

République Algérienne Démocratique & populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Mémoire de Magister



71

Département de Génie Mécanique

Etude du comportement des matériaux de coupe lors du tournage d'un acier inoxydable

Option : Construction - Productique

Présenté par :

S. BERKANI

Devant le jury composé de MM :

K. CHAOUI	Pr. à l'université de Annaba	Président
N. ZEGHIB	Pr. à Université de Annaba	Examineur
A. BELBAH	M/C à l'université de Guelma	Examineur
S. GUENFOUD	M/C à l'université de Guelma	Examineur
M. A. YALLESE	M/C à l'université de Guelma	Rapporteur

REMERCIEMENTS

Je saisis cette occasion pour remercier mon encadreur le docteur M.A. YALLESE pour ses conseils.

Je remercie aussi Monsieur le professeur K. CHAOUI pour avoir présidé le jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur le professeur N. ZEGHIB, à Monsieur A. BELBAH et à Monsieur S. GUENFOUD pour leur participation au jury.

Que toutes les personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail trouvent ici ma reconnaissance la plus sincère et particulièrement MM : M^{ed} AIB et A/Aziz MADI.

J'exprime ma profonde gratitude à toute ma famille pour son soutien.

ملخص

الأصلاب المقاومة للصدأ تلعب دوراً هاماً في الصناعات الحديثة، و هي مقسمة إلى ثلاثة أصناف أساسية، مارتنستيكية، فيريتيكية و أوستنيتيكية. هذه الأخيرة لها مميزات خاصة جداً من بينها لدانة عالية، مقاوم عالية للحرارة و معامل إحتكاك عالي جداً. هذه الخصائص تجعل تشغيل هذه الأصلاب صعباً جداً مما يؤدي إلى قصر مدة حياة أداة القطع. فكان من المهم إيجاد أدوات قطع تستطيع تشغيل هذه الأصلاب.

في هذه الدراسة تناولنا خمسة مواد قطع مختلفة، كربيدات مكسوة و غير مكسوة و سرامي مكسو و آخر غير مكسو. الهدف من هذا البحث هو من جهة دراسة مختلف الظواهر التي تتدخل أثناء تشغيل الصلب (X2CrNi 18-9) خاصة قوى القطع، خشونة السطح و تآكل أداة القطع، مع تغير مختلف شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة و زمن التشغيل). من جهة أخرى، قمنا بدراسة إحصائية معتمدين في ذلك على (ANOVA) و (RSM) لاقتراح نماذج رياضية.

Résumé

Les aciers inoxydables jouent un rôle extrêmement important dans l'industrie d'aujourd'hui. Ils sont divisés en trois catégories, martensitiques, ferritiques et austénitiques. Les austénitiques présentent des propriétés physico-mécaniques très sévères, tels que une ductilité élevée, une haute résistance à chaud et un taux d'écaillage élevé ainsi un coefficient de frottement très important. Ces caractéristiques rendent l'usinage de ces aciers très difficile ce qui conduit généralement à des durées de vie des outils très limitées. De là, il est très intéressant de trouver des plaquettes de coupe qui ont des meilleures performances et de sélectionner une plage des paramètres du régime de coupe où ces plaquettes peuvent productivement et efficacement usiner ces aciers.

Cette étude met au point l'évaluation de cinq matériaux de coupe recommandés pour l'usinage des aciers inoxydables austénitiques. Ces matériaux sont des carbures revêtus et non revêtus et des cermets revêtus et non revêtus. L'objectif de cette recherche est d'une part d'examiner les différents phénomènes intervenants lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 tels que, les efforts de coupe, la rugosité et l'usure de l'outil, avec la variation de différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de passe et temps d'usinage). D'autre part, nous avons fait une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité, des efforts de coupe et de l'usure pour faire des prédictions.

Abstract

Stainless steels play an extremely important role in today's industry. They are divided into three categories, martensitic, ferritic and austenitic. The austenitic ones present very severe physico-mechanical properties, such as a high ductility, a high hot strength and a high work hardening also a very important friction ratio. For these reasons, machining of stainless steels becomes very difficult that generally leads to very limited tool lives. Hence, it is very interesting to find the cutting inserts with best performances and the ranges of machining parameters where these inserts can productively and efficiently machine these steels.

This study is focused on the evaluation of five cutting materials recommended for the austenitic stainless steels machining. These materials are coated and uncoated carbides and coated and uncoated cermets. The purpose of this research is on the one hand to examine the various intervening phenomena during the dry machining of X2CrNi18-9 austenitic stainless steel such as, cutting forces, surface roughness and tool wear, with the variation of various cutting parameters (cutting speed, feed, depth of cut and the machining time). Moreover, we made a statistical analysis of the results based on the analysis of variance (ANOVA) and the response surface methodology (RSM) and that in the aim to propose mathematical models of the surface roughness, cutting forces and tool wear to make predictions.

SOMMAIRE

Introduction générale

7

Chapitre I- Etude bibliographique, usinage des aciers inoxydables

I-1 Introduction	10
I-2 Introduction sur la coupe des métaux	10
I-3 Définition de l'usinabilité	11
I-3-1 Critère d'évaluation l'usinabilité	11
I-3-2 Facteurs influençant l'usinabilité	12
I-3-3 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils	13
I-4 Usinage des aciers inoxydables	14
I-4-1 Définition	14
I-4-2 Types d'aciers inoxydables	14
I-4-3 Rôle des éléments d'addition	15
I-4-4 Influence des propriétés physiques	15
I-4-5 Usinage des aciers inoxydables	18
I-4-6 Choix des outils	18
I-5 Matériaux de coupe	19
I-5-1 Carbures métalliques	19
I-5-2 Cermets	21
I-6 Revêtement pour outils coupants	22
I-6-1 Fonction d'un revêtement en usinage	22
I-6-2 Propriétés des revêtements	22
I-6-3 Types de revêtements	23
I-7 Les efforts de coupe	26
I-7-1 Intérêt de mesure des efforts de coupe	27
I-7-2 Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe	27
I-7-3 Effort spécifique de coupe (pression de coupe)	31
I-7-4 La puissance de coupe	31
I-8 Usure des outils de coupe	32
I-8-1 Mécanisme d'usure	33
I-8-2 Usure visible sur l'outil	36
I-9 Travaux de recherches concernant l'usinage des aciers inoxydables	40
I-10 Position du problème	48

Chapitre II- Procédure expérimentale

II-1 Introduction	50
II-2 Matériels utilisés	50
II-3 Conditions de coupe	62
II-4 Planification des expériences	63
II-5 Conclusion	65

Chapitre III- Etude de l'usinabilité de l'acier X2CrNi18-9

III.1 Introduction	67
III-2 Essais réalisés	67
III-3 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe	68
III-4 Evolution des pressions de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe	74
III-5 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe	78
III-6 Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps	84
III-7 Evolution de la rugosité en fonction du temps	89
III-8 Conclusion	97

Chapitre IV- Modèles mathématiques

IV-1 Introduction	99
IV-2 Analyse des efforts de coupe et de rugosité en fonction de (V_c, f et a_p)	99
IV-2-1 Analyse des efforts de coupe	100
IV-2-2 Analyse des critères de la rugosité	105
IV-3 Analyse de l'usure en dépouille et de rugosité en fonction de (V_c, f et t)	109
IV-3-1 Analyse de l'usure en dépouille	110
IV-3-2 Analyse de la rugosité	111
IV-4 Conclusion	116
Conclusion générale	117
Nomenclature	121
Références bibliographiques	122

Introduction générale

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion. Ils jouent un rôle très important dans l'industrie aéronautique, la fabrication des pièces médicales et dans l'agroalimentaire. Parmi les types de ces aciers il y a les martensitiques, les ferritiques et les austénitiques. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques distinguées telles que la haute ductilité, le taux d'écrouissage élevé et le coefficient de frottement élevé.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 par les cinq matériaux de coupe suivants : carbure non revêtu (H13A), carbures revêtus (GC1025 et GC2015), cermet non revêtu (CT5015) et cermet revêtu (GC1525). Dans une première partie, l'étude de l'évolution des efforts et pression de coupe, de la rugosité et de l'usure en fonction des variables d'entrée (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et temps d'usinage). La deuxième partie porte sur la détermination des modèles mathématiques traduisant l'évolution des différents phénomènes de la coupe en fonction de paramètres du régime de coupe.

Le mémoire de Magister est structuré comme suite :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux et sur un état d'art concernant l'usinage des différents aciers inoxydables en appuyant sur les divers articles, revues et thèses. Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction sur l'usinabilité et la coupe des métaux, suivie par l'usinage des aciers inoxydables et les matériaux de coupe et leurs caractéristiques et en dernier lieu nous avons présenté les différents phénomènes intervenant dans la coupe.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini une méthodologie de travail qui repose sur la planification des expériences. Nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats des différents essais réalisés tels que :

- L'évolution des efforts et des pressions de coupe en fonction des paramètres de coupe (f , V_c , a_p) ;
- L'évolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction des éléments du régime de coupe (f , V_c , a_p et temps de coupe).

Dans le quatrième chapitre nous avons présenté une étude statistique (analyse de variance, interactions) basée sur la méthodologie de surface de réponse et cela dans le but de déterminer des modèles mathématiques qui permet à la prédiction de la rugosité, des efforts de coupe ainsi que l'usure et cela en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , a_p et T_c).

En fin, nous avons fait une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

CHAPITRE I
ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE,
USINAGE DES ACIERS
INOXYDABLES

I-1 Introduction

L'interaction de l'outil de coupe avec la pièce, dans le but de l'enlèvement de la matière est appelée « usinage ». L'usinage est effectué par la machine, l'outil de coupe et le système de fixation. Un usinage plus rapide et plus efficace est très souhaitable et peut mener à l'épargne du temps et de l'argent. L'efficacité du procédé de l'enlèvement de la matière dépend de nombreux facteurs; parmi eux est l'outil de coupe, vitesses de coupe, la géométrie de l'outil, la matière à usiner et le fluide de refroidissement qui est employé dans le processus.

Pour atteindre une productivité exceptionnelle et des coûts de production réduits, les fabricants ont proposé une large gamme des outils revêtus recommandée pour l'usinage des aciers inoxydables, ces outils de coupe sont plus répandus par rapport aux autres non revêtus à cause de leur longue durée de vie et leurs performances considérables. Dans les opérations du tournage continu, la température de la plaquette rapportée atteint 700°C et plus. On a formé une idée que ces problèmes pourraient être allégés dans une certaine mesure en diminuant la génération de la chaleur, ce qui peut être obtenu en abaissant le frottement et en maintenant la résistante à l'usure stable.

Ce chapitre est subdivisé en deux sections principales. La première concerne des définitions de quelques phénomènes intervenants dans le processus de coupe et aussi présente les différentes familles des aciers inoxydables. La seconde est réservée aux différents travaux de recherche sur l'usinage des aciers inoxydables.

I-2 Introduction sur la coupe des métaux

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes.

Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage.

I-3 Définition de l'usinabilité

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée.

Selon les auteurs, l'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée.

I-3-1 Critère d'évaluation l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont: [TRO01], [CUN92].

- ❖ la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures 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, dont la rugosité ;
- ❖ la productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités.

I-3-2 Facteurs influençant l'usinabilité

a) La résistance mécanique

On pense couramment que la résistance mécanique, ou la dureté qui lui est équivalente constitue un indice d'usinabilité significatif. En réalité, des aciers dont la dureté est rendue plus élevée par un traitement de trempe et revenu au lieu d'un traitement de recuit, peuvent avoir une usinabilité meilleure dans l'état le plus dur. Ce résultat est valable pour certaines résistances aux environs 800 MPa mais ne peut être étendu aux résistances plus élevées de l'ordre de 1100MPa. On rencontre alors des difficultés d'usinage dues à la résistance élevée du métal à la déformation [CUN92].

b) Les caractéristiques thermiques

Le *tableau I-1* présente la conductivité thermique de quelques matériaux. Cette caractéristique est en relation étroite avec l'usinabilité car les aciers qui ont une conductivité réduite ne dissipent pas rapidement la chaleur générée lors de la coupe, ce qui conduit à la concentration de la chaleur au niveau du contact pièce-outil-copeau et par conséquent à l'usure accélérée de l'outil de coupe.

<i>Matériau</i>	<i>Conductivité thermique, W/(m. °K)</i>
Acier inoxydable	12.11 ~ 45.0
Plomb	35.3
Aluminium	200
Or	318
Cuivre	380
Argent	429
Diamant	900 ~ 2320

Tableau I-1 Valeurs approximatives de la conductivité thermique pour une série de matériaux.

d) Les compositions chimiques

L'élément le plus important est le carbone. A basse teneur, l'acier composé de ferrite, est difficile à usiner. L'augmentation du pourcentage (% C) crée des solutions de continuité dans la matière de ferrite par formation de plages de perlite. On atteint un optimum d'usinabilité avec l'acier demi-dur à 0.35 % de carbone. Une augmentation supplémentaire de la teneur en carbone rend l'acier de plus en plus dur et moins usinable.

Le manganèse n'agit pas de façon sensible tant qu'il n'est pas en proportion notable. A forte teneur, il favorise l'écrouissabilité et diminue l'usinabilité. Les éléments d'alliages usuels, comme le nickel ou le chrome n'ont que peu d'influence aux teneurs présentes dans les aciers de construction industriels faiblement alliés. A forte teneur, dans le cas d'aciers spéciaux ils agissent sur la structure et l'écrouissabilité. Les aciers inoxydables de type 18/8 (18% Cr et 8% Ni) par exemple, sont austénitiques, très écrouissables et difficiles à usiner.

I-3-3 Méthodes d'essais pour la détermination de la tenue de coupe des outils**a) Essai d'usure de longue durée à vitesse constante**

Pour des conditions de coupe déterminées, on effectue des essais à des vitesses de coupe différentes, et on relève la durée de vie de l'outil, on effectue ainsi plusieurs essais. Cette méthode classique est très sûre, mais elle est assez longue et laborieuse et exige une quantité assez considérable de matière à usiner et plusieurs outils.

b) Essai d'usure à vitesse croissante:

Afin d'abréger la durée des essais et réduire la consommation du métal, on fait travailler l'outil jusqu'à détérioration de l'arête (ou jusqu'à un degré d'usure déterminé), avec des vitesses croissantes suivant une loi bien déterminée:

- croissance continue (par exemple: dressage sur tour d'une face plane, l'outil avance radialement) ;
- la croissance peut être obtenue par chariotage conique ;

- ou croissance par paliers, si le tour est équipé d'un variateur de vitesse.

I-4 Usinage des Aciers inoxydables

Parmi les nombreuses techniques de mise en œuvre des aciers inoxydables l'usinage concerne principalement les produits longs (barres).

Les autres opérations d'usinage (perçage, fraisage, taraudage) sur les produits plats ne peuvent être négligées. Dans ce cas, elles précèdent souvent un assemblage à l'aide de moyens mécaniques: vis, boulons, rivets.

À l'usinage qui est l'opération de mise en œuvre par enlèvement de matière à l'aide d'un outil de coupe, on associe le concept d'usinabilité concernant une nuance ou une famille de nuances [TRO01] [CUN92].

I-4-1 Définition

Un acier inoxydable est un acier fortement allié dont la teneur en chrome doit être supérieure à 10% ce qui lui assure une résistance aux agents oxydants (résistance à la corrosion) [TRO01].

I-4-2 Types d'aciers inoxydables

Les aciers inoxydables peuvent être classés en trois grandes familles:

- *Les austénitiques* sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre ou du laiton, et aussi de leurs bonnes caractéristiques mécaniques élevées. Les teneurs en éléments d'addition tournent autour de 18% de chrome, 10% de nickel et de 0.02 à 0.06% de carbone.
- *Les ferritiques* ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 30%), particulièrement intéressants en présence de soufre.
- *Les martensitiques* sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13% de chrome avec au moins

0.08% de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel [TRO01].

I-4-3 Rôle des éléments d'addition

- C'est au **chrome** et à lui seul que l'on doit la résistance des aciers inoxydables aux agents oxydants.
- Le **nickel** favorise la formation des structures homogènes de type austénitique, intéressantes pour éviter la corrosion mais à éviter soigneusement dans le domaine du frottement.
- Le **molybdène** et le **cuivre** améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation
- Le **tungstène** améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.
- Le **titane** doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure.

I-4-4 Influence des propriétés physiques

Les propriétés physiques qui jouent un rôle important lors de l'usinage des aciers inoxydables sont la conductivité thermique, les coefficients de frottement et de dilatation.

a) Effet de la conductivité thermique

Nous pouvons retenir que les sources de chaleur lors de la formation du copeau sont localisées dans les zones de cisaillement primaire et cisaillement secondaire (*Figure I-1*). Une conductivité thermique élevée évite un échauffement trop important dans la zone de coupe grâce à une bonne évacuation de la chaleur produite à l'interface outil-copeau dans toute l'épaisseur du copeau.

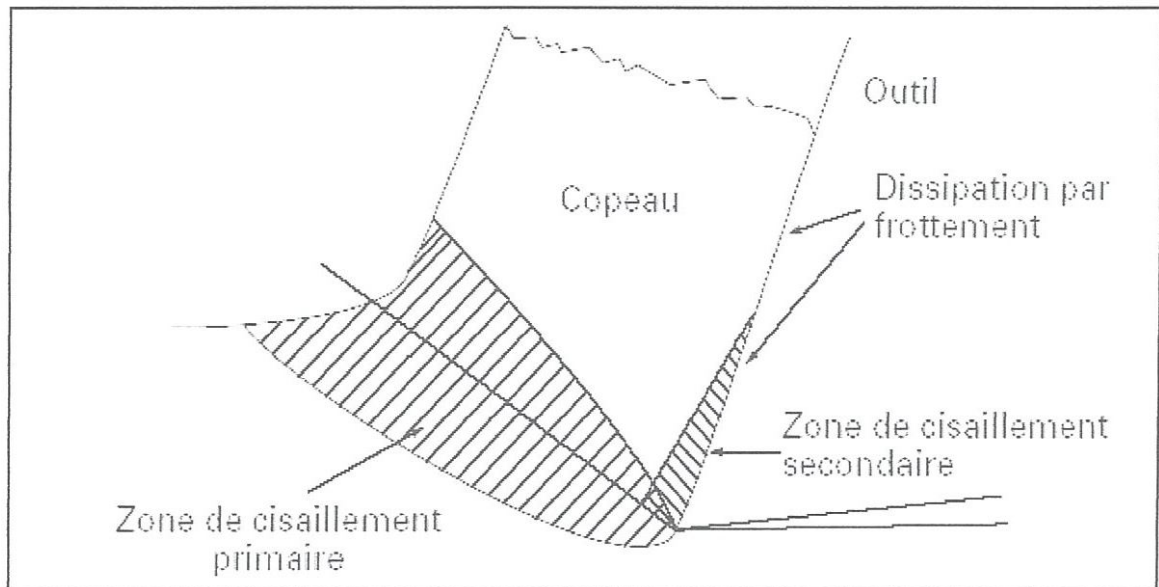


Figure I-1 Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale.

Il s'avère que les aciers inoxydables présentent des conductivités thermiques beaucoup plus faibles que les aciers peu alliés (1.5 à 3 fois plus faibles). Les austénitiques sont de loin les plus défavorisés (*figure I-2*), même si une augmentation de la température diminue leur handicap. Les martensitiques sont les moins pénalisés, mais leur conductivité reste tout de même environ 1.5 fois plus faibles que les aciers peu alliés. Cette mauvaise conductivité a alors pour conséquences:

- Des températures à l'interface outil-copeau élevées et des efforts de coupe importants ;
- Une tendance à des conditions de déformation de type adiabatique aux vitesses de coupe élevées, d'où une instabilité plastique ;
- Une usure des outils par fatigue thermique et par diffusion plus importante.

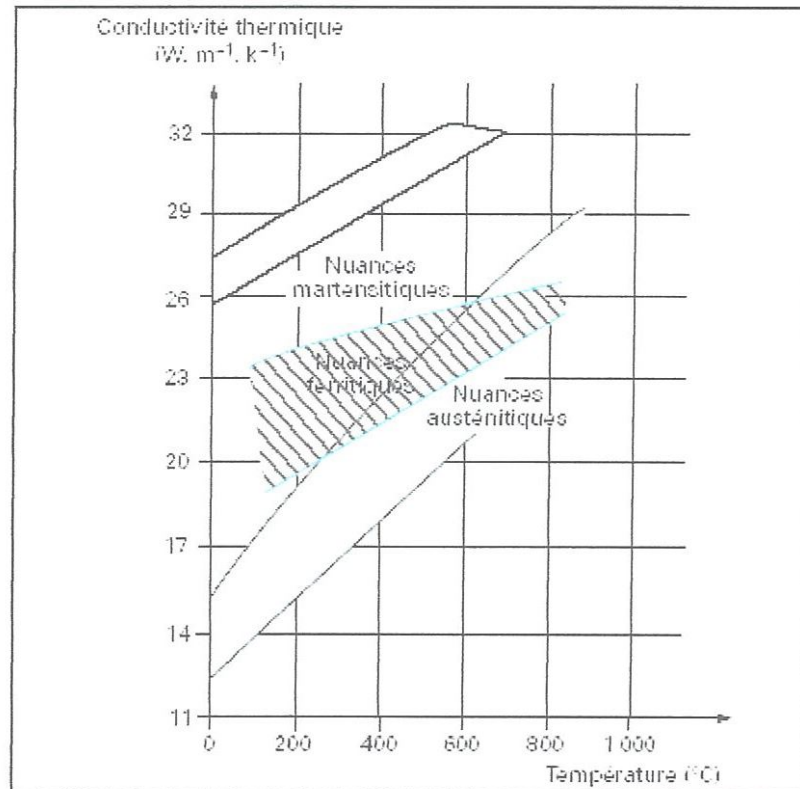


Figure I-2 Conductivité thermique des aciers inoxydables [TRO01].

b) Rôle du coefficient de dilatation

Les coefficients de dilatation élevés ont une influence directe sur la tenue des cotes et sur les déformations des pièces usinées. Ceci est tout particulièrement vrai pour les austénitiques pour lesquels le cumul de températures de coupe élevées et de forts coefficients de dilatation peut poser des problèmes lorsqu'une grande précision d'usinage est exigée.

c) Influence du coefficient de frottement

Les aciers inoxydables austénitiques ont des coefficients de frottement élevés, ce qui a pour conséquence une usure rapide des outils ainsi que des risques de collage qui vont conduire à des dégradations d'outil de type adhésion.

En conséquence, les aciers inoxydables, et tout particulièrement les austénitiques, ont des propriétés physiques qui les pénalisent lors de l'usinage. Ceci rend l'usinage

des aciers inoxydables très particulier et conduit à des solutions bien spécifiques, que ce soit dans l'amélioration des matériaux ou dans le choix des outils [TRO01].

I-4-5 Usinage des aciers inoxydables

Du point de vue de l'usinage les aciers inoxydables peuvent être classés en deux catégories [CUN92]:

- **Les aciers ferritiques** et surtout martensitiques s'usinent pratiquement de la même manière que les aciers de construction classiques de même dureté, il est cependant conseillé de réduire légèrement les vitesses de coupe.
- **Les aciers austénitiques** se distinguent des aciers de construction ordinaire par leur faible limite d'élasticité, leur allongement important avant rupture et leur forte aptitude à l'écrouissage, ce qui oblige à modifier les conditions d'usinage dans des proportions parfois très importantes. D'une manière générale il faut utiliser des machines plus puissantes, très rigides, ne vibrant pas, et fixer très énergiquement les pièces que l'on veut travailler. On privilégiera les fortes profondeurs de passe à des vitesses relativement faibles. Pour améliorer l'usinage des aciers inoxydables, les sidérurgistes ont développé deux méthodes. La première consiste à resulfurer des nuances ($0.15 \leq S \leq 0.35$) %. La deuxième prévoit l'inclusion des oxydes durs tels que: Al_2O_3 , SiO_2 ...ou des oxydes malléables à haute température tels que: SiO_2 - $CaO-Al_2O_3$. La synergie de leurs effets permet des gains de productivité de 45% [CUN92].

I-4-6 Choix des outils

Le choix des outils pour l'usinage des aciers inoxydables est primordial. La productivité est directement liée à celui-ci. Les principales familles d'outils sont [CUN92]:

- les outils en acier rapide ;
- les outils en carbure brasé ;
- les plaquettes en carbure revêtu ou non revêtu ;

- les cermets ;
- les céramiques.

I-5 Matériaux de coupe

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. Il dépend aussi des conditions de coupe, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau de coupe (ténacité et résistance à l'abrasion).

I-5-1 Carbures métalliques

Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes brasées sur des corps d'outils en acier ordinaire, la partie active de ces outils étant réaffûtée au fur et à mesure de son usure. Vers 1958 ont été créés les outils à plaquettes amovibles. Ce type d'outil a été rapidement adopté car les avantages des plaquettes amovibles sont nombreux:

- suppression de l'affûtage ;
- conditions de coupe plus sévères ;
- indexage (repérage mécanique) de la plaquette pour remplacer une arête usée ou un changement de nuance plus rapide que le changement d'un outil brasé ;
- affilage d'arête recommandé dans le tournage de l'acier, exécuté d'une façon automatique par le fabricant de plaquettes alors que, pour l'outil brasé, il est réalisé à la main par l'opérateur.

a) Carbures métalliques sans revêtement

La dureté des carbures métalliques (environ 1 500 à 2 500 HV), très supérieure à celle des aciers rapides non surcarburés (66 HRC soit environ 865 HV), jointe à une résistance importante (résistance à la flexion de 800 à 2 200 MPa) rend ses aciers plus utilisés. Leur dureté à chaud permet l'usinage jusqu'à une température de 1000 °C.

La symbolisation des carbures a fait l'objet de la recommandation NF E 66-304 (ISO 513), les nuances y sont divisées en trois grandes catégories:

- P: Pour métaux ferreux à copeaux longs ;
- M: Pour métaux ferreux à copeaux longs, à copeaux courts et métaux non ferreux ;
- k: Pour métaux ferreux à copeaux courts, métaux non ferreux et matières non métalliques.

Dans chaque catégorie, un nombre allant de 01 à 50 indique la ténacité croissante et la diminution de la résistance à l'usure. Les nuances modernes de carbures étant de plus en plus polyvalentes et performantes, il devient difficile de les classer ainsi. Cela implique des difficultés croissantes pour établir des équivalences directes entre fabricants. Par contre, les carbures métalliques non revêtus sont de plus en plus employés pour certains types d'outils en remplacement de l'acier rapide. On peut citer: foret en carbure monobloc, foret à insert rapporté en carbure, alésoir à plaquettes, alésoir monobloc, taraud, insert brasé pour les outils de décolletage...

b) Carbures métalliques avec revêtement

A partir de 1969 apparaît un nouveau type de matériau de coupe:

Le carbure revêtu est constitué par une plaquette en carbure métallique recouvert par un film mince (3 à 10 μm) d'un matériau plus dur (2 000 à 3 000 Knoop).

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

Ces couches sont obtenues généralement par CVD dans des fours entre 800 et 1100°C, ce qui permet d'obtenir des dépôts de très bonne adhérence. Pour certaines applications comme le fraisage, ces dépôts sont parfois réalisés à basse température par PVD afin de fragiliser le moins possible le substrat carbure.

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

I-5-2 Cermets

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

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN et TiCN et du rapport $N/(C + N)$ qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0.3. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

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

I-6 Revêtement pour outils coupants

I-6-1 Fonction d'un revêtement en usinage

Les fonctions que l'on peut exiger d'un revêtement sont avant tout de protéger l'outil contre les agressions extérieures qu'il subit lors d'une opération d'usinage. Ces sollicitations sont d'ailleurs fortement variables d'une technique d'usinage à une autre, et d'une application à une autre [REC02].

I-6-2 Propriétés des revêtements

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent en définitif se traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables et/ou qualifiables. Ainsi, il est possible de demander au système substrat + revêtement de répondre au cahier des charges suivant :

- ❖ Une ténacité élevée ;
- ❖ Une parfaite adhésion sur le substrat ;
- ❖ Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures ;
- ❖ Une dureté élevée ;
- ❖ Une inertie chimique élevée ;
- ❖ Une faible conductivité et diffusivité thermiques ;
- ❖ Une haute résistance à l'oxydation ;
- ❖ Une épaisseur adéquate ;
- ❖ Une fonction barrière de diffusion.

Sachant que ces propriétés doivent être conservées à la plus haute température possible, en lien avec les sollicitations thermiques de l'opération d'usinage visée.

I-6-3 Types de revêtements

Les revêtements déposés industriellement peuvent se décomposer en 2 familles distinctes : les revêtements déposés par voie physique (Physical Vapor Deposition: PVD) et les revêtements déposés par voie chimique (Chemical Vapor Deposition: CVD) *figure I-3*. Chacune de ces familles possède une variété importante de sous-

familles en constante évolution depuis quelques années. Ainsi, les procédés PVD sont basés sur trois types de technologie : l'évaporation, la pulvérisation et le dépôt ionique (ou 'ion-plating'). Chacune de ces sous-familles connaît également des variantes basées sur des moyens différents d'aboutir à l'évaporation ou à la pulvérisation des sources de matière : faisceau d'ions, effet joule, diode, etc.

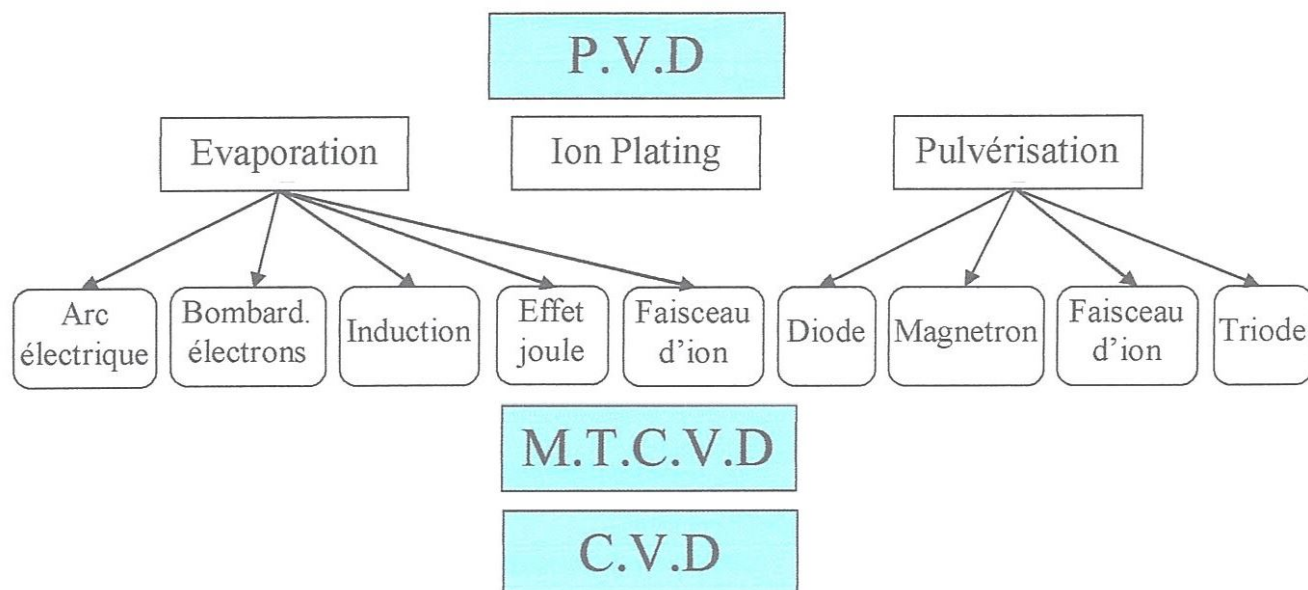


Figure I-3 Principaux modes de dépôt de revêtement pour outils-coupants [REC02].

L'ensemble de ces procédés permet de déposer des couches de compositions et d'aspects très voisins. Cependant, les modalités de dépôts peuvent entraîner des différences très importantes en terme de texture, adhésion, dureté, etc. Il est important de noter que les technologies de dépôt ont subi de très grandes évolutions ces dernières années. A tel point qu'il est difficile de donner un aperçu exhaustif de l'ensemble des variantes [REC02].

Type	Signification	Température	Technique
CVD	Dépôt chimique en phase vapeur	530°	La plus répandue
PVD	Dépôt physique en phase vapeur	200°	Courante
PCVD	Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma	315°	De plus en plus courante
MTCVD	Dépôt chimique en phase vapeur à moyenne température	425°	Récente

Tableau I-2 Différents types de revêtements et leurs significations.

Les dépôts réalisés industriellement par PVD et CVD sont issus de familles très voisines, par contre leurs propriétés résultantes font que certains revêtements sont systématiquement réalisés par une des techniques. Ainsi, dans le domaine des outils-coupants, les procédés CVD produisent couramment les revêtements suivants :

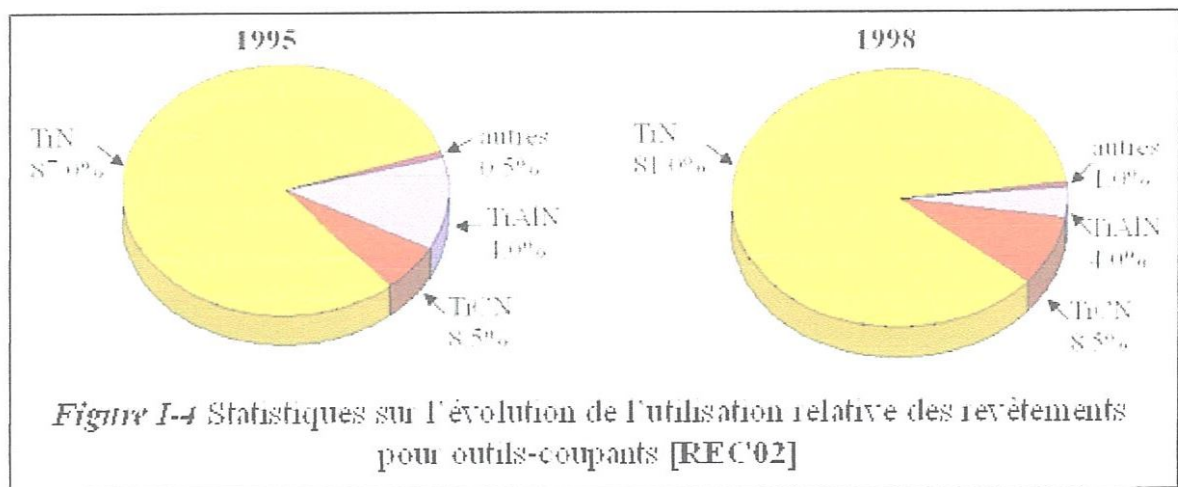
- ❖ Revêtements à base de titane : TiC , Ti(C,N) , TiN , TiB_2
- ❖ Revêtements céramiques : Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4
- ❖ Revêtements 'ultra-dur' : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC)

Les procédés PVD réalisent plutôt des revêtements du type :

- ❖ Revêtements à base de titane : TiC , Ti(C,N) , TiN , TiB_2 , $(\text{Ti,Al})\text{N}$
- ❖ Revêtements 'ultra-dur' : Diamant, Diamant Like Carbon (DLC), cubic Boron Nitride (c-BN)
- ❖ Revêtements lubrifiants : MoS_2 , WC/C , CrC/C

Les revêtements de la famille des TiN , Ti(C,N) et $(\text{Ti,Al})\text{N}$ sont de loin les plus répandus en usinage comme le montre la *figure I-4*. Ces revêtements doivent leur succès à leurs très bonnes propriétés moyennes dans l'ensemble des applications d'usinage et surtout leurs très bonnes adhésions aux substrats les plus couramment

utilisés: acier rapide, carbures, cermet. Les revêtements céramiques se sont beaucoup moins développés du fait de leurs grandes fragilités et de leurs manques d'adhésion.



De plus, les revêtements à base de titane se déposent aussi bien par les procédés PVD que par les procédés CVD, alors que les revêtements céramiques sont très difficiles à réaliser en PVD. Cela limite ainsi toute une partie des applications sur les outils en acier rapide. Les avantages et les inconvénients des deux techniques sont regroupés dans le *tableau I-3* :

	Avantages	Inconvénients
PVD	❖ Investissement limité ❖ Faible température de dépôt ❖ Bonne adhérence de dépôt ❖ Couches en contraintes compressives ❖ Nombreuses possibilités de dépôt ❖ Bonne acuité d'arête des outils	❖ Nécessité de réaliser les dépôts sur des pièces de formes voisines ❖ Vitesse de dépôt faible ❖ Dépôts non uniformes ❖ Difficultés pour revêtir des outils à géométrie complexe
CVD	❖ Grande pureté des dépôts ❖ Grande variété de composition ❖ Possibilité de dépôt sur des pièces complexes ❖ Bonne adhérence sur substrat carbure	❖ Température de déposition élevée ❖ Investissement élevé ❖ Résidus toxiques de déposition ❖ Mauvaise acuité d'arête des outils ❖ Couches en contraintes de traction ❖ Risques d'attaque des substrats par les gazes corrosifs

Tableau I-3 Comparaison des propriétés des modes de déposition PVD et CVD.

Ainsi dans le cadre d'un usinage continu (perçage, tournage), un revêtement épais et adhérent sera préféré (afin d'accroître la quantité de matière à enlever).

Pour les procédés à coupe interrompue (fraisage, taillage, etc.), il sera privilégié un revêtement tenace, résistant à l'oxydation et ayant des contraintes de compression. Ces conditions privilégient plutôt les revêtements obtenus par PVD. Cette analyse est à moduler avec l'apparition de revêtements MTCVD.

Par ailleurs, cela nécessite d'avoir des arêtes arrondies ce qui privilégie l'emploi des dépôts CVD, même si les dépôts PVD peuvent aussi s'appliquer sur des arêtes préalablement rodées. Les opérations de finition nécessitent des arêtes vives, ce qui privilégie plutôt l'emploi de revêtements PVD.

I-7 Les efforts de coupe

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec certaine force dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe (*figure I-5*). La résultante de coupe ($F_{rés}$) est la somme de trois composantes suivantes :

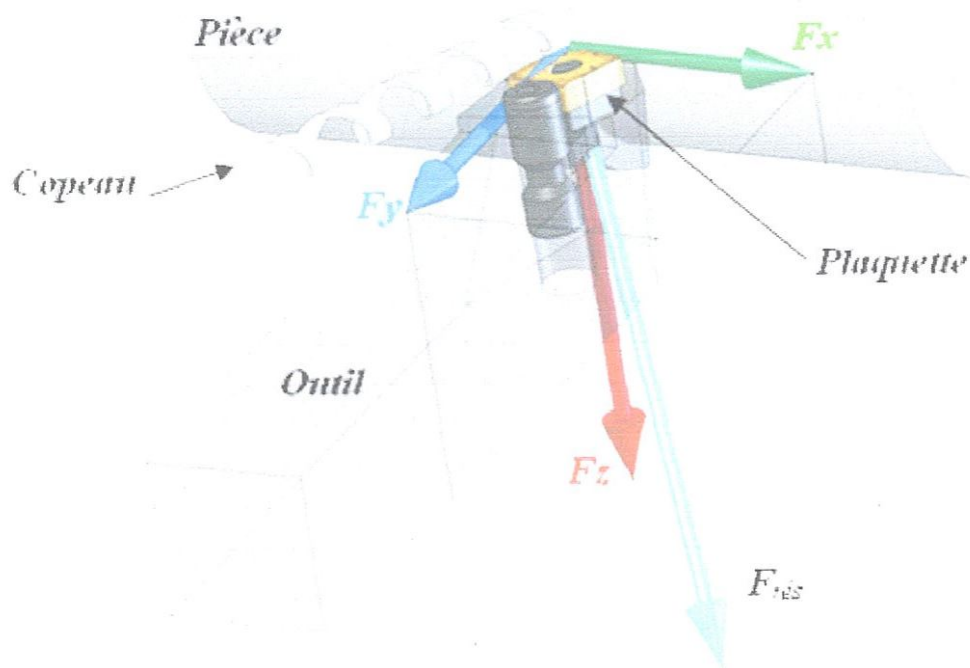


Figure I-5 Composantes de l'effort de coupe

- **F_z ou F_t**: composante dans le sens de vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. C'est la composante qui a la plus grande valeur absolue.
- **F_x ou F_a**: composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- **F_y ou F_r**: composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

Rapport des composantes:

La résultante de coupe $F_{rés}$ étant une diagonale de parallélépipède est égale à :

$$F_{rés} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2}.$$

I-7-1 Intérêt de mesure des efforts de coupe

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage.

I-7-2 Influence des différents facteurs sur les composantes de l'effort de coupe

a) Influence de la vitesse de coupe

Il y a d'abord une diminution de l'effort aux très basses vitesses due à une diminution du frottement copeau-outil, puis l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation de l'effort jusqu'à un maximum. Ensuite l'effort décroît à cause de la disparition progressive de l'arête rapportée.

La décroissance aux grandes vitesses est due à la diminution du frottement copeau-outil, suite à l'augmentation d'une part de la température à interface copeau-outil et outil-pièce et à la formation du cratère sur la surface d'attaque (*Figure I-6*).

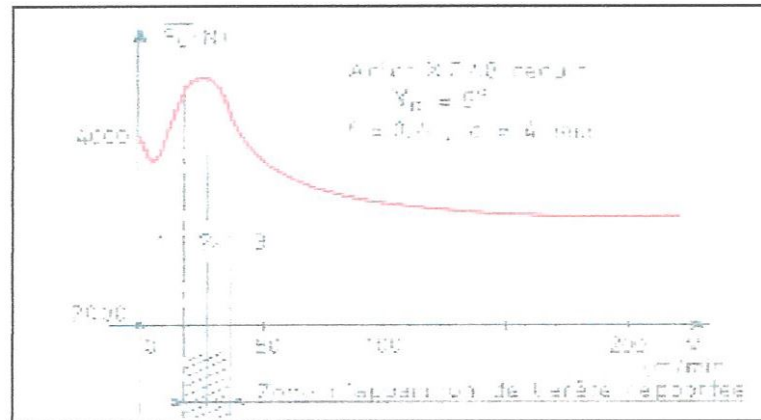


Figure I-6 Influence de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe

b) Influence de profondeur de passe et l'avance

Avec l'augmentation des ces deux facteurs, la section du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus à la formation du copeau et la valeur des composantes F_z , F_x , F_y nécessaire pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance.

En doublant par exemple, la profondeur de passe; on double également la largeur du copeau et cela conduit à une multiplication par deux de l'effort de coupe (figure I-7).

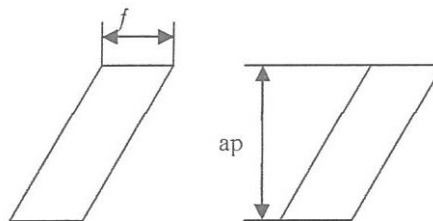


Figure I-7 Avance et profondeur de passe

c) Influence du matériau de coupe

Les matériaux de coupe revêtus, en particulier ceux avec des revêtements TiN ou Ti (C, N), accusent un frottement moindre et des efforts de coupe plus faible que les matériaux de coupe non revêtus.

Les faces d'attaque superfinies (rectifiées, rodées, polies) et dotées d'une arête de coupe acérée réduisent les efforts de coupe (figure I-8).

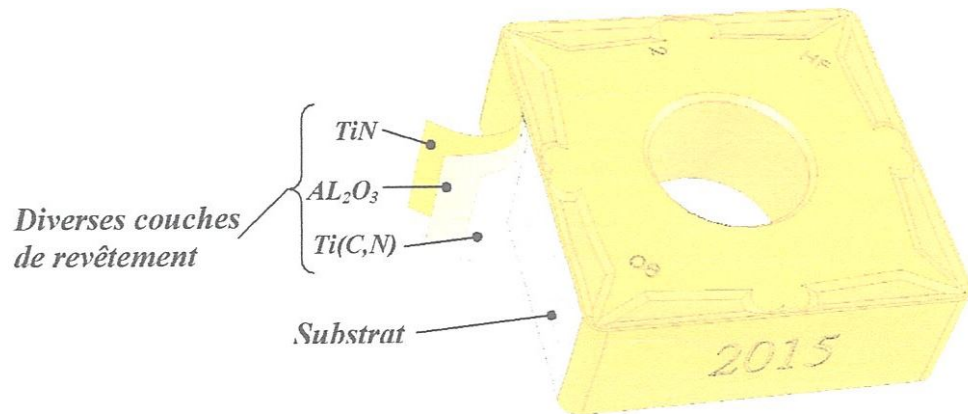


Figure I-8 Matériau de coupe (plaquette)

d) Influence du brise-copeaux

Les brise-copeaux qui forment une pente effective de coupe positive et qui ne présentent pas de liste négatif génèrent des efforts de coupe moindres. L'absence de "dos" sur lequel peut se dérouler les copeaux contribue également à des efforts plus réduits sans dégrader les propriétés de rupture du copeau (*figure I-9*).

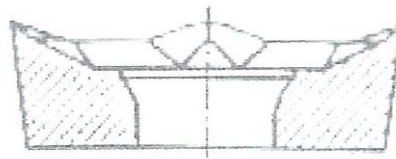


Figure I-9 Brise-copeaux.

e) Influence de l'angle de direction principal (χ)

Avec une avance inchangée, le copeau devient plus fin au fur et à mesure que l'angle χ diminue. Ceci conduit à une augmentation de l'effort de coupe principal.

La réduction de l'angle χ est limitée par les dégradations croissantes de la stabilité (forte augmentation des efforts d'avance et de pénétration, tendance au broutage), (*Figure I-10*).

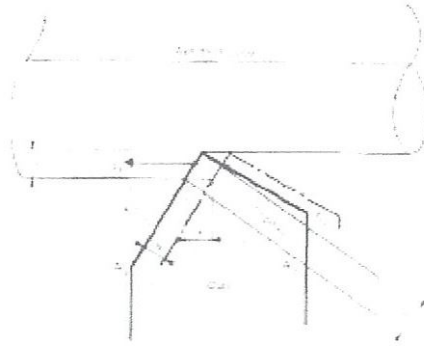


Figure I-10 Influence de l'angle de direction principal.

f) Influence de l'usure en dépouille

Les arêtes de coupe usées augmentent les efforts de coupe. En pratique on estime une augmentation de l'effort de 10% par 0,1mm d'usure sur la surface en dépouille de l'outil.

L'usure maximale admissible est fonction des résultats d'usinage souhaités (précision dimensionnelle, état de surface, etc.) et de l'outil utilisé. Pour les plaquettes amovibles, elle est égale à environ 10% de l'épaisseur de plaquette pour opération d'ébauche (*figure I-11*).

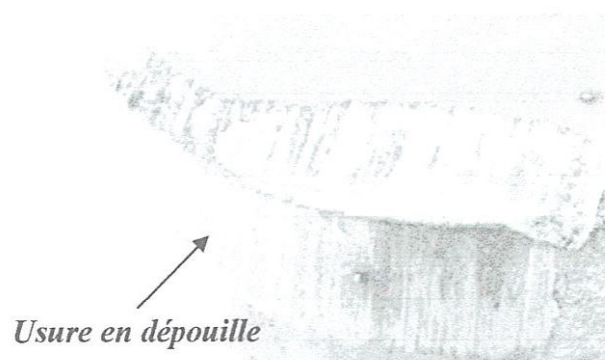


Figure I-11 Analyse par MEB d'une plaquette usée en PCBN [CAR03].

I-7-3 Effort spécifique de coupe (pression de coupe)

L'effort spécifique de coupe, aussi appelé pression de coupe, est également à déterminer. Cette grandeur est définie comme étant l'effort de coupe ramené à la section du copeau non déformé.

$$K_z = F_z / S \dots\dots\dots (I-1)$$

- F_z : effort de coupe (N) ;
- K_z : pression de coupe (N/mm^2) ;
- S : section du copeau (mm^2).

$$S = a_p \cdot f \dots\dots\dots (I-2)$$

- f : avance (mm/tr) ;
- a_p : profondeur de passe (mm) ;

L'effort spécifique varie en fonction de:

- matériau usiné ,
- épaisseur de coupe ;
- angle de coupe (diminution de 1.5 environ, pour augmentation de 1°) ;
- usure de l'outil (30 à 50 %, outil fortement usé).

I-7-4 La puissance de coupe

Elle est donnée par la relation:

$$P_c = F_z \cdot V_c \dots\dots\dots (I-3)$$

- V_c : vitesse de coupe (m/s) ;
- F_c : force de coupe (N) ;
- P_c : puissance de coupe (W).

Mais, d'après l'expression de la force de coupe, on peut utiliser la formule suivante :

$$P_c = K_z \cdot a_p \cdot f \cdot V_c \dots\dots\dots (I-4)$$

- P_c : puissance de coupe (W) ;
- K_z : pression de coupe (N/mm^2) ;
- a_p : profondeur de passe (mm) ;
- f : avance (mm/tr) ;
- V_c : vitesse de coupe (m/s).

La puissance de la machine se déduit de la puissance de coupe en fonction du rendement η

$$P = P_c / \eta \dots\dots\dots (I-5)$$

- P: puissance absorbée par la machine ;
- η : rendement de la machine.

I-8 Usure des outils de coupe

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

Cette usure dépend des paramètres de l'usinage, mais aussi de:

- la géométrie de la plaquette: angle de coupe, présence de brise copeau ;
- revêtement et de son comportement mécanique et thermique.

Il en résulte une usure apparente schématisée par la (figure I-12).

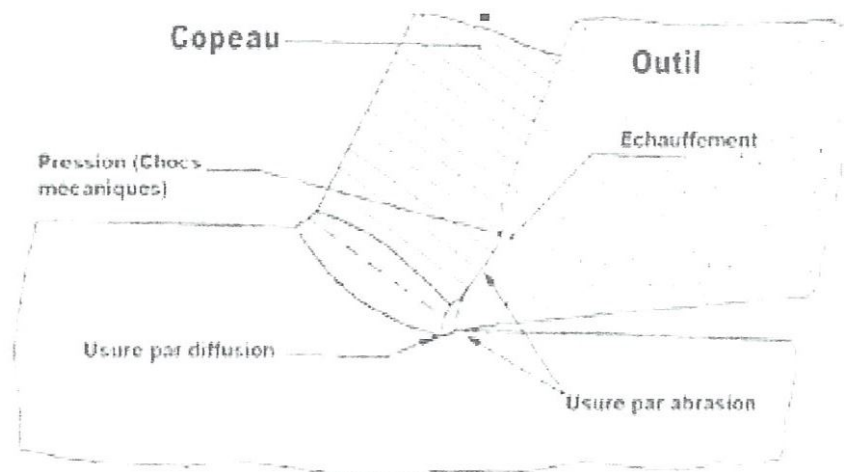


Figure I-12 Représentation des différentes zones de l'usure de l'outil durant la phase de la formation de copeau.

I-8-1 Mécanisme d'usure

a) Processus d'abrasion (mécanique)

Lors de l'usinage, la matière (pièce usinée et copeau) frotte avec des pressions de contacts importantes sur l'outil. Suivant la constitution physico-chimique (nombre, nature, composition et proportion des phases) et la structure (répartition et agencement des composants de l'alliage: forme, dimension, arrangement) la matière est plus ou moins abrasive par rapport à l'outil (*figure I-13*).

Si la matière comporte des constituants durs (nitrure, carbure, oxyde par exemple) et que ces derniers sont plus durs que l'outil, il y aura usure par abrasion de l'outil.



Figure I-13 Processus d'usure par abrasion.

b) Processus d'adhésion (mécanique)

Cette usure est due aux états de surface du copeau, de la pièce et de l'outil. En effet lors de l'usinage, ces entités frottent les unes contre les autres. Or les rugosités et micro-rugosités de ces surfaces, par contact et sous l'influence des fortes pressions engendrées par l'usinage, vont générer des micro-soudures (*Figure I-14*).

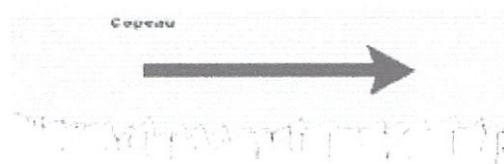


Figure I-14 Processus d'usure par adhésion mécanique

Ces micro-soudures se créent et se rompent très rapidement au cours de l'usinage. Ce processus continu génère:

- l'apparition d'arêtes rapportées si les micro-soudures sur l'outil est plus résistante que celles du copeau ;
- l'usure de l'outil si la micro-soudure sur le copeau est plus résistante que celle de l'outil. Cette usure est très faible et généralement négligeable.

c) Processus de déformation plastique (mécanique)

Si l'on caractérise un usinage en prenant comme paramètres la température (interface outil-copeau) et la pression exercée sur l'outil, on obtient un domaine de fonctionnement.

Les pressions sont très importantes (de l'ordre de 70 à 80 daN/mm² pour un matériau mi-dur par exemple) et les températures à l'interface outil-copeau ou outil-pièce sont de l'ordre de 1000°C.

Prenons le cas d'une plaquette en WC (grande majorité des plaquettes): pour ces températures et pour ces pressions, on se trouve dans le domaine de déformation plastique du WC. Il y a donc transformation plastique d'une partie de l'outil (arête de coupe).

d) Processus de diffusion (physico-chimique)

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

Les hautes températures, ainsi que les pressions et la vitesse relative de défilement du copeau, permettent de donner suffisamment d'énergie (élévation de température) aux atomes pour que ceux-ci puissent migrer de l'outil au copeau. Ce processus est aussi grandement accentué par les phénomènes d'affinités chimiques que l'on peut avoir entre les atomes de la matière usinée et les atomes de l'outil (*Figure I-15*).

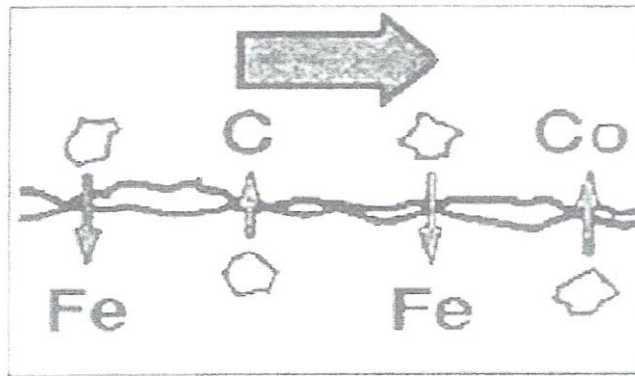


Figure I-15 Processus d'usure par diffusion.

e) Processus d'oxydation (physico-chimique)

Le milieu de l'usinage est constitué:

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

Avec l'élévation de température de l'outil, la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoque localement une fragilisation de l'outil par oxydation de ce dernier (figure I-16).

De plus, le potentiel d'oxydo-réduction des matériaux diminue avec la température ce qui favorise d'autant le processus d'oxydation des outils.

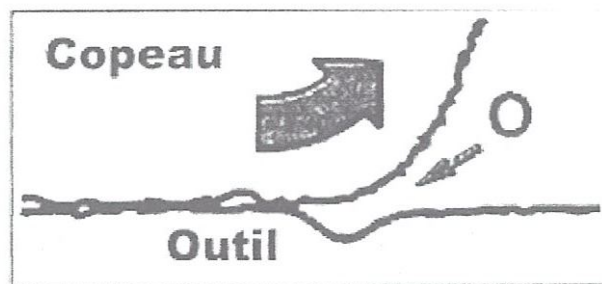


Figure I-16 Processus d'usure par oxydation.

f) Processus combiné

Au cours d'un usinage, l'ensemble de ces processus se produit. Suivant les conditions d'usinage, certains processus sont favorisés par rapport à d'autres.

En général on peut dire que:

- Les processus d'abrasion et d'adhésion sont favorisés lors des usinages où les températures sont faibles et où les vitesses de défilement du copeau sont faibles. En effet dans ces cas là, il n'y a pas de formation de couche de glissement due à la température ou aux vitesses élevées. Il y a donc grippage ou arrachement.
- Les processus de diffusion, de déformation plastique, d'oxydation sont favorisés par l'élévation de la température et des vitesses de coupe. Ce qui peut se résumer d'après KONIG par le diagramme suivant (*Figure I-17*).

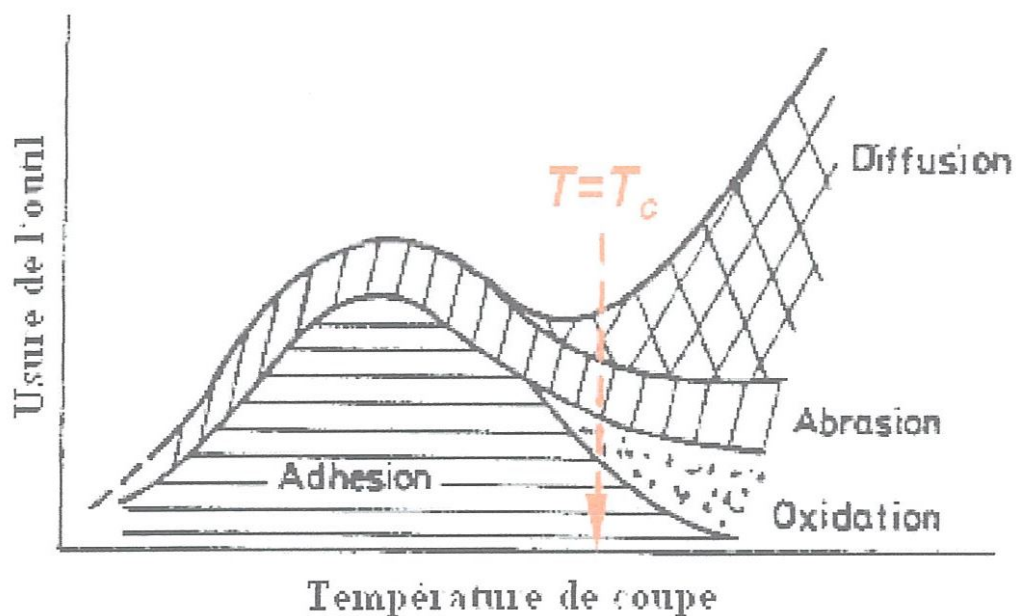


Figure I-17 Diagramme de combinaison des différents processus d'usure en fonction de la température d'usinage (parallèle possible avec la vitesse) [CAR03].

I-8-2 Usure visible sur l'outil

L'ensemble des processus décrits dans les deux paragraphes précédents, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils.

Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (*Figure I-18*).

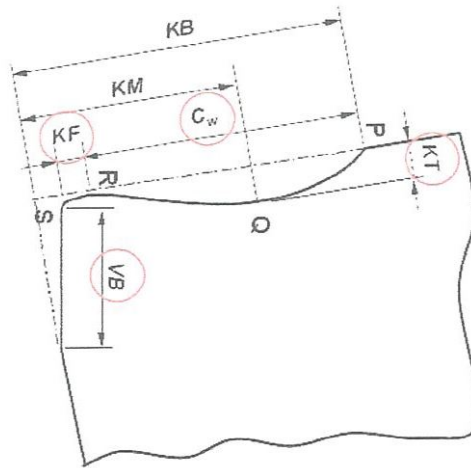


Figure I-18: Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil [CAR03].

- KM: Distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil ;
- KT: Profondeur du cratère ;
- KB: Largeur du cratère ;
- γ_c : Angle de cratérisation ;
- VB: Hauteur de l'usure en dépouille ;
- VN: Profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale ;
- VBC: Profondeur entre l'arête initiale et la zone usée ;
- SV: Profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usée.

a) Usure en dépouille

Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil et provoque une bande striée parallèle à l'arête de coupe (*figure I-19*). Elle influe sur l'état de surface de la pièce usinée et sur la précision dimensionnelle de l'usinage car elle modifie la position de l'arête de coupe.

C'est un critère général pour la tenue d'outil, caractérisé par une valeur d'usure admissible VB.

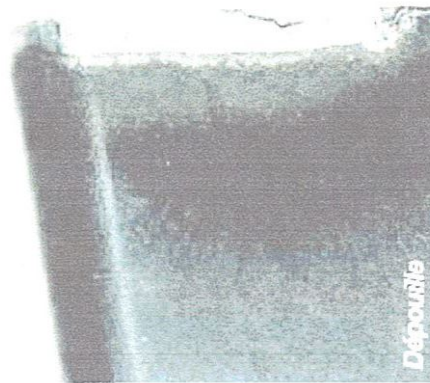


Figure I-19 Usure en dépouille [TRA06].

b) Usure en entaille ou par oxydation

Elle apparaît ponctuellement au niveau du point de contact entre l'arête principale de coupe et la surface de la pièce mais elle peut aussi apparaître sur la face de dépouille secondaire. Elle est due à l'écrouissage ou l'oxydation de la pièce (*figure I-20*).

Ce genre d'usure due à des phénomènes métallurgiques (calamine des pièces forgées, différence de taille de grain des pièces moulées, oxydation des aciers, austénitiques par exemple) est caractérisé par l'indice VN. Suivant l'importance de cette usure, il y a des risques de rupture.



Figure I-20 Usure en entaille [TRA06].

c) Usure en cratère

C'est une usure en creux sur la face de coupe, caractérisée par la profondeur de cratérisation (indice KT) et le rapport K_t/K_M ou son angle de cratérisation γ_c . Elle

peut avoir à terme une incidence sur la tenue d'outil (durée de vie: effondrement ou recul de l'arête de coupe) (*figure I-21*).

Elle est due au frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. Lors de l'usinage, la température élevée à l'interface copeau-outil et les pressions de contact entre le copeau et l'outil, provoquent une diffusion importante de la matière de l'outil vers le copeau par processus d'adhésion.

Elle donne aussi une déformation plastique de la pointe de l'outil, caractérisée par un renflement de la face de dépouille.

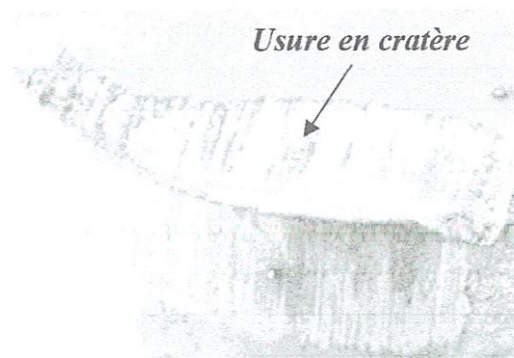


Figure I-21 Usure en cratère [CAR03].

d) Rupture de la plaquette

Une rupture de la plaquette signifie en général détérioration de l'outil et de la pièce. Les causes sont multiples et dépendent de la machine-outil et de la pièce. Elle est souvent le résultat d'entailles sur l'arête de coupe, d'une cratérisation ou d'une usure trop importante (*figure I-22*).



Figure I-22 Rupture de la plaquette [TRA06].

e) Arêtes rapportées

Les arêtes rapportées résultent d'une accumulation de métal de la pièce usinée sur la face de coupe, en particulier dans le cas de matériaux difficilement usinables. Il arrive parfois que cet apport de métal se détache et détériore l'arête de coupe. Il mène en outre à des états de surface médiocres (*figure I-23*).

Le phénomène est dû à une vitesse de coupe et une avance trop faible ou à des angles de coupe non appropriés.

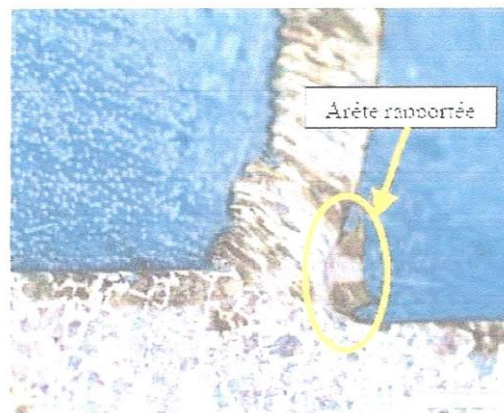


Figure I-23 Arêtes rapportées [REC02].

I-9 Travaux de recherches concernant l'usinage des aciers inoxydables

Cette partie récapitule la recherche dans la littérature existante reliée à l'usinage des aciers inoxydables. L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage de ces aciers jusqu'à nos jours. Dans cette recherche on a trouvé que beaucoup d'auteurs ont étudié l'influence de la matière à usiner, le rôle du revêtement et les paramètres de coupe optimaux, l'usure de l'outil, l'influence de revêtements, l'influence de différents types de substrats et l'effet de l'usinage à sec sur l'usinabilité de ces aciers. Plusieurs articles ont été publiés dans ces domaines. Parmi eux on cite :

KORKUT I. et al. [KOR04], ont démontré l'effet de certains facteurs sur l'usinabilité de l'acier inoxydable dans le but de la détermination des paramètres de coupe optimaux pendant l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9.

Les propriétés physico-mécaniques (la haute résistance à la rupture, la basse conductivité thermique, la ductilité élevée et la tendance élevée de l'écrouissage) des aciers inoxydables austénitiques qui rendent l'usinage de cet acier vraiment difficile. Premièrement, il a étudié la signification de l'effet de la vitesse de coupe sur l'usure et la rugosité de la surface usinée. Il a observé une diminution de l'usure de l'outil quand la vitesse de coupe augmente jusqu'à une valeur de 180 m/min. L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à la diminution de la rugosité (R_a) (*figure I-24*). Ils ont indiqué que la chaleur a une influence négative sur les performances de l'outil. Aux vitesses de coupe élevées le processus de la coupe génère une grande quantité de chaleur et il est essentiel que la chaleur produite soit dissipée rapidement. A cause de la basse conductivité thermique de l'acier inoxydable X2CrNi18-9, la chaleur ne se dissipe pas rapidement et l'outil se ramollit et devient moins dur et par conséquent il s'use rapidement.

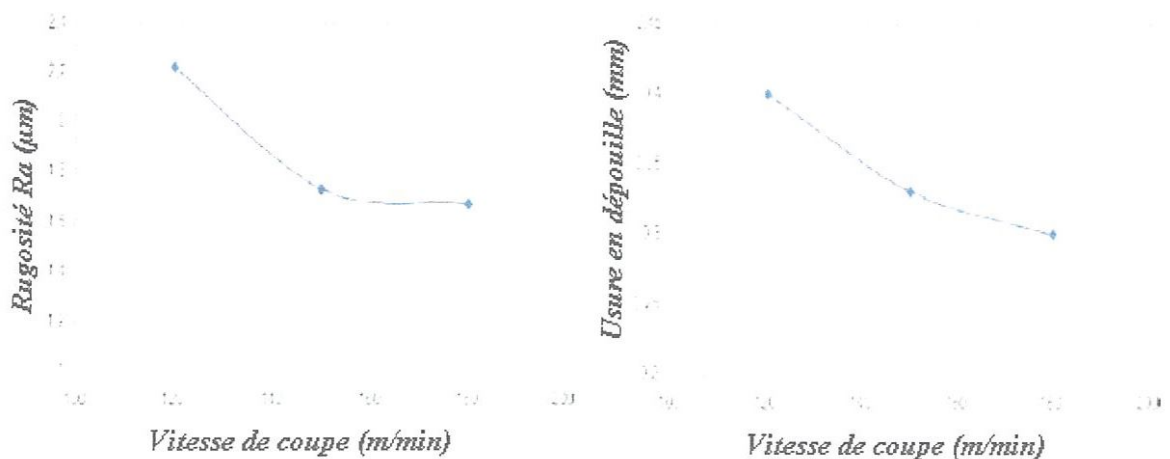


Figure I-24 Evolution de la rugosité et l'usure en dépouille en fonction de la vitesse de coupe [KOR04].

Ciftci I. [CIF05] a étudié l'usinabilité de deux aciers inoxydables austénitiques par des outils en carbure cimenté avec un revêtement multicouche CVD. Il a fait des essais de tournage sur deux nuances des aciers inoxydables AISI304 et AISI316 utilisant deux nuances différentes des outils de coupe en carbure cimenté, ayant différentes couches supérieures de revêtements. L'influence de la nuance de la pièce

en œuvre, de la couche supérieure du revêtement de l'outil de coupe, et de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe et la rugosité de la surface usinée ont été étudiées.

Selon l'auteur, La vitesse de coupe a une influence significative sur les valeurs de la rugosité de la surface usinée. En augmentant la vitesse de coupe, les valeurs de la rugosité diminuent jusqu'à une valeur minimale, au delà elles augmentent, et des valeurs très élevées de la rugosité de surface sont obtenues aux faibles vitesses de coupe. Cette élévation est due évidemment à la formation de l'arête rapportée et aussi à l'écaillage des arêtes tranchantes. Il a trouvé que les outils de coupe à revêtement TiC/TiCN/TiN ont donné des efforts de coupe plus faibles que les outils à revêtement TiCN/TiC/Al₂O₃ bien que la différence ne soit pas significative. Ceci a été attribué au coefficient de frottement réduit de la couche supérieure du revêtement (TiN). L'étude montre aussi que l'acier AISI 316 donne des efforts de coupe très élevés à toutes les vitesses de coupe utilisées par rapport à l'acier AISI 304. Les 2.0% de molybdène présents dans l'acier AISI 316 ont été considérés la cause principale de l'élévation des efforts de coupe.

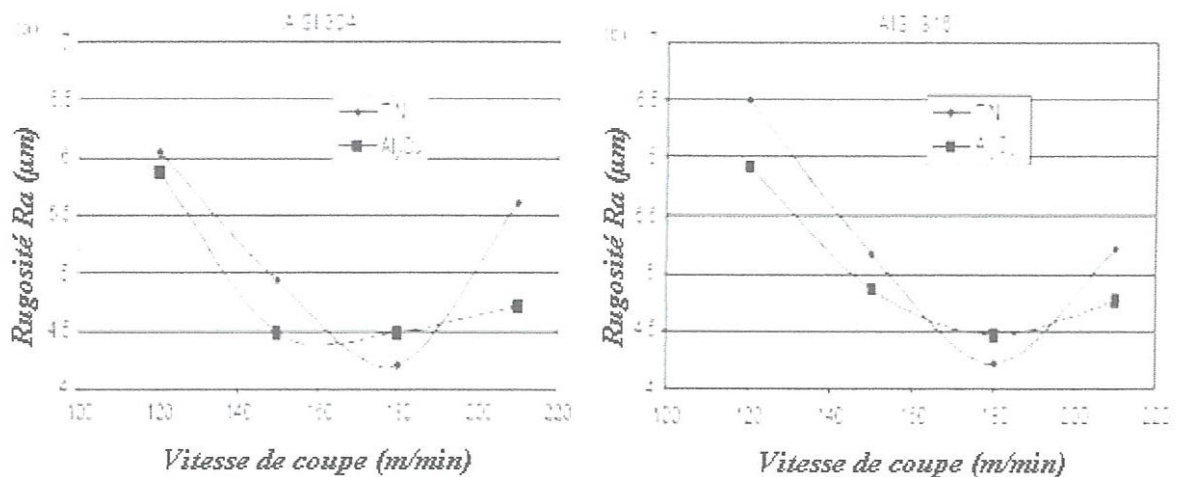


Figure I-25 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe

a) AISI 304, b) AISI 316 [CIF05].

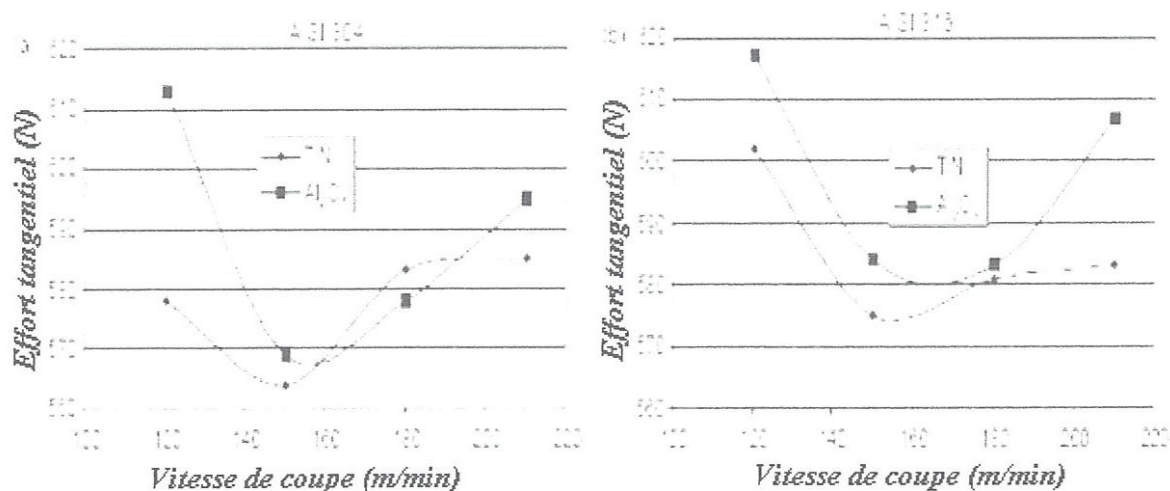


Figure I-26 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe

a) AISI 304, b) AISI 316 [CIF05].

JUKKA P. et al. [JUK01] ont étudié les différents mécanismes actifs de l'usure et de rupture des outils en carbure cémentés à revêtement TiN pendant l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X5CrMnN18-18. L'azote stabilise l'austénite, augmente la résistance à la rupture de l'acier et favorise l'écrouissage. Les aciers inoxydables sont souvent considérés en tant que des matériaux difficiles à usiner. Le copeau a été analysé par un microscope électronique à balayage. L'effet du pourcentage de l'azote est également analysé par la mesure des efforts de coupe. Le pourcentage élevé de l'azote diminue les efforts de coupe et limite l'usinabilité. Les auteurs ont remarqué qu'une usure catastrophique au niveau du bec de l'outil est due aux efforts de coupe élevés et à l'ébrèchement de l'arête tranchante. La présence de l'arête rapportée diminuait l'usinabilité de l'acier X5CrMnN18-18, ceci est expliqué par la mauvaise qualité de surface. Ils ont confirmé que le pourcentage de l'azote a un effet significatif sur la durée de vie de l'outil, pour la nuance qui contient 0.91% la durée de vie était 30min et elle a diminué à 10min pour celle qui contient 0.57%.

La hausse de la vitesse de coupe de 60 à 70m/min provoque la diminution de la durée de vie de l'outil rapidement de 10 à 5min pour l'acier qui contient 0.57%N. Ils ont démontré aussi qu'il n'y a aucune différence d'un point de vue effort de coupe

entre les deux nuances des aciers, pour une teneur de 0.91%N l'effort tangentiel est de 2.4 à 3.5KN et pour 0.57%N il est de 1.8 à 2.2KN.

Neo K.S. et al. [NEO03], ont étudié la performance d'un outil en CBN pour l'usinage de l'acier inoxydable (X38Cr13), cet acier est de la famille martensitique, il est largement utilisé pour la fabrication des matrices et des moules de précision. Les performances en termes de rugosité de surface et d'usure de l'outil en PCBN et en CBN conventionnel dans différentes conditions d'usinage étaient étudiées et leurs résultats étaient comparés. Sur la base des résultats expérimentaux, le PCBN s'est avéré plus performant en terme de résistance à l'usure comparé à l'outil en CBN conventionnel. Il peut également réaliser un état de surface miroir dont la rugosité R_a est inférieure à 30nm, et par conséquent il semble être un outil prometteur pour la coupe des matériaux réservés pour la fabrication des matrices et des moules. Les auteurs ont conclu que, pour atteindre une bonne qualité de surface sur STAVAX (X38Cr13), la vitesse de coupe élevée est exigée pour les outils en CBN et en PCBN, ce dernier peut réaliser un meilleur état de surface. Il ont constaté aussi qu'à la gamme élevée de la vitesse de coupe, l'outil en PCBN peut mieux résister à l'usure.

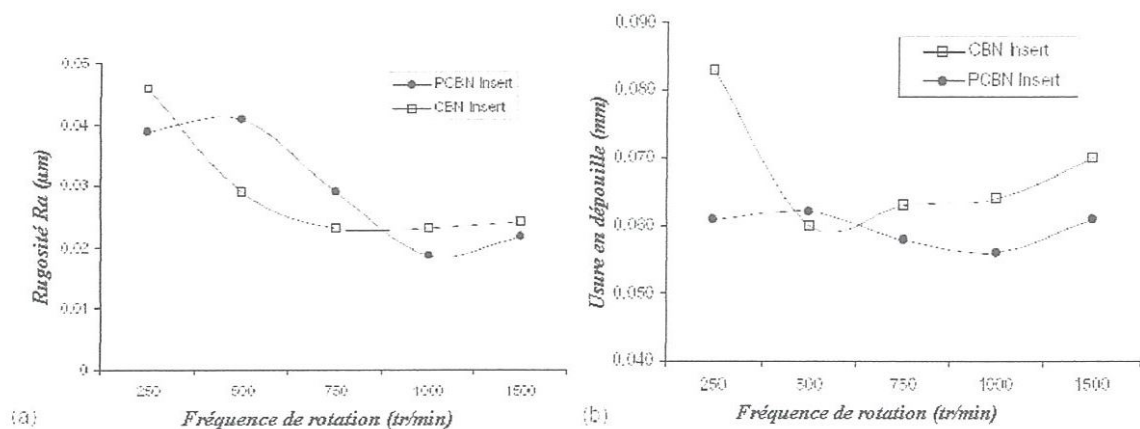


Figure I-27 Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction de la fréquence de rotation [NEO03].

KUMAR A. et al. [KUM06], ont étudié l'évolution de l'usure et la durée de vie d'un outil en céramique mixte à base d'alumine lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC. Les auteurs ont élaboré des modèles de durée de vie de l'outil en fonction de l'usure. Ils ont conclu que l'usure en dépouille affecte la durée de vie de l'outil à des faibles vitesses de coupe, cependant, l'usure en cratère ou l'usure d'entaille affecte la durée de vie aux vitesses élevées, au-dessus de 200 m/min.

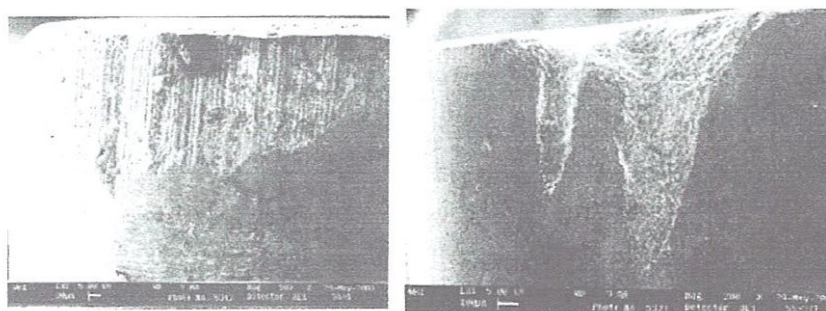


Figure I-28 L'usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC [KUM06].

Liew [LIE04] a étudié les performances des outils en carbure non revêtu et revêtu lors de l'usinage de l'acier inoxydable STAVAX (AISI 420) aux basses vitesses de coupe. Pendant l'usinage de cet acier qui a une dureté de 55 HRC, la surface d'attaque de l'outil a été soumise à deux modes distincts d'usure. Aux faibles vitesses de coupe, il y'a une apparition des écailles sur l'arête tranchante de outil ce qui induit une dégradation significative de l'état de surface. L'utilisation du liquide d'arrosage pendant l'usinage a réduit l'usure en dépouille, ce qui empêche la rupture de l'arête et améliore l'état de surface. L'usinage par le carbure à revêtement multicouches PVD avec la présence du lubrifiant à toutes les vitesses testées a donné des valeurs de R_t très faibles sans défauts de surface tels que les micro-copeaux soudés sur la surface usinée. Les résultats expérimentaux montrent que la présence d'un revêtement sur un outil en carbure empêche la détérioration rapide de celui-ci et lui a donné une bonne résistance à l'usure.

Belluco W. [BEL02] a présenté une recherche sur l'effet d'une huile lubrifiante végétale sur l'intégrité de la surface et la précision dimensionnelle lors des opérations d'alésage et de taraudage de l'acier inoxydable AISI316L. L'intégrité de la surface a été évaluée par la mesure de la rugosité, microdureté, et la technique métallographique. Le fluide de coupe s'est avéré avoir un effet significatif sur l'intégrité de la surface et l'épaisseur de la couche superficielle durcie par écrouissage, aussi bien que la précision dimensionnelle. Les fluides de coupe à base des huiles végétales ont donnés des performances comparables ou meilleures que les huiles minérales. Ces fluides de coupe donnent un bon état de surface, une épaisseur réduite de la couche déformée plastiquement et une meilleure précision dimensionnelle.

Les aciers inoxydables peuvent, eux aussi, être divisés en trois catégories, ceux austénitiques, ceux ferritiques et ceux martensitiques. Les aciers inoxydables austénitiques sont les plus difficiles à usiner du fait, en partie, qu'ils s'écrouissent facilement sous l'action de coupe. Cet écrouissage forme une peau très dure susceptible d'aboutir à une usure en entaille à la profondeur de coupe lors des opérations suivantes d'usinage. L'alliage est, également, d'une nature "gommeuse" susceptible de contribuer à la formation d'arêtes rapportées, d'aboutir à des finis de surface quelconques, d'accroître l'échauffement et de réduire la tenue d'outil. Néanmoins, on utilise couramment les aciers austénitiques pour leur excellente résistance à la corrosion [TRA05].

T.R. Lin [LTR00] a étudié le comportement des revêtement de coupe lors de perçage de l'acier inoxydable SUS304 utilisant l'usinage à avance variable pour améliorer la durée de vie de l'outil et diminuer la hauteur de bavure pendant le débouchage de la matière. Il a utilisé quatre types de revêtement tels que (TiC, TiCN, CrN et TiAlN). Les forets qui ont un revêtement [TiN] et [TiCN] donnent des meilleurs résultats par rapport aux autres revêtements (*figure I-29*). Il a montré aussi que la détérioration de l'outil ainsi que la dégradation de la surface usinée sont dues clairement au copeau sous forme d'un ruban long.

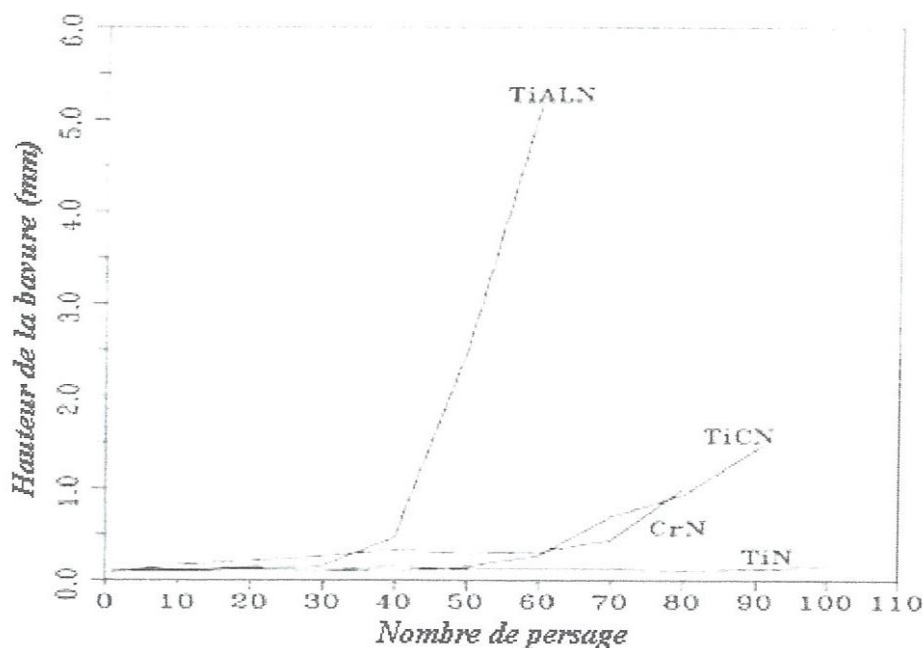


Figure I-29 Hauteur de bavure en fonction de nombre de perçages usinés [LTR00].

Noordin M.Y. [NOO07] a étudié le comportement des outils de coupe lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable martensitique X38Cr13 durci à 45 HRC. Deux matériaux de coupe ont été utilisés, le premier un cermet revêtu de nuance KT315 (PVD, TiN/TiNC/TiN) et le second en carbure revêtu KC9110 (MTCVD, revêtement spécial d'épaisseur de 18 μ m) avec différentes angles de coupe (0, -3 et -5). Dans cette étude l'hauteur a montré que le matériau de coupe, la vitesse de coupe, l'avance et l'angle d'attaque affectent significativement l'usure de l'outil et la tenue. Les figures I-29 et I-30 illustrent une comparaison de performance entre le cermet KT315 et le carbure KC9110.

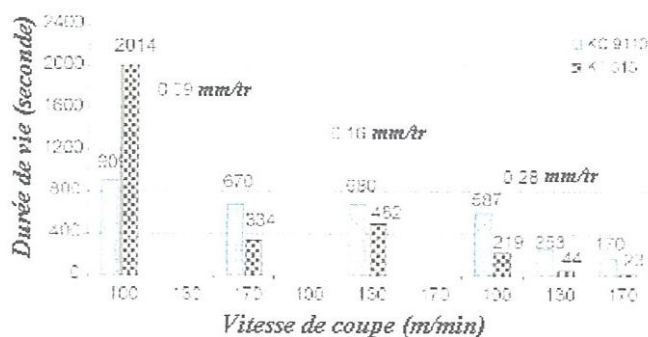


Figure I-29 Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différentes vitesses de coupe et avances pour un angle d'attaque -5° [NOO07].

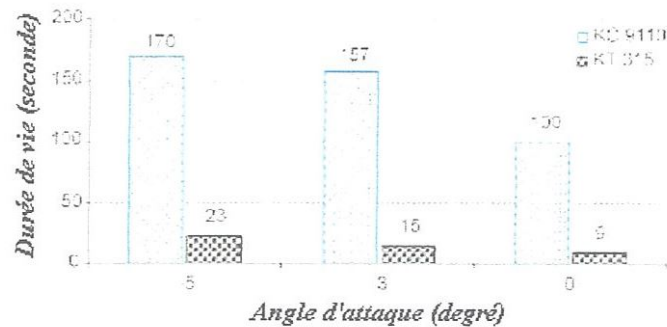


Figure I-30 Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différents angles d'attaque pour $V_c=170$ m/min [NOO07].

Pour une vitesse de 100m/min et une avance de 0.09mm/tr le cermet donne une durée de vie très importante par rapport à celle de carbure, par contre pour les conditions sévères surtout pour $V_c=170$ m/min et $f=0.28$ la tenue du cermet est de l'ordre de 23 seconde et celle du carbure et de l'ordre de 170 seconde. Cette différence a été attribuée au type de revêtement de carbure [NOO07].

I-10 Position du problème

En se basant sur l'étude bibliographique, nous pouvons conclure que les aciers inoxydables sont classés parmi les aciers difficiles à usiner et spécialement les aciers inoxydables austénitiques. Ces aciers se caractérisent par une ductilité élevée ce qui favorise l'apparition de l'arête rapportée sur l'outil et aussi les micro-copeaux sur la pièce. Ainsi, un coefficient de frottement élevé qui accélère l'usure de l'outil. Ces caractéristiques nous ont obligé de choisir une série de matériaux de coupe composée de carbures revêtus et non revêtus et des cermets revêtus et non revêtus pour étudier le comportement des matériaux de coupe et le rôle du revêtement ainsi que le comportement de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 lors de tournage.

CHAPITRE II

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

II-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, un banc d'essais comportant un tour, une plate forme pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée et un microscope pour la mesure de l'usure sur les plaquettes de coupe.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 08 Mai 1945.

II-2 Matériels utilisés

II-2-1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40 C de puissance sur la broche égale à 6.6KW (*figure II-1*). Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont comme suit (45; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000) tr/min.

- les avances disponibles sont: (0.08; 0.10; 0.11; 0.12; 0.14; 0.16; 0.18; 0.20; 0.22; 0.24...0.8) mm/tr.



Figure II-1 Tour parallèle modèle SN 40 C.

II-2-2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage

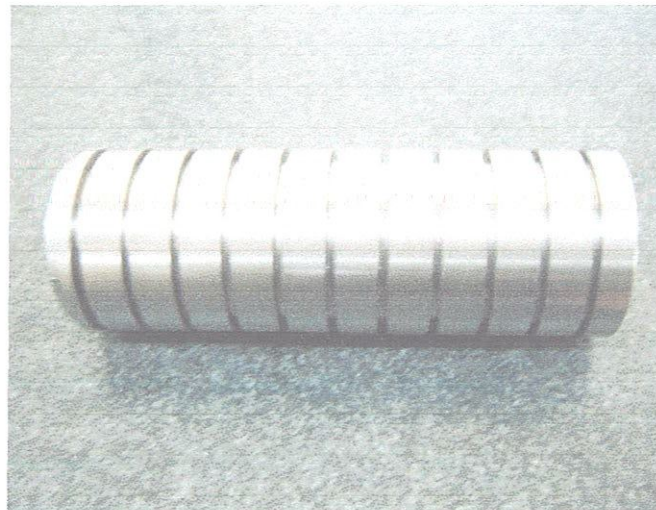
C'est un acier inoxydable austénitique fortement allié, sa nuance est X2CrNi18-9. Cet acier offre une bonne combinaison de résistance à la corrosion et

d'aptitude au formage et à la fabrication, ainsi qu'une résistance à l'usure avec une très bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contraintes.

Les aciers inoxydables austénitiques sont utilisés dans d'innombrables domaines: vie quotidienne (coutellerie, outils de couture et ustensiles de cuisine), industrie mécanique (instruments de mesure), agroalimentaire (malaxeurs), chimie, transports, médecine et chirurgie, etc.



a) Eprouvette utilisée pour les essais de longue durée



b) Eprouvette utilisée pour les essais de courte durée

Figure II-2 *Eprouvettes pour différents essais.*

Pour les essais de longue durée (évolution de l'usure de l'outil et la rugosité en fonction du temps) on a utilisé des éprouvettes de diamètre $\Phi=100\text{mm}$ et de longueur $L=400\text{mm}$ (*figure II-2-a*), et pour les essais de courte durée (efforts de coupe et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe : V_c, f

et ap) on a utilisé des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de 20mm de longueur (*figure II-2-b*).

La composition chimique de l'acier **X2 Cr Ni 18-9** est représentée dans le **tableau II-1**.

élément	Pourcentage (%)
Carbone	0.02
Manganèse	1.44
Silicium	0.33
Phosphore	0.02
Soufre	0.016
Cuivre	0.727
Aluminium	0.012
Titane	0.005
Niobium	0.013
Nickel	7.69
Chrome	16.91
Molybdène	0.402
Vanadium	0.112
Etain	0.014
Tungstène	0.066
Fer	72.10

Tableau II-1 Composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9.

Cette analyse a été faite au laboratoire du Complexe Sidérurgique d'**El HADJAR**.

II-2-3 Plaquette de coupe

Les plaquettes sont amovibles de forme carrée (*figure II-3*), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le tableau **II-2** [SAN07], chaque plaquette à un brise-copeau différent comme le montre la *figure II-4*.

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	GC 1025	PVD	TiAlN	SNMG 12-04-08-PF
	GC 2015	CVD	Ti(C,N)/Al ₂ O ₃ /TiN	SNMG 12-04-08-MF
Carbure non revêtu	H13A	----	----	SNMG 12-04-08-QF
Cermet revêtu	GC 1525	PVD	TiC/TiN	SNMG 12-04-08-MF
Cermet non revêtu	CT 5015	----	----	SNMG 12-04-08-QF

Tableau II-2 Informations relatives aux plaquettes de coupe.

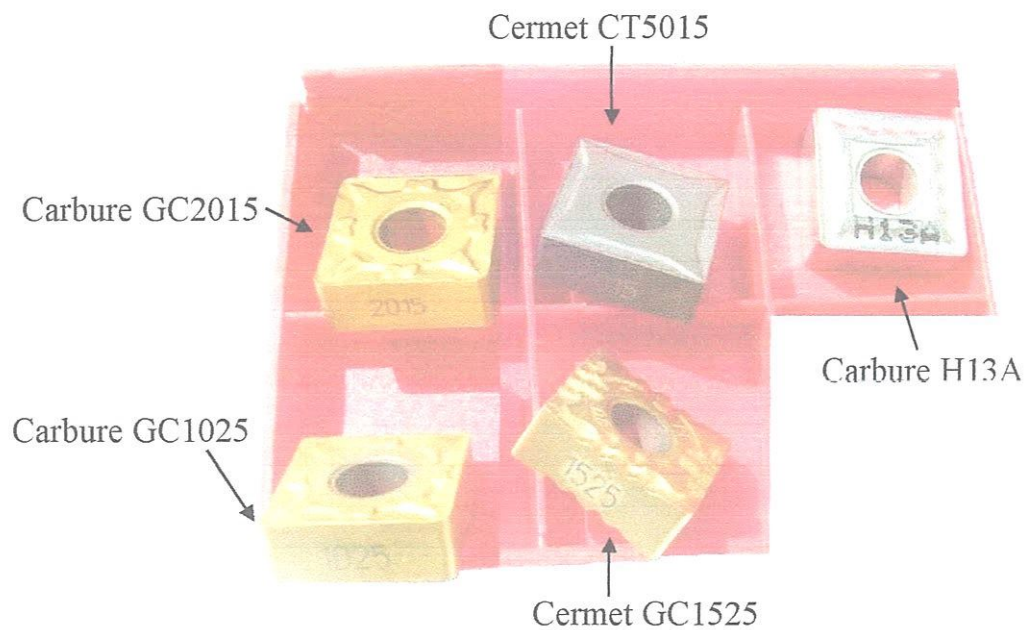


Figure II-3 Photos des plaquettes de coupe utilisées.

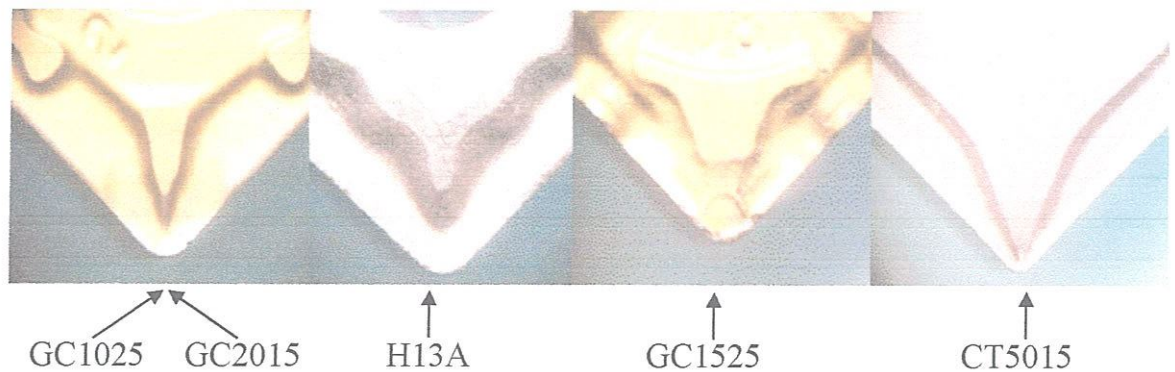


Figure II-4 Brise copeau pour chaque nuance.

Carbure 1025 : c'est une nuance à grain très fin, avec le tout nouveau revêtement PVD de TiAlN tenace et résistant à l'usure. Présente les qualités requises pour des arêtes de coupe vives et une sécurité élevée contre le martelage des copeaux. Pour tolérance serrées et excellent état de surface en finition des aciers inoxydables.

Carbure 2015 : triple revêtement sur un substrat tenace enrichi en cobalt. Excellente adhérence du revêtement au substrat, une bonne résistance à l'usure surtout l'usure par diffusion et à la déformation plastique aux températures élevées, un coefficient de frottement réduit, donc elle empêche la formation de l'arête rapportée.

Carbure H13A : nuance carbure non revêtu avec bonne résistance à l'usure par abrasion et bonne ténacité. Bon choix pour opération de la semi-finition à l'ébauche d'aciers réfractaires et d'alliages de titane.

Cermet 5015 : nuance de carbure à base de titane (cermet), non revêtu. L'emploi de titane au lieu de tungstène comme base de particules dures se traduit par une plus grande stabilité chimique, et une bonne résistance à l'usure en dépouille, en cratère et en entaille. Nuance dure, dont la bonne résistance à la déformation plastique et la grande stabilité chimique conviennent bien pour les matières collantes.

Cermet 1525 : nuance cermet à revêtement PVD pour la finition et la semi-finition. Substrat du même type que CT5015 avec tous ses avantages mais plus tenace. Le revêtement de TiC/TiN dur et résistant à l'usure confère d'excellentes propriétés dans une plage étendue de vitesse de coupe. Le plus tenace des cermets, pour une haute sécurité du processus.

II-2-4 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au tableau II-3.

Désignation	Marque	χ	α	γ	λ	χ_r
PSBNR25x25M12	SANDVIK coramant	75°	6°	-6°	-6°	15°

Tableau II-3 Caractéristiques de porte plaquette utilisé.

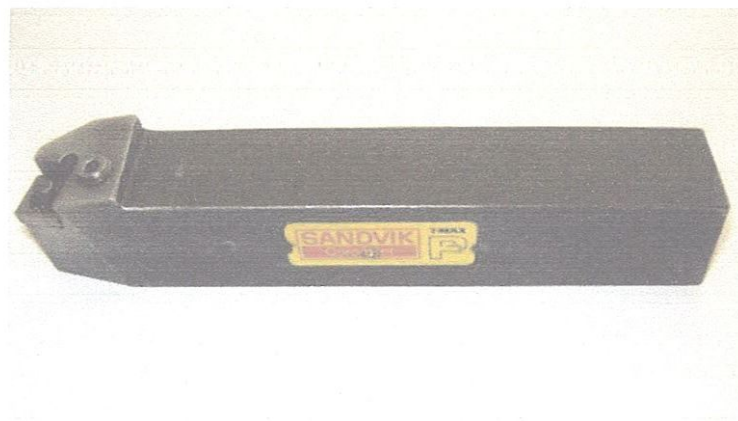


Figure II-4 Porte outil utilisé.

II-2-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dynamomètre (*KISTLER* 9257 B), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite: la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée

aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (*figure.II-5*). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (*figure.II-6*).

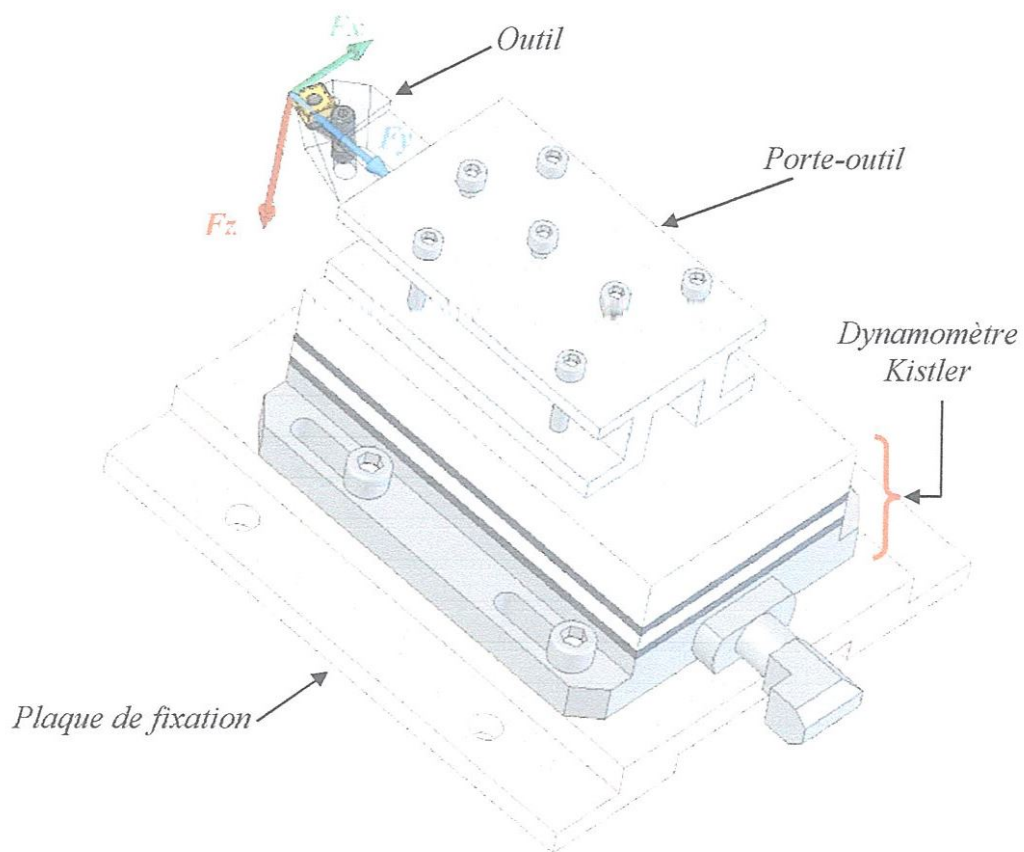


Figure II-5 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

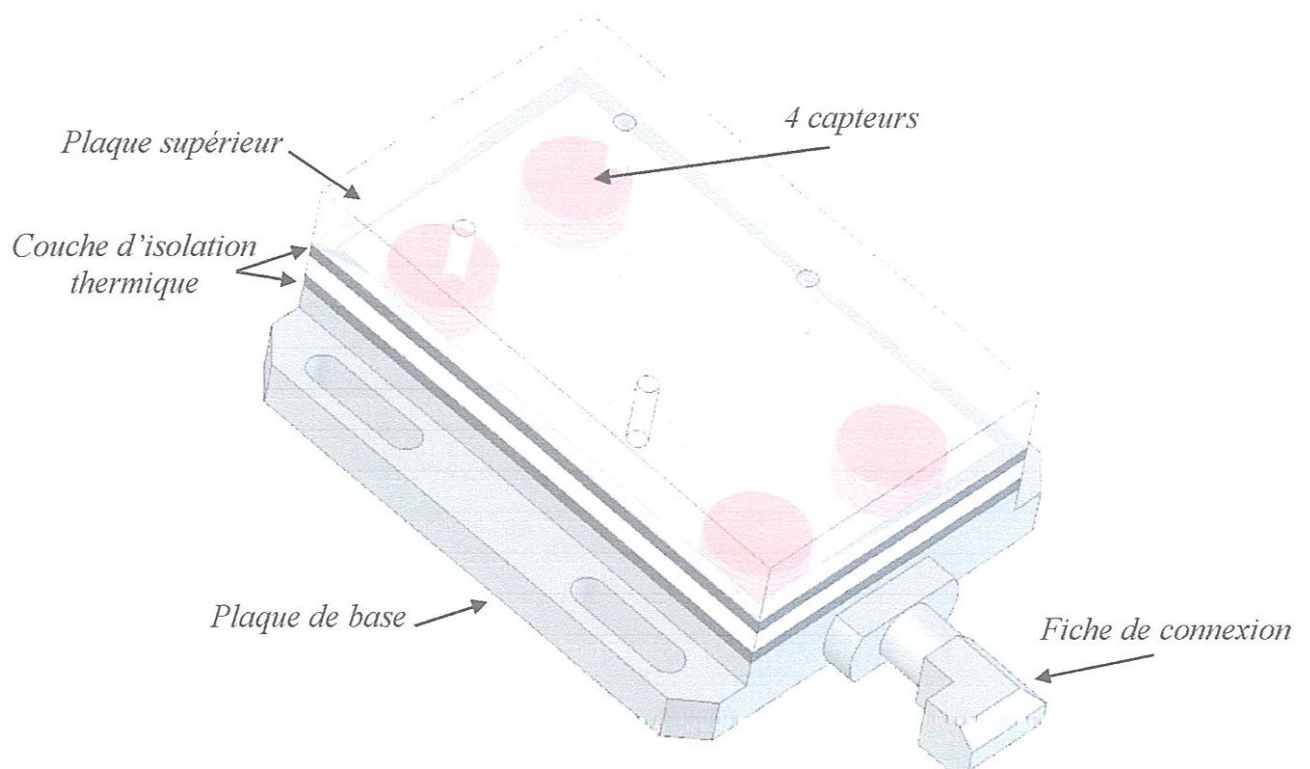


Figure II-6 Capteur d'effort de coupe **KISTLER**.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La *figure II-7* présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composantes des efforts de coupe (Force axiale: F_x , Force radiale: F_y et Force tangentielle: F_z).

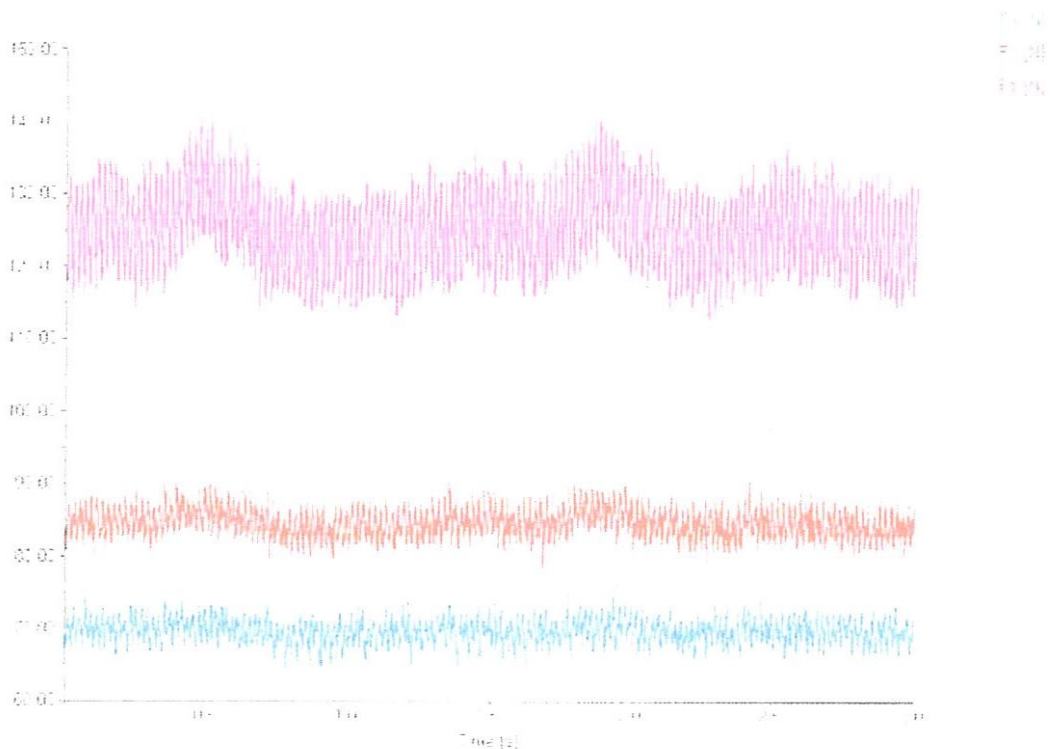


Figure II-7 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à 3 composantes (9257 B): le porte outil type 9403 vissable est employé pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 (*figure II-8*).

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée ;
- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis ;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi) ;
- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC) ;
- Traceur.

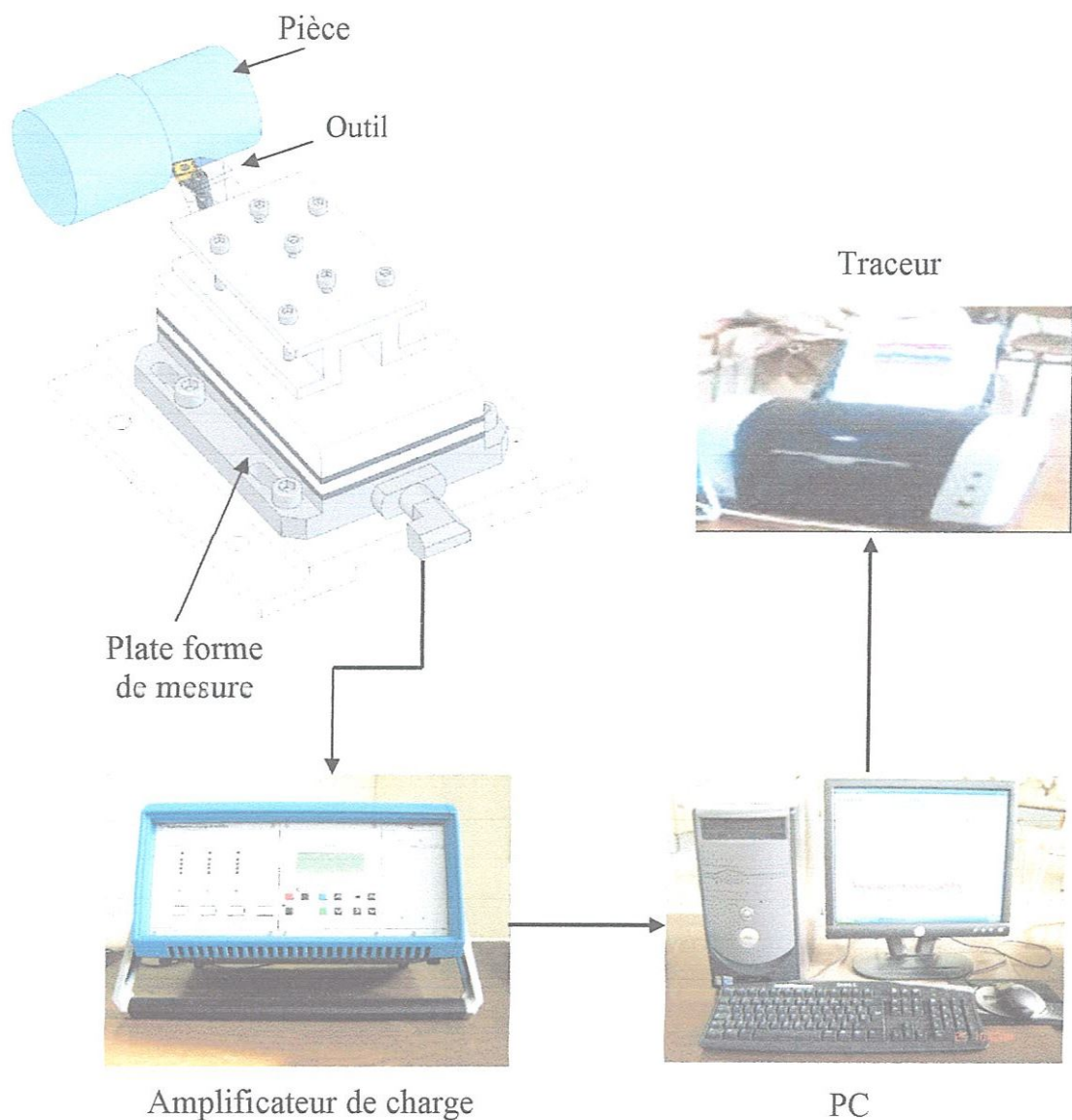


Figure II-8 Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II-2-6 Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille VB

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) est du type HUND (W-AD). La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001mm. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges

micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure V_B . Après chaque séquence de travail la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (*figure II-9*).



Figure II-9 Microscope pour la mesure de l'usure.

II-2-7 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) Surftest 201 (Mitutoyo) (*figure II-10*).

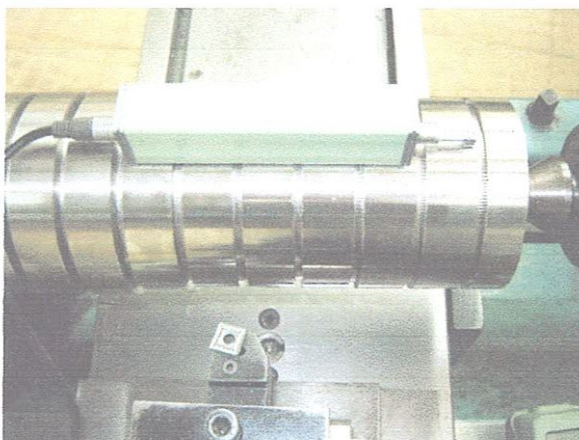


Figure II-10 Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce.

II-2-8 Pyromètre à infrarouge pour la mesure de la température de coupe

Durant l'usinage, pour mesurer la température de coupe, nous avons utilisé un pyromètre à infrarouge modèle Raynger 3I (*figure II.11*). Le pyromètre mesure les températures de surface à distance. Il concentre l'énergie infrarouge rayonnant de la cible et calcule sa température de surface. Il calcule également les températures (moyenne, maximale et minimale) qui seront affichées sur l'écran digital en degré Celsius ou Fahrenheit. Une sortie analogique/digitale permet le transfert des données enregistrées. Le pyromètre infrarouge Raynger 3I présente les caractéristiques suivantes :

- Etendue de mesure -30° à 1200°C
- Etendue spectrale 8 à 14μ
- Résolution optique 75 : 1
- Emissivité 0,10 à 1,00 par pas de 0,01 (0,95 par défaut)
- Visée laser double
- Temps de réponse 700 msec



Figure II-11 Pyromètre à infrarouge.

II-2-9 Autres équipements

- un chronomètre pour enregistrer le temps d'usinage ;
- un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- un appareil photo numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés et les photos de l'usure.

II-3 Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les *tableaux II-4 et II-5*. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
V_c (m/min)	150	f (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 ; 0.2 ; 0.24 ; 0.28.
a_p (mm)	0.5		
V_c (m/min)	150	a_p (mm)	0.3 ; 0.6 ; 0.9 ; 1.2 ; 1.5 ; 1.8.
f (mm/tr)	0.08		
a_p (mm)	0.5	V_c (m/min)	100 ; 150 ; 210 ; 290 ; 410 ; 590.
f (mm/tr)	0.08		

Tableau II-4 Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée).

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
V_c (m/min)	250	f (mm/tr)	0.08 0.14
a_p (mm)	0.2		
V_c (m/min)	390	f (mm/tr)	0.08 0.14
a_p (mm)	0.2		

Tableau II-5 Conditions de coupe pour les essais d'usure et de la rugosité en fonction du temps (essais longue durée).

II-4 Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , a_p), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil (α , γ , λ , χ , ε_r), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité,... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

II-4-1 Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe, durée de vie). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots (II-1)$$

Où:

- N: nombre d'essais ;
- q: nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;
- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors: $N=3^3=27$.

Les essais ont été numérotés de 1 à 27. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II-6.

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Tableau II-6 Matrice de planification pour un plan 3^3

II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La composition chimique des éprouvettes et les caractéristiques des matériaux de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

CHAPITRE III

ÉTUDE DE L'USINABILITÉ DE

L'ACIER X2CrNi18-9

III.1 Introduction

Ce chapitre porte sur l'évolution des différents phénomènes de coupe étudiés tels que les efforts et les pressions de coupe, la rugosité de surface et l'usure pour les différentes nuances de plaquettes utilisées. Les résultats expérimentaux obtenus à partir des mesures effectuées par les équipements exposés au chapitre II seront présentés et nous proposons une analyse complète pour comprendre le comportement des outils de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9.

III-2 Essais réalisés

Deux types d'essais ont été réalisés pour caractériser l'usinabilité de l'acier inoxydable X2CrNi18-9.

- Essais de courtes durées, effectués sur des paliers de 20mm de longueur et de 100mm de diamètre.
- Essais de loges durées qui sont réalisés sur des éprouvettes de 400mm de longueur et de 100mm de diamètre.

L'ensemble des résultats indiqués dans ce chapitre sont comme suit :

- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sur les efforts de coupe.
- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sur les pressions de coupe.
- Résultats de l'influence des éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) sur la rugosité des surfaces.
- Résultats de l'influence de la nuance du matériau de coupe sur les efforts et la rugosité.
- Résultats de l'évolution de l'usure en fonction du temps.
- Résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps

III-3 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

La *figure III-1* présente un exemple d'acquisition des efforts de coupe par la plate forme Kistler. Ces résultats correspondent aux profils des trois composantes des efforts enregistrés (effort axial, effort radial et effort tangentiel).

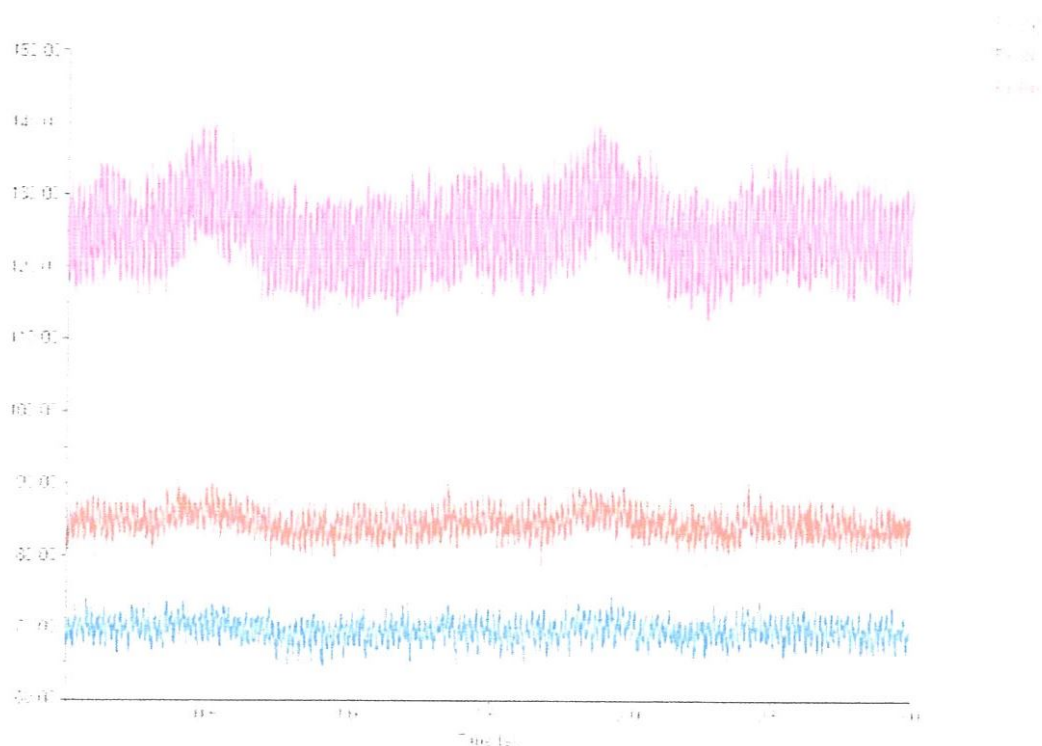


Figure III-1 Exemple d'acquisition des efforts de coupe.

III-3-1 Influence de la vitesse de coupe

Les *figure III-2 (a, b, c, d et f)* montrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les cinq matériaux de coupe testés. Cette évolution est presque la même pour toutes les nuances jusqu'à la vitesse de 410m/min. On a remarqué une diminution des efforts de coupe, cela est dû à l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui rend le matériau plus malléable et s'écoule facilement sur la surface d'attaque. Au-dessus de cette vitesse, les vibrations dues aux vitesses de coupe élevées conduisent à une légère élévation des efforts de coupe. Pour la nuance H13A (carbure non revêtu), on a remarqué un changement brusque de l'allure vers l'augmentation à cause de l'usure en dépouille accéléré de ce matériau.

Du point de vue effort de coupe, cette nuance n'est pas adaptée pour usiner cet acier aux vitesses de coupe supérieures à 410m/min. Généralement les cinq nuances donnent des valeurs des efforts très voisines avec une légère différence qui varie d'un matériau à un autre à cause du matériau de coupe lui-même, du type de revêtement et de la géométrie du brise-copeau.

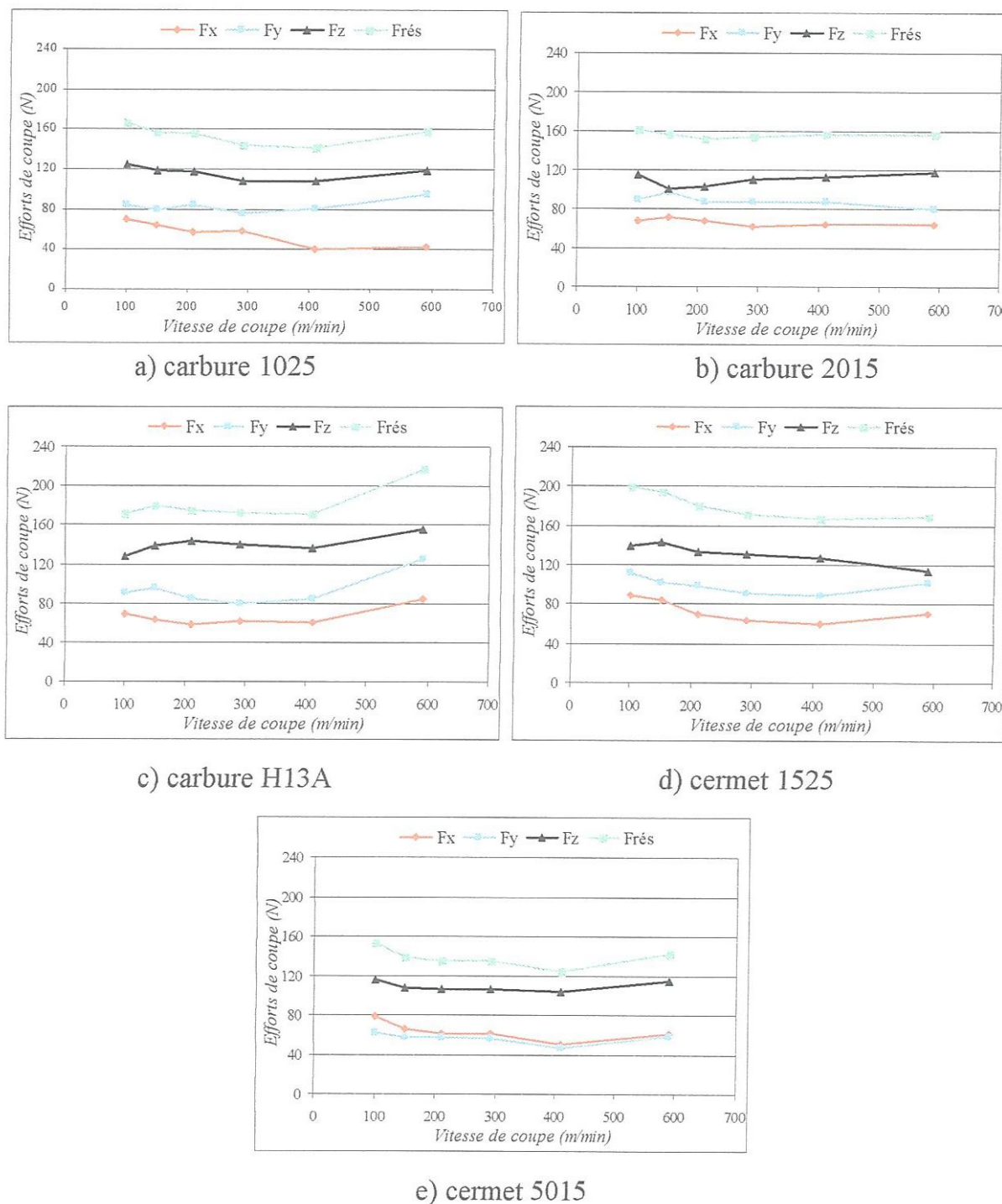


Figure III-2 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$

Les *figures III-3 (a et b)* illustrent la différence entre les efforts de coupe qui est principalement due aux formes distinguées des brise-copeaux pour chaque nuance. La *figure III-3-a* montre que la nuance cermet 1525 donne des efforts de coupe élevés par rapport aux autres nuances.

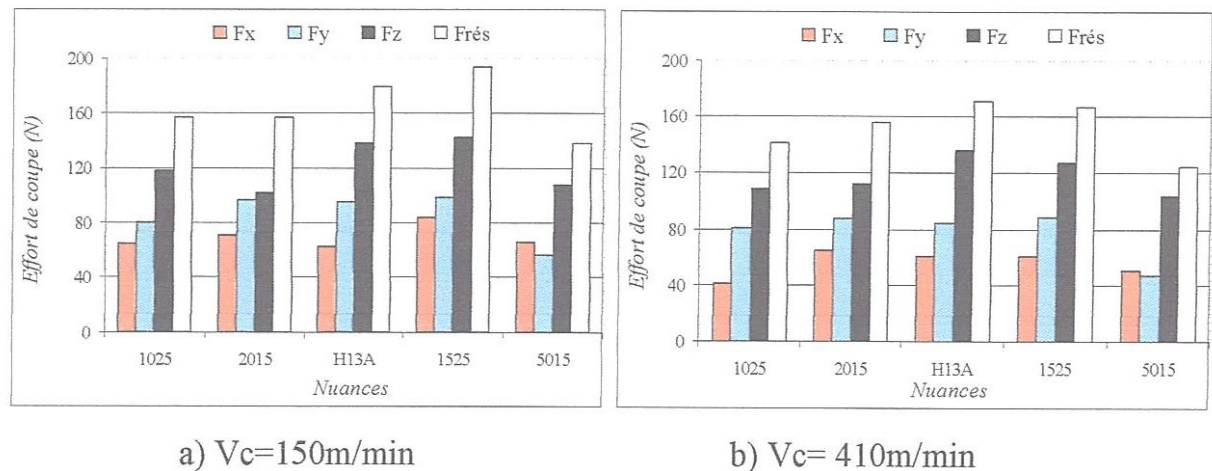
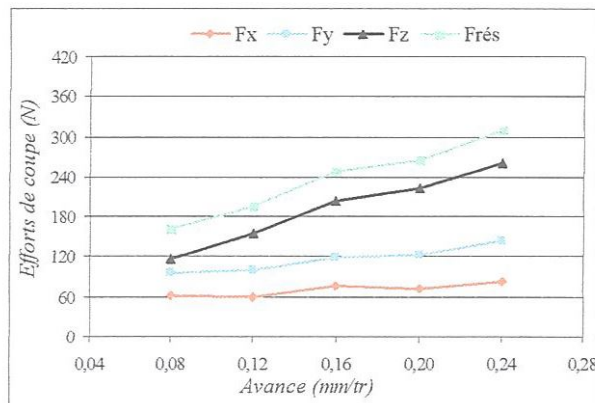


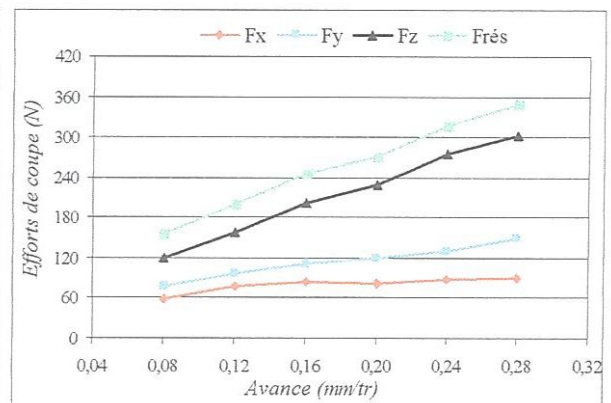
Figure III-3 Comparaison entre les efforts enregistrés pour les cinq nuances de coupe; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$

III-3-2 Influence de l'avance

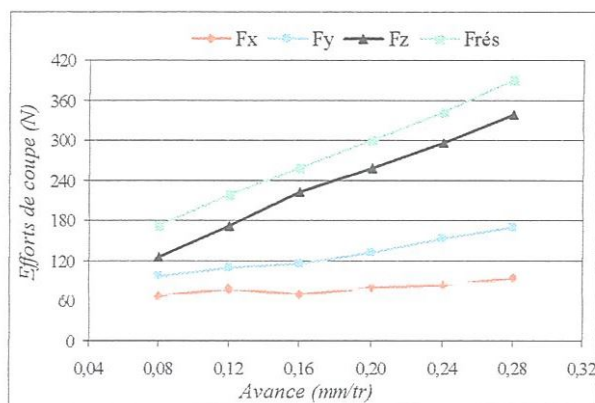
Les *figures III-4 (a, b, c, d et e)* illustrent l'influence de l'avance sur les trois composantes de l'effort de coupe et l'effort résultant et cela pour les cinq matériaux de coupe testés. Avec l'augmentation de l'avance la section du copeau cisailé accroît et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière s'accroît. L'influence de la forme du brise-copeau reste toujours un facteur influent sur les efforts de coupe comme le montre la *figure III-5*. L'allure de cette évolution est la même pour toutes les nuances. Pour une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.28 mm/tr on a enregistré une élévation de (158.70 ; 153.45 ; 169.98 ; 162.80 et 184.88) % de l'effort tangentiel, (58.84 ; 89.22 ; 77.92 ; 84.74 et 162.65) % de l'effort radial, (45.64 ; 50.87 ; 38.23 ; 50.80 et 84.98) % de l'effort axial respectivement aux différentes nuances de coupe (1025, 2015, H13A, 1525 et 5015). L'analyse des résultats montre que l'effort tangentiel est le plus affecté par l'avance, suivi par l'effort radial et en dernier lieu par l'effort axial.



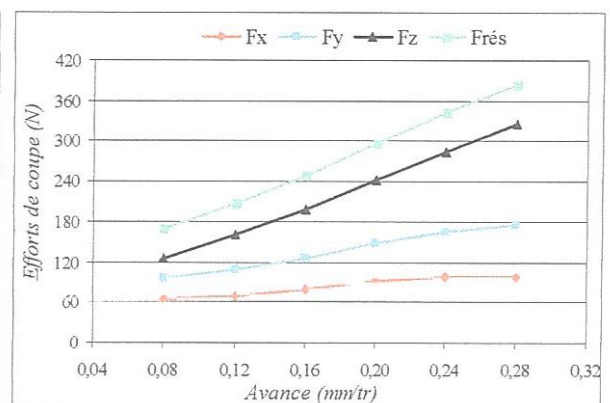
a) Carbure 1025



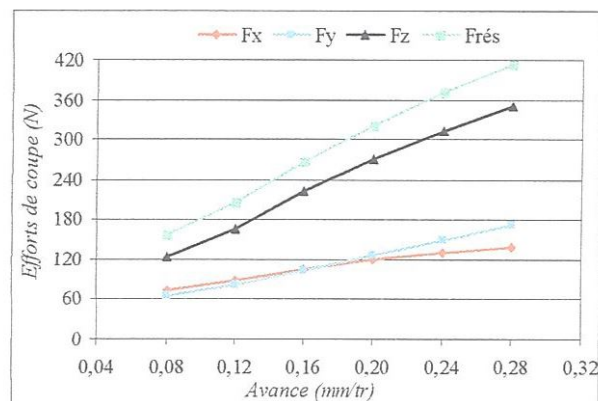
b) Carbure 2015



c) Carbure H13A



d) Cermet 1525



e) Cermet 5015

Figure III-4 Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance;

$$V_c = 150 \text{ m/min}, a_p = 0.5 \text{ mm}$$

De la *figure III-5*, on peut remarquer que les diverses nuances donnent des efforts de coupe presque les mêmes. Les valeurs des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z et $Frés$) à ($V_c = 150 \text{ m/min}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$) sont de l'ordre de (60.22 ; 99.62 ; 155.38 ; 194.15) N pour le carbure 1025, (77.78 ; 96.93 ; 156.77 ;

200.05)N pour le carbure 2015, (78.34 ; 110.11 ; 172.85 ; 219.40) N pour le carbure H13A, (69.92 ; 109.59 ; 161.20 ; 207.09) N pour le cermet 1525 et (88.64 ; 81.43 ; 166.63 ; 205.56) N pour le cermet 5015.

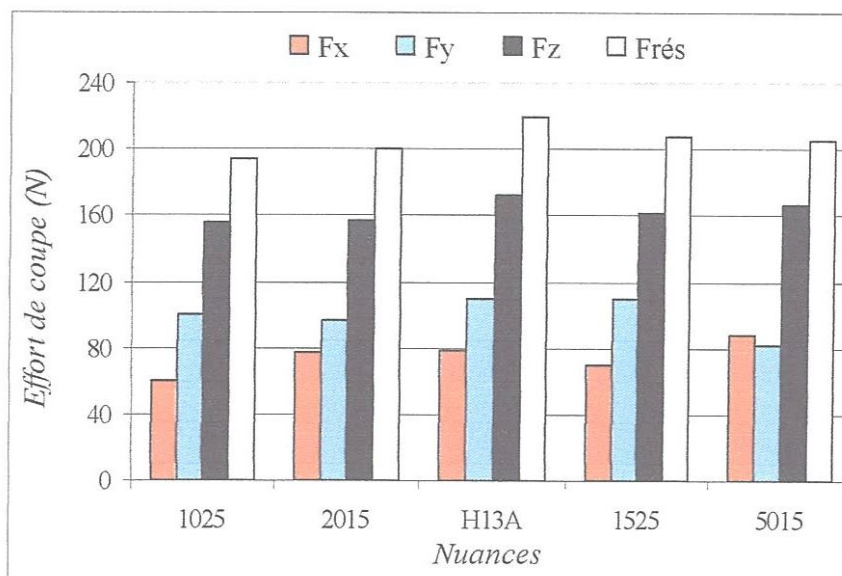


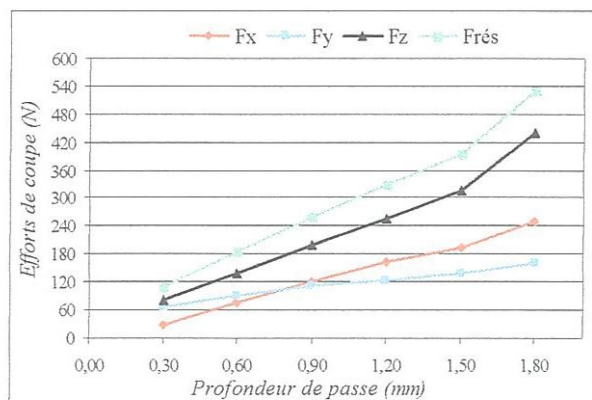
Figure III-5 Comparaison entre les cinq nuance de matériau de coupe ; $V_c=150\text{m/min}$, $f=0.12\text{mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$

III-3-3 Influence de la profondeur de passe

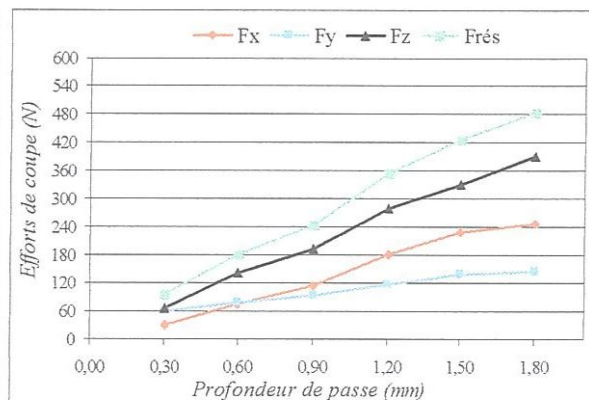
Les résultats présentés dans les *figures III-6 (a, b, c, d et e)* qui correspondent à chaque nuance de coupe, montrent la variation des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. Avec l'augmentation de cette dernière, l'épaisseur du copeau devient très importante ce qui conduit à une augmentation du volume de métal à déformer et cela nécessite des efforts de coupe importants pour l'enlèvement du copeau. Pour une augmentation de la profondeur de passe de (0.3 à 1.8) mm, on a enregistré un taux d'élévation pour les trois composantes (Fx, Fy, Fz) successivement de (834 ; 137.94 ; 442.92) % pour la nuance **1025**, (687.87 ; 143.22 ; 482.92) % pour la nuance **2015**, (589.37 ; 129.39 ; 469.60) % pour la nuance **H13A**, (562.40 ; 92.20 ; 402.02) % pour la nuance **1525** et (500.90 ; 173.40 ; 397.62) % pour la nuance **5015**.

On a remarqué que pour des petites valeurs de la profondeur de passe, l'effort radial est prépondérant par rapport à l'effort axial. Au-delà de la valeur de $a_p=0,6\text{mm}$, l'effort axial dépasse l'effort radial. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon du bec aux petites profondeurs de passe. Avec l'augmentation

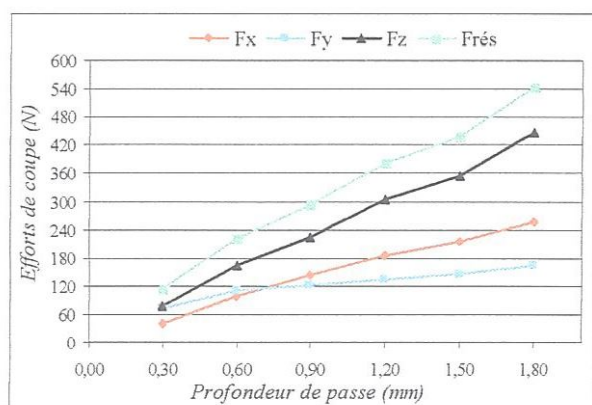
de a_p , la coupe se fait en dehors de la limite du rayon du bec de l'outil et la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier axial. Car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente, autrement dit l'outil ne travaille plus avec son rayon seulement.



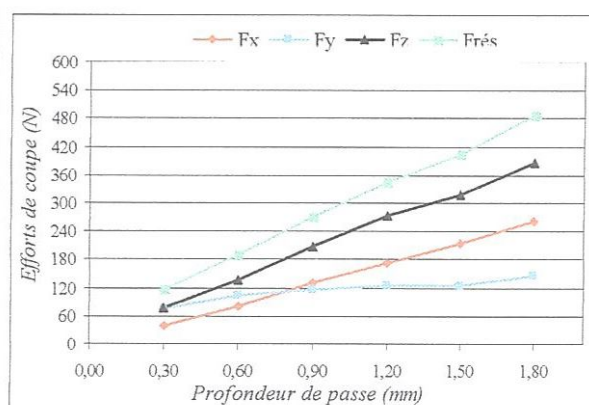
a) Carbure 1025



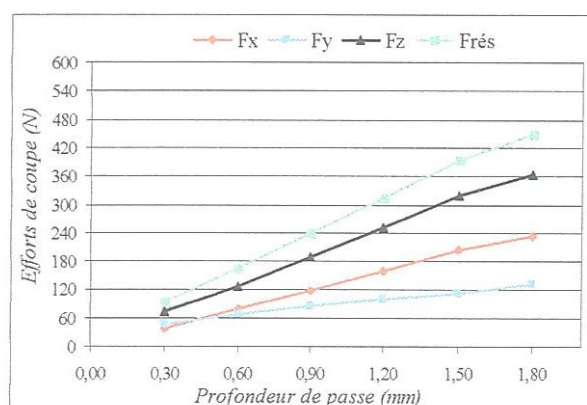
b) Carbure 2015



c) Carbure H13A



d) Cermet 1525



e) Cermet 5015

Figure III-6 Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe;

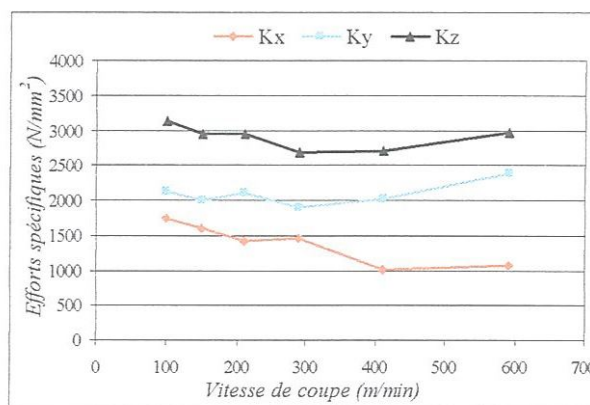
$$V_c = 150 \text{ m/min}, f = 0.08 \text{ mm/tr}$$

III-4 Evolution des pressions de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

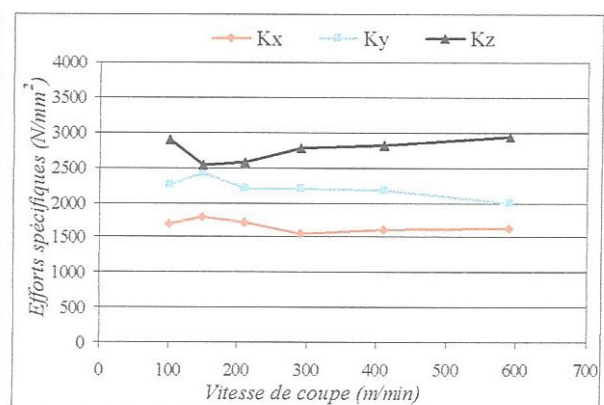
La pression de coupe, aussi appelée effort spécifique, est une grandeur définie comme étant l'effort de coupe par unité de surface, $K_z = F_z / (f \times a_p)$.

III-4-1 Influence de la vitesse de coupe

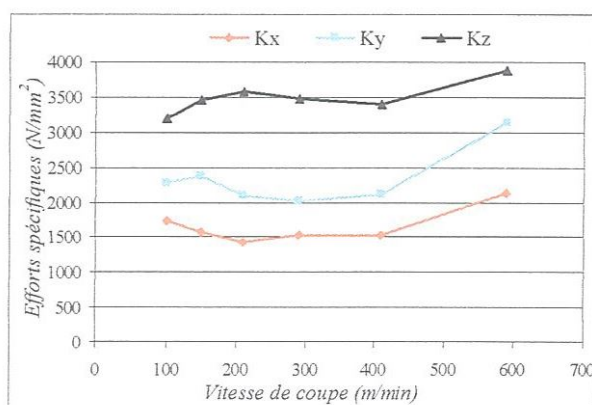
La *figure III-7* présente l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts spécifiques. On peut remarquer sur cette figure que la pression de coupe diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cette réduction peut s'expliquer par les hautes températures générées pendant la coupe et qui entraînent un ramollissement de la matière à l'interface pièce-outil-copeau et par conséquent une diminution des efforts et des pressions de coupe.



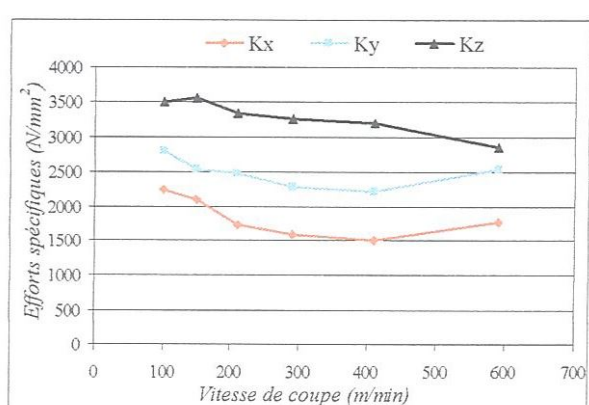
a) Carbure 1025



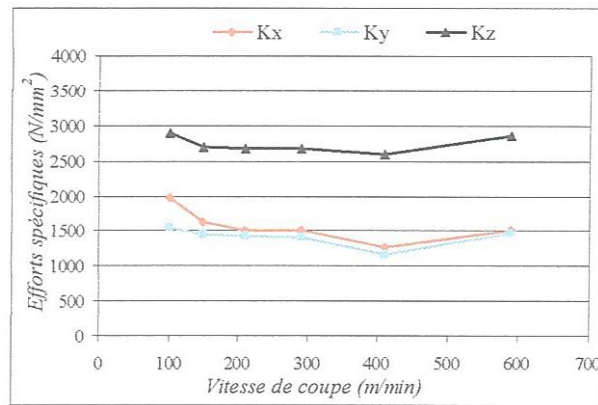
b) Carbure 2015



c) Carbure H13A



d) Cermet 1525

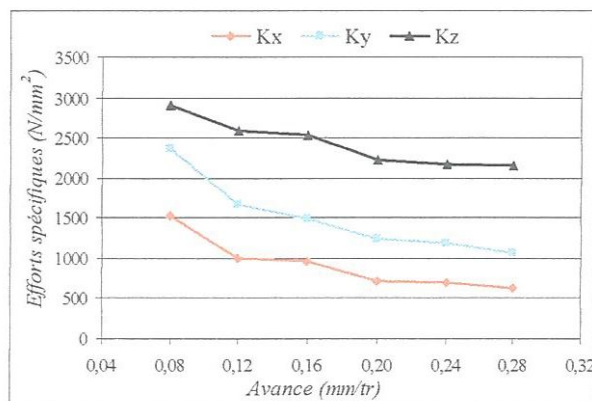


e) Cermet 5015

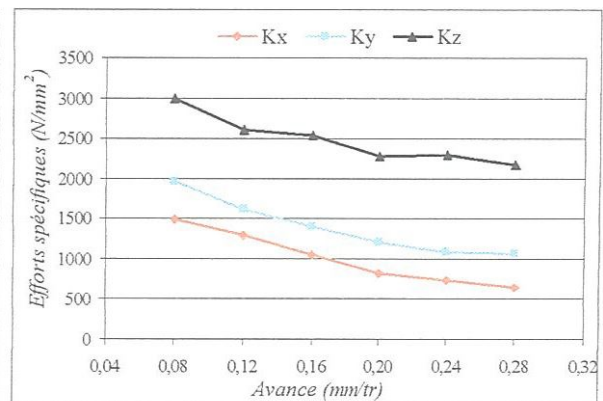
Figure III-7 Evolution des pressions de coupe en fonction de la vitesse pour $f=0.08\text{mm/tr}$, $ap=0.5\text{mm}$

III-4-2 Influence de l'avance

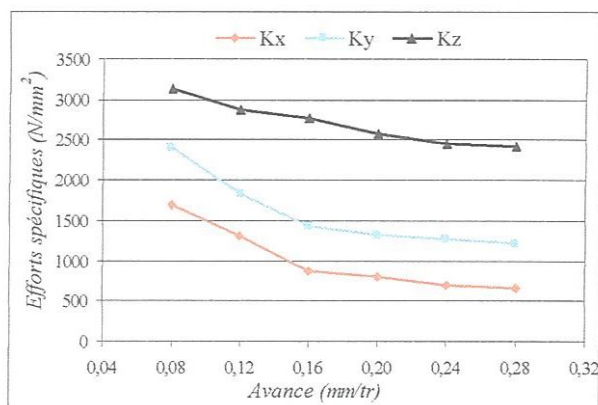
La *figure III-8* présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de l'avance. On remarque qu'avec l'augmentation de l'avance, les pressions de coupe diminuent. Pour une faible avance, on enregistre des pressions extrêmement élevées. Pour une avance de 0.08mm/tr , on a enregistré des valeurs maximales des pressions de coupe de (3135; 2398 et 1862) MPa respectivement pour (Kz, Ky et Kx). Pour une avance de 0.28 mm/tr , les pressions chutent successivement de (18.50 ; 47 ; 25) %. Ici, un compromis reste à faire entre la diminution des pressions de coupe et la dégradation de l'état de surface due à l'élévation de l'avance.



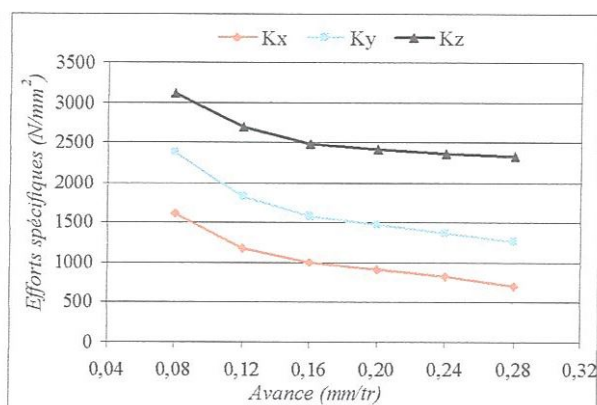
a) Carbone 1025



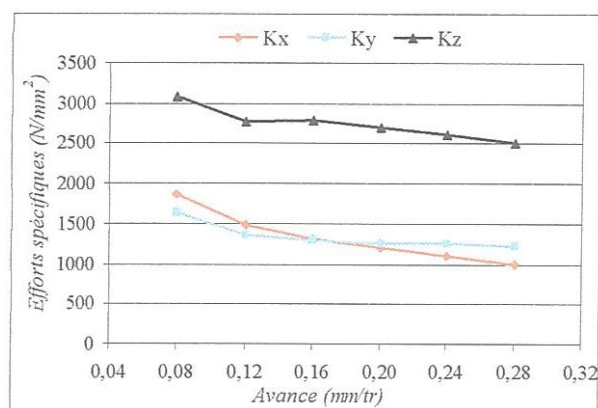
b) Carbone 2015



c) Carbure H13A



d) Cermet 1525



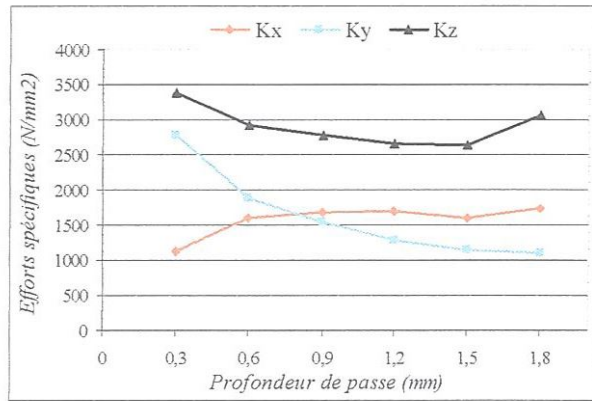
e) Cermet 5015

Figure III-8 Evolution des pressions de coupe en fonction de l'avance pour
 $V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$

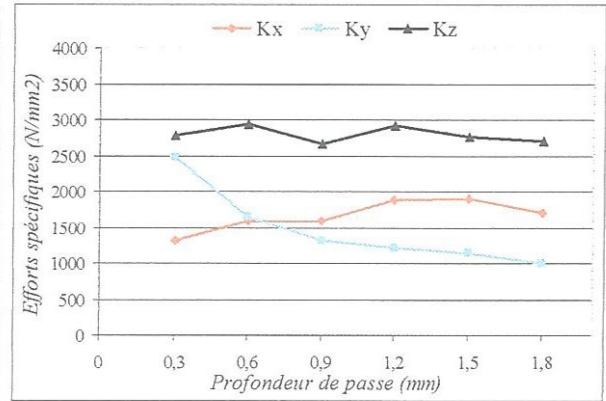
III-4-3 Influence de la profondeur de passe :

La *figure III-9* présente l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe, on remarque que l'augmentation de la profondeur de passe conduit à une chute des pressions de coupe sauf dans le cas de la pression axiale. Pour les valeurs prises de profondeur de passe de (0.3 à 1.8 mm), on enregistre une diminution des pressions de coupe (K_y et K_z) successivement de (60 et 10) % pour le carbure 1025, (60 et 3) % pour le carbure 2015, (62 et 5) % pour la nuance H13A, (68 et 16) % pour le nuance du cermet 1525 et (17% et 54%) pour le cermet 5015. Concernant la pression axiale, on a enregistré une élévation avec l'augmentation de la profondeur de passe jusqu'à une valeur supérieure au rayon du bec de l'outil ($a_p=0.6\text{mm}$). Au delà de cette valeur on enregistre une stabilisation avec une légère

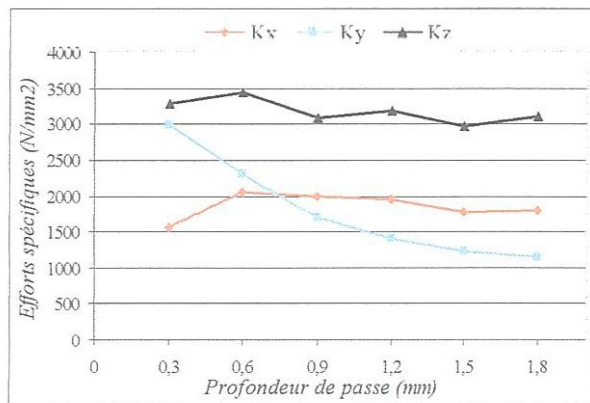
augmentation. Lorsque la profondeur de passe s'accroît de 0.9 à 1.8 mm on enregistre une croissance de l'effort axial de (3 % pour le carbure 1025), (8 % pour le carbure 2015), (10 % pour la nuance H13A), (1 % pour le cermet 1525) et (2 % pour le cermet 5015).



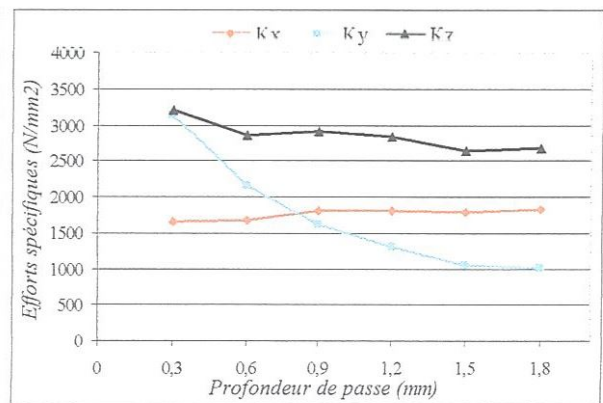
a) Carbure 1025



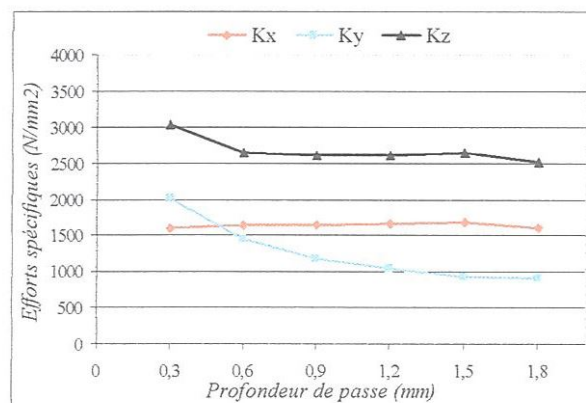
b) Carbure 2015



c) Carbure H13A



d) Cermet 1525



e) Cermet 5015

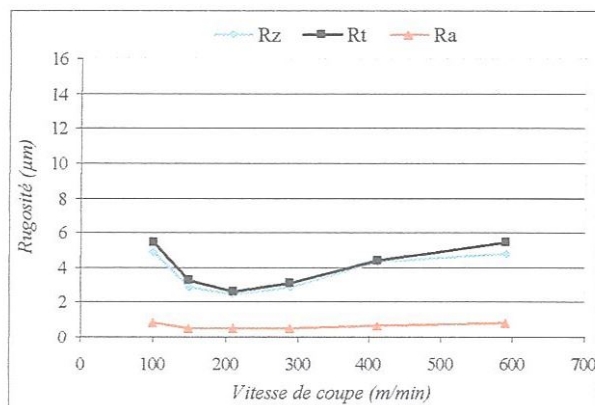
Figure III-9 Evolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=150\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$

III-5 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe

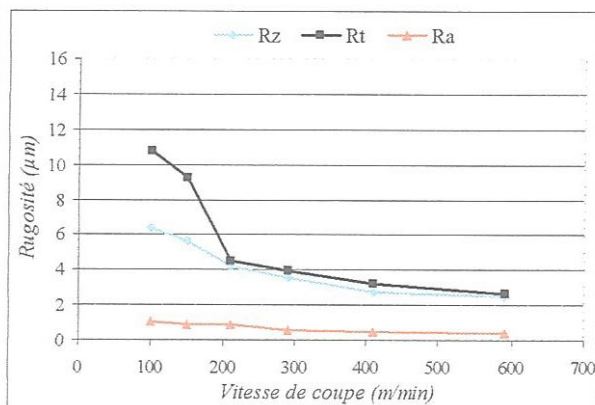
III-5-1 Influence de la vitesse de coupe

Les *figures III-10 (a, b, c, d et e)* illustrent l'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité lors de l'usinage de l'acier X2CrNi18-9. Nous signalons premièrement que l'arête rapportée était presque toujours présente lors de l'usinage. Pour le carbure 1025, on a remarqué que l'état de surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à une valeur limite de 210m/min, au delà de cette valeur on a enregistré une augmentation de la rugosité. Dans la zone entre 100 et 210m/min l'arête rapportée est plus résistante. En dehors de cette zone la hausse de la vitesse de coupe conduit à l'élévation de la température et par conséquent l'arête rapportée devient très ductile et se soude sur la surface usinée. Concernant le carbure H13A, cette nuance n'est pas capable d'usiner à des vitesses supérieures à 150m/min. Pour des vitesses supérieures à 150m/min l'usure est catastrophique pour cette nuance ce qui conduit à une croissance brusque des différents critères de la rugosité. On a remarqué que pour le cermet 5015 la qualité de surface usinée reste presque stable le long de la plage des vitesses de coupe utilisées avec une légère diminution des valeurs de la rugosité. Pour le carbure 2015, on a distingué deux zones, une entre 100 et 210m/min d'où la rugosité chute brusquement de (1.05 à 0.86, 6.39 à 4.15 et 10.76 à 4.51) μm , au-delà de la vitesse 210m/min les valeurs de la rugosité se stabilise avec une légère diminution. Lorsque la vitesse augmente de 210 à 590m/min, on enregistre des valeurs de rugosité de (0.42% pour Ra, 2.49% pour Rz et 2.69% pour Rt). On a remarqué aussi que le cermet 1525 donne des meilleurs états de surface. Les critères de la rugosité à la vitesse 590m/min sont de l'ordre de (0.34 μm pour Ra, 2.17 μm pour Rz et 2.81 μm pour Rt).

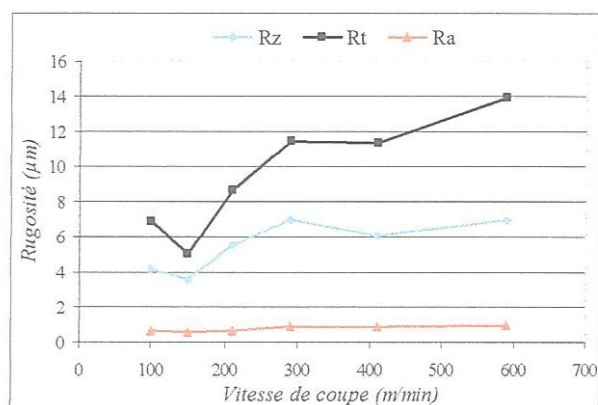
Les *figure III-11 (a, b et c)* illustrent que le carbure H13A et le cermet 5015 donnent des bonnes qualités de surface à des vitesses faibles (100m/min). Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'usure s'accélère surtout pour la nuance H13A ce qui affecte la qualité de la surface usinée. A la vitesse de coupe de 600 m/min, on a remarqué que le carbure 2015 et le cermet 1525 résistent bien aux frottements exercés sur l'outil à cause de leurs performances et ils donnent des meilleurs états de surface.



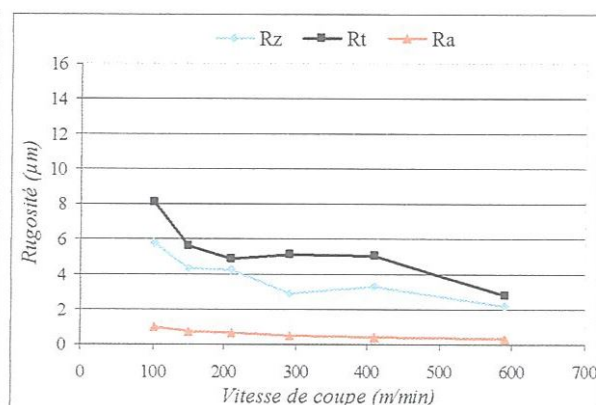
a) Carbure 1025



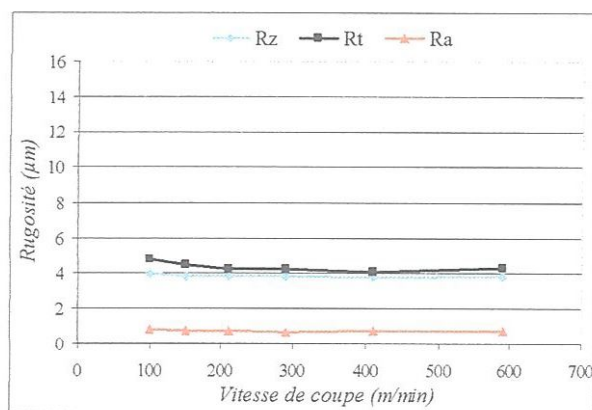
b) Carbure 2015



c) Carbure H13A



d) Cermet 1525



e) Cermet 5015

Figure III-10 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour $V_c=150\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$

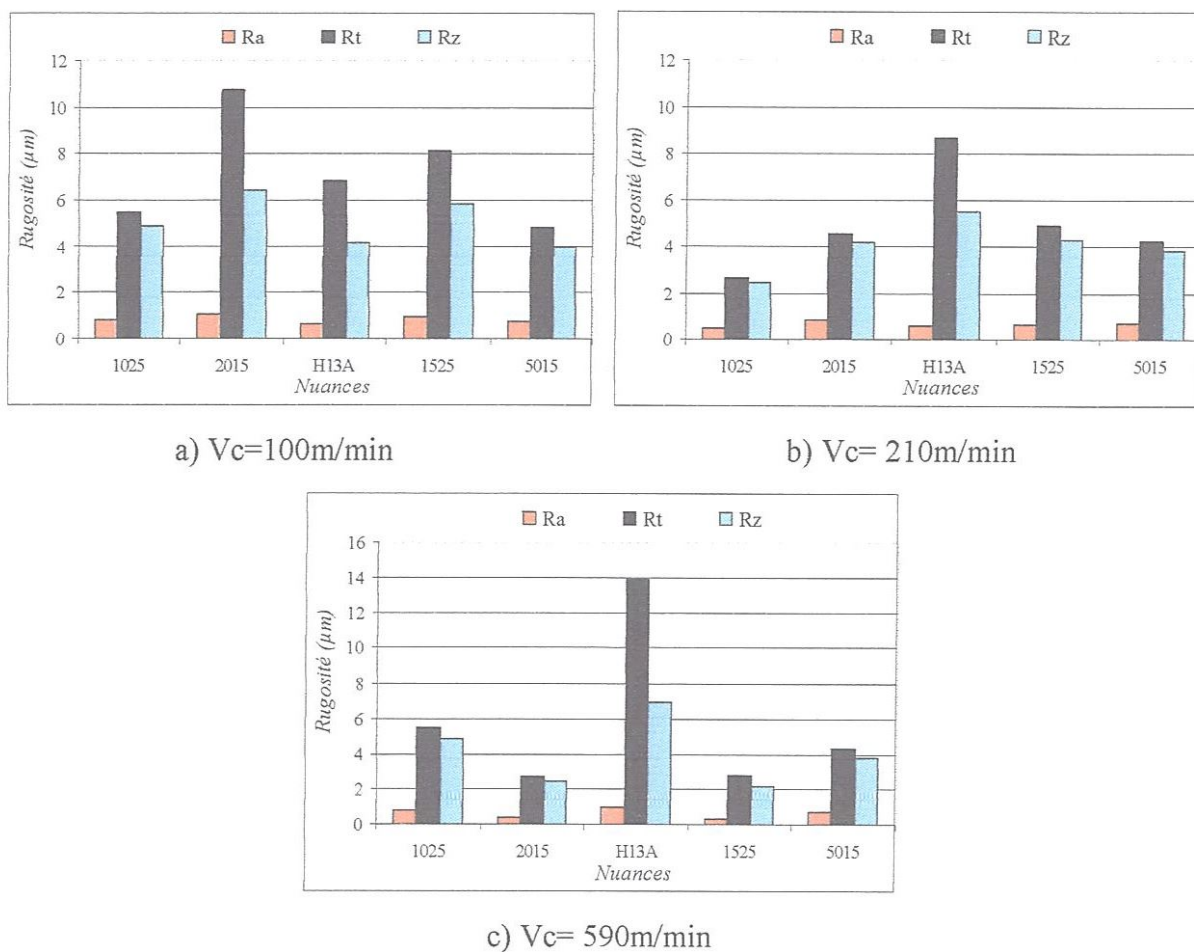


Figure III-11 Comparaison entre les cinq nuances pour $f=0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p=0.5 \text{ mm}$

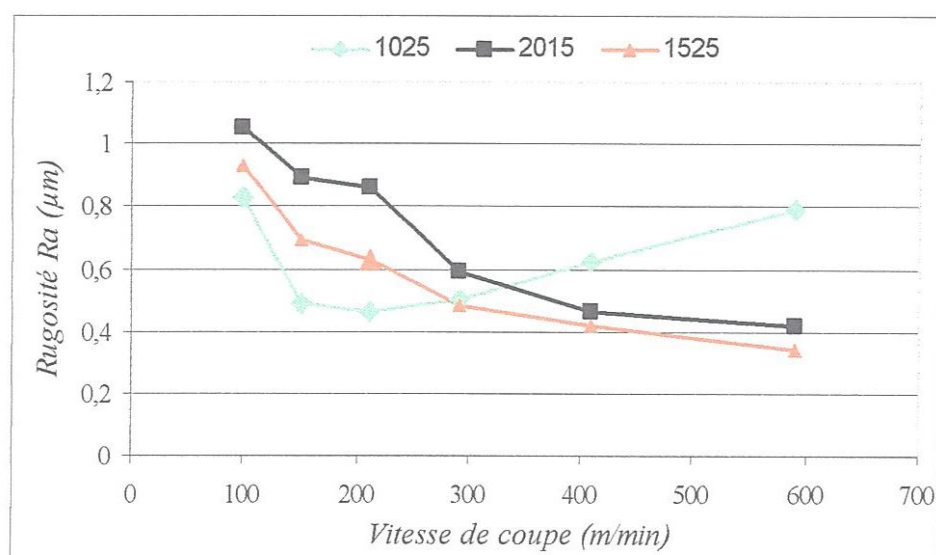
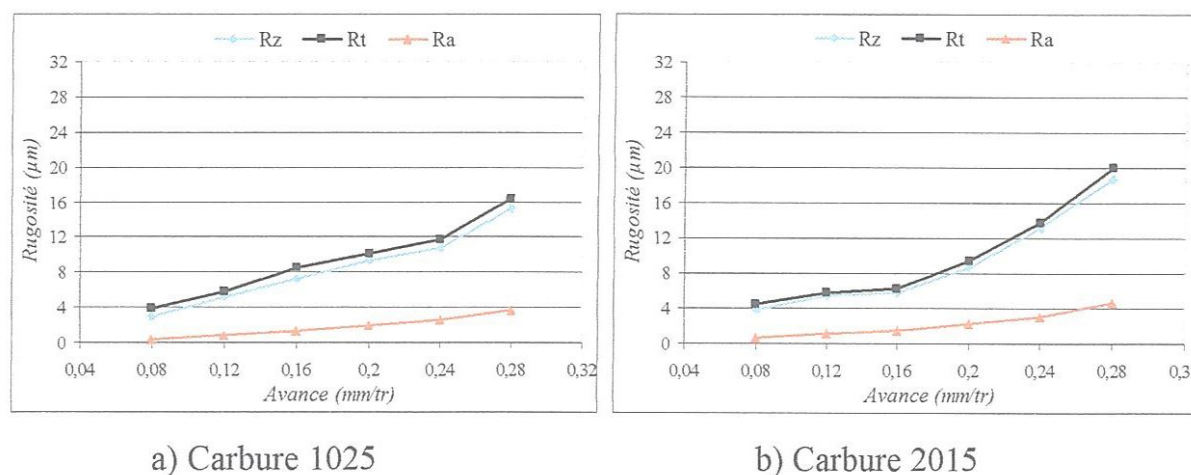


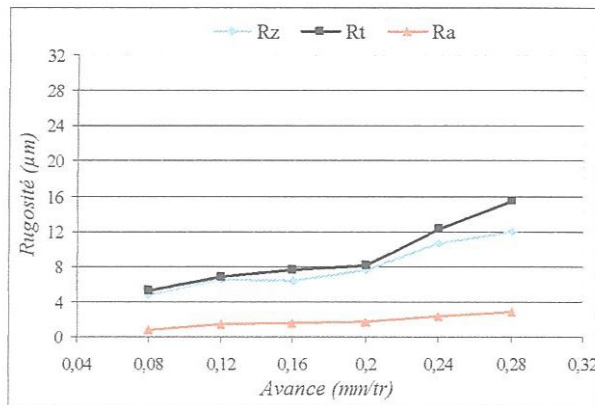
Figure III-12 Comparaison entre les trois nuances revêtues; ($f=0.08 \text{ mm/tr}$, $a_p=0.5 \text{ mm}$)

La *figure III-12* présente une comparaison entre les rugosités des trois nuances des plaquettes revêtues. Dans un premier temps et au-dessous de la vitesse 290 m/min la nuance de carbure 1025 donne un état de surface meilleur par rapport aux nuances 2015 et 1525. Donc c'est la zone où l'arête rapportée domine. Jusqu'à la vitesse de coupe de 210m/min on a remarqué que les valeurs de la rugosité enregistrées de la nuance 1025 sont meilleures par rapport aux deux autres nuances. Nous justifions ici ce constat par l'explication donnée par Ciftci I. [CIF05] concernant l'influence de la couche supérieure du revêtement. Il a prouvé que les outils qui contiennent le nitrure de titane TiN comme revêtement en couche supérieure donnent des efforts de coupe plus faibles et des bons états de surface par rapport aux autres types de revêtement car la couche TiN confère à l'outil un coefficient de frottement très réduit.

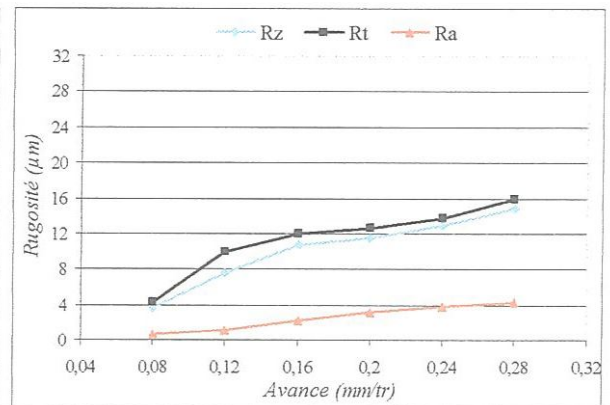
III-5-2 Influence de l'avance

La *figure III-13* montre que l'avance a une influence très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux résultant de la forme de l'outil et du mouvement hélicoïdal outil-pièce. Ces sillons sont d'autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. En pratique, les conséquences de l'influence de l'avance sur la rugosité sont comme suit: l'augmentation de l'avance de 0.08 à 0.28mm/tr, conduit à une augmentation des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) successivement de (864; 432 et 318) % pour le carbure 1025, (598; 395 et 342) % pour la nuance 2015, (229; 152 et 195) % pour la nuance H13A, (573; 302 et 275) % pour le cermet 1525 et (577; 377 et 319) % pour le cermet 5015. On remarque que le critère R_a est le plus affecté par l'avance.

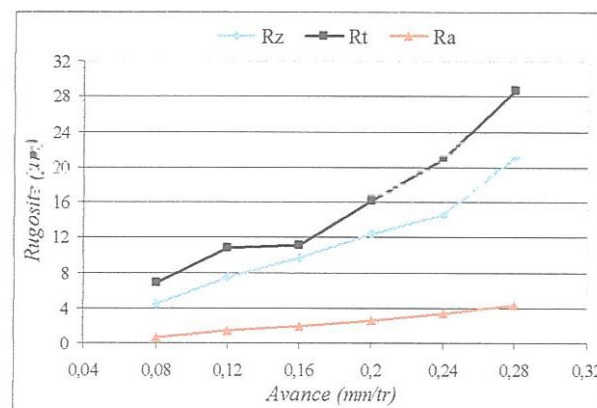




c) Carbure H13A



d) Cermet 1525

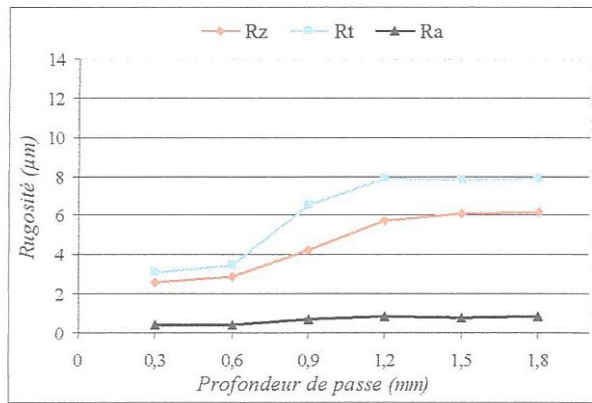


e) Cermet5015

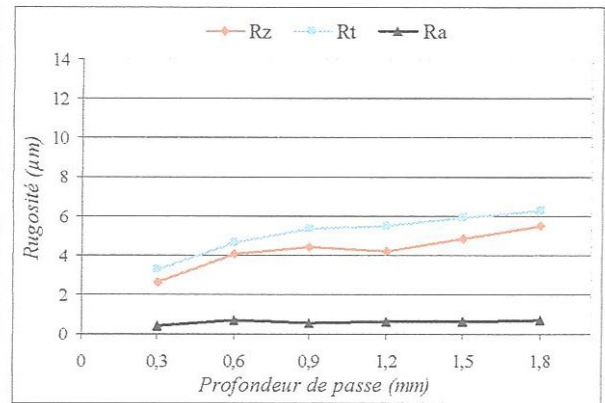
Figure III-13 Evolution de la rugosité en fonction de l'avance par tour
pour $V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$

III-5-3 Influence de la profondeur de passe

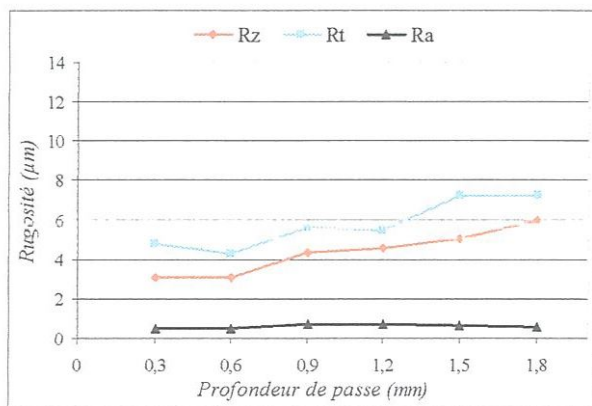
L'évolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe (*figure III-14*), montre que ce paramètre est moins important que l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. Pour les valeurs de profondeur de passe prises de (0.3 à 1.8mm), on enregistre une augmentation des critères de rugosité de (110; 66.66; 14; 76 et 40) % pour Ra, de (138; 105; 96; 85 et 139) % pour Rz et enfin de (154; 91; 51; 161 et 234) % pour Rt respectivement pour les nuances (1025 ,2015 ,H13A ,1525 et 5015).



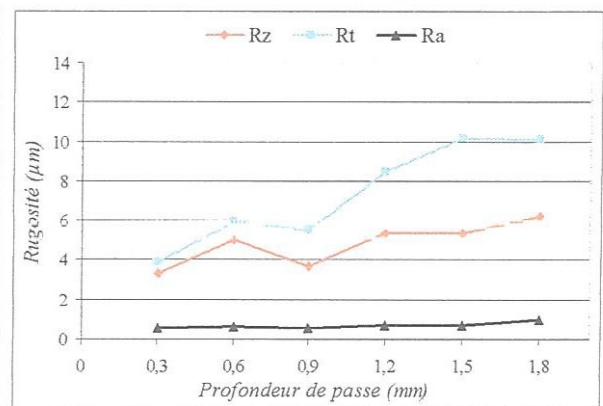
a) Carbure 1025



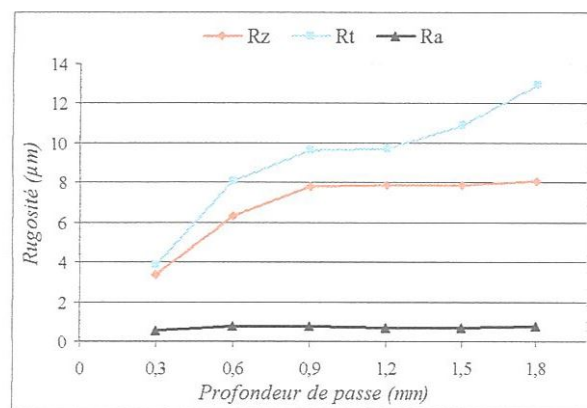
b) Carbure 2015



c) Carbure H13A



d) Cermet 1525



e) Cermet 5015

Figure III-14 Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe pour $V_c=150\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$

III-6 Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps

En se basant sur les résultats de la première partie on a choisi trois nuances performantes (carbure 2015, cermet 1525 et cermet 5015) de point de vue résistance à l'usure et rugosité pour poursuivre les essais de l'usure et de la rugosité en fonction du temps.

Les figures III-15, III-16 et III-17 montrent l'évolution de l'usure en dépouille (VB) en fonction du temps d'usinage pour deux vitesses de coupe et deux avances pour le carbure revêtu 2015, le cermet non revêtu 5015 et le cermet revêtu 1525. L'analyse de ces courbes montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance, l'usure en dépouille des trois plaquettes de coupe augmente. A cause des performances du revêtement du carbure 2015 et cermet 1525 (frottement réduit), ces derniers sont plus adaptés à l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. Des mesures ont été réalisées à différentes conditions de coupe pour relever les valeurs de KT, les résultats obtenus montrent que les valeurs de KT sont insignifiantes par rapport au VB. C'est pour cela le suivi de l'usure a été limité sur l'usure en dépouille VB.

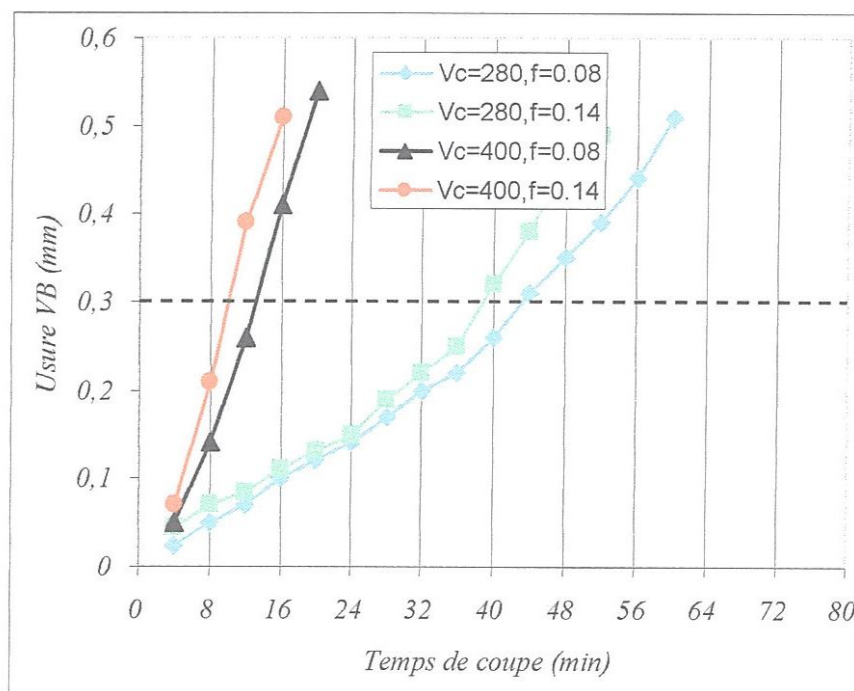


Figure III-15 Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage pour le carbure 2015 avec $ap=0.3\text{mm}$

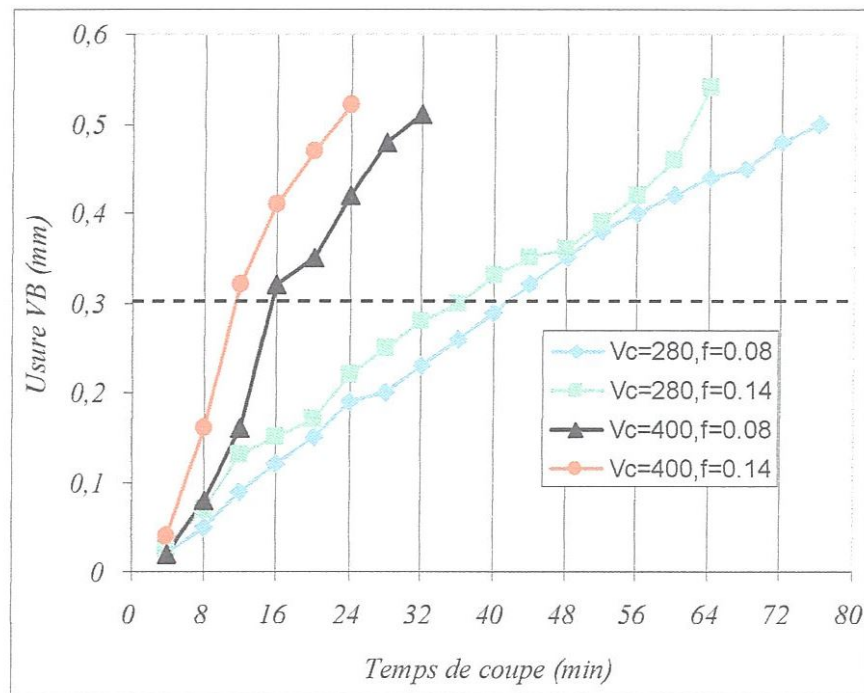


Figure III-16 Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage pour le cermet 1525 avec $a_p=0.3$

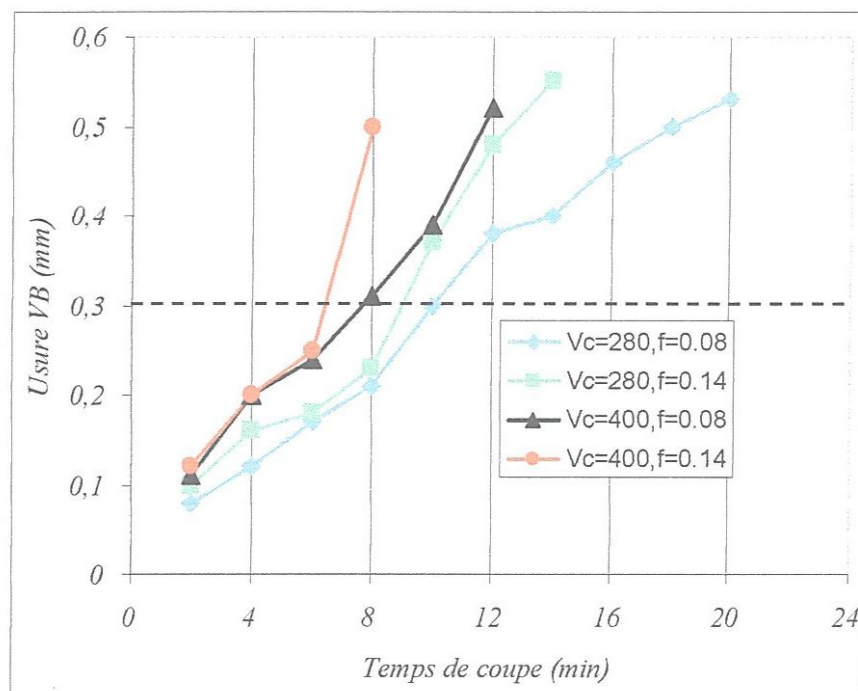
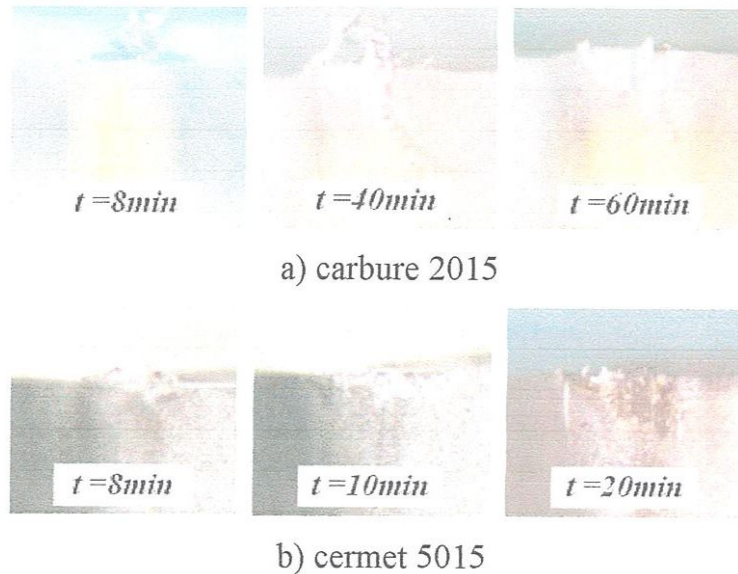


Figure III-17 Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage pour le cermet 5015 avec $a_p=0.2$

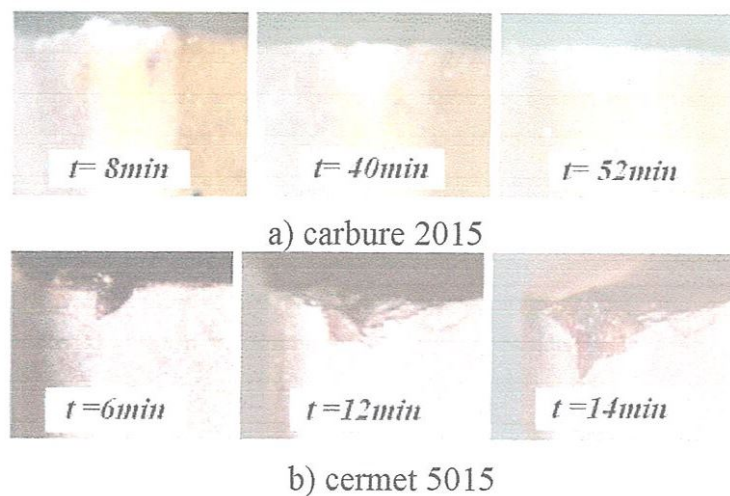
A la vitesse $V_c = 280\text{m/min}$ et une avance de $f = 0.08\text{mm/tr}$, le copeau obtenu est long, l'usure se développe et se manifeste par une bande sur la surface en dépouille de

l'outil, la tenue de carbure GC 2015 est de 44 min, de 41min pour le cermet 1525 et de 10min pour la nuance 5015 pour $VB = 0.3 \text{ mm}$ (*Photos III-1*).



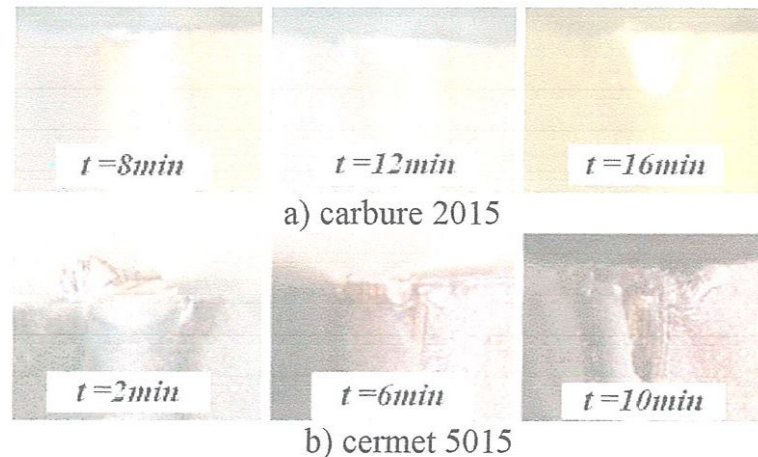
Photos III-1 Evolution de l'usure (VB) à: $V_c = 280 \text{ m/min}$,
 $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.2 \text{ mm}$

Pour une avance de 0.14 mm/tr à la même vitesse (280 m/min), l'usure se manifeste toujours par une bande élargie de ces dimensions jusqu'à un effondrement du bec de l'outil à la fin d'usinage (*Photos III-2*). Cet effondrement a pour effet d'augmenter la rugosité de la surface usinée et influe aussi sur la précision dimensionnelle et en dernier sur la formation du copeau. La tenue de l'outil en carbure 2015 est de 40min, pour le cermet 1525 est de 36 min et pour le cermet 5015 est d'environ 9 min.



Photos III-2 Evolution de l'usure (VB) ;
 $V_c = 280 \text{ m/min}$, $f = 0.14 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.2 \text{ mm}$

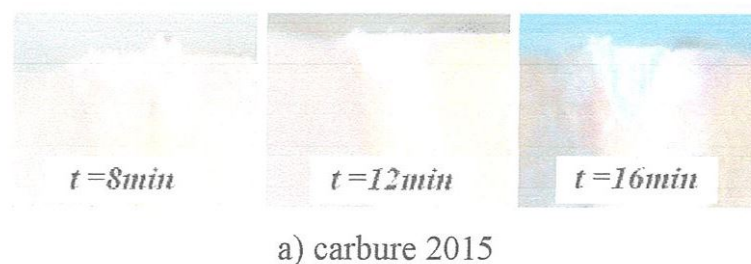
A la vitesse de 400 m/min et pour une avance de 0.08 mm/tr, les revêtements du carbure 2015 et du cermet 1525 se détachent rapidement à cause de la température dans la zone de coupe. On a enregistré une tenue de 14 minutes pour le carbure 2015, 15min pour le cermet 1525 et de 8min pour le cermet 5015 à une usure admissible $VB=0.3\text{mm}$ (Photos III-3).



Photos III-3 Evolution de l'usure (VB) ; $V_c = 400 \text{ m/min}$,
 $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.2 \text{ mm}$

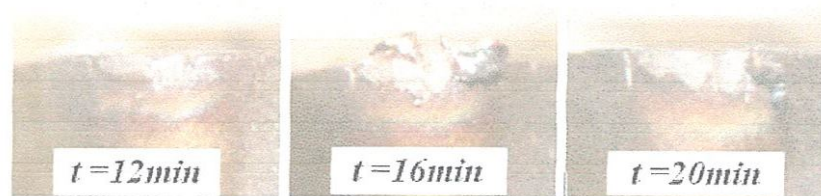
Lorsque l'avance atteint à 0.14 mm/tr, l'usinage devient encore plus difficile et des micro-soudures apparaissent au cours de l'usinage et se collent sur la surface de la pièce et par conséquent la rugosité augmente. Un petit effondrement du bec de l'outil apparaît aux premières minutes de travail au fur et à mesure que l'outil coupe, cet effondrement augmente rapidement et dégrade la surface usinée.

Pour $V_c=400\text{m/min}$ et $f = 0.14 \text{ mm/tr}$, la tenue de l'outil en carbure 2015 est de 11min et de 12min pour la nuance 1525 par contre le cermet 5015 ne peut travailler que 6.5 min (Photos III-4).





b) cermet 5015



c) cermet 1525

Photos III-4 Evolution de l'usure (VB) à: $V_c = 400$ m/min,
 $f = 0.14$ mm/tr et $a_p = 0.2$ mm

Nous signalons finalement que pour les deux vitesses et les deux avances testées, l'usure en cratère KT est insignifiante pour $V_c = 400$ m/min et $f = 0.14$ mm/tr, on a enregistré une valeur de $KT = 0.057$ mm pour la nuance cermet 5015.

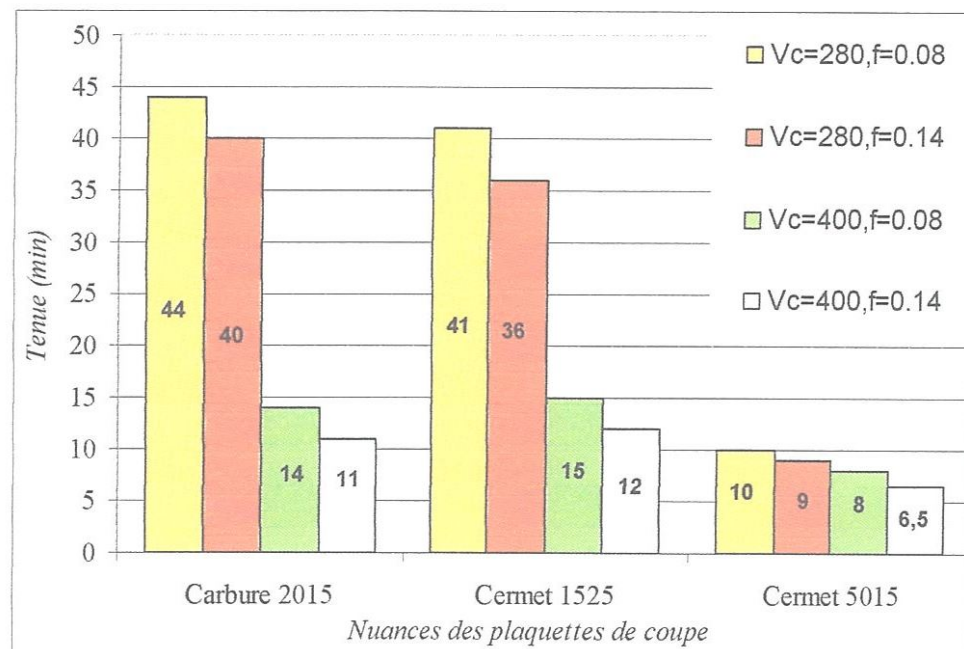


Figure III-18 Tenues des différentes nuances de plaquettes de coupe pour les différentes conditions de coupe, $VB = 0.3$ mm, $a_p = 0.2$ mm.

En analysant la *figure III-18* nous remarquons que les deux vitesses choisies sont des conditions sévères par rapport à la nuance 5015. Concernant le carbure 2015 et le cermet 1525, dans un premier temps et à la vitesse 280m/min on a enregistré des tenus élevées pour le carbure. Par contre le cermet 1525 est plus résistant à l'usure à la vitesse de 400 m/min et il a donné des durées de vie supérieures à celles du carbure 2015.

III-7 Evolution de la rugosité en fonction du temps

III-7-1 Carbure 2015

Les *figures III-19 (a, b, c et d)* montrent l'évolution de la rugosité en fonction du temps de coupe pour le carbure 2015. Les allures des courbes de l'évolution de la rugosité en fonction du temps de coupe sont presque identiques à celles de l'usure en dépouille. Ce qui explique que cette dernière est très liée au temps de coupe. Avec l'augmentation du temps d'usinage les frottements augmentent et donnent naissance aux différents mécanismes d'usure. Cette dernière provoque la dégradation de la surface usinée.

A la vitesse de coupe $V_c=280\text{m/min}$ et une avance de 0.08mm/tr , l'augmentation de l'usure en dépouille conduit à une dégradation de l'état de surface et on remarque un collage du micro-copeau sur la surface usinée de la pièce (*photo III-5*). Pour une usure en dépouille admissible $[VB] = 0.3 \text{ mm}$ ($t = 44 \text{ min}$), les valeurs des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) sont respectivement de $(1.68 ; 7.5 \text{ et } 9.15) \mu\text{m}$. A la fin de l'usinage (pour un temps de 60min) et une usure en dépouille de 0.51 mm , les valeurs des critères de rugosité sont $(2.09 ; 10.73 \text{ et } 12.93) \mu\text{m}$.

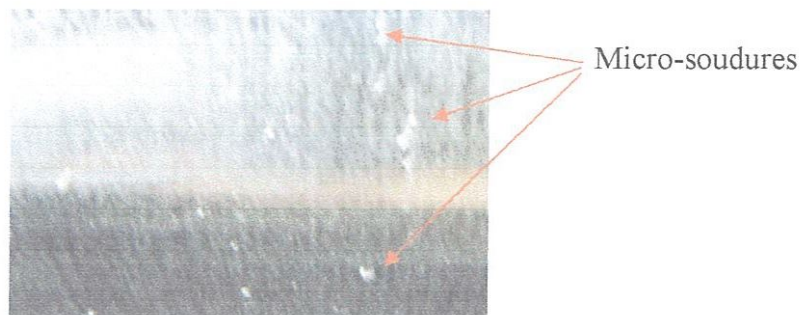


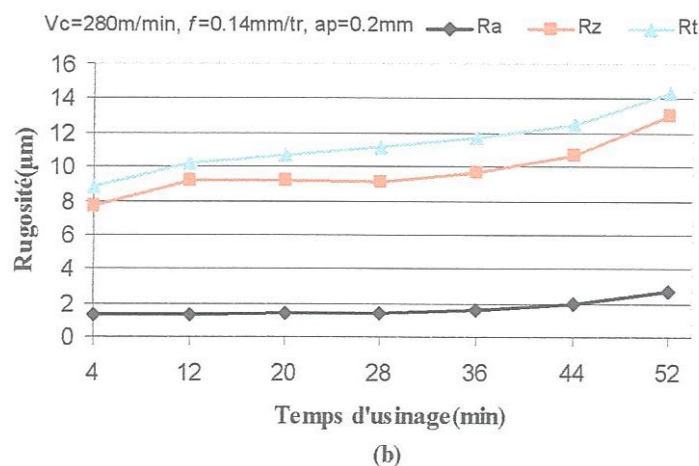
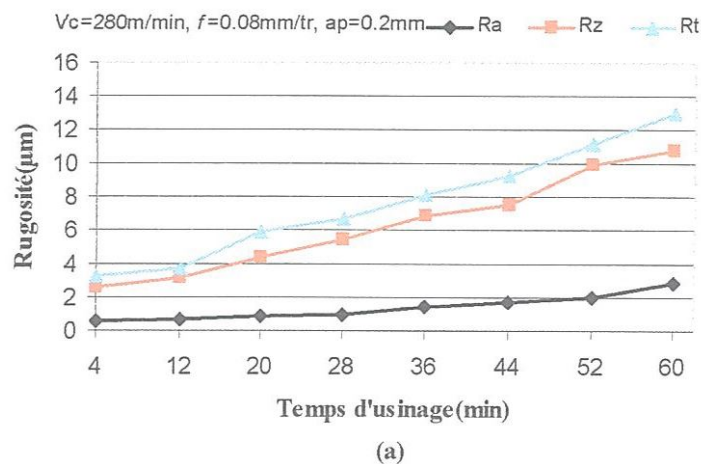
Photo III-5 Micro-soudures collées sur la surface usinée

A la vitesse de 280 m/min et une avance de 0.14 mm/tr , avec une usure en dépouille de 0.3 mm ($t = 40 \text{ min}$), les valeurs des critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) sont

respectivement de (2.00 ; 10.02 et 11.93) μm . A la fin de l'usinage (pour un temps de 52 min) et une usure en dépouille de 0.49 mm, les valeurs de rugosité sont (2.76 ; 12.97 et 14.35) μm .

A la vitesse de 400m/min et une avance de 0.08mm/tr, l'augmentation de l'usure en dépouille conduite à une augmentation des critères de rugosité. Pour une usure en dépouille de 0.3mm (ce qui correspond à $t = 14$ min), les valeurs des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) sont respectivement de (1.52 ; 6.84 et 8) μm . A la fin de l'usinage (pour un temps de 20min) et une usure en dépouille de 0.54mm, les valeurs de rugosité sont (2.23 ; 9.48 et 10.5) μm .

A la vitesse de 400 m/min et une avance de 0.14 mm/tr et pour une usure en dépouille admissible de 0.3 mm (ce qui correspond à 11 min), les valeurs des critères de rugosité (R_a , R_z et R_t) sont respectivement de (1.95 ; 8.20 et 8.93) μm . A la fin de l'usinage (pour un temps de 16min) et une usure en dépouille de 0.5mm, les valeurs de rugosité sont (3.2 ; 13.93 et 14.62) μm .



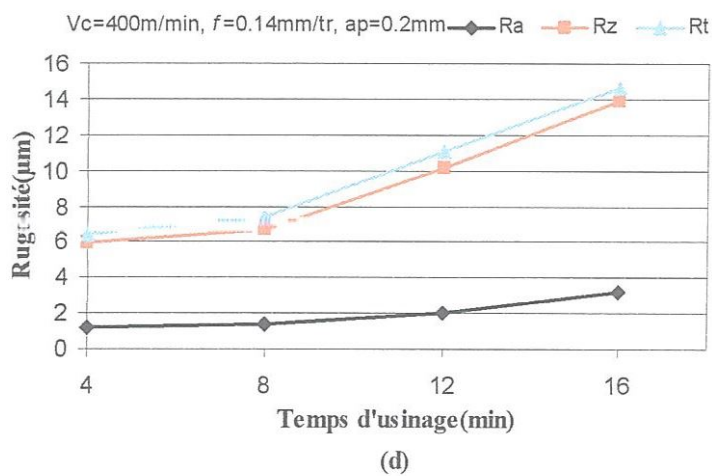
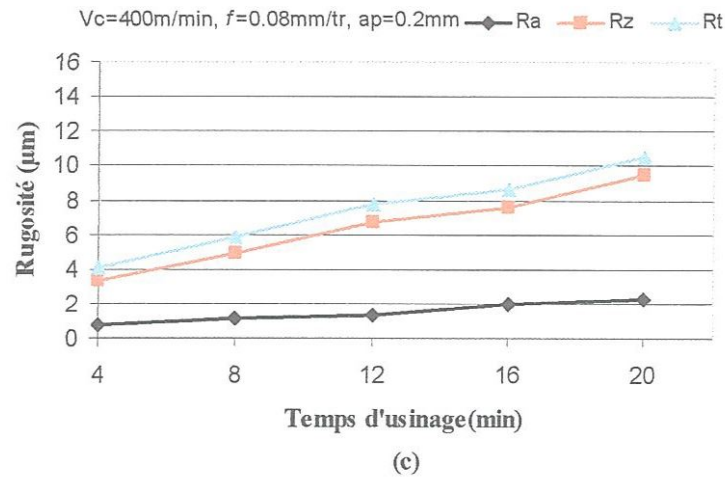


Figure III-19 Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage pour le carbure 2015

III-7-2 Cermet 5015

Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage de la nuance 5015 (*figure III-20 (a, b, c et d)*) montrent que les valeurs des critères de la rugosité s'accroissent brusquement à cause de l'usure en dépouille. Les rugosités sont de l'ordre de (1.22 ; 8.16 et 10.41) μm successivement à (Ra, Rz et Rt) pour $V_c=280\text{m/min}$ et $f=0.08\text{ mm/tr}$ à une usure en dépouille admissible de 0.3mm ($t=10\text{min}$). Pour la vitesse 400m/min on a remarqué une dégradation catastrophique de l'état de surface comme illustre la *photo III-6*.

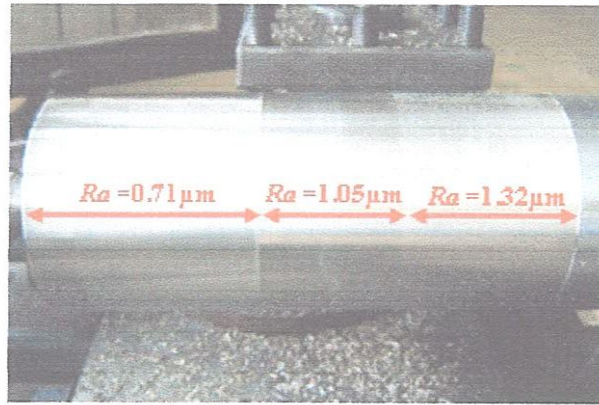
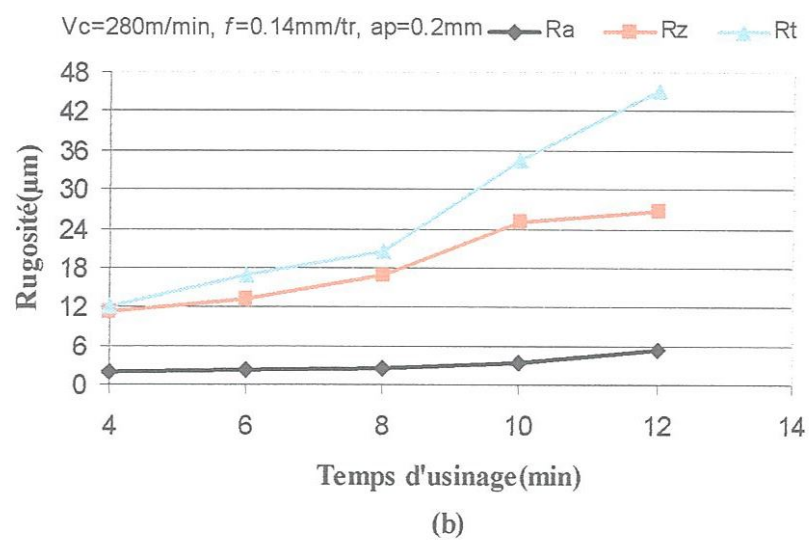
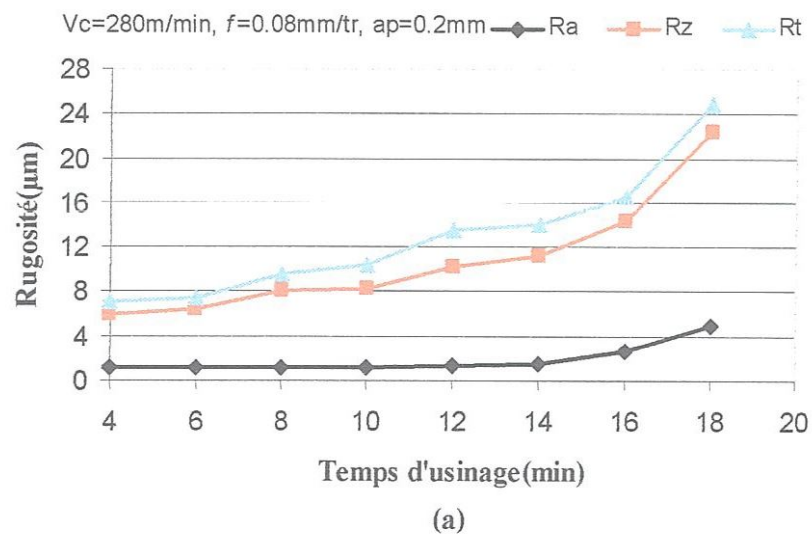


Photo III-6 Rugosité obtenue à une seule passe,
 $V_c=400\text{m/min}$ et $f=0.14\text{mm/tr}$



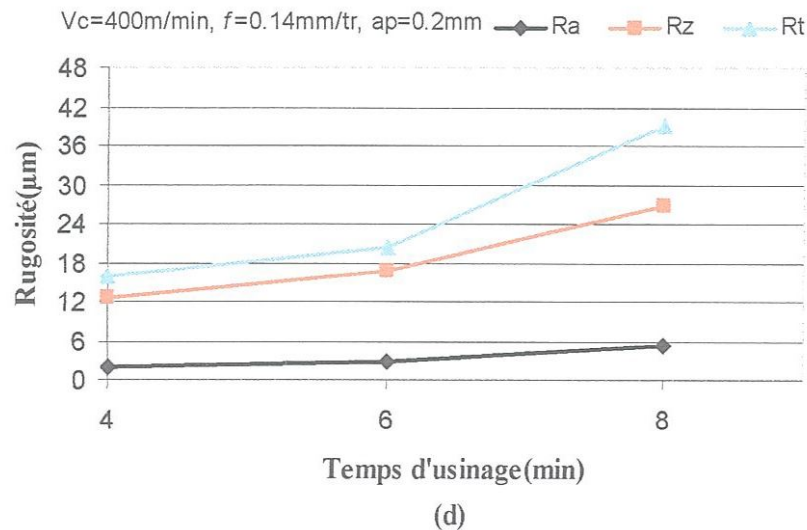
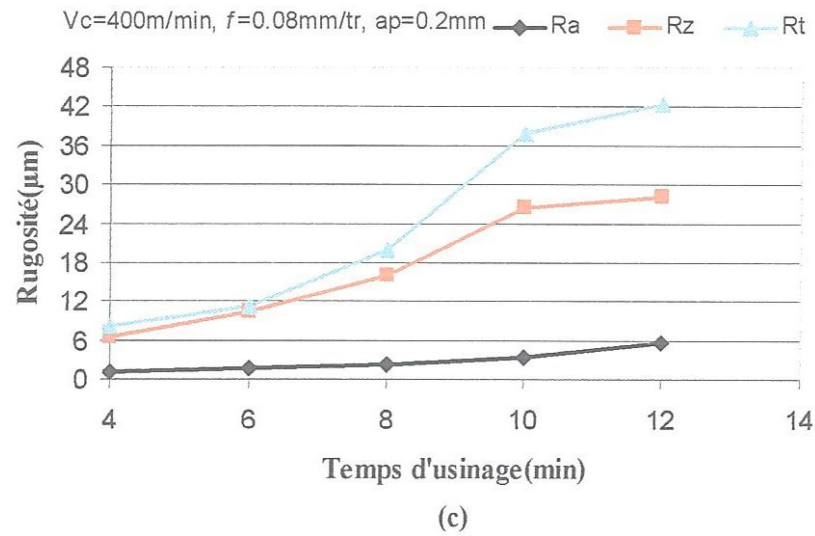
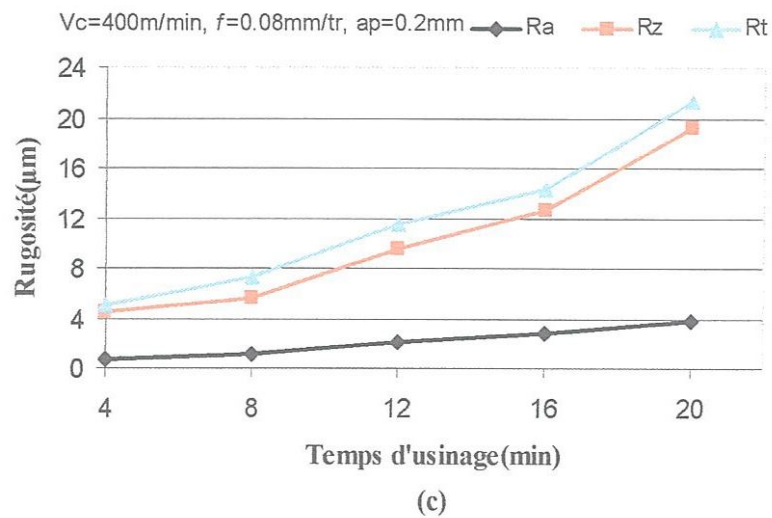
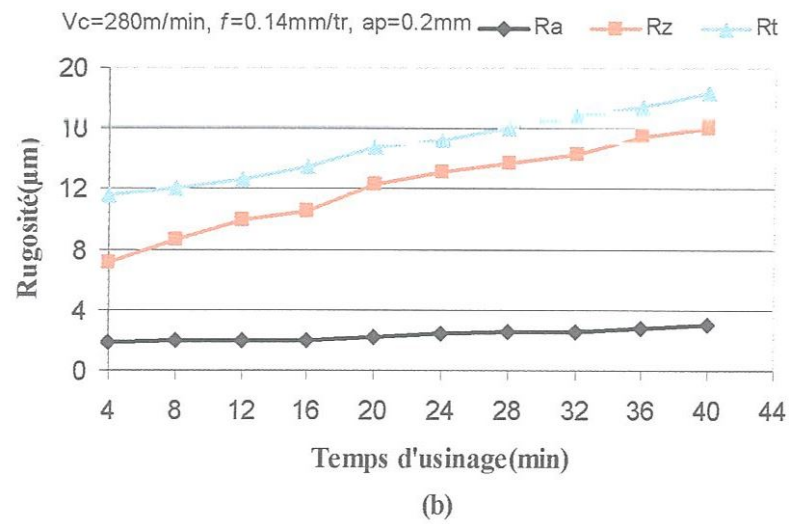
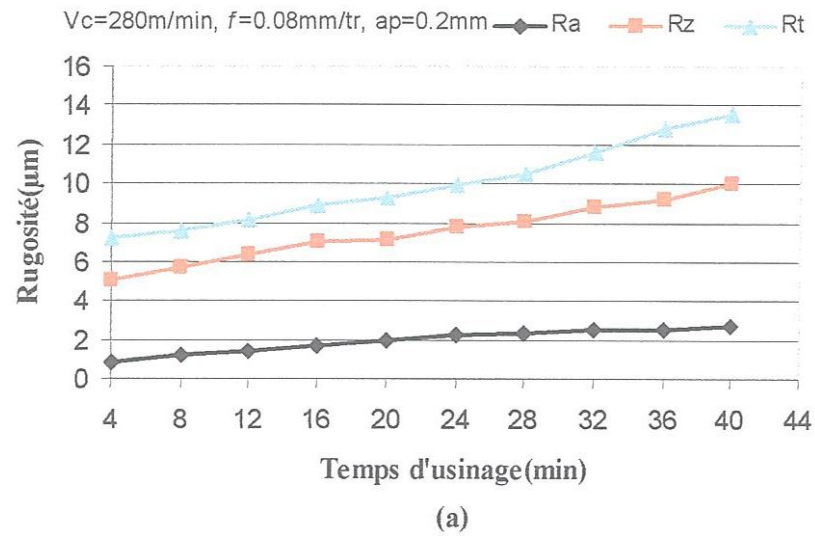


Figure III-20 Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage pour le cermet 5015

III-7-3 Cermet 1525

Les figures III-21 (a, b, c et d) illustrent l'évolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage pour les différentes conditions de coupe. Quand les paramètres de coupe changent de 280 m/min à 400 m/min pour la vitesse de coupe et de 0.08 mm/tr à 0.14mm/tr pour l'avance, les critères de la rugosité s'élèvent de (2.68 ; 9.98 et 13.60) μm à (3.60 ; 18.45 et 22.47) μm respectivement à (Ra, Rz et Rt) pour une usure en dépouille [VB] = 0.3mm.



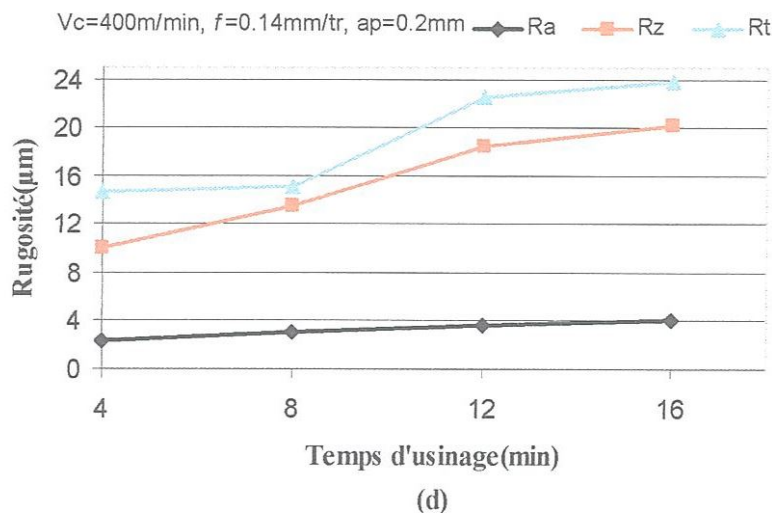
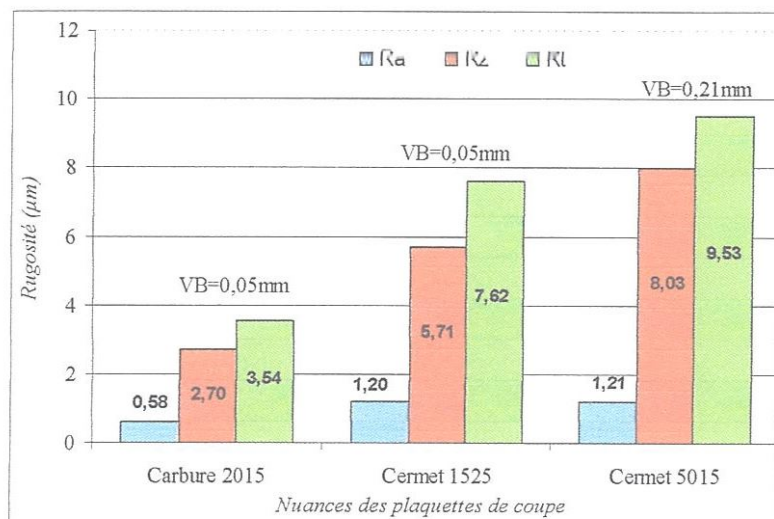
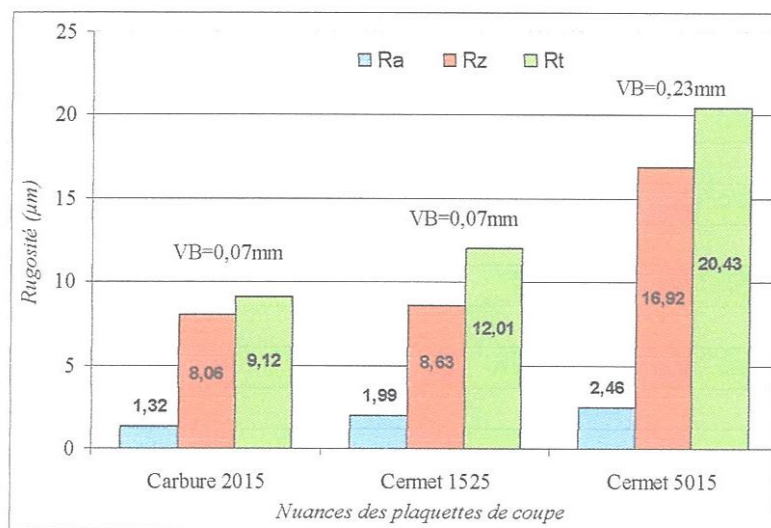


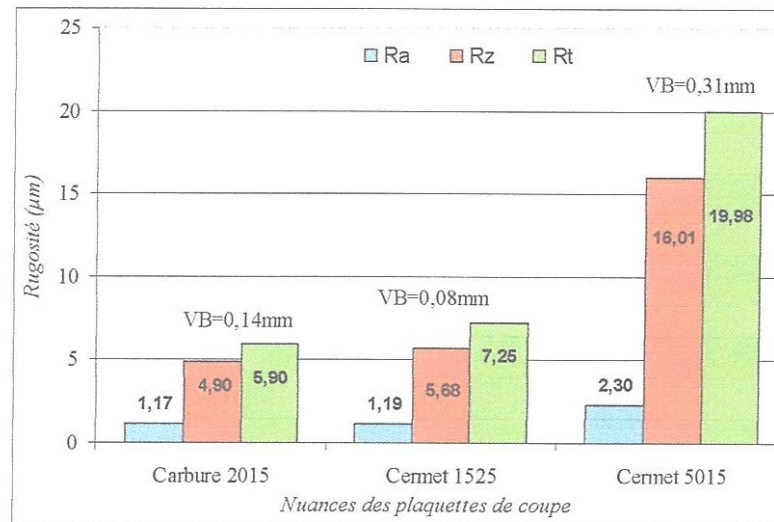
Figure III-21 Evolution de la rugosité en fonction du temps d'usinage pour le cermet 1525.



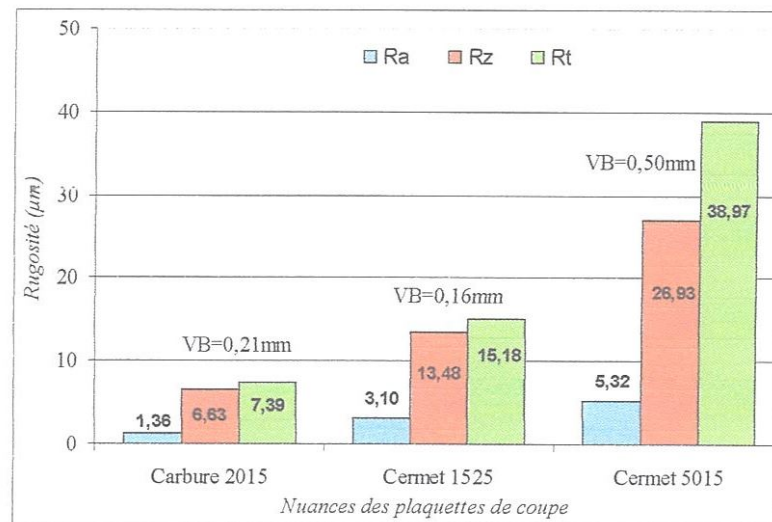
a) $t = 8 \text{ min}$, $V_c = 280 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$



b) $t = 8 \text{ min}$, $V_c = 280 \text{ m/min}$, $f = 0.14 \text{ mm/tr}$



c) $t = 8 \text{ min}$, $V_c = 400 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$



d) $t = 8 \text{ min}$, $V_c = 400 \text{ m/min}$, $f = 0.14 \text{ mm/tr}$

Figure III-22 Rugosité de différentes nuances de coupe pour différentes conditions.

Les *Figures III-22 (a, b, c et d)* présentent une comparaison entre les trois nuances pour un temps d'usinage de huit minutes. On a remarqué que le cermet 1525 résiste bien à l'usure par rapport au carbure 2015 mais ce dernier donne un bon état de surface.

III-8 Conclusion

En se basant sur les résultats obtenus dans ce chapitre nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- L'analyse des courbes de l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe montre que les valeurs des efforts obtenues par les cinq nuances sont presque du même ordre et la différence qui existe est due au type de matériau de coupe, de couches de revêtement et de la géométrie de brise-copeau.
- L'influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe est plus significative sur les efforts radial et axial car les valeurs de ces composantes se croisent à une profondeur de passe limite $ap_{(limite)} = r_c (1 - \cos(\chi)) \approx 0.6mm$.
- Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe montrent que la nuance du carbure H13A donne un bon état de surface à des faibles vitesses de coupe ($V_c \leq 150m/min$). Quand la vitesse de coupe dépasse 150m/min, la surface usinée se dégrade. Ceci est dû à l'usure accélérée de l'outil. En ce qui concerne le carbure 1025 on a remarqué l'apparition des micro-copeaux soudés sur la surface usinée à des vitesses de coupe supérieures à 210m/min, ce qui affecte négativement la qualité de la surface. Cette dégradation peut être expliquée par le type du revêtement qui favorise la formation de l'arête rapportée.
- L'analyse des résultats de l'usure illustre que le cermet 5015 est moins résistant à l'usure et il a donné des durées de vie très limitées (ne dépasse pas 10min pour les conditions minimales, $V_c = 280 m/min$ et $f = 0.08 mm/tr$). Par contre les nuances revêtues (carbure 2015 et cermet 1525) ont atteint des tenues plus supérieures surtout pour la vitesse 280m/min.
- Les résultats de l'évolution de la rugosité en fonction du temps montrent que l'usure des outils influe sur l'évolution des différents critères de la rugosité. L'augmentation de l'usure VB engendre une dégradation de l'état de surface.

CHAPITRE IV

MODÈLES MATHÉMATIQUES

IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de passe et temps d'usinage) et les paramètres étudiés (efforts de coupe, rugosité et usure de l'outil). Pour faire une analyse de variance et pour déterminer les constantes des modèles mathématiques et le coefficient de corrélation de chaque modèle ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statiquement significatif sur la rugosité, les efforts de coupe et sur l'usure de l'outil.

IV-2 Analyse des efforts de coupe et de rugosité en fonction de (V_c , f et a_p)

N°	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_t (μm)
1	90,00	0,08	0,30	38,98	76,08	92,31	0,82	4,41	5,07
2	90,00	0,08	0,60	72,22	87,83	131,56	0,62	4,14	5,31
3	90,00	0,08	0,90	129,80	147,42	208,50	0,79	4,56	6,85
4	90,00	0,16	0,30	42,67	86,41	130,60	1,60	8,12	8,53
5	90,00	0,16	0,60	123,23	109,22	214,00	1,99	8,62	9,94
6	90,00	0,16	0,90	181,37	160,70	366,49	1,28	7,41	8,48
7	90,00	0,24	0,30	52,95	100,04	195,69	3,63	15,43	16,11
8	90,00	0,24	0,60	117,20	140,32	330,22	3,13	12,83	12,06
9	90,00	0,24	0,90	209,90	170,91	538,58	2,39	10,53	12,17
10	180,00	0,08	0,30	28,64	59,87	61,93	0,66	3,56	4,20
11	180,00	0,08	0,60	75,13	82,42	147,89	1,00	4,08	4,46
12	180,00	0,08	0,90	123,21	138,83	217,04	0,55	3,56	4,21
13	180,00	0,16	0,30	30,36	80,70	128,37	1,24	6,48	6,95
14	180,00	0,16	0,60	94,00	110,93	217,31	1,84	8,86	10,24
15	180,00	0,16	0,90	138,41	150,02	325,18	1,61	9,45	11,34
16	180,00	0,24	0,30	47,22	114,44	190,84	3,32	13,99	14,64
17	180,00	0,24	0,60	95,18	133,08	346,24	3,19	13,35	13,95
18	180,00	0,24	0,90	193,85	161,99	497,38	3,36	15,00	16,64
19	350,00	0,08	0,30	41,60	85,07	96,35	0,51	3,42	3,48
20	350,00	0,08	0,60	68,50	79,79	127,91	0,53	3,51	4,08
21	350,00	0,08	0,90	120,23	119,47	177,13	1,36	8,36	11,41
22	350,00	0,16	0,30	39,23	70,03	120,68	1,81	8,40	8,60
23	350,00	0,16	0,60	73,93	103,11	170,30	1,59	7,54	7,71
24	350,00	0,16	0,90	101,75	105,92	300,32	1,58	8,02	7,73
25	350,00	0,24	0,30	33,18	90,81	159,04	3,60	15,84	16,41
26	350,00	0,24	0,60	42,70	120,94	300,03	3,19	16,56	15,62
27	350,00	0,24	0,90	156,97	140,62	429,37	3,58	17,77	15,79

Tableau IV-1 Résultats des efforts de coupe et de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe (plan complet $N=3^3$).

Pour étudier l'impact des différents paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sur la rugosité de la surface et les efforts de coupe, nous avons dressé un plan factoriel de 3 facteurs, chaque facteur à trois niveaux. Le traitement des résultats expérimentaux obtenus aux tableaux IV-1 nous a permis de déterminer des modèles mathématiques statistiques, exprimant la relation entre (les différentes Composantes de l'effort de coupe et critères de rugosité) et les paramètres du régime de coupe.

IV-2-1 Analyse des efforts de coupe

IV-2-1-1 Effort axial F_x

Les résultats présentés dans le *tableau (ANOVA)* sont analysés par le logiciel *MINITAB*. En appliquant l'analyse de la variance, nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0.05$), on constate que tous les paramètres avec les interactions entre eux ont un impact significatif sur l'effort axial, sauf le terme $V_c \times a_p$, puisque sa valeur de la probabilité P est supérieure à 0.05. On a remarqué que la profondeur de passe est le facteur le plus influant car sa contribution est de 75.50%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
V_c (m/min)	2	5064.2	2523.1	18.47	0.001	6.95
f (mm/tr)	2	3502.7	1751.3	12.82	0.003	4.81
a_p (mm)	2	54980.6	27490.3	201.29	<0.001	75.50
$V_c \times f$	4	2260.1	565.0	4.14	0.042	3.10
$V_c \times a_p$	4	1794.5	448.6	3.29	0.071	2.46
$f \times a_p$	4	4124.5	1031.1	7.55	0.008	5.66
Erreur	8	1092.6	136.6			1.50
Total	26	72801.2				100.00

Tableau IV-2 Résultats de l'analyse de variance pour F_x

En introduisant les termes principaux plus les termes significatifs dans le modèle, nous obtenons un coefficient de corrélation de 91.7% et également l'équation de régression suivante :

$$F_x = -3.379 + 0.0452V_c + 65.73f + 92.52a_p - 1.12V_c \times f + 567f \times a_p \dots\dots\dots (IV-1)$$

$$R^2 = 91.7\%.$$

La présentation en 3D (*figure IV-1*) montre que la pente de la profondeur de passe est plus supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une

influence très importante sur l'effort axial suivi de l'avance et en dernier lieu de la vitesse de coupe.

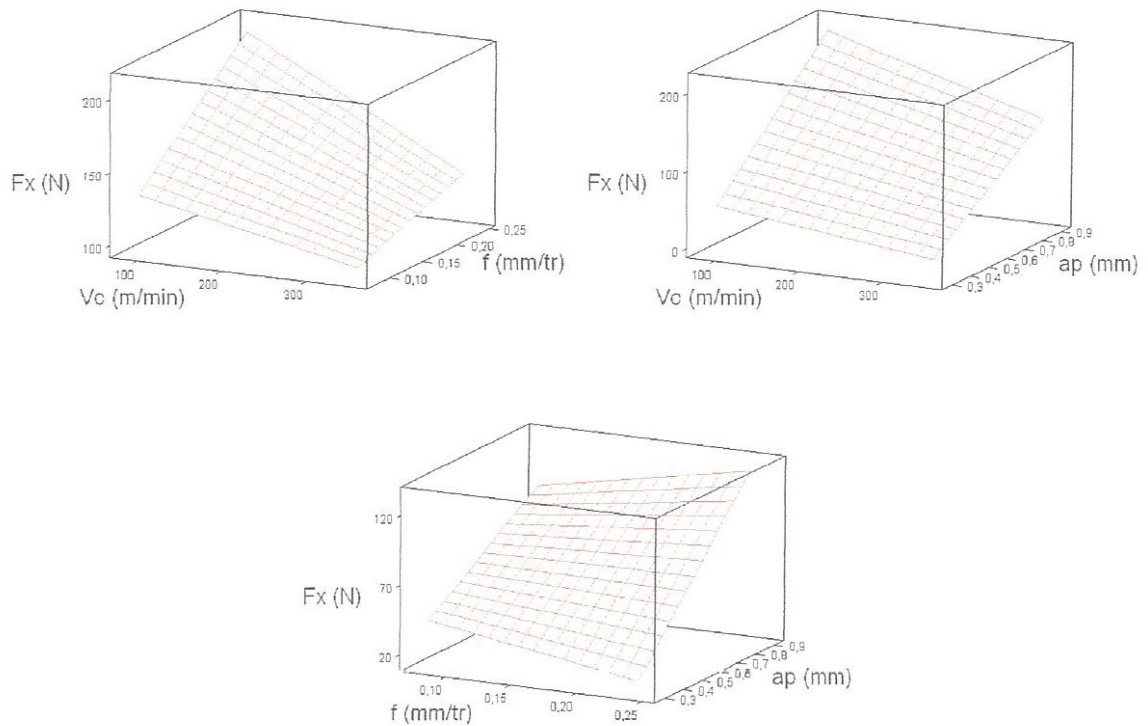


Figure IV-1 F_x en fonction de V_c , f et a_p

La figure IV-2 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort axial. On a remarqué que l'augmentation de la vitesse de coupe minimise F_x . L'effort axial s'élève légèrement avec l'augmentation de l'avance. La profondeur de passe est plus prépondérante car sa pente est plus grande.

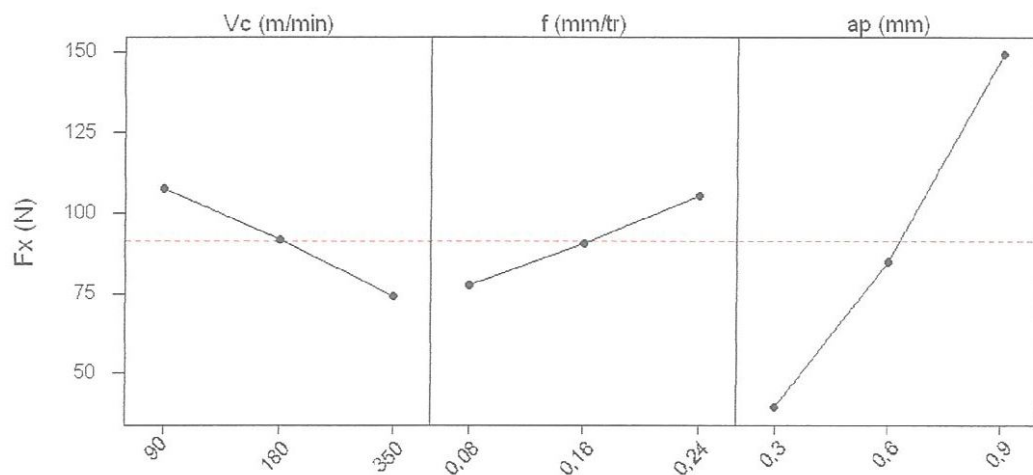


Figure IV-2 Graphes des effets de V_c , f et a_p sur F_x

IV-2-1-2 Effort radial F_y

Le tableau IV-3 présente l'analyse de variance pour F_y . On remarque que seuls les termes principaux ont un impact significatif. Par contre les différentes interactions n'ont pas une signification sur l'effort radial puisque la valeur de probabilité P est supérieure à 0.05. La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 63%. Ainsi que l'avance a une influence importante et elle présente un pourcentage de contribution de 20%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
V_c (m/min)	2	1569.5	784.8	11.31	0.005	6.20
f (mm/tr)	2	5049.9	2524.9	36.40	<0.000	19.95
a_p (mm)	2	16034.0	8017.0	115.58	<0.000	63.35
$V_c * f$	4	485.2	121.3	1.75	0.232	1.92
$V_c * a_p$	4	978.7	244.7	3.53	0.061	3.87
$f * a_p$	4	638.3	159.6	2.30	0.147	2.52
Erreur	8	554.9	69.4			2.19
Total	26	25310.5				100.00

Tableau IV-3 Résultats de l'analyse de variance pour F_y

L'équation de régression qui suit, montre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe l'effort radial décroît. Le coefficient de corrélation est de $\approx 88\%$.

$$F_y = 34.605 - 0.071V_c + 205.8f + 98.6a_p \dots\dots\dots (IV-2)$$

$$R^2 = 87.7\%.$$

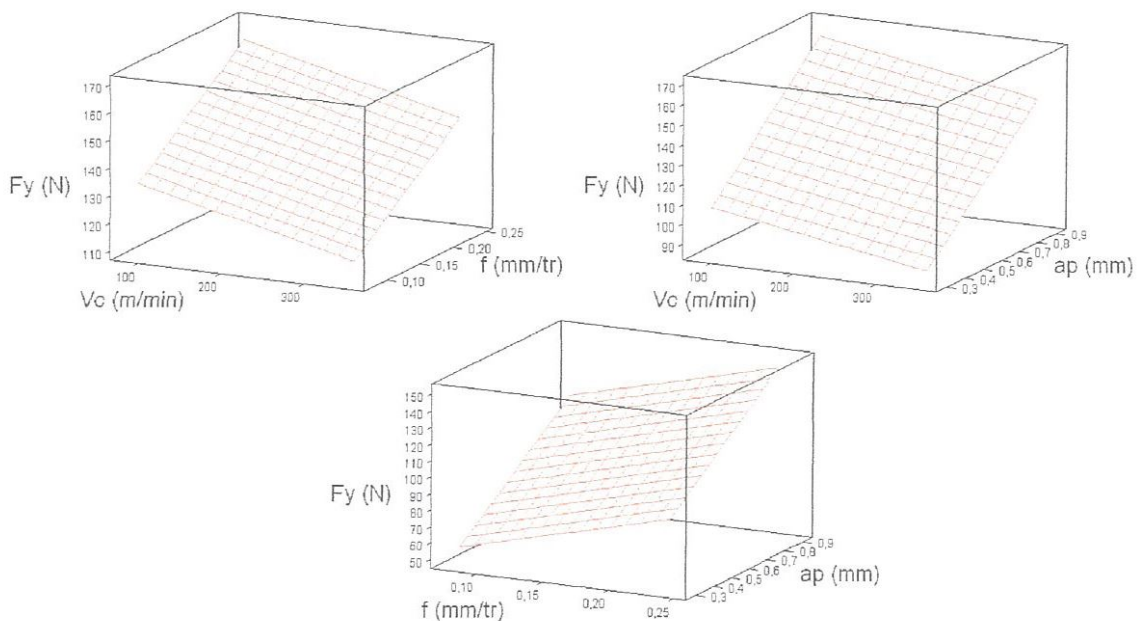


Figure IV-3 F_y en fonction de V_c , f et a_p

La surface de réponse présentée sur la *figure IV-3* ainsi que les diagrammes des effets moyens (*figure IV-4*), montrent que l'effort radial est inversement proportionnel avec la vitesse de coupe. L'effort F_y est plus affecté par l'augmentation de la profondeur de passe, ceci est clair par la pente qui est supérieure à celle de l'avance.

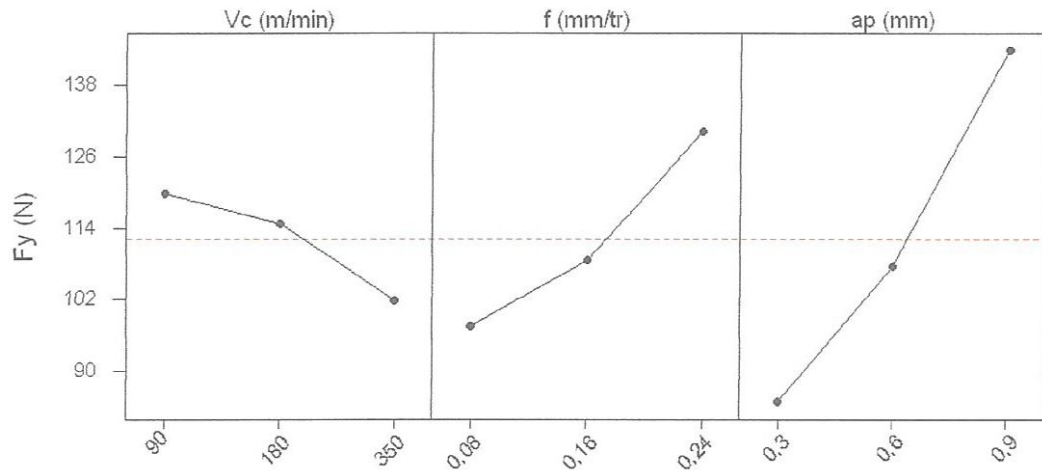


Figure IV-4 Graphes des effets de V_c , f et a_p sur F_y

IV-2-1-3 Effort tangentiel F_z

Les résultats obtenus au chapitre III concernant l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe montre que cette dernière n'a pas un impact significatif. L'analyse montre aussi que la vitesse a une influence négligeable puisque le pourcentage de contribution de V_c est de 1.60%. La profondeur de passe est le paramètre le plus prépondérant ($C = 48.8\%$) suivie de l'avance ($C = 41.14\%$).

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
V_c (m/min)	2	6503	3251	17.56	0.001	1.60
f (mm/tr)	2	167335	83668	451.95	<0.001	41.14
a_p (mm)	2	198529	99264	536.20	<0.001	48.80
$V_c \cdot f$	4	2070	517	2.80	0.101	0.51
$V_c \cdot a_p$	4	3406	852	4.60	0.032	0.84
$f \cdot a_p$	4	27462	6866	37.09	0.001	6.75
Erreur	8	1481	185			0.36
Total	26	406787				100.00

Tableau IV-4 Résultats de l'analyse de variance pour F_z

Equation de régression :

$$F_z = 3.36 + 0.07V_c + 16.48f + 107.85a_p - 0.36V_c \times a_p + 1971.11f \times a_p \dots\dots\dots (IV-3)$$

$$R^2 = 98\%$$

L'évolution de l'effort tangentiel en fonction de (f et a_p) *figure IV-5* illustre que cet effort est plus affecté par la profondeur de passe. L'avance affecte considérablement l'effort tangentiel comme le montre le graphe des effets (*figure IV-6*).

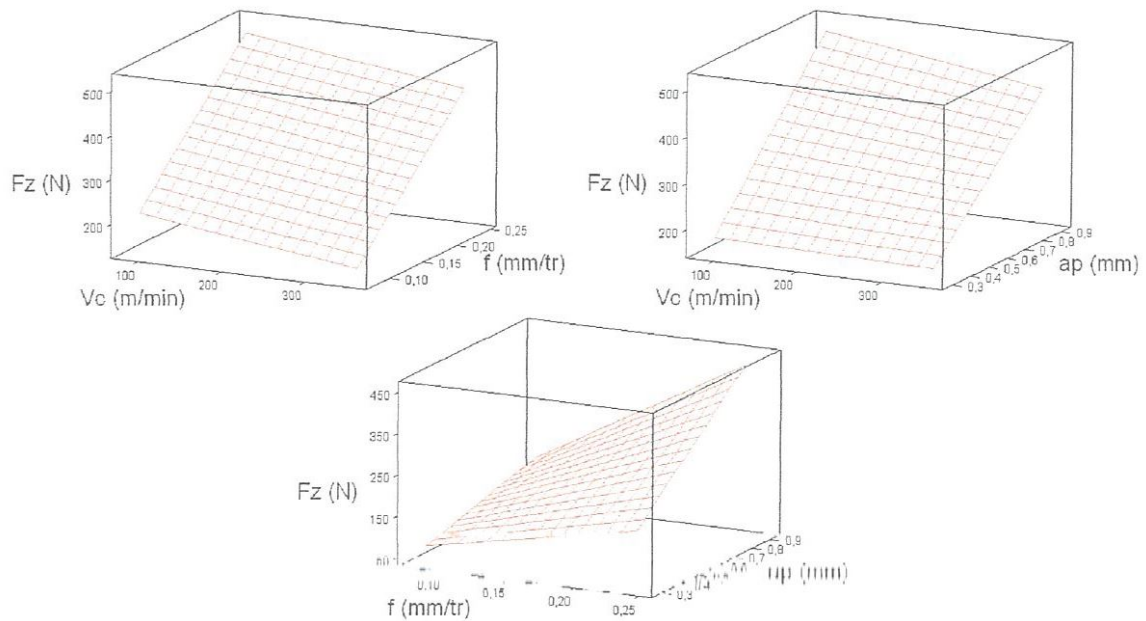


Figure IV-5 F_z en fonction de V_c , f et a_p

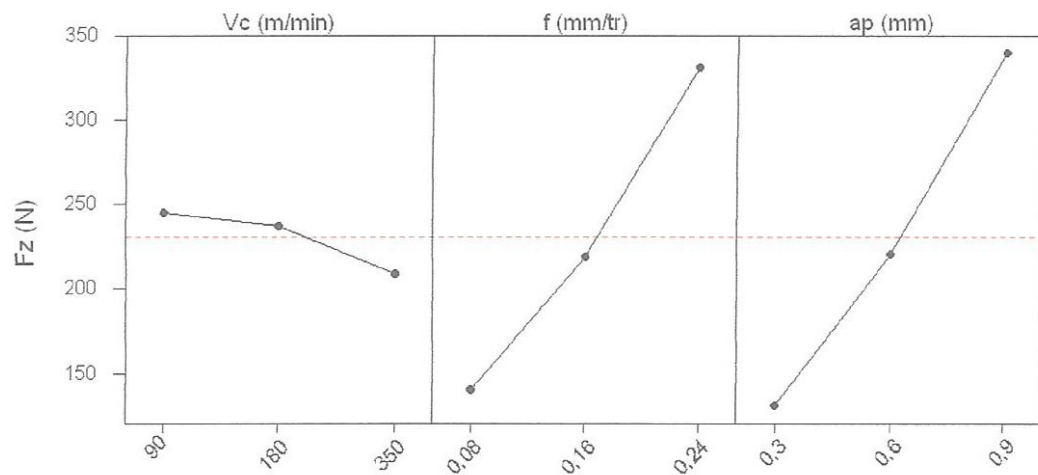


Figure IV-6 Graphes des effets de V_c , f et a_p sur F_z

IV-2-2 Analyse des critères de la rugosité

IV-2-2-1 Analyse de Ra

L'analyse du *tableau IV-5* montre que la profondeur de passe et la vitesse de coupe n'ont pas une signification sur la variation de la rugosité Ra car les valeurs trouvées de P sont supérieures à 5%. Par contre la valeur de P pour l'avance est inférieure à 0.05. On a conclu aussi que les différentes interactions n'ont aucun effet. En revanche l'avance a une signification très importante, elle présente un pourcentage de contribution de 92.85%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
Vc (m/min)	2	0.1289	0.0645	0.83	0.472	0.41
f (mm/tr)	2	29.1969	14.5984	186.96	<0.001	92.85
ap (mm)	2	0.0305	0.0153	0.20	0.826	0.10
Vc*f	4	0.1434	0.0358	0.46	0.764	0.46
Vc*ap	4	0.7989	0.1997	2.56	0.120	2.54
f*ap	4	0.5208	0.1302	1.67	0.249	1.66
Erreur	8	0.6247	0.0781			1.99
Total	26	31.4441				100.00

Tableau IV-5 Résultats de l'analyse de variance pour Ra

L'analyse de régression a donné l'équation ci-dessous avec un coefficient de corrélation de 90.3% :

$$Ra = -0.681 + 0.0006Vc + 15.659f - 0.128ap \dots\dots\dots (IV-4)$$

$$R^2 = 90.3\%.$$

La *figure IV-7* montre que la rugosité Ra est très affectée par l'avance. On a remarqué que Ra s'accroît légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cette dernière conduit à l'usure de l'outil et par conséquent à la dégradation de la surface usinée.

Les graphes des effets moyens de Ra en fonction des paramètres du régime de coupe (*figure IV-8*) montrent qu'une légère élévation des valeurs de la rugosité est due à l'usure de l'outil. On a remarqué aussi que la profondeur de passe a un effet négligeable sur Ra.

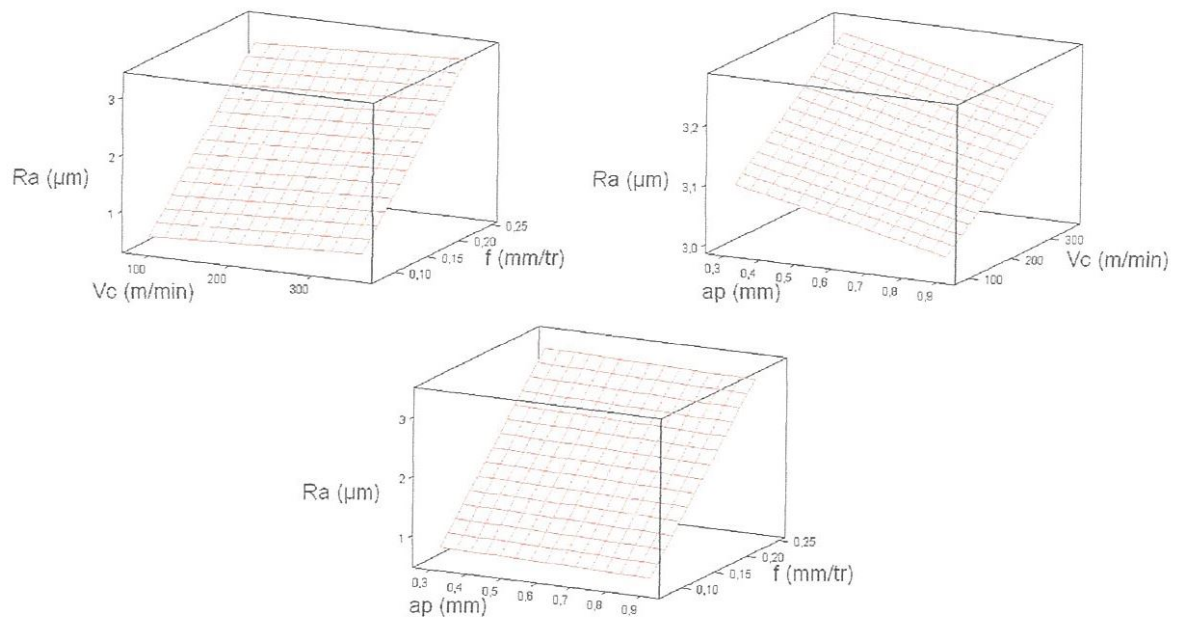


Figure IV-7 Ra en fonction de Vc , f et ap

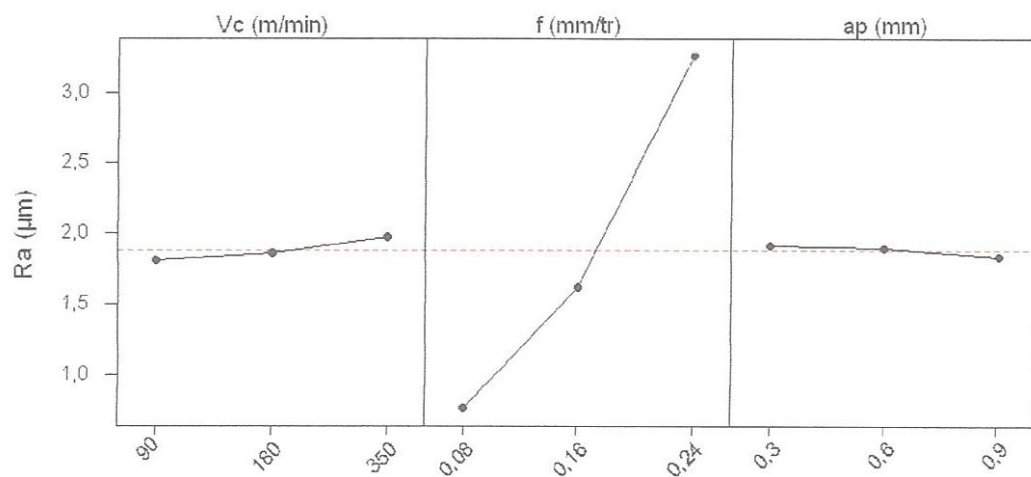


Figure IV-8 Graphes des effets de Vc , f et ap sur Ra

IV-2-2-2 Analyse de Rz

On a remarqué aussi dans le tableau IV-6 que seule l'avance a une influence importante sur la rugosité Rz ($P < 0.05$) avec une contribution de 88.35%. Par contre la vitesse de coupe, la profondeur de passe et les interactions n'ont pas un effet significatif.

L'analyse de régression a donné l'équation ci-dessous qui présente un coefficient de corrélation de 88.5%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
Vc (m/min)	2	11.368	5.684	3.03	0.105	2.10
f (mm/tr)	2	478.827	239.414	127.42	<0.001	88.35
ap (mm)	2	1.921	0.960	0.51	0.618	0.35
Vc*f	4	14.152	3.538	1.88	0.207	2.61
Vc*ap	4	15.166	3.791	2.02	0.185	2.80
f*ap	4	5.493	1.373	0.73	0.596	1.01
Erreur	8	15.031	1.879			2.77
Total	26	541.958				100.00

Tableau IV-6 Résultats de l'analyse de variance pour Rz

Equation de régression pour Rz :

$$Rz = -2.938 + 0.006Vc + 63.681f + 0.928ap \dots\dots\dots (IV-5)$$

$$R^2 = 88.5\%$$

La **figure IV-9** présente l'évolution de la rugosité Rz en fonction des paramètres du régime de coupe. Sur cette figure on a remarqué que Rz est très affectée par l'avance. Avec la hausse de la vitesse de coupe l'usure s'accélère ce qui conduit à la dégradation de la surface usinée.

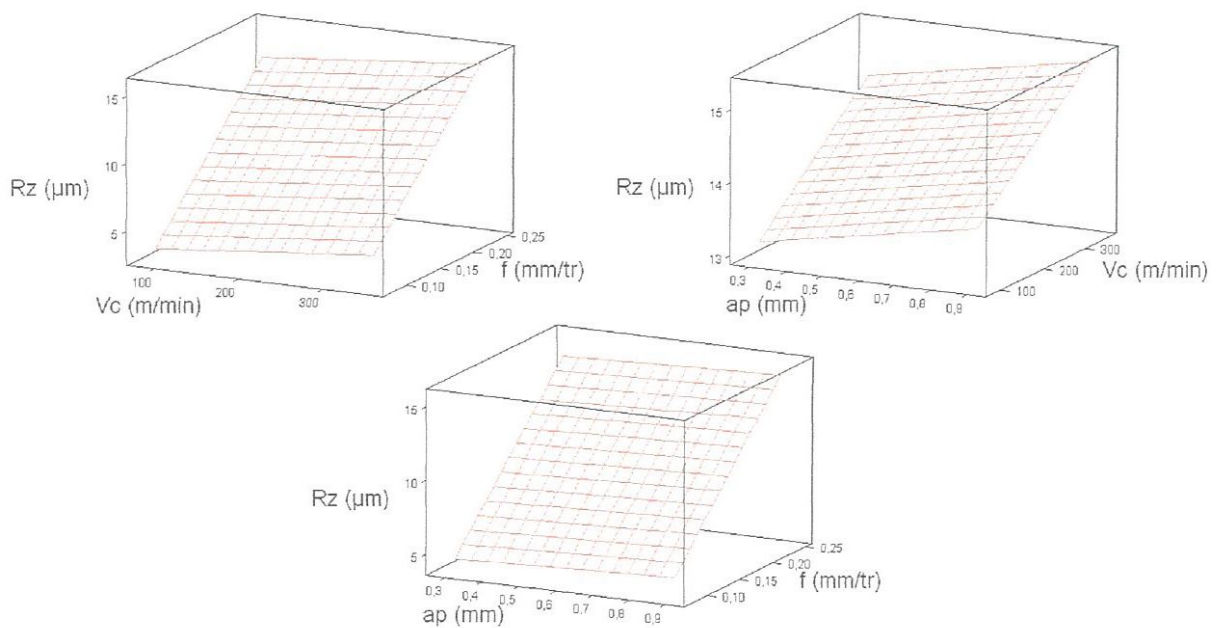


Figure IV-9 Rz en fonction de Vc, f et ap

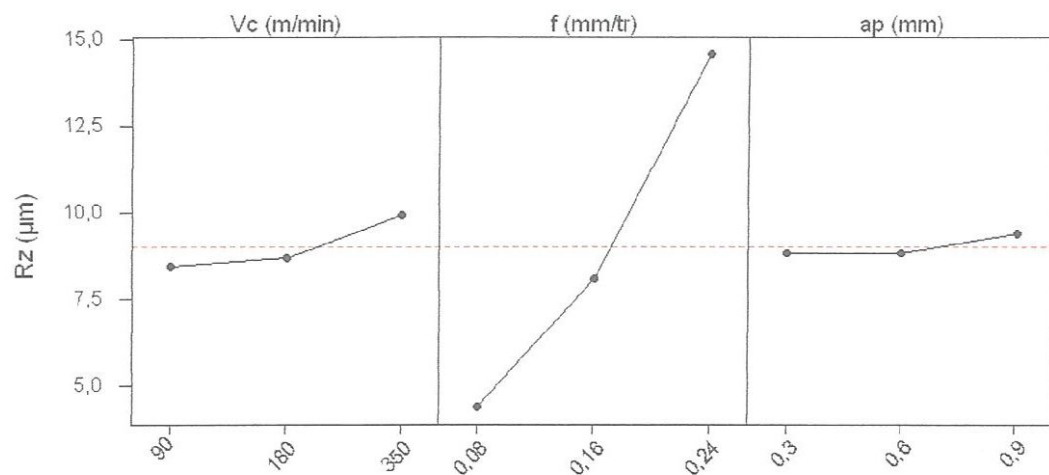


Figure IV-10 Graphes des effets de V_c , f et a_p sur R_z

IV-2-2-3 Analyse de R_t

L'analyse de variance présentée dans le *tableau IV-7* montre que les valeurs P pour la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont supérieures à 0.05 ce qui implique que ces deux paramètres n'ont pas une influence importante sur la rugosité R_t . Par contre la valeur P de l'avance est inférieure à 0.05 avec un pourcentage de contribution de 82.19%, donc ce paramètre est le plus significatif.

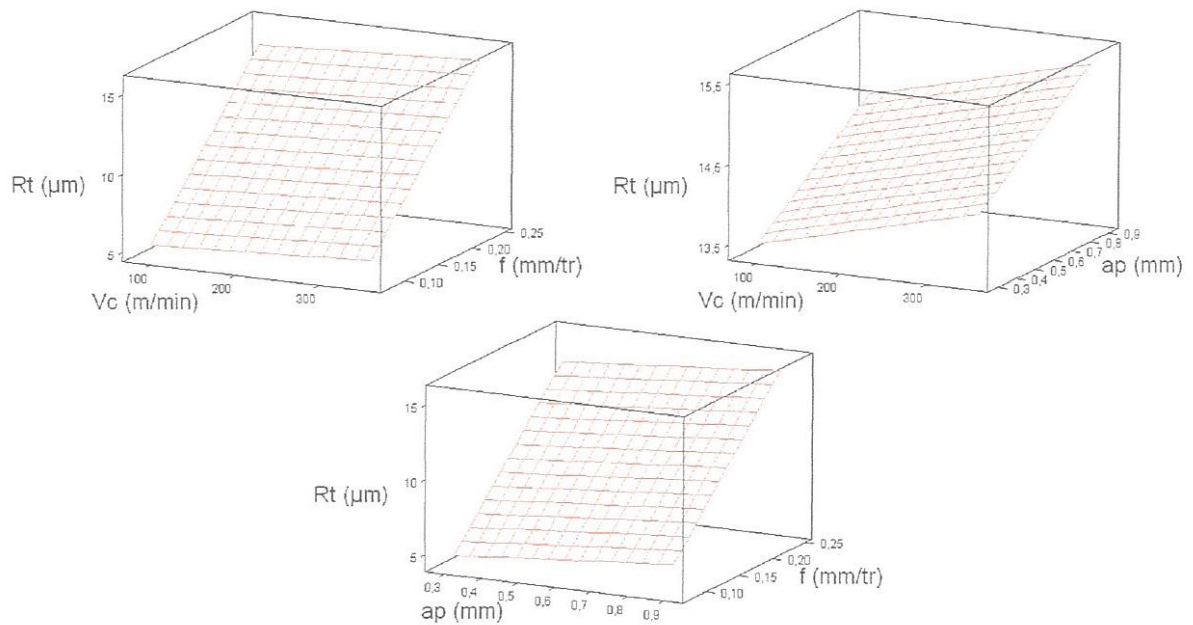
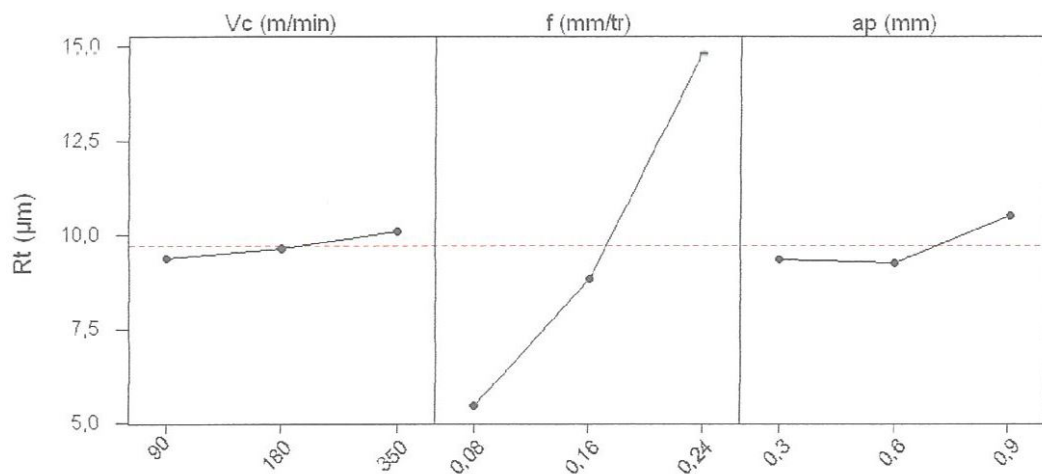
Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
V_c (m/min)	2	2.293	1.146	0.30	0.752	0.47
f (mm/tr)	2	405.150	202.575	52.29	<0.001	82.19
a_p (mm)	2	8.887	4.443	1.15	0.365	1.80
$V_c * f$	4	17.367	4.342	1.12	0.411	3.52
$V_c * a_p$	4	10.173	2.543	0.66	0.639	2.06
$f * a_p$	4	18.071	4.518	1.17	0.394	3.67
Erreur	8	30.991	3.874			6.29
Total	26	492.932				100.00

Tableau IV-7 Résultats de l'analyse de variance pour R_t

L'analyse de régression de l'influence de (V_c , f et a_p) sur R_t a donné l'équation suivante avec un coefficient de corrélation de 81.9%.

$$R_t = -1.406 + 0.003V_c + 58.556f + 1.969a_p \dots\dots\dots (IV-6)$$

$$R^2 = 81.9\%$$

Figure IV-11 R_t en fonction de V_c , f et a_p Figure IV-12 Graphes des effets de V_c , f et a_p sur R_t IV-3 Analyse de l'usure en dépouille et de rugosité en fonction de (V_c , f et temps)

N°	V_c (m/min)	f (tr/min)	t (min)	VB (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
1	280	0,08	4	0,03	0,56	2,58	3,26
2	280	0,14	4	0,05	1,32	7,67	8,79
3	280	0,08	12	0,07	0,63	3,17	3,67
4	280	0,14	12	0,09	1,34	9,17	10,20
5	400	0,08	4	0,05	0,80	3,35	4,07
6	400	0,14	4	0,07	1,16	5,90	6,40
7	400	0,08	12	0,26	1,31	6,72	7,80
8	400	0,14	12	0,39	2,04	10,17	11,03

Tableau IV-8 Résultats de l'usure en dépouille et des critères de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe et du temps (plan 2³).

Le *tableau IV-8* présente les résultats de l'usure en dépouille (VB) et de différents critères de la rugosité (R_a , R_z et R_t) en fonction des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe.

IV-3-1 Analyse de l'usure en dépouille VB

En analysant les résultats présentés dans le *tableau IV-9* on conclut que tous les termes n'ont pas une influence importante sur l'usure VB. Selon les pourcentages de contribution le temps d'usinage est le facteur le plus influant (37.48%) suivi de la vitesse de coupe qui présente une influence de 27.85%.

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
Vc (m/min)	1	0.031250	0.031250	12.76	0.174	27.85
f (tr/min)	1	0.006050	0.006050	2.47	0.361	5.39
t (min)	1	0.042050	0.042050	17.16	0.151	37.48
Vc*f	1	0.000800	0.000800	0.33	0.670	0.71
Vc*t	1	0.028800	0.028800	11.76	0.181	25.67
f*t	1	0.000800	0.000800	0.33	0.670	0.71
Error	1	0.002450	0.002450			2.18
Total	7	0.112200				100.00

Tableau IV-9 Résultats de l'analyse de variance pour VB

$$VB = 0.470 + 0.001Vc + 0.917f + 0.018t \dots\dots\dots (IV-7)$$

$$R^2 = 70.7\%$$

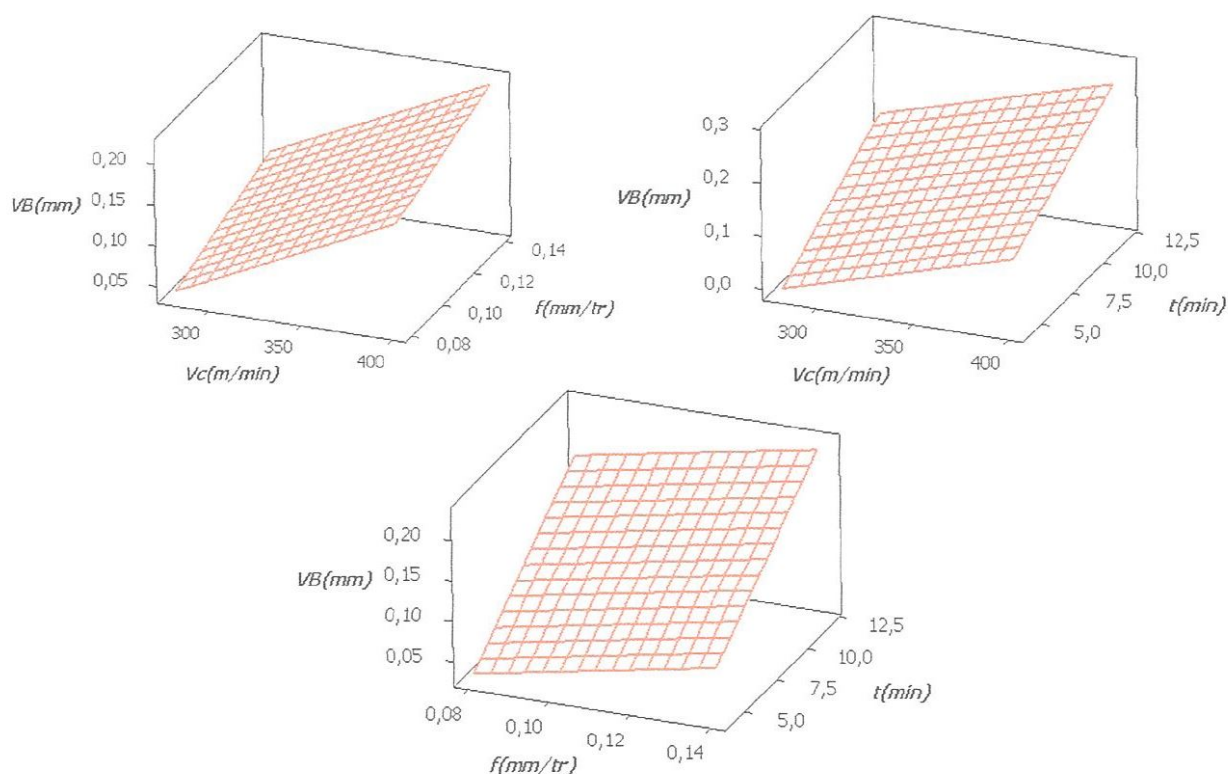


Figure IV-13 VB en fonction de Vc, f et t

La *figure IV-14* présente les effets de V_c , f et t sur l'usure en dépouille. On a remarqué que le temps d'usinage ainsi que la vitesse de coupe ont un impact important sur l'évolution de VB. Avec l'augmentation de ces deux paramètres l'usure de l'outil s'accélère par contre l'influence de l'avance est limitée.

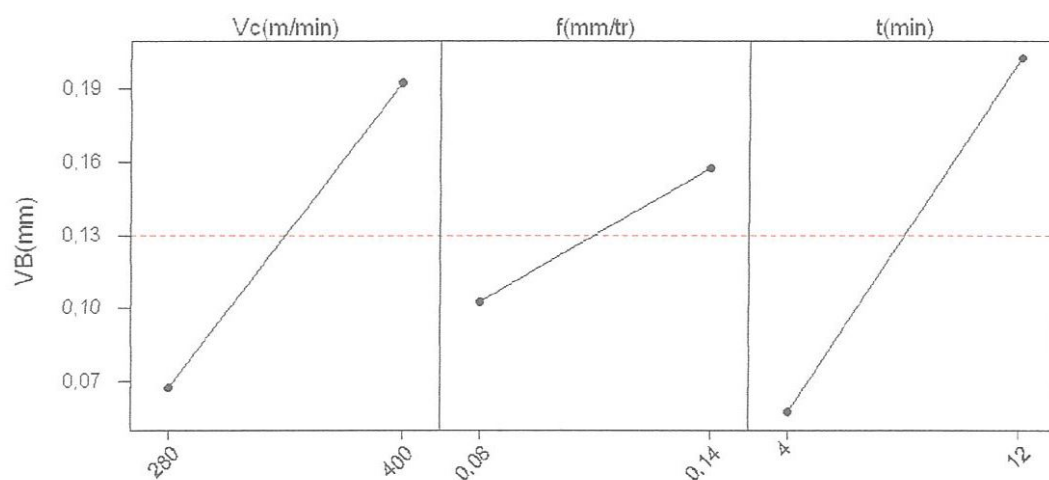


Figure IV-14 Graphes des effets de V_c , f et t sur VB

IV-3-2 Analyse de la rugosité

IV-3-2-1 Analyse de Ra

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le *tableau IV-8* montre que l'avance a un impact important sur l'évolution de la rugosité Ra car son pourcentage de contribution est de 50.46% suivie du temps d'usinage (16.86%) et en dernier lieu de la vitesse de coupe (16.41%).

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
V_c (m/min)	1	0.26645	0.26645	12.08	0.178	16.41
f (tr/min)	1	0.81920	0.81920	37.15	0.104	50.46
t (min)	1	0.27380	0.27380	12.42	0.176	16.86
$V_c * f$	1	0.01805	0.01805	0.82	0.532	1.11
$V_c * t$	1	0.21125	0.21125	9.58	0.199	13.01
$f * t$	1	0.01280	0.01280	0.58	0.586	0.79
Erreur	1	0.02205	0.02205			1.36
Total	7	1.62360				100.00

Tableau IV-10 Résultats de l'analyse de variance pour Ra

$$Ra = -1.432 + 0.003V_c + 10.667f + 0.046t \dots\dots\dots (IV-8)$$

$$R^2 = 83.7\%.$$

La *figure IV-15* qui présente l'influence de (V_c , f et t) sur la rugosité R_a . Elle illustre qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la rugosité R_a augmente légèrement. Nous concluons aussi que l'avance est le paramètre le plus prépondérant suivi du temps de coupe et en dernier de la vitesse de coupe.

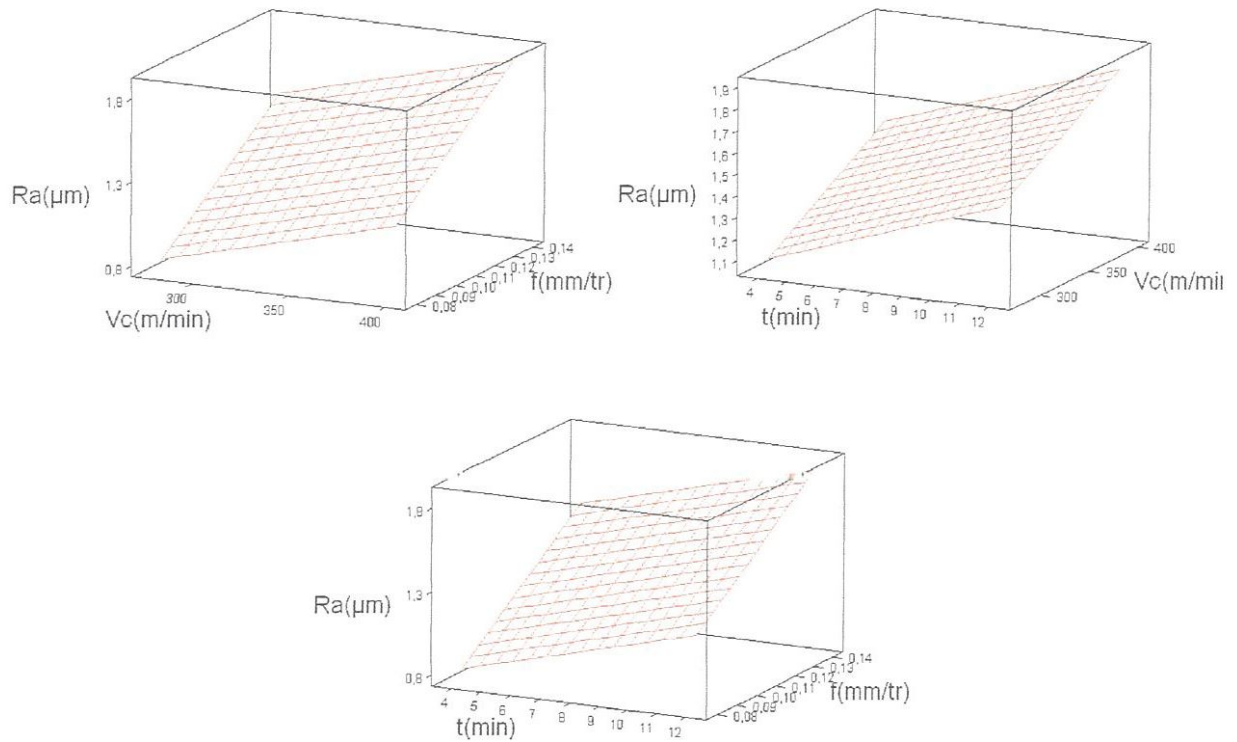


Figure IV-15 R_a en fonction de V_c , f et t

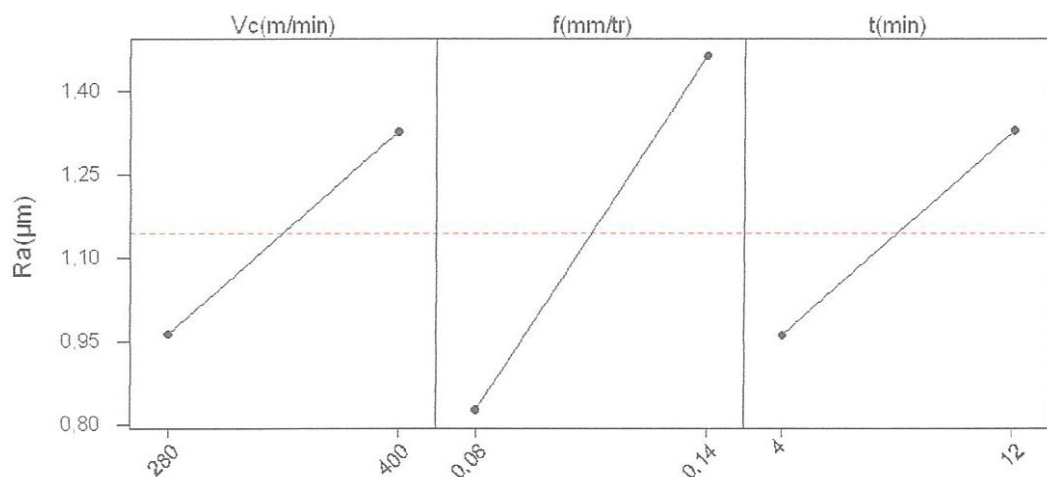


Figure IV-16 Graphes des effets de V_c , f et t sur R_a

IV-3-2-2 Analyse de Rz

On a remarqué dans le tableau IV - 11 qui présente les résultats de l'analyse de variance pour Rz que la vitesse de coupe, l'avance et le temps d'usinage ainsi que les interactions entre eux ont un impact significatif puisque les valeurs de P obtenues sont inférieures à 0.05. Les pourcentages de contribution de chaque terme montrent que l'avance est le facteur le plus prépondérant (63.59%) suivi du temps de coupe (20.61%).

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
Vc (m/min)	1	1.5753	1.5753	1.3 ^e 5	0.002	2.47
f (tr/min)	1	36.5085	36.5085	2.9 ^e 6	<0.001	63.59
t (min)	1	11.8341	11.8341	9.5 ^e 5	0.001	20.61
Vc*f	1	3.2385	3.2385	2.6 ^e 5	0.001	5.64
Vc*t	1	3.8503	3.8503	3.1 ^e 5	0.001	6.71
f*t	1	0.4095	0.4095	3.3 ^e 4	0.004	0.71
Erreur	1	0.0000	0.0000			0.00
Total	7	57.4163				100.00

Tableau IV-11 Résultats de l'analyse de variance pour Rz

$$Rz = -10.39 + 0.02Vc + 176.31f - 0.89t - 0.35Vc \times f + 0.001Vc \times t + 1.89f \times t \dots (IV-9)$$

$$R^2 = 99.9\%.$$

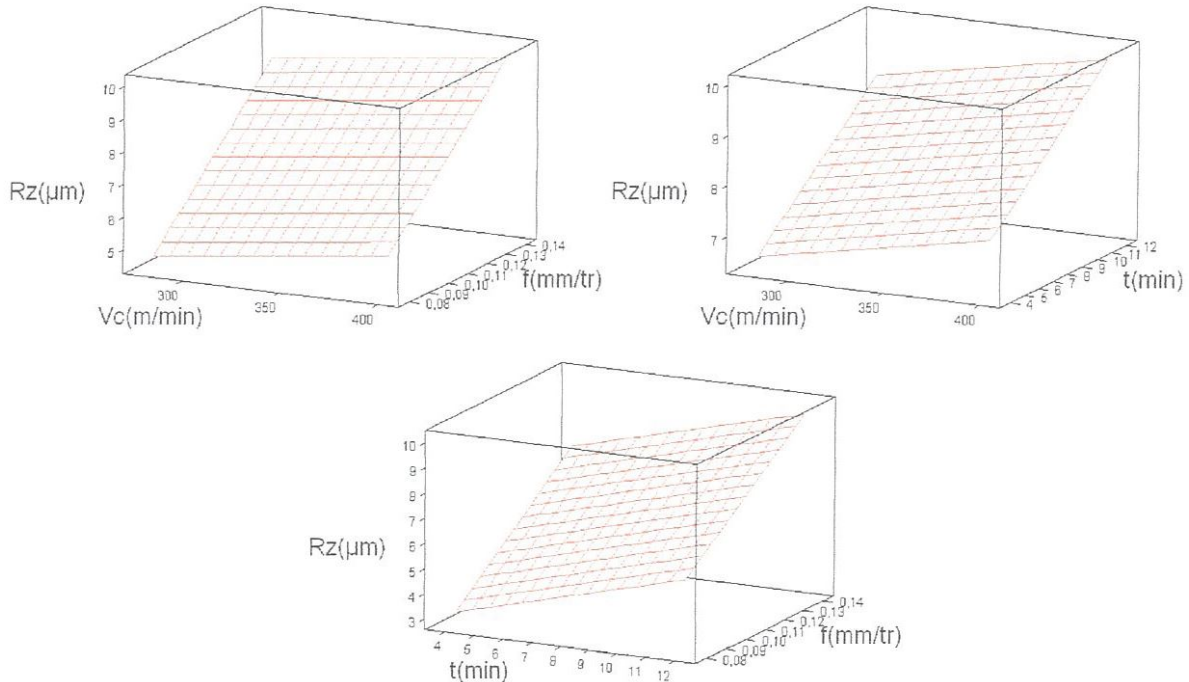


Figure IV-17 Rz en fonction de Vc, f et t

Les *figures IV-17* et *IV-18* montrent que la rugosité R_z est très affectée par l'avance suivie du temps d'usinage et en dernier lieu de la vitesse de coupe. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe la rugosité R_z s'accroît à cause de l'usure en dépouille de l'outil.

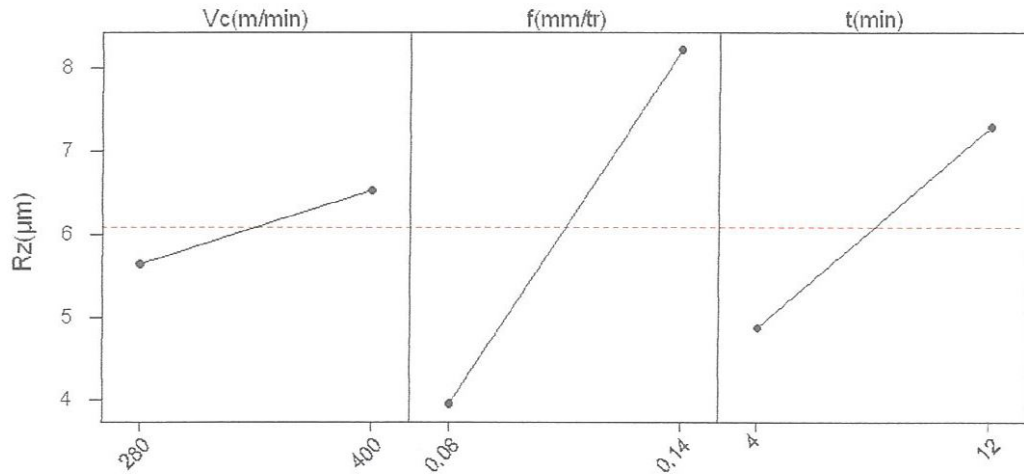


Figure IV-18 Graphes des effets de V_c , f et t sur R_z

IV-3-2-3 Analyse de R_t

Les valeurs illustrées dans le *tableau IV-12* de l'analyse de variance de la rugosité R_t en fonction des paramètres de coupe (V_c , f et t) ont montré que tous les termes ont un impact significatif sur R_t puisque les valeurs de P obtenues sont inférieures à 0.05. Le tableau illustre que l'avance est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est de 60.38% suivie du temps d'usinage avec une contribution de 20.16%

Source	DL	SC	CM	F	P	Contribution%
V_c (m/min)	1	1.428	1.428	1142.44	0.019	2.22
f (tr/min)	1	38.808	38.808	3.1^e4	0.004	60.38
t (min)	1	12.954	12.954	1.0^e4	0.006	20.16
$V_c * f$	1	5.281	5.281	4225.00	0.010	8.22
$V_c * t$	1	5.346	5.346	4277.16	0.010	8.32
$f * t$	1	0.451	0.451	361.00	0.033	0.70
Erreur	1	0.001	0.001			0.00
Total	7	64.270				100.00

Tableau IV-12 Résultats de l'analyse de variance pour R_t

L'analyse de régression a donné l'équation ci-dessous avec un coefficient de corrélation de 99.9%.

$$R_t = -11.99 + 0.03V_c + 211.06f - 1.06t - 0.45V_c \times f + 0.001V_c \times t + 1.89f \times t \dots (IV-10)$$

$$R^2 = 99.9\%$$

A partir de la *figure IV-19*, nous pouvons remarquer que la rugosité s'affecte légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Contrairement à l'avance qui influe d'une manière forte sur R_t .

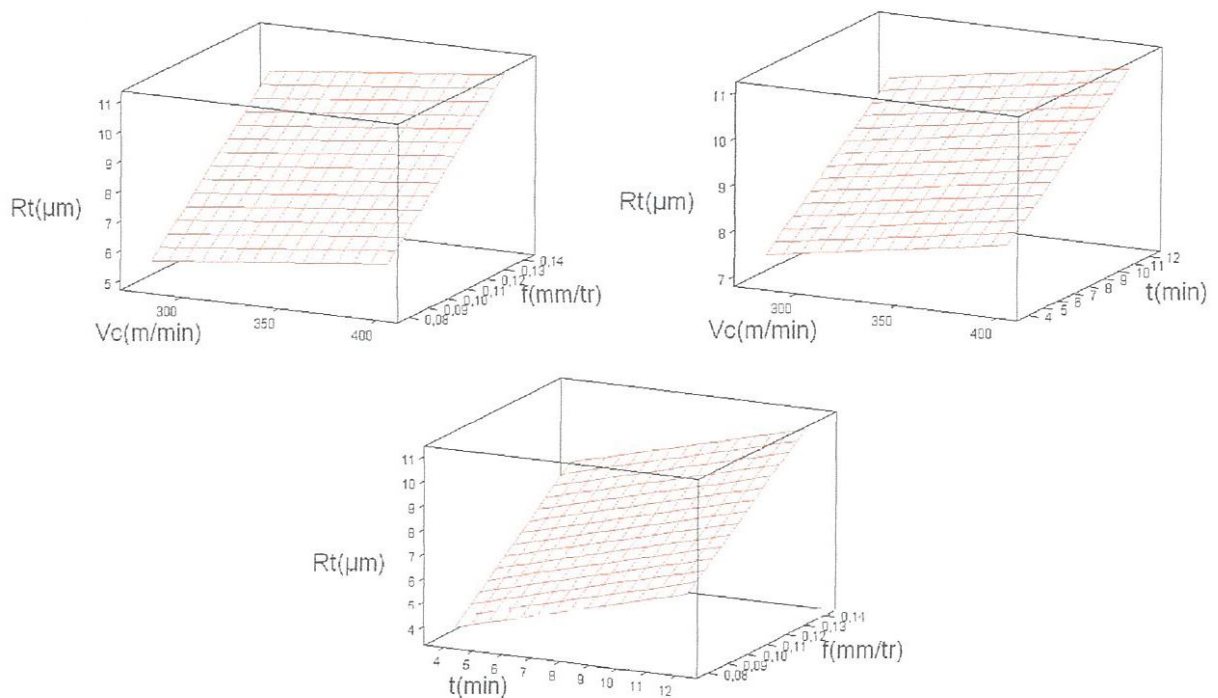


Figure IV-19 R_t en fonction de V_c , f et t

Les graphes des effets de paramètres de coupe sur la rugosité R_t (*figure IV-20*) montrent que l'influence de la vitesse de coupe est significative, ceci est dû clairement à l'usure engendrée pendant l'usinage. Avec le temps, l'usure en dépouille de l'outil s'accroît ce qui affect la qualité de la surface usinée.

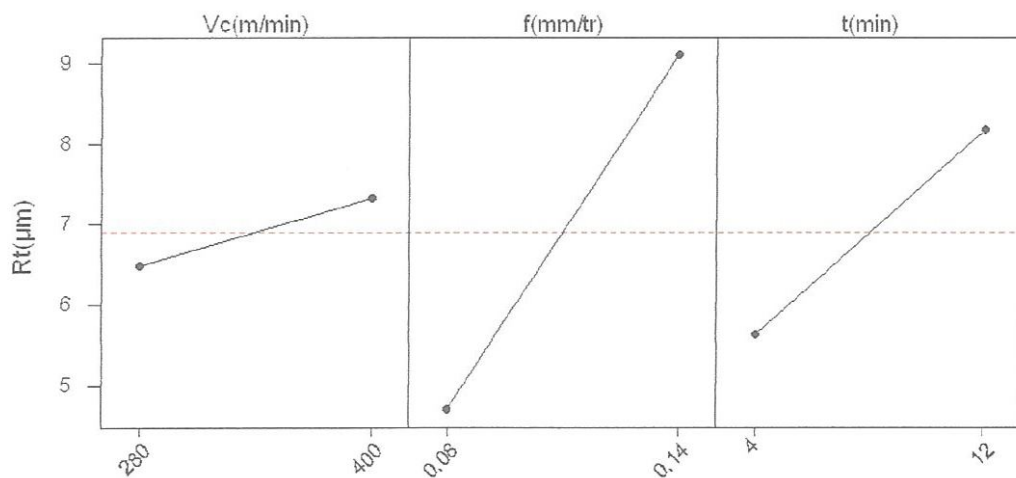


Figure IV-20 Graphes des effets de V_c , f et t sur R_t

IV-4 Conclusions

Ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (efforts de coupe, rugosité et usure en dépouille de l'outil) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et temps d'usinage) lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. Les résultats de ce chapitre nous ont conduit aux conclusions suivantes :

- Selon les modèles des différentes composantes de l'effort de coupe, la vitesse de coupe n'a pas une influence notable sur les efforts de coupe ;
- Les efforts axial et radial sont très affectés par la profondeur de passe suivi de l'avance;
- On a noté que les différents critères de la rugosité sont influencés considérablement par l'avance, la contribution de cette dernière est de $\approx 93\%$ sur le critère R_a , de $\approx 88\%$ sur le critère R_z et de $\approx 82\%$ sur le critère R_t ;
- L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à l'endommagement du bec de l'outil à cause de l'usure en dépouille. Ce qui mène à l'élévation des différents critères de la rugosité ;
- Le temps d'usinage est le plus important paramètre intervenant dans le processus de la coupe. Il favorise l'augmentation de l'usure en dépouille de l'outil ce qui induit la dégradation de la surface usinée et l'accroissement des efforts de coupe.
- Les modèles de la rugosité en fonction du temps indiquent que l'avance est le paramètre qui influe en premier ordre avec une contribution de $2/3 \approx 60\%$ suivi par le temps de coupe avec une contribution de $1/3$ de la contribution de l'avance.

CONCLUSION GÉNÉRALE

1- Conclusion

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi 18-9 nous a permis d'étudier l'usinabilité de cet acier en se basant sur les critères suivants : efforts et pressions de coupe, rugosité de la surface usinée et usure de l'outil de coupe.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur l'usinage des aciers inoxydables. Dans cette partie, nous avons défini les phénomènes intervenant dans le processus de la coupe. Les travaux de recherche concernant l'usinabilité des aciers inoxydables ont été évoqués.

Dans le chapitre II, nous avons présenté une méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences. Pour cela nous avons fait appel à la méthode factorielle. Le traitement des résultats a été fait par l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de la surface de réponse (RSM). Les équipements nécessaires à la réalisation des expériences ainsi que les conditions de coupe ont été également l'objet de ce chapitre.

Le chapitre III est consacré à la partie expérimentale. Dans ce chapitre, les relations entre les variables d'entrée et les paramètres technologiques ont été étudiées.

Dans le chapitre IV, nous avons fait une analyse de variance des résultats expérimentaux pour déterminer les facteurs qui ont un impact significatif. Ensuite nous avons proposé des modèles mathématiques en se basant sur la méthodologie de la surface de réponse.

L'étude du comportement des différents matériaux de coupe face à l'acier inoxydable austénitique X2CrNi 18-9 en tournage nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ❖ Pour toutes les conditions de coupe testées, l'effort principal est l'effort tangentiel suivi par l'effort radial et en dernier lieu l'effort axial.

❖ Les valeurs des efforts obtenues par les cinq nuances sont presque du même ordre et la différence qui existe est due au type de matériau de coupe, de couches de revêtement et de la géométrie de brise-copeau. A la vitesse de 210 m/min, l'avance de 0.08 mm/tr et la profondeur de passe de 0.5 mm, on a enregistré les valeurs de (56.50 ; 68.29 ; 57.32 ; 69.44 et 60.47) N pour F_x , (84.42 ; 87.84 ; 83.95 ; 98.90 et 56.82) N pour F_y et (117.78 ; 102.59 ; 143.01 ; 133.43 et 106) N pour F_z successivement aux différentes nuances (1025, 2015, H13A, 1525 et 5015).

❖ Aux vitesses de coupe élevées ($V_c > 210$ m/min), les rugosités minimales sont obtenues par le cermet 1525 suivi par le carbure 2015 et le cermet 5015 ($R_a = 0.34 \mu\text{m}$). Par contre le carbure non revêtu H13A donne un bon état de surface à des faibles vitesses de coupe ($V_c = 150$ m/min) ($R_a = 0.56 \mu\text{m}$). Au-delà de cette vitesse le carbure H13A perd ses capacités de coupe (usure accélérée). En ce qui concerne le carbure revêtu 1025, les résultats montrent que l'état de surface se dégrade suite à l'apparition des micro-copeaux soudés sur la surface usinée à des vitesses de coupe $V_c > 210$ m/min.

❖ L'étude de l'usure illustre que le cermet 5015 est moins résistant à l'usure et il a donné des durées de vie très limitées (ne dépasse pas 10min pour les conditions minimales, $V_c = 280$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr). Par contre les nuances revêtues (carbure 2015 et cermet 1525) ont atteint des tenues plus supérieures surtout pour la vitesse 280m/min. On a enregistré des tenues de 44min pour le carbure 2015 et 41min pour le cermet 1525.

❖ Le traitement statistique des résultats des essais ont abouti à la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe, de la rugosité et de l'usure. L'analyse de la variance (ANOVA) nous a permis de déterminer les facteurs qui ont un impact significatif sur les différents phénomènes étudiés.

❖ Les modèles mathématiques de l'effort de coupe montrent que la profondeur de passe est le paramètre le plus influent suivi de l'avance et en dernier de la vitesse de coupe.

❖ Il est à noter que les différents critères de la rugosité sont influencés considérablement par l'avance, la contribution de cette dernière est de $\approx 93\%$ sur le critère R_a , de $\approx 88\%$ sur le critère R_z et de $\approx 82\%$ sur le critère R_t .

❖ Les modèles de la rugosité en fonction du temps indiquent que l'avance est le paramètre qui influe en premier ordre avec une contribution de $2/3 \approx 60\%$ suivi par le temps de coupe avec une contribution de $1/3$ de la contribution de l'avance.

2- Perspectives

Cette étude ouvre d'importantes perspectives qui nous incitent à :

- Continuer à connaître le comportement de nouveaux matériaux de coupe face à l'acier inoxydable austénitique X2CrNi 18-9.
- Etudier l'usinabilité d'autres aciers inoxydables à titre d'exemple, les aciers inoxydables martensitiques et ferritiques.
- Déterminer les modèles mathématiques en fonction d'autres variables tels que : la géométrie de la partie active de l'outil (rayon du bec de l'outil et l'angle d'attaque).
- Utiliser d'autres méthodes statistiques (Taguchi, réseau de neurone).

Nomenclature

ANOVA	Analyse de la variance.
ap	Profondeur de passe (mm).
CVD	Dépôt chimique vapeur.
f	Avance par tour (mm/tr).
Frés	Effort de coupe résultant (N).
F _x (F _a)	Effort de coupe axial (N).
F _y (F _p)	Effort de coupe radial (N).
F _z (F _c)	Effort de coupe tangentiel (N).
K _x (K _a)	Pression de coupe axiale (N/mm ²).
K _y (K _p)	Pression de coupe radiale (N/mm ²).
K _z (K _c)	Pression de coupe tangentielle (N/mm ²).
K _T	Profondeur d'un cratère (mm).
PVD	Dépôt physique vapeur.
P _c	Puissance de coupe (w).
P	Puissance absorbée par la machine (w).
R _a	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
RSM	Méthodologie de la surface de réponse.
R _t	Rugosité totale (μm).
R _z	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
t (T _c)	Temps de coupe.
VB	Hauteur de l'usure en dépouille (mm).
V _c	Vitesse de coupe (m/min).
α	Angle de dépouille principal (degré).
γ	Angle d'attaque (degré).
χ	Angle de direction principal (degré).

Références bibliographiques

- [ABO05] **Abou-El-Hossein K.A., Yahya Z.**; High-speed end-milling of AISI 304 stainless steels using new geometrically developed carbide inserts, *Journal of Materials Processing Technology* 162–163 (2005), pp. 596–602.
- [BEL02] **Belluco W., Dechiffre L.** ; Surface integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils, *Tribology International* 35 (2002), pp. 865-870.
- [CAR03] **CARSTEN S.**; Tool Wear Prediction and Verification in Orthogonal Cutting, *Institute of Machine Tools and Production Science University of Karlsruhe* (2003), pp. 22.
- [CIF05] **Ciftci I.**; Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, *Journal of Tribology International* (2005), pp.1–5.
- [CUN91] **CUNAT P.**; Aciers inoxydables "Critères de choix et structure", *Techniques de l'ingénieur* M4540.
- [CUN92] **CUNAT P.**; Aciers inoxydables "Mise en œuvre", *Techniques de l'ingénieur* M4542.
- [CUN93] **CUNAT P.**; Aciers inoxydables "Propriétés, Résistance à la corrosion", *Techniques de l'ingénieur* M4541.
- [DSO04] **DSOUZA D. G.**; a comparison of the performance of various indexable carbide inserts for machining stainless steel, thèse de doctorat, department of mechanical & industrial engineering the university of texas At El Paso, (2004), pp. 135.
- [END06] **ENDRINO J.L., FOX-RABINOVICH G.S., GEY C.**; Hard AlTiN, AlCrN PVD coating for machining of austenitic stainless steel; *Surface & Coating Technology*, 200 (2006) pp. 6840-6845.

- [JUK01] **JUKKA P., HANNU H., VEIJO K.**; Tool wear and machinability of X5CrMnN18-18 stainless steel, *Journal of Material Processing Technology*, 119(2001) pp. 14-20.
- [KOR04] **KORKUT I., KASAP M., CIFTCI I., SEKER U.**; Determination of cutting parameters during machining of AISI 304 stainless steel, *Material and Design*, 25(2004) pp. 303-305.
- [KUM06] **KUMAR A., DURAI A., SORNAKUMAR T.**, The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, *Journal of Material Processing Technology*, 173(2006) pp. 151-156.
- [LIE04] **Liew W.Y.H., Lu Y.G., Ding X., Ngoi B.K.A. Yuan and S.**, Performance of uncoated and coated carbide tools in the ultra-precision machining of stainless steel, *Tribology Letters*, Vol. 17No.4 (2004) pp. 851-857.
- [LIN00] **LIN T.**, Experimental study of burr formation and tool chipping in the face milling of stainless steel, *Journal of Material Processing Technology*, 108 (2000) pp. 12-20.
- [LTR00] **Lin T.R., Shyu R.F.**, Improvement of tool life and exit burr using variable feeds when drilling stainless steel with coated drills, *Advanced Manufacturing Technology*, (2000) 16 pp. 308-313.
- [NEO03] **Neo K.S., Rahman M., Li X.P., Khoo H.H., Sawa M., Maeda Y.**, Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel, *Journal of Material Processing Technology*, 140 (2003) pp. 326–331.
- [NOO07] **M.Y. Noordin, V.C. Venkatesh, S. Sharif**, Dry turning of tempered martensitic stainless steel using coated cermet and coated carbide tools, *Journal of Material Processing Technology*, (2007) 185 pp. 83-90.
- [REC02] **RECH J.**, CONTRIBUTION A LA COMPREHENSION DES MODES D’ACTIONS TRIBOLOGIQUES ET THERMIQUES DES REVETEMENTS EN USINAGE, thèse de doctorat, école nationale supérieure d’arts et métiers, (2002) pp. 290.

- [SAN07] **SANDVIK** Coromant 2007 Catalogue Général: Tournage-Fraisage-Perçage-Alésage-attachements.
- [TRA05] **TRAMETAL**; Matières difficiles à usiner « usinage des aciers inoxydables », (2005) pp. 12-15.
- [TRA06] **TRAMETAL**; Plaquettes de coupe ; Mars 2006 VOL.1, pp 6-14.
- [TRO01] **TROMBERT C.**; Usinabilité des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur M726.