tr/mn
Puissance de 1800 tr/mn à 3600 tr/mn	18/24,2 kW

TRAINARD

Vis longitudinale	∅ 40 pas de 10 mm
Vis transversale	∅ 32 pas de 10 mm
Couple maxi en continu du moteur d'avance longitudinale	10,2 mN.
Couple maxi en continu du moteur d'avance transversale	10,2 mN.
Rapport des poulies moteur/vis	1/2 et 1/1
Poussée maxi en régime continu sur l'axe longitudinal	1000 da N.
Poussée maxi en régime continu sur l'axe transversal	1000 da N.
Vitesse de déplacement rapide du longitudinal	15 m/mn
Vitesse de déplacement rapide du transversal	15 m/mn

II-1

TOURELLE

Section des outils de chariotage	32 x 32 mm
Diamètre des barres d'alésage	∅ 40 mm

CONTREPOINTE

Diamètre du fourreau	90 mm
Course du fourreau	150 mm
Cône du fourreau pour pointe tournante	∅ Cône Morse n° 5

ENCOMBREMENT

Longueur hors tout	3400 mm
Largeur hors tout	2205 mm
Hauteur	2200 mm
Masse	7300 kg

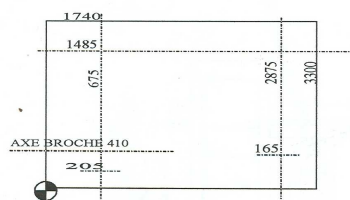
II-2

III. INSTALLATION ET MANIPULATION

FONDATION

- La machine ne demande pas de fondations préalables
- Il suffira de placer 4 plaques métalliques de 100 cm² et de 10 mm d'épaisseur entre les points d'appui et le sol, usinées en leur centre d'une empreinte de foret (∅ 20 mm).
- Amener ensuite les 4 vérins en contact avec les plaques.

POSITION DES POINTS D'APPUI



ALIMENTATION ELECTRIQUE

- La puissance totale installée est de 25 kw
- Alimentation triphasée : 3 x 400 V + terre
- Protection du câble par disjoncteur courbe D
- Section minimum des conducteurs d'alimentation : 10 mm²
- Point de raccordement : voir plan d'implantation page III-3

NETTOYAGE DE RECEPTION

- Le tour est en général enduit d'huile anticorrosion ; cette huile doit être enlevée et la machine nettoyée soigneusement.
- Le solvant à employer de préférence est le pétrole.

III-1

Annexes 4 - Tableau de mesures des rayons d'arête

Tableau de valeur correspondant aux ER entre 40 a 50µm avec forme géométrique W/H≈1 et W/H>1.

Plaquette N°	H (ER)	W/H
11.1	46	0.96
11.2	49	0.99
11.3	47	0.99
11.4	49	1.03
12.1	47	1.03
12.2	52	0.94
12.3	48	1.02
12.4	47	1.00
13.1	46	0.91
13.2	48	1.02
13.3	46	1.05
13.4	47	0.98
14.1	51	1.02
14.2	30	1.08
14.3	34	1.05
14.4	53	0.99
15.1	40	1.04
15.2	46	1.05
15.3	46	0.95
15.4	45	0.99
16.1	44	1.06
16.2	41	1.05
16.3	44	0.99
16.4	45	0.95
17.1	45	0.96
17.2	49	0.99
17.3	51	1.03
17.4	49	0.94
18.1	45	0.97
18.2	46	0.98
18.3	47	1.11
18.4	43	1.01
19.1	48	0.97
19.2	48	1.00
19.3	40	1.08
19.4	46	1.00
20.1	48	0.97
20.2	53	0.83
20.3	48	1.01
20.4	47	0.95

Plaquette N°	H (ER)	W/H
41.1	42	1.066
41.2	39	1.116
41.3	50	0.91
41.4	38	1.079
42.1	44	1.109
42.2	40	1.062
42.3	42	0.982
42.4	42	1.12
43.1	40	1.203
43.2	42	1.041
43.3	43	1.11
43.4	51	0.859
44.1	35	1.156
44.2	46	0.968
44.3	39	1.135
44.4	40	1.112
45.1	66	0.794
45.2	48	0.907
45.3	39	1.076
45.4	42	1.243
46.1	52	0.933
46.2	46	1.232
46.3	40	1.01
46.4	40	1.05
47.1	43	1.052
47.2	45	1.078
47.3	40	1.2
47.4	35	1.336
48.1	40	1.08
48.2	41	1.091
48.3	46	1.043
48.4	35	1.107
49.1	48	0.964
49.2	40	1.205
49.3	39	1.097
49.4	37	1.048
50.1	43	1.135
50.2	43	1.017
50.3	43	1.047
50.4	40	1.15

Plaquette N°	H (ER)	W/H
71.1	44	1.26
71.2	45	1.13
71.3	46	1.18
71.4	42	1.19
72.1	40	1.27
72.2	36	1.50
72.3	39	1.28
72.4	42	1.44
73.1	36	1.36
73.2	39	1.37
73.3	43	1.27
73.4	43	1.25
74.1	41	1.38
74.2	42	1.33
74.3	42	1.33
74.4	45	1.11
75.1	42	1.13
75.2	41	1.25
75.3	48	1.00
75.4	40	1.13
76.1	36	1.30
76.2	40	1.32
76.3	41	1.26
76.4	40	1.19
77.1	50	0.98
77.2	44	1.33
77.3	44	1.14
77.4	42	1.14
78.1	39	1.29
78.2	46	1.22
78.3	45	1.20
78.4	40	1.29
79.1	39	1.19
79.2	39	1.22
79.3	43	1.17
79.4	46	1.09
80.1	46	1.11
80.2	41	1.15
80.3	45	1.14
80.4	39	1.25

Tableau de valeur correspondant aux ER entre 40 a 50µm avec forme géométrique W/H≈1 et W/H>1.

Plaquette N°	H (ER)	W	W/H	Plaquette N°	H (ER)	W	W/H
101.1	59	54	0.91	131.1	42	49	1.16
101.2	59	55	0.92	131.2	46	47	1.02
101.3	60	52	0.87	131.3	44	45	1.03
101.4	58	52	0.91	131.4	48	49	1.02
102.1	56	52	0.93	132.1	46	46	1.00
102.2	54	52	0.96	132.2	46	51	1.12
102.3	56	52	0.92	132.3	47	50	1.06
102.4	56	53	0.95	132.4	53	53	1.01
103.1	57	49	0.85	133.1	44	48	1.08
103.2	52	52	1.00	133.2	48	51	1.05
103.3	59	54	0.92	133.3	44	50	1.13
103.4	60	53	0.89	133.4	48	51	1.06
104.1	60	55	0.92	134.1	40	39	0.96
104.2	65	57	0.87	134.2	46	46	1.00
104.3	56	54	0.96	134.3	41	42	1.02
104.4	59	54	0.92	134.4	46	47	1.03
105.1	65	55	0.85	135.1	42	43	1.01
105.2	57	54	0.94	135.2	47	51	1.09
105.3	59	56	0.95	135.3	42	45	1.08
105.4	60	53	0.88	135.4	56	52	0.93
106.1	60	56	0.94	136.1	36	37	1.02
106.2	58	52	0.90	136.2	44	41	0.93
106.3	57	52	0.91	136.3	38	35	0.91
106.4	59	54	0.91	136.4	46	45	0.97
107.1	60	57	0.95	137.1	40	40	0.99
107.2	62	58	0.94	137.2	46	46	1.00
107.3	61	56	0.92	137.3	40	44	1.10
107.4	62	56	0.90	137.4	44	44	1.01
108.1	62	58	0.94	138.1	42	43	1.04
108.2	60	55	0.92	138.2	44	44	1.01
108.3	66	58	0.87	138.3	40	50	1.24
108.4	63	56	0.89	138.4	42	44	1.04
109.1	67	58	0.87	139.1	48	55	1.16
109.2	64	57	0.90	139.2	45	45	1.00
109.3	64	58	0.90	139.3	48	52	1.08
109.4	66	58	0.89	139.4	46	49	1.07
110.1	67	61	0.91	140.1	47	54	1.14
110.2	67	57	0.84	140.2	42	46	1.10
110.3	66	58	0.89	140.3	46	49	1.08
110.4	66	59	0.89	140.4	42	44	1.06

Tableau de valeur correspondant aux ER de 70µm avec forme géométrique W/H≈1 et W/H>1.

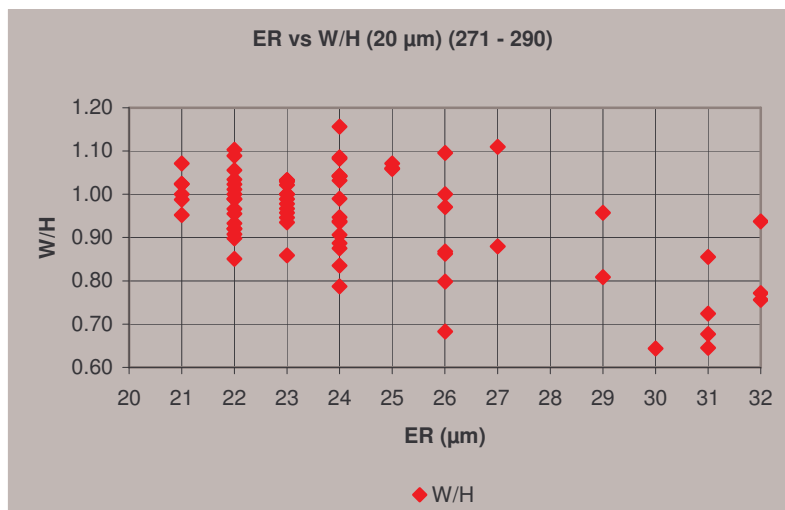
Plaquette N°	H(ER)	W	WH	Plaquette N°	H(ER)	W	WH	Plaquette N°	H(ER)	W	WH
191.1	74	59	0.80	221.1	74	72	0.98	251.1	63	81	1.29
191.2	69	58	0.85	221.2	74	71	0.96	251.2	74	83	1.12
191.3	72	62	0.86	221.3	73	74	1.01	251.3	68	83	1.22
191.4	71	60	0.85	221.4	68	67	0.98	251.4	72	80	1.12
192.1	74	61	0.83	222.1	71	67	0.94	252.1	68	93	1.37
192.2	69	61	0.89	222.2	70	71	1.01	252.2	77	96	1.25
192.3	69	62	0.90	222.3	78	73	0.94	252.3	75	98	1.31
192.4	67	58	0.87	222.4	70	71	1.01	252.4	80	88	1.10
193.1	66	59	0.90	223.1	74	78	1.06	253.1	64	79	1.23
193.2	80	64	0.80	223.2	72	70	0.98	253.2	70	77	1.10
193.3	68	59	0.86	223.3	72	72	1.00	253.3	68	70	1.03
193.4	71	65	0.91	223.4	69	71	1.02	253.4	69	70	1.01
194.1	71	61	0.86	224.1	67	73	1.09	254.1	68	80	1.17
194.2	73	63	0.86	224.2	73	71	0.98	254.2	70	89	1.28
194.3	71	63	0.89	224.3	72	68	0.95	254.3	70	90	1.29
194.4	70	64	0.91	224.4	70	72	1.03	254.4	74	92	1.24
195.1	74	65	0.88	225.1	75	77	1.03	255.1	70	76	1.09
195.2	80	69	0.86	225.2	71	70	0.98	255.2	69	82	1.19
195.3	78	65	0.83	225.3	75	77	1.03	255.3	72	77	1.07
195.4	81	69	0.85	225.4	69	72	1.05	255.4	70	81	1.16
196.1	68	63	0.93	226.1	78	70	0.89	256.1	70	74	1.06
196.2	76	62	0.81	226.2	70	72	1.03	256.2	63	83	1.31
196.3	71	63	0.89	226.3	76	80	1.06	256.3	67	77	1.15
196.4	73	68	0.93	226.4	74	75	1.01	256.4	67	77	1.16
197.1	72	61	0.85	227.1	75	77	1.02	257.1	75	93	1.24
197.2	68	62	0.92	227.2	76	81	1.07	257.2	73	75	1.03
197.3	66	55	0.84	227.3	76	79	1.04	257.3	71	87	1.23
197.4	73	63	0.86	227.4	82	74	0.91	257.4	69	81	1.17
198.1	75	65	0.87	228.1	88	71	0.81	258.1	68	82	1.21
198.2	69	60	0.87	228.2	69	71	1.02	258.2	70	77	1.09
198.3	74	64	0.86	228.3	80	77	0.96	258.3	64	82	1.29
198.4	68	62	0.91	228.4	66	71	1.07	258.4	69	85	1.24
199.1	73	65	0.89	229.1	68	71	1.04	259.1	67	84	1.25
199.2	76	60	0.79	229.2	68	69	1.02	259.2	69	85	1.23
199.3	74	64	0.87	229.3	70	72	1.03	259.3	64	84	1.32
199.4	74	65	0.88	229.4	70	69	0.98	259.4	69	79	1.15
200.1	68	61	0.89	230.1	69	71	1.03	260.1	70	82	1.17
200.2	73	65	0.90	230.2	79	72	0.91	260.2	66	82	1.25
200.3	70	61	0.87	230.3	72	70	0.98	260.3	67	81	1.22
200.4	70	65	0.93	230.4	73	78	1.06	260.4	65	77	1.19

Tableau de valeur correspondant aux ER de 20 – 25 μm .

Plaquette N°	H (ER)	W/H	Plaquette N°	H (ER)	W/H
271.1	31	0.86	281.1	23	0.96
271.2	26	0.86	281.2	25	1.06
271.3	27	0.88	281.3	26	1.00
271.4	29	0.96	281.4	22	0.91
272.1	23	0.95	282.1	30	0.64
272.2	24	1.04	282.2	22	1.10
272.3	23	1.03	282.3	24	0.94
272.4	43	0.56	282.4	24	1.04
273.1	22	1.09	283.1	32	0.77
273.2	31	0.65	283.2	22	0.90
273.3	23	1.03	283.3	24	1.16
273.4	24	0.89	283.4	24	0.99
274.1	23	0.86	284.1	23	0.98
274.2	24	0.88	284.2	23	1.00
274.3	26	0.68	284.3	22	0.96
274.4	24	1.04	284.4	25	1.07
275.1	25	1.06	285.1	31	0.72
275.2	31	0.68	285.2	22	1.02
275.3	23	0.99	285.3	24	0.79
275.4	22	0.85	285.4	27	1.11
276.1	22	0.92	286.1	24	1.03
276.2	21	1.02	286.2	22	0.99
276.3	24	0.84	286.3	22	1.01
276.4	24	1.08	286.4	24	0.94
277.1	26	0.97	287.1	29	0.81
277.2	22	1.03	287.2	23	1.02
277.3	21	0.99	287.3	22	0.92
277.4	24	0.95	287.4	24	1.09
278.1	23	0.97	288.1	26	0.80
278.2	23	1.00	288.2	21	1.00
278.3	22	1.06	288.3	26	1.10
278.4	22	0.93	288.4	24	0.91
279.1	21	1.07	289.1	22	0.97
279.2	21	1.02	289.2	23	1.03
279.3	23	0.94	289.3	19	0.96
279.4	22	1.00	289.4	21	0.95
280.1	32	0.76	290.1	37	0.77
280.2	23	1.37	290.2	42	0.69
280.3	26	0.87	290.3	32	0.94
280.4	22	0.99	290.4	38	0.73

Les tableaux représentent la valeur moyenne de (H) ER correspondant à quatre point de mesure sur la partie active de la plaquette.

Des graphiques des ER en fonction des forme W/H on été tracé pour permettre la sélection des rayons d'arête.



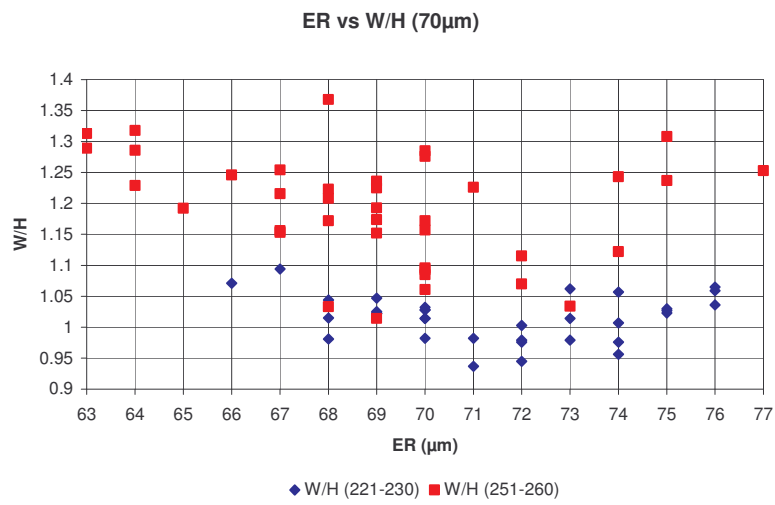
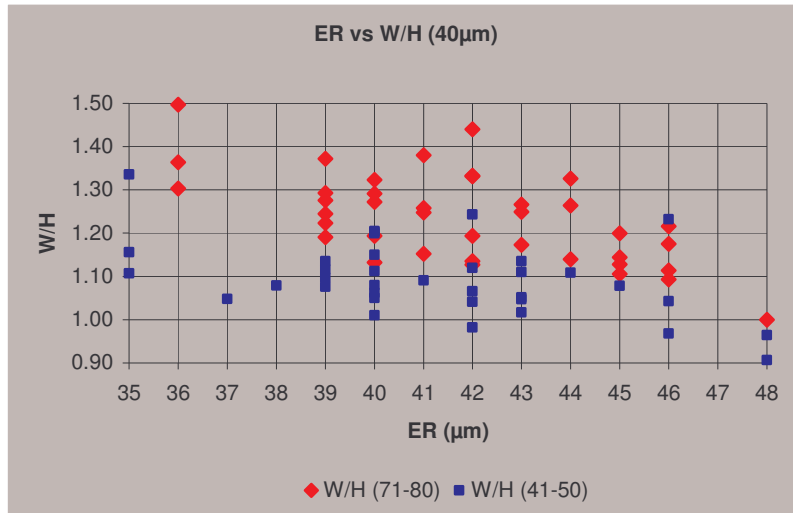


Tableau des plaquettes sélectionnées pour l'étude :

	N° arête	H (ER) μm	W/H
Vc = 300	272.3	23 \pm 2	1.03
	273.3	23 \pm 2	1.03
	275.3	23 \pm 2	0.99
Vc = 400	278.2	23 \pm 2	1
	281.1	23 \pm 2	0.96
	284.2	23 \pm 2	1

	N° arête	H (ER) μm	W/H
Vc = 300	42.2	40 \pm 2	1.062
	45.3	39 \pm 2	1.076
	46.3	40 \pm 2	1.01
Vc = 400	46.4	40 \pm 2	1.05
	48.1	40 \pm 2	1.08
	49.3	39 \pm 2	1.097

	N° arête	H (ER) μm	W/H
Vc = 300	72.1	40 \pm 2	1.27
	72.3	39 \pm 2	1.28
	73.2	39 \pm 2	1.37
Vc = 400	76.2	40 \pm 2	1.32
	78.1	39 \pm 2	1.29
	78.4	40 \pm 2	1.29

	N° arête	H (ER) μm	W/H
Vc = 300	222.2	70 \pm 2	1.01
	222.4	70 \pm 2	1.01
	223.4	69 \pm 2	1.02
Vc = 400	224.4	70 \pm 2	1.03
	226.2	70 \pm 2	1.03
	229.4	70 \pm 2	0.98

	N° arête	H (ER) μm	W/H
Vc = 300	254.2	70 \pm 2	1.28
	254.3	70 \pm 2	1.29
	255.2	69 \pm 2	1.19
Vc = 400	258.4	69 \pm 2	1.23
	259.2	69 \pm 2	1.24
	260.1	71 \pm 2	1.23

Annexes 5 - MEB : Principe de fonctionnement

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du microscope est basé sur l'émission d'électrons produits par une cathode et la détection de signaux provenant de l'interaction de ces électrons avec l'échantillon. Ces électrons qui irradient la surface de l'échantillon pénètrent profondément dans le matériau et affectent un certain volume. Ce volume dépend du numéro atomique moyen de l'échantillon et de l'énergie des électrons incidents. Dans ce volume d'interaction, les électrons du faisceau vont perdre leur énergie par collisions multiples avec les atomes du matériau générant ainsi de nombreux phénomènes secondaires. La figure ci-dessous illustre l'ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon. Toutes ces radiations sont produites simultanément et rendent possibles à la fois l'observation et l'analyse d'un objet choisi.

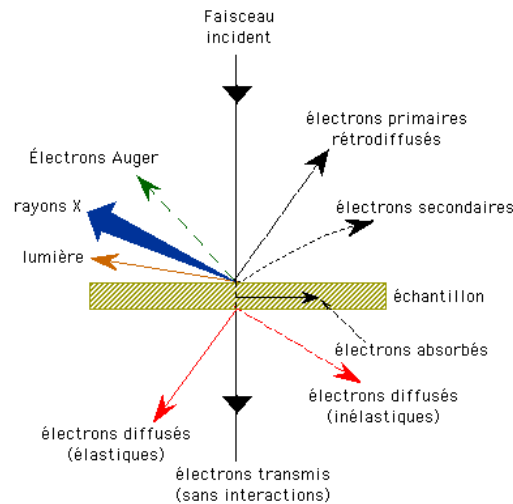


Figure 80: Définition des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon.

Les électrons secondaires sont créés par le passage d'un électron incident près d'un atome. L'électron incident peut transmettre une partie de son énergie à un électron peu lié de la bande de conduction provoquant ainsi une ionisation par éjection de ce dernier électron. L'énergie cinétique de ce dernier ne peut excéder 50 eV. Chaque électron incident peut créer plusieurs électrons secondaires. De part leurs faibles énergies, seuls les électrons secondaires émis proche de la surface (< 10 nm) peuvent s'échapper de l'échantillon et être recueillis par le détecteur. La moindre variation topographique va modifier la quantité d'électrons secondaires collectés.

Les électrons rétro-diffusés sont causés par la collision entre un électron incident et un atome de l'échantillon. Ce sont des électrons primaires qui ont réagi de façon élastique avec des noyaux d'atomes de l'échantillon. Ils sont dispersés dans toutes les directions avec une faible perte d'énergie. Du fait de leur forte énergie, les électrons rétro-diffusés récupérés peuvent provenir

d'une plus grande profondeur que celle des électrons secondaires. Ils ont une sensibilité topographique nettement inférieure. Du fait de leur origine, la quantité d'électrons rétro-diffusés croît avec le numéro atomique des atomes constitutifs de la cible.

L'émission d'un photon X permet à un atome ionisé sous l'impact du faisceau d'électrons, de revenir à l'état fondamental. Quand un électron d'une couche interne d'un atome a été éjecté, un électron d'une couche plus externe va combler la lacune. La différence d'énergies entre ces deux couches va provoquer l'émission d'un photon X.

Les photons X possèdent une énergie caractéristique propre à chaque élément qui les a émis. Ces photons sont recueillis et classés suivant leurs énergies (EDS) ou leurs longueurs d'onde (WDS) pour donner des informations sur la composition de l'échantillon. Ils sont très pénétrants et sont émis d'un volume d'interaction de l'ordre du micron cube. Les détecteurs de type EDS sont des semi-conducteurs (Silicium dopé au Lithium). [<http://www.mssmat.ecp.fr/Principe-du-microscope-a-balayage,513>].

Annexes 6 - Estimation de la matière et des temps de préparations

Débit des barres d'aciers :

	Vc1 = 300m/min		TOTAL	Vc2 = 400m/min		TOTAL
	1 courbe usure ER40 durée <i>72min</i>	Reproductibilité des résultats 3x	On a 5 cas	1 courbe usure ER40 durée <i>22min</i>	Reproductibilité des résultats 3x	On a 5 cas
Nombre de lopins utilisés	24 lopins	24 x 3 = 72 lopins	72 x 5 = 360 lopins	20 lopins	20 x 3 = 60 lopins	60 x 5 = 300 lopins

	Total de matière nécessaire pour Vc1 et Vc2	Matière à commander (lopin)	En barre de 1 m avec $\Phi 80$ mm
<i>Pour les 5 cas</i>	360 + 300 = 660 <i>lopins</i>	660 - 160 = 500	72 (+12)

Découpe des lopins : 5 min/coupe. Pour 72 barres il faudra environ 55h de débit.

Gamme d'usinage pour préparation des lopins avant tests :

Pour 72 barres environ il faudra approximativement une semaine de préparation.

Annexes 7 -Exemple : Quantification de l'usure (Vb, Vp, Kt) sur les plaquettes pour le temps d'usinage T6 = 6 minutes, Vc 300 et 400 m/min.

Tableau des plaquettes ER 40 μm , W/H=1, après 6 minutes d'usinage à 300 m/min :

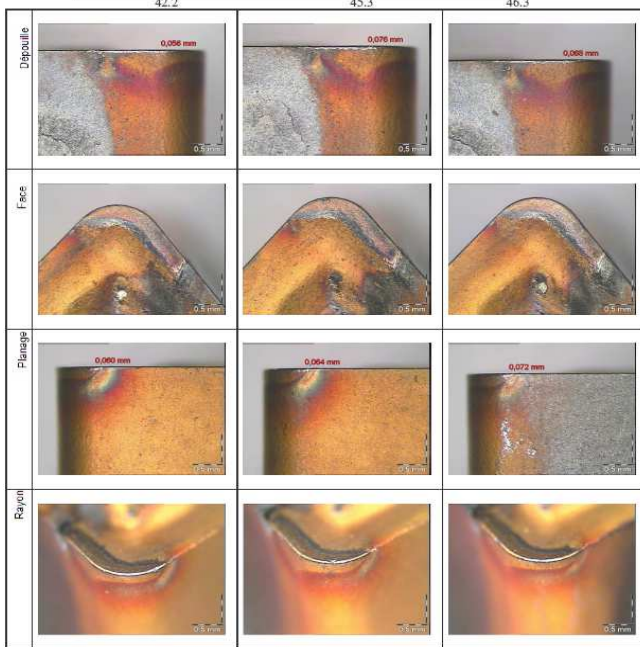


Tableau des plaquettes ER 40 μm , W/H>1 après 6 minutes d'usinage à 300 m/min :

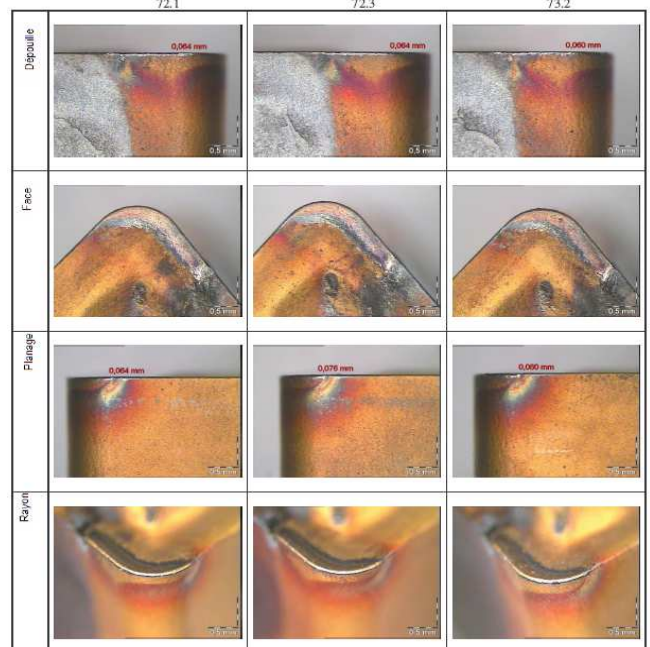


Tableau des plaquettes ER 70 μm , W/H=1, après 6 minutes d'usinage à 300 m/min :

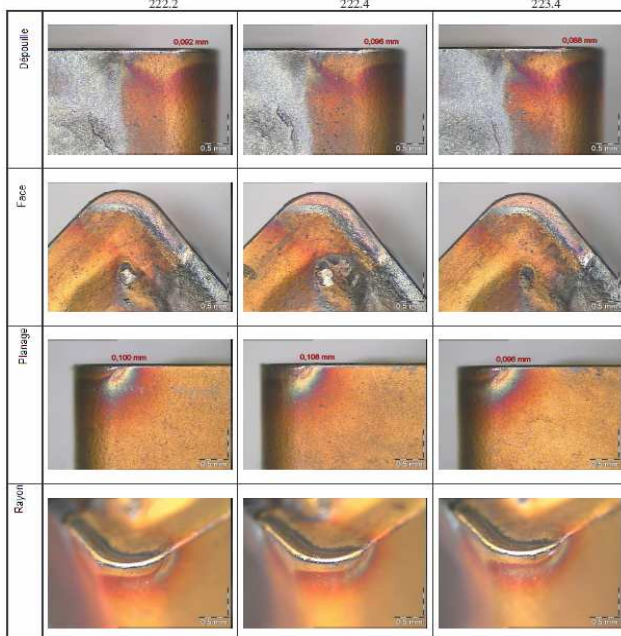


Tableau des plaquettes ER 70 μm , W/H>1, après 6 minutes d'usinage à 300 m/min :

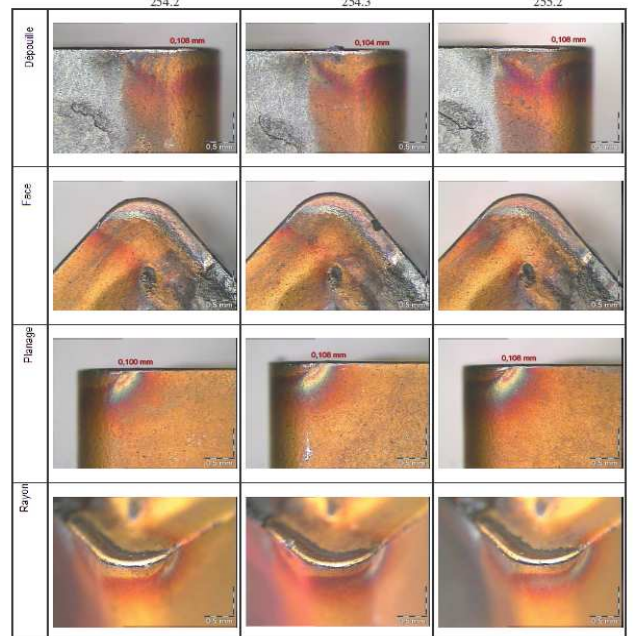


Tableau des plaquettes ER 23 μm , après 6 minutes d'usinage à 300 m/min :

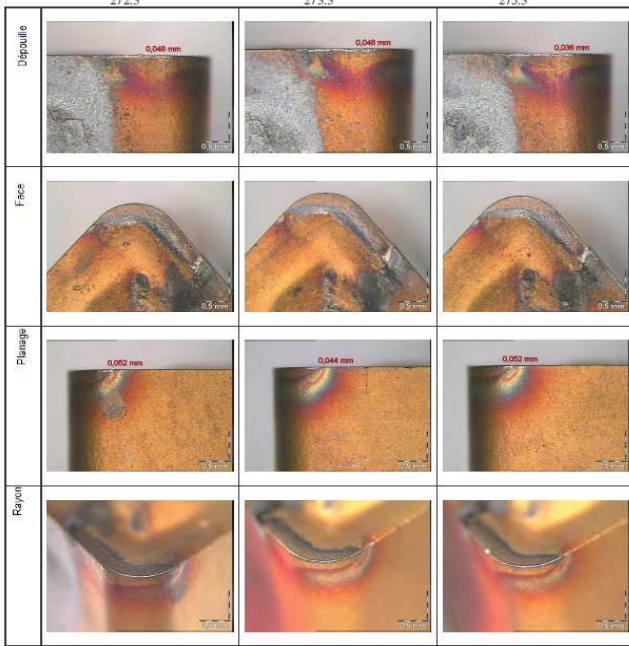


Tableau des plaquettes ER 40 μm , W/H = 1, après 6 minutes d'usinage à 400 m/min :

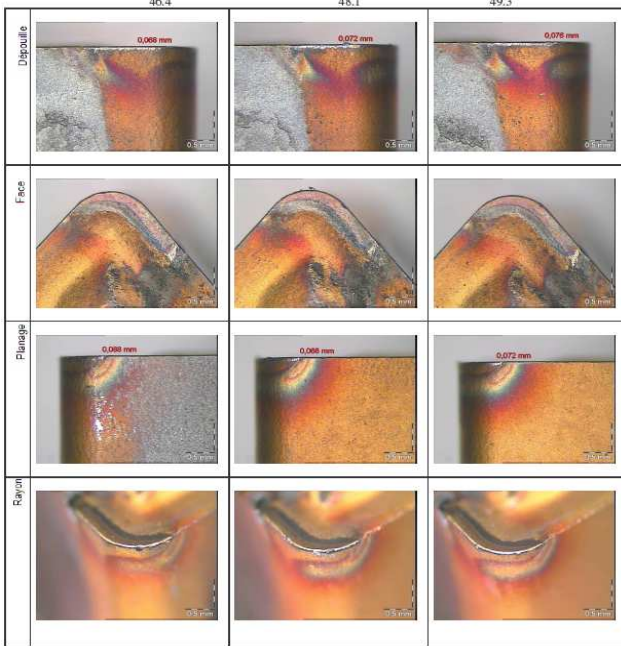


Tableau des plaquettes ER 40 μm , W/H > 1, après 6 minutes d'usinage à 400 m/min :

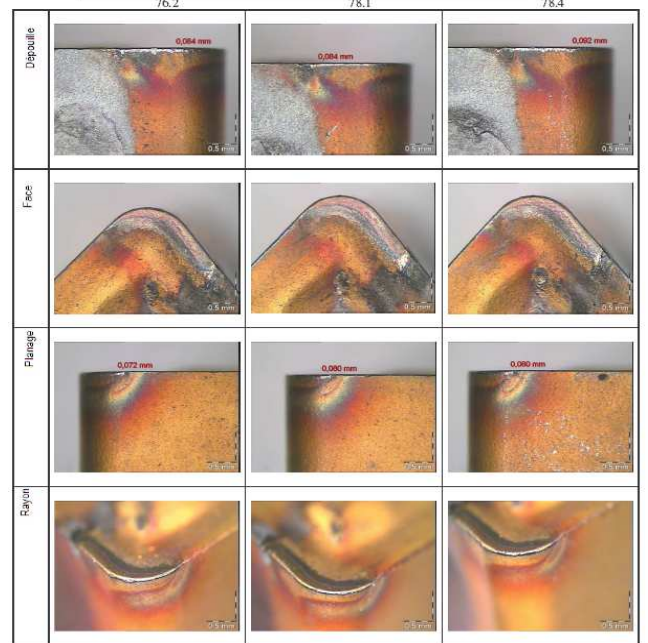


Tableau des plaquettes ER 70 μm , W/H=1, après 6 minutes d'usinage à 400 m/min :

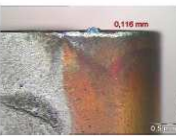
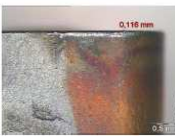
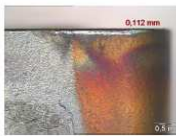



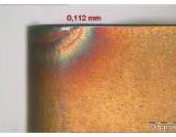
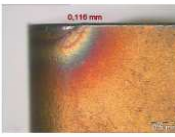
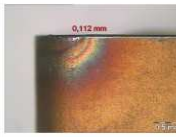


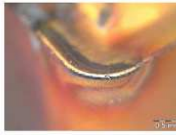
	224.4	226.2	229.4
Dégauffe			
Face			
Planaire			
Rayon			

Tableau des plaquettes ER 70 μm , W/H > 1, après 6 minutes d'usinage à 400 m/min :







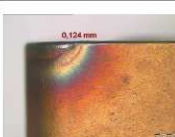
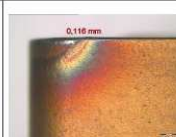
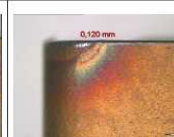



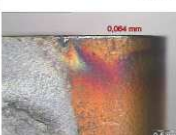
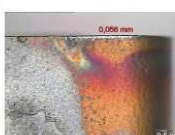




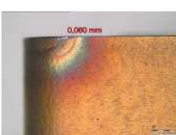
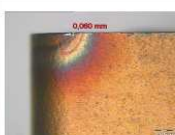
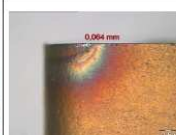
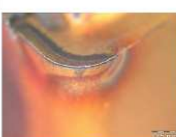


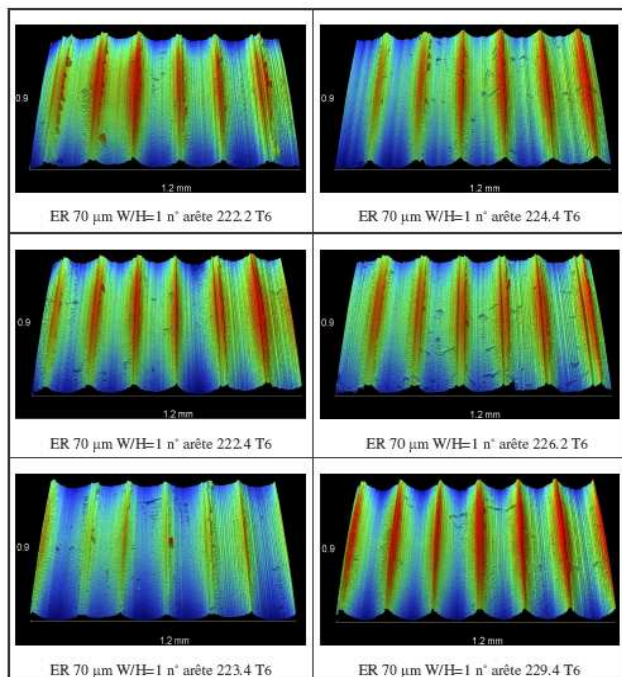
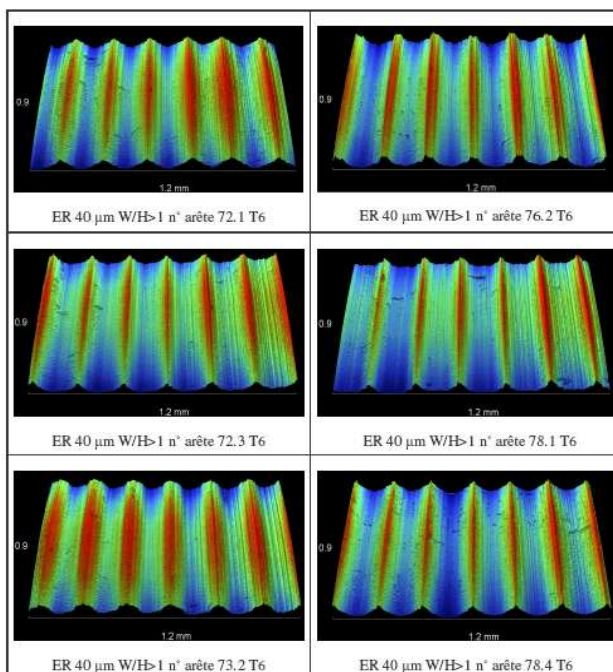
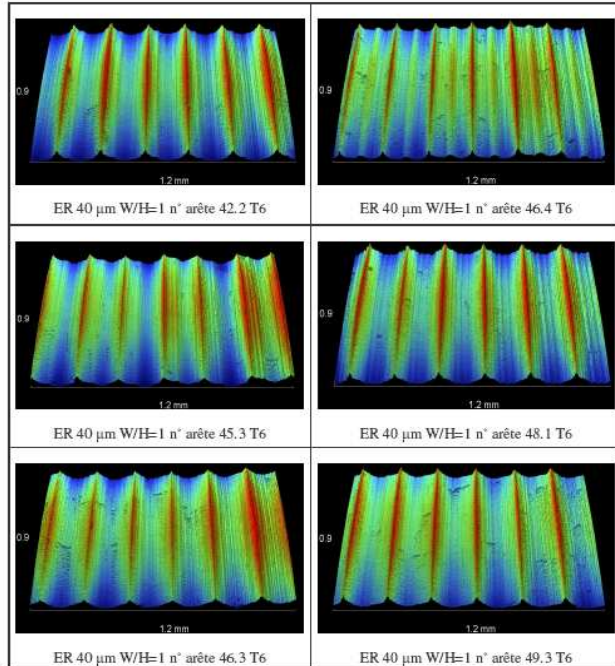
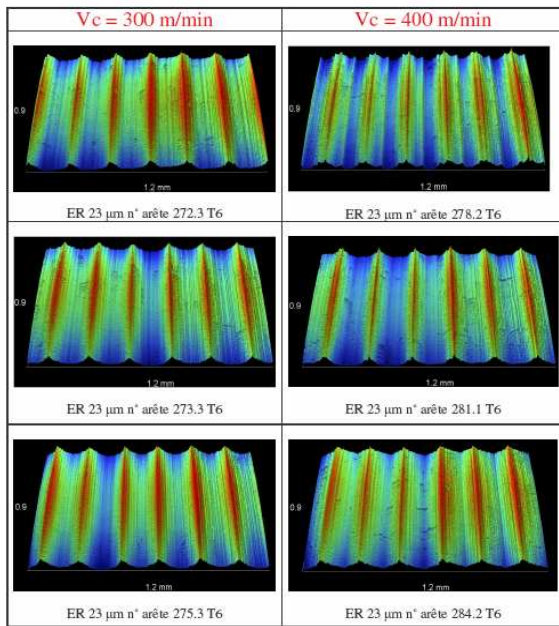
	258.4	259.2	260.1
Dégauffe			
Face			
Planaire			
Rayon			

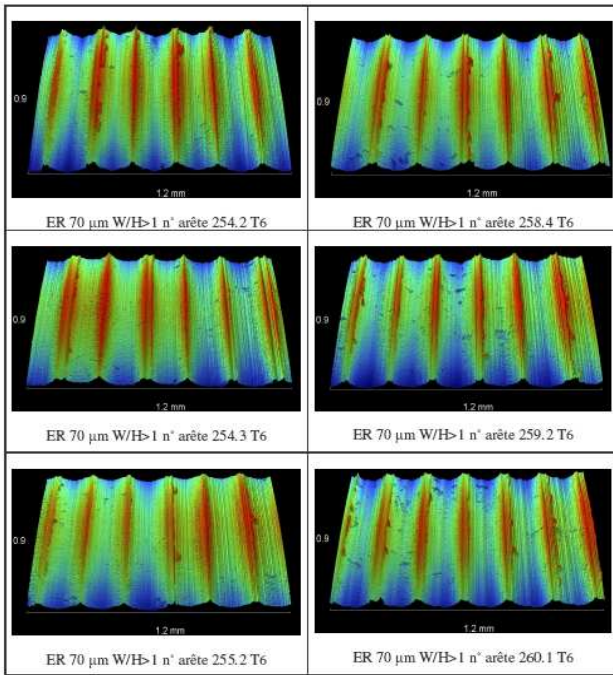
Tableau des plaquettes ER 23 μm , après 6 minutes d'usinage à 400 m/min :

	278.2	281.1	284.2
Dégauffe			
Face			
Planaire			
Rayon			

Annexes 8 -Exemple : Topographie de la surface de la pièce à T6

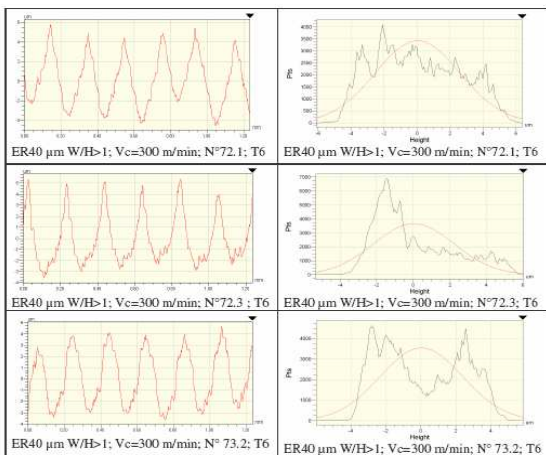
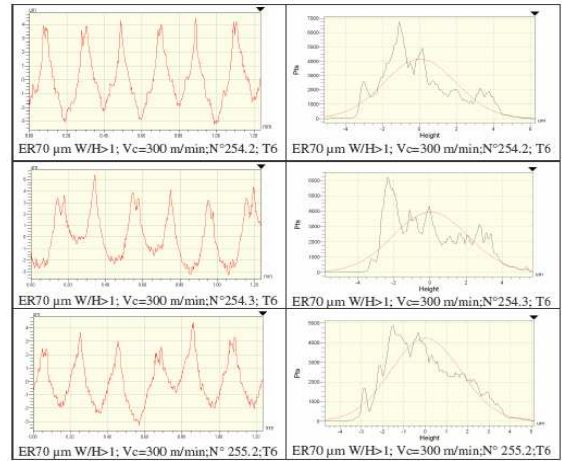
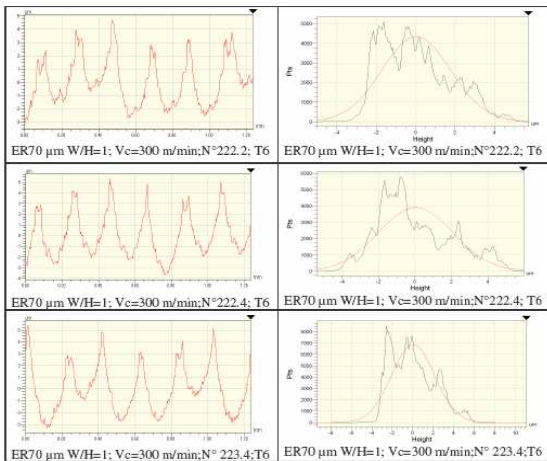
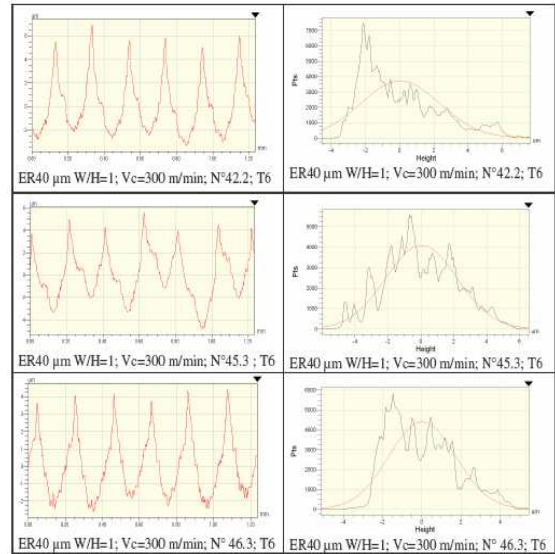
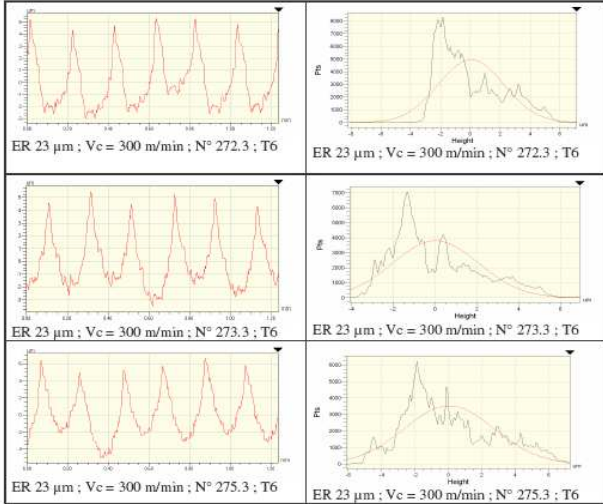
Topographie de la surface après 6 minutes d'usinage pour chaque ER :



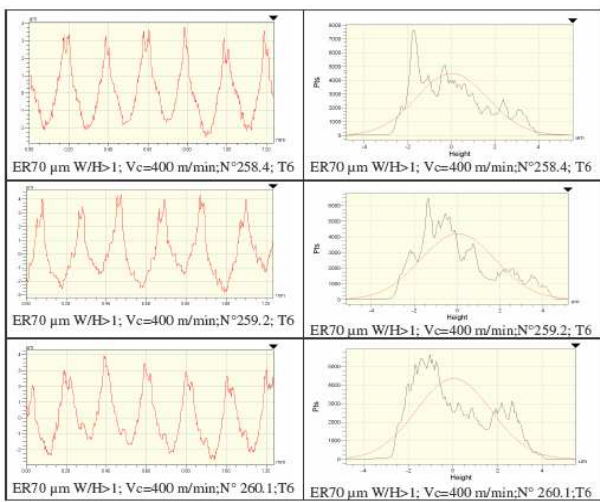
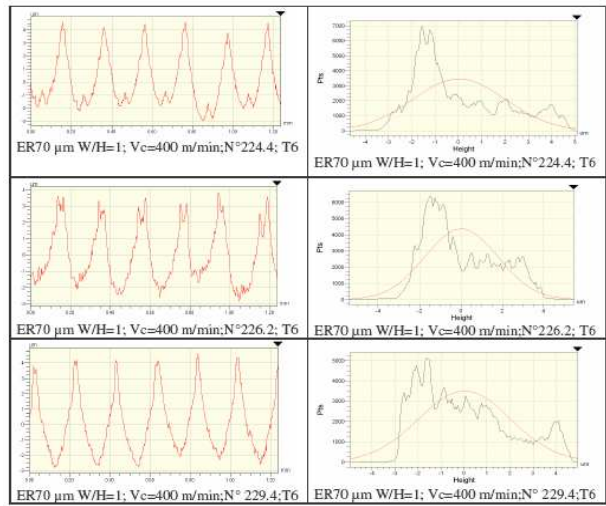
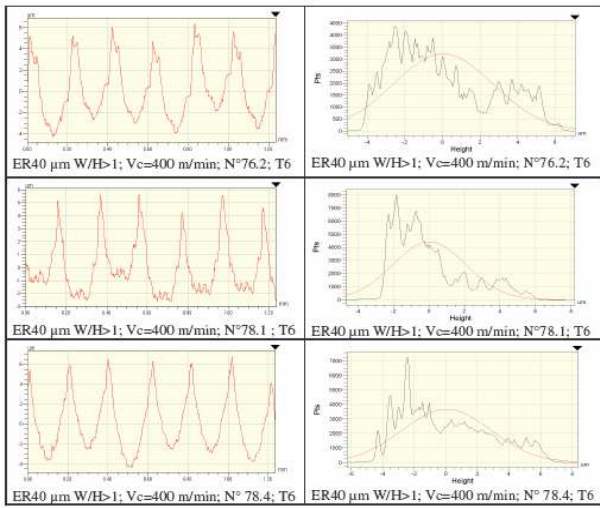
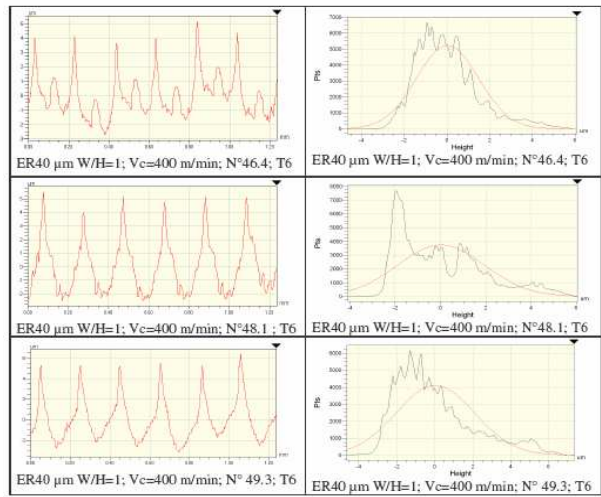
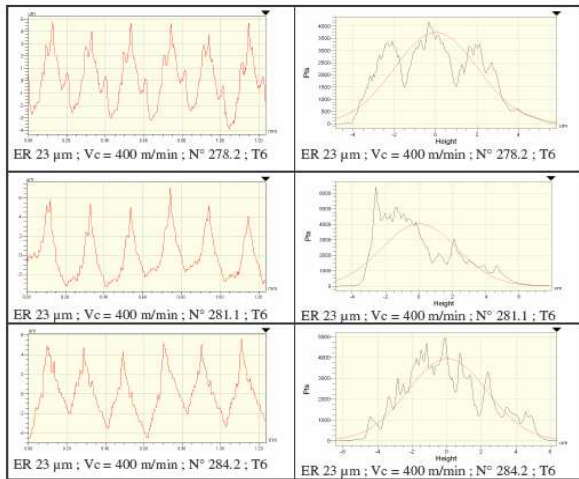


Annexes 9 -Exemple : Profil topographique de la surface de la pièce après 6 minutes d'usinage. (avec histogramme des piques et creux)

Vc = 300 m/min après 6 minutes d'usinage



Vc = 400 m/min après 6 minutes d'usinage



Annexes 10 -Exemple : Image MEB (suivi du profil d'usure dans le temps)

Image MEB des plaquettes ER 23µm après 6 min d'usinage (x50)

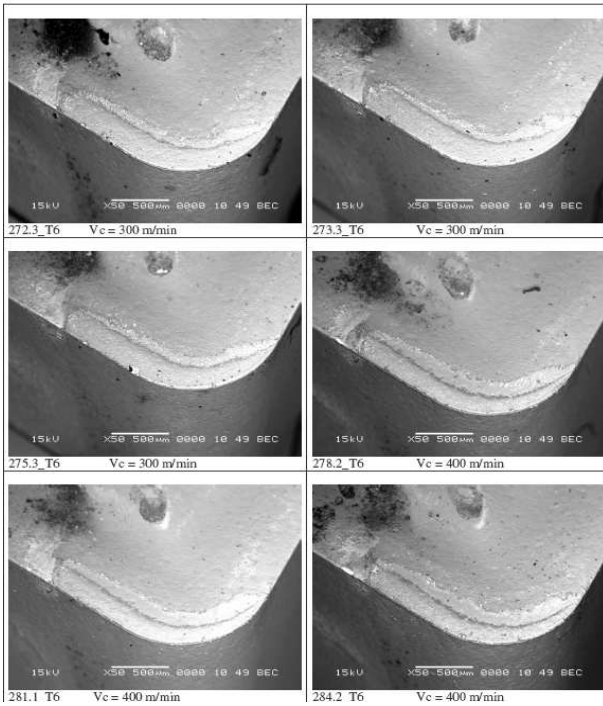


Image MEB des plaquettes, ER 40µm, W/H=1, après 6 min d'usinage (x50).

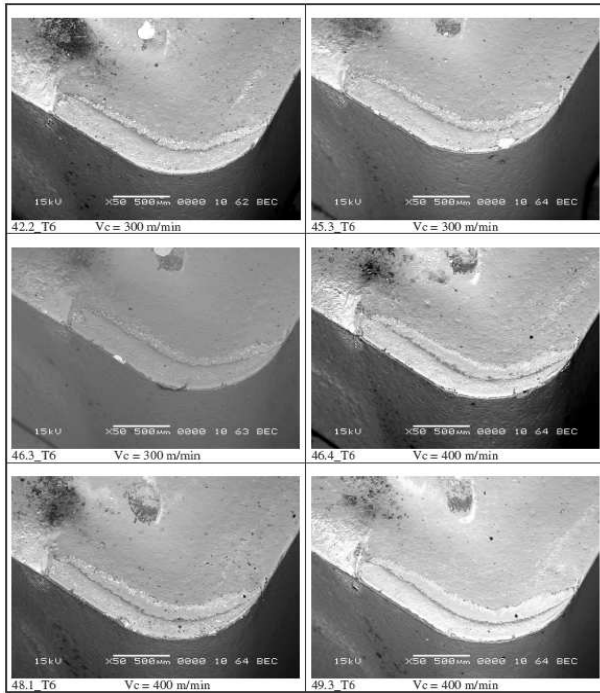


Image MEB des plaquettes, ER 40µm, W/H>1, après 6 min d'usinage (x50).

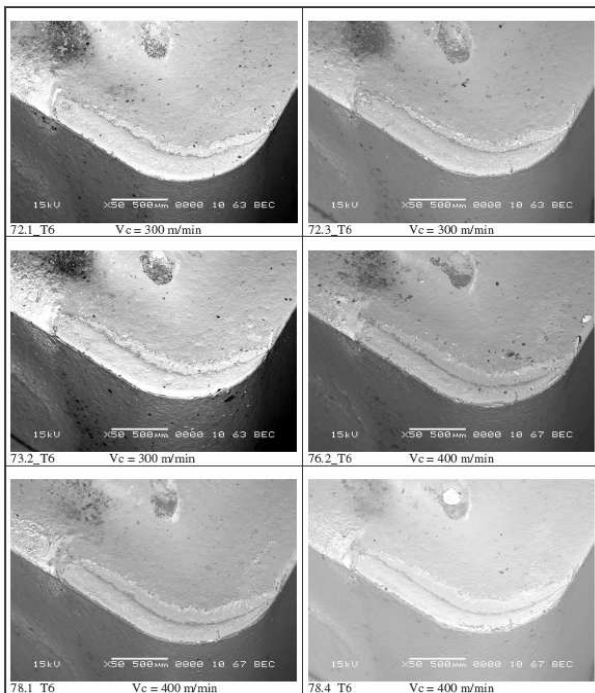


Image MEB des plaquettes, ER 70µm, W/H=1, après 6 min d'usinage (x50).

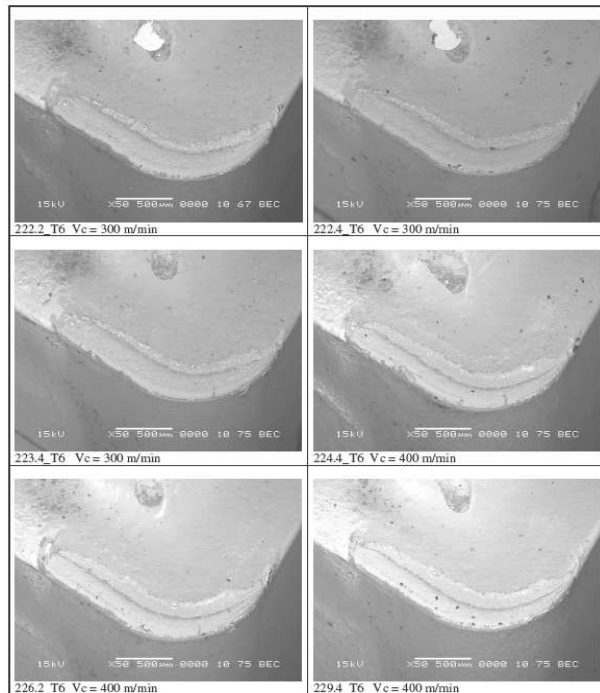
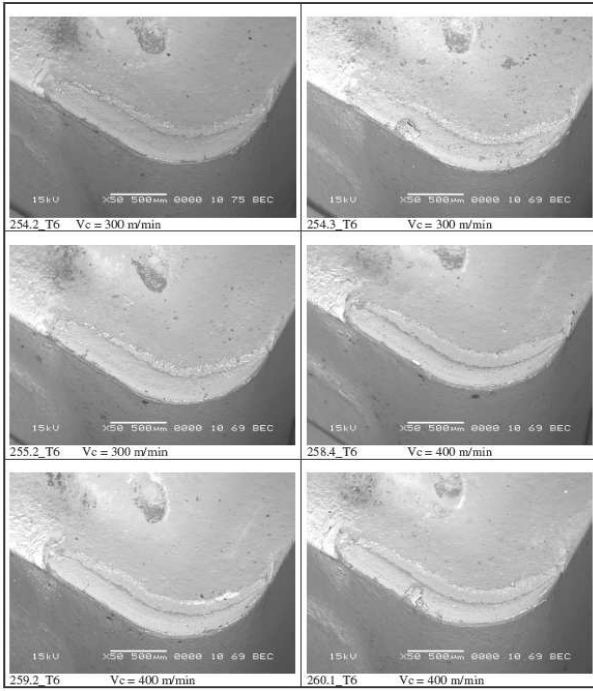


Image MEB des plaquettes, ER 70µm, W/H>1, après 6 min d'usinage (x50).



Listes des tableaux

Tableau 1: Valeurs nominales et valeurs réelles des mouchages d'arête mesurées sur les plaquettes carbure.....	9
Tableau 2: Mesures de mouchage d'arête effectuées sur la partie active pour trois fabricants de plaquettes pour des applications comparables.....	10
Tableau 3: Propriétés des différents outils de coupe et revêtement	22
Tableau 4: Comparatif des propriétés de certains revêtements.....	23
Tableau 5: Influence de l'angle d'attaque sur certains paramètres de la coupe.....	28
Tableau 6: Type de copeau caractéristique de l'usinage traditionnel et de l'usinage grande vitesse.....	34
Tableau 7: Classification normalisé des formes des copeaux obtenue en tournage.....	37
Tableau 8: Principaux mécanismes d'usure des outils de coupe en usinage.....	39
Tableau 9: Résumé des travaux de recherche développé par plusieurs auteurs sur le comportement des micros géométries d'arête. Analyse de l'influence des conditions de coupe et des contraintes résiduelles engendrées en surface après usinage	50
Tableau 10: Composition et propriété de la plaquette CNMG 12-04-08 M5.....	53
Tableau 11: Classification du porte outil employé.....	55
Tableau 12: Composition chimique de l'acier, analyse chimique (référence Ascometal).....	55
Tableau 13: Dureté de l'acier caractérisé par Ascometal (HB 2.5), (référence Ascometal).....	55
Tableau 14: Tableau des conditions de coupe testées pour l'étude de V_{cmin}	70
Tableau 15: Conditions de coupe et rayon d'arête utilisées pour les essais d'usure sans revêtement.....	71
Tableau 16: Revêtements et systèmes de déposition employés pour cette étude.....	74
Tableau 17: Résumé des mesures des ER et forme W/H, avant et après revêtement.....	75
Tableau 18: Image du rayon de bec de la plaquette. Différences de comportement entre les revêtements testés à différentes conditions de coupes.....	76
Tableau 19: Tableau des conditions de coupe testées et des acuités ER utilisé pour l'étude de V_{cmin}	77
Figure 46: Détermination de la vitesse de coupe minimale en fonction de l'effort spécifique de coupe pour les conditions de coupe (f 0.2mm/tr, a_p 1mm) (f 0.3mm/tr, a_p 2mm). Evolution de l'effort spécifique de coupe en fonction des ER 25, 40 et 70 μm	78
Tableau 20: Conditions de coupes utilisée pour la réalisation des diagrammes copeaux.....	79
Tableau 21: Présentation du couple (a_p , f) choisi avec valeur de l'effort spécifique de coupe correspondant pour chaque rayon d'arête.....	83
Tableau 22: Acuité d'arête sélectionnée pour l'étude.....	86
Tableau 23 : Valeur et identification des acuités d'arête exploitées pendant les tests d'usages.....	91
Tableau 24: Résumé de l'évolution de la forme géométrique du copeau en fonction de l'usure au long du temps.....	98
Tableau 25: Image MEB de l'évolution de l'usure sur la plaquette au cours du temps d'usinage pour les rayons ER 23 et 70 μm à la vitesse 300 m/min.....	99
Tableau 26 : valeurs de dureté mesurée sur la surface avec l'écart de mesures correspondant.....	110
Tableau 27 : Images métallographiques en coupe de la pièce usinée représente la déformation superficielle engendrée en début d'usinage.....	111

Listes des figures

Figure 1 : Les différentes configurations de géométrie des rayons d'arête.	9
Figure 2 : Outil de coupe lors d'une opération de tournage.....	15
Figure 3 : Paramètres de coupes qui influencent l'intégrité de surface en usinage, sous la forme d'un diagramme d'Ishikawa.	15
Figure 4 : Historique de l'acier au carbure de tungstène revêtu, chariotage d'un cylindre de $\varnothing 100$, longueur de 500 mm.	16
Figure 5 : Positionnement comparatif des propriétés de différents matériaux de coupe.....	17
Figure 6 : Procédure de fabrication du carbure de tungstène.	20
Figure 7: Microstructures de plaquette carbure après frittage. Relation entre la grosseur des grain et le % de Co dans le carbure cémenté	21
Figure 8: Rôle des revêtements	21
Figure 9 : évolution de la conductivité thermique en fonction de la température des constituants des outils et des revêtements,	23
Figure 10: dimension de coupe en tournage (NF E 66-506).....	26
Figure 11 : Angles de coupe d'un outil simple.....	27
Figure 12: Incidence de l'angle d'attaque κ_r sur la longueur de coupe (L), et sur l'épaisseur du copeau (h)	28
Figure 13: Effort de compression et force au niveau de l'arête de coupe.	29
Figure 14 : Composantes des efforts mesurés pendant une opération de tournage (chariotage).	30
Figure 15: Carte thermiques d'un outil pour différentes vitesses de coupe.....	31
Figure 16: Formation du copeau dans la coupe orthogonale. Définition des zones de cisaillement primaire (I), secondaire (II), tertiaire (III). (φ : angle du plan de cisaillement, α : angle de dépouille, γ : angle de coupe).....	32
Figure 17 : Ordre de grandeurs des vitesses de coupe pour différents matériaux, en usinage conventionnel, usinage transitoire et usinage grande vitesse.....	34
Figure 18 : Evolution de la forme du copeau en fonction de la dureté et de la vitesse de coupe [Poul'98].	35
Figure 19:Champs de recherche sur le fractionnement du copeau. L'intérêt de l'étude des copeaux obtenus en usinage.....	36
Figure 20: Distribution des flux de chaleurs générés en coupe orthogonale.....	38
Figure 21 : Image MEB avec usure combinée. Diagramme de combinaison des différents mécanismes d'usure en fonction de la température.....	40
Figure 24: Exemple de préparations d'arête typiques : (a) type T, (b) type E, (c) type S.	42
Figure 27: Familles de géométries des arêtes préparées. De gauche à droite : arête circulaire unitaire, avec $W/H=1$, suivie d'une arête à forme plate puis une arête en « chute d'eau ».....	44
Figure 28: Coupe orthogonale : (a) avec arête tranchante, (b) avec renforcement d'arête.	45
Figure 29:Usure des outils en fonction des différents rayons d'arête.	47
Figure 30:Comportement du rayon d'arête sur les composantes des efforts (radial, axial) et sur les duretés de surface pièce.	48
Figure 31: Effet de l'acuité d'arête sur l'avance et la rugosité arithmétique de surface (R_a).	48
Figure 32: Image métallographique en coupe de la plaquette CNMG 120408 M5. A gauche, acuité d'arête de $25-30\mu\text{m}$, à droite, acuité de $70\mu\text{m}$	54
Figure 33:Structure métallographique de l'acier 27MnCr5 à l'état recuit après indentation. Mis en évidence des phases perlite lamellaire et fer α après attaque au nital (3%).	56
Figure 34: Tour CNC SOMAB 500 utilisé pour les essais de chariotage. A droite la photo de la pièce, de l'outil monté sur la table dynamométrique.....	56
Figure 35: Force de coupe en tournage.....	57
Figure 36: Dynamomètre TAB6.....	57
Figure 37: Schéma de la méthodologie suivie pour la préparation du rayon d'arête.	59

Figure 38: Présentation d'un exemple du menu pour la mesure d'une plaquette TCMT. A droite la définition du profil de H et de W enregistré.....	60
Figure 39: Schéma de préparation des lopins à usiner.	61
Figure 40: Système d'interférométrie à lumière blanche. a) Schéma conventionnel d'un interféromètre à lumière blanche (balayage vertical), b) Profilomètre Wyko NT 1100Veeco, c) motif d'interférence (frange).	63
Figure 41: (a) Système de nano indentation, (b) Evolution du déplacement en fonction de la charge.	65
Figure 42: Détermination de la vitesse de coupe minimale en fonction de l'effort spécifique de coupe. Définition de la zone de fonctionnement.....	70
Figure 43: Image MEB correspondante à une plaquette carbure non revêtue, ER 30 μ m, après usinage de l'acier 27MnCr5 : (a) arête rapportée sur la face de dépouille, (b) grossissement sur la zone de dépouille, (c) arête rapportée collée par pression sur le rayon d'arête, (d) arête rapportée sur la face de coupe qui longe le rayon de bec de la plaquette.....	71
Figure 44: (a) - Courbe d'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage, (b) représentation de l'arête rapportée sur la face de dépouille de la plaquette, pour un ER 30, 40 et 60 μ m après 10 seconde d'usinage.....	72
Figure 45: Composantes des efforts de coupe mesurées pour un rayon d'arête de 30 et 60 μ m superposé avec une arête rapporté.	73
Figure 46: Détermination de la vitesse de coupe minimale en fonction de l'effort spécifique de coupe pour les conditions de coupe (f 0.2mm/tr, ap1mm) (f 0.3mm/tr, ap 2mm). Evolution de l'effort spécifique de coupe en fonction des ER 25, 40 et 70 μ m.....	78
Figure 47: Diagramme copeau correspondant aux rayons d'arête 25, 40 et 70 μ m.	79
Figure 48: Diagramme correspondant aux sections copeau avec mis en évidence de la zone de travaille préconisée pour les trois rayons d'arête : 25, 40 et 70 μ m.	79
Figure 49: Graphique correspondant à l'évolution n de l'effort spécifique de coupe (K_c) en fonction des avances pour un ER 23 μ m.	81
Figure 50: Graphique correspondant à l'évolution de l'effort spécifique de coupe (K_c) en fonction des avances pour un ER 40 μ m.	81
Figure 51: Graphique correspondant à l'évolution de l'effort spécifique de coupe (K_c) en fonction des avances pour un ER 70 μ m.	82
Figure 52: (a) Plan de la plaquette CNMG120408 M5 avec les sections ap et f, (b) section de la plaquette pour une avance 0.12, (c) section de la plaquette pour une avance 0.3.	82
Figure 53: Plan de la plaquette CNM G120408 M4.....	83
Figure 54: Courbe d'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min. (a) (b) (c) et (d) représente les formes d'usure paru après 18 minutes d'usinage sur la face de coupe et sur la face de dépouille de la plaquette. (a) et (b) correspondant a la vitesse 300 et (c) et (d) à la vitesse 400 m/min.....	84
Figure 55: Organigramme de la démarche suivi pendant les tests d'usinage.....	87
Figure 56: Organigrammes représentant la méthodologie de caractérisation et d'analyse.....	88
Figure 57: Courbe d'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 (a) et 400 (b) m/min.	92
Figure 58: Valeur moyenne de l'usure en dépouille (V_b) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min.....	94
Figure 59: Images MEB des plaquettes illustrant l'usure en dépouille et l'usure en cratère.	94
Figure 60: Valeur moyenne de l'usure en cratère (KM) en fonction du temps d'usinage pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min.....	95
Figure 61: Image MEB d'une plaquette de rayon d'arête 23 μ m après 1 minute d'usinage à la vitesse de coupe 300 m/min, ap=1.6 mm et f = 0.2 mm/tr. Représentation de la cartographie des éléments chimiques retrouvés en surface.....	96
Figure 62: Image MEB topographique du profil d'usure de l'arête de coupe après 12 minutes d'usinage à 400 m/min.....	96

Figure 63: Image MEB représentant l'usure développée par l'arête de coupe aux vitesses de coupe 300 et 400 m/min respectivement.....	97
Figure 64: (a) Image d'un copeau avant formation de l'usure en cratère. (b) Image prise par caméra d'acquisition rapide pendant un usinage après formation du cratère sur la face de coupe de l'outil.	97
Figure 65: Evolution de l'effort radial au long du temps d'usinage en fonction de chaque rayon d'arête analysé : (a) pour $V_c = 300$ m/min et (b) pour $v_c = 400$ m/min.....	100
Figure 66: Evolution de l'effort axial au long du temps d'usinage en fonction de chaque rayon d'arête analysé : (c) pour $V_c = 300$ m/min et (d) pour $v_c = 400$ m/min.....	101
Figure 67: Evolution de l'effort tangentiel durant l'usinage en fonction de chaque rayon d'arête analysé : (e) pour $V_c = 300$ m/min et (f) pour $v_c = 400$ m/min.....	101
Figure 68: Répartition tridimensionnel des efforts acquis par la table dynamométrique. Repère : référentiel outil avec la position de l'effort radial F_r , l'effort axial F_a et l'effort tangentiel F_t	102
Figure 69: Repère de mesure de la table d'effort et repère local lié à la géométrie de la plaquette...	103
Figure 70: Courbe de chaque composante de l'effort local ramené à la plaquette pour les vitesses de coupe 300 et 400 m/min. A gauche pour 1 minute et a droite après 12 minutes d'usinage.	104
Figure 71: Effort rapporté à l'arête de coupe.	104
Figure 72: Effort perpendiculaire à l'arête de coupe.	105
Figure 73: Effort rapporté à l'arête de coupe.	105
Figure 74: évolution de la rugosité moyenne au cours de l'usinage en fonction des rayons d'arête pour une vitesse de coupe 300 m/min.	107
Figure 75: évolution de la rugosité moyenne au cours de l'usinage en fonction des rayons d'arête pour une vitesse de coupe 400 m/min.	108
Figure 76: Profile de rugosité de surface en début d'usinage et après développement des phénomènes d'usure pour les rayons ER 23 et 70 μm à la vitesse 400 m/min.....	109
Figure 77: Moyenne des mesures de dureté sur la surface usinée a 300 et 400 m/min, en fonction des rayons d'arête.	110
Figure 78: Analyse des empreintes de dureté sur la surface usinée.	111
Figure 81: Bandes de cisaillements déformées après usinage. Influence sur l'usure de la plaquette.....	112
Figure 82: Définition des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau d'électrons et l'échantillon.....	130

Brigitte VASQUES

**Étude du comportement du
rayon d'arête et de son influence
sur l'intégrité de surface en
tournage à sec**

**Thèse en contrat
CIFRE avec
l'entreprise :**



Résumé

Ce travail, mené dans le cadre d'une thèse CIFRE en collaboration avec le fabricant d'outil de coupe ValeniteSafety et le Laboratoire de Mécanique et Rhéologie EA 2640 de l'Université François Rabelais de Tours (Polytech'Tours), a été réalisé au sein du Centre d'Etude et de Recherche sur les Outils Coupants (CEROC). Il s'agit d'étudier le *rayon d'arête* noté *ER* et son influence sur *l'intégrité de surface* lors d'une opération de tournage à sec sur l'acier 27MnCr5.

L'usinage par enlèvement de matière résulte du cisaillement de matière par l'arête de coupe, partie active d'une plaquette. C'est l'élément le plus sollicité pendant la coupe. Une plaquette est caractérisée par son substrat, son revêtement, la géométrie de la zone de coupe et sa micro géométrie d'arête qui influence intimement le cisaillement de la matière. Elle conditionne ainsi l'intégrité de surface usinée. Théoriquement une finition d'arête idéale au bon cisaillement de la matière doit être « vive ». En réalité, dans un grand nombre de cas les arêtes ont un mouchage (arrondie).

L'*objectif* de cette étude est d'analyser le comportement des rayons d'arête. La maîtrise de la finition d'arête peut augmenter de façon significative la durée de vie de la plaquette et assurer la reproductibilité de la qualité de surface usinée.

Après un rappel des principes généraux de la coupe, nous nous attachons à décrire la micro géométrie d'arête et son influence lors du procédé d'usinage à sec. Nous présentons ensuite la procédure suivie pour la détermination des conditions d'utilisations de l'outil. Puis nous décrivons les protocoles expérimentaux de préparation des pièces à usiner et des arêtes de coupe de la plaquette.

Pour caractériser l'intégrité des surfaces usinées et le comportement des rayons d'arête nous employons plusieurs techniques telles que la Microscopie Electronique à Balayage, la Microscopie Interférentielle, la Micro indentation. Des paramètres tels que les efforts de coupe, les phénomènes d'usures développées pendant les tests de durée de vie, la topographie et la métallurgie de surface ont été analysés. Ces analyses permettent de *quantifier* le comportement des rayons d'arête et l'influence des tolérances de fabrication sur l'intégrité de surface de la pièce.

Mots clés

Rayon d'arête, tolérance de fabrication, acier 27MnCr5, usinage à sec, tournage, outils de coupe, revêtement, micro-indentation, interférométrie en lumière blanche, MEB, efforts de coupe, usure.

Abstract

This work performed at the Research Cutting Tools Centre “CEROC” has been carried out in the framework of a collaboration with the cutting tool manufacturer ValeniteSafety and the Mechanical & Rheology Laboratory EA 2640 of the University François Rabelais of Tours (Polytech'Tours). It's devoted to investigate the behaviour of the cutting *edge radius* denoted *ER* on the *surface integrity* of worked piece after dry turning of 27MnCr5 steel.

Cutting process involving material removal occurs by a large plastic deformation in a zone of concentrated shear due to the cutting edge. Cutting edge radius is the essential working part of the insert during machining process. An insert is a combination of a substrate, a coating, the geometry of a cutting zone and the edge finish geometry. These parameters related to the shearing property of the worked piece are critical for the quality of the surface integrity. Sharp edge is considered as an ideal edge in theory. However, in many cases, the cutting edges are “*honed*” on purpose during the manufacturing process of the insert.

The *aim* of this research work is to establish correlations between relevant parameters and examine how the surface integrity of machined steel and tool life can be affected by the cutting tool edge preparation. Control of the micro edge radius geometry can considerably increase the tool life and assure the reproducibility of the machined surface quality.

After a summary of the metal cutting principles, we describe how the presence of a honed edge affects the performance of machining operation in different ways. We present the procedures followed to determine the cutting conditions adapted to our cutting tool and material during dry turning. The experimental procedure of machined samples and edge radius preparation methods used in this study are illustrated.

Scanning Electronic Microscope, White Light Interferometry and Micro Indentation, were the employed techniques to understand the impact of honed insert edges in the surface integrity of the worked piece and to investigate tool life performances. Parameters such as: cutting efforts, wear types generated during life time tests, topographic and metallurgic surface were evaluated and allow to *quantify* the effect of the variation of the cutting edge radius “manufacturing spread” on the life time of the insert and the surface finish of the worked piece.

Keywords

honed edge radius, “spread edge radius”, steel 27MnCr5, dry machining, turning, insert tool, coating, micro indentation, white light interferometry, SEM, cutting efforts, wear, surface integrity.