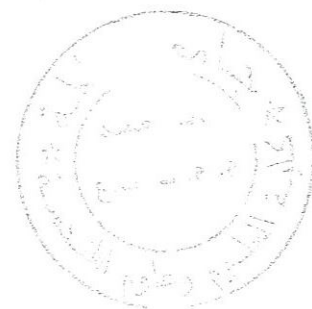


75

Mémoire de Magister



Département de : **Génie Mécanique**
Option : **Construction Mécanique et Productique**

Présenté par : A-Ali - Selaïmia

*CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'USINABILITE DES ALLIAGES
FERREUX EN FRAISAGE.*

Sous la Direction du : Dr. M^{ed} Athmane YALLESE

Devant le Jury

Dr. L. BOULANOUAR	Pr. Président	Université Badji Mokhtar Annaba
Dr. M. A. YALLESE	MC. Rapporteur	Université 8 Mai 1945 Guelma
Dr. N. OUELAA	Pr. Examineur	Université 8 Mai 1945 Guelma
Dr. M.c. DJAMAA	MC. Examineur	Université 8 Mai 1945 Guelma
Cc. M. BENGHARSALLAH	Invité	Université Badji Mokhtar Annaba

Remerciement

Les travaux de ce mémoire ont été réalisés au sein du laboratoire (LMS) de l'université de Guelma, dans l'équipe de recherche de coupe des métaux dirigé par monsieur Mohamed athmane YALLESE, Maître de Conférence, que je remercie tout particulièrement de m'avoir encadré dans ce mémoire de Magister, de m'avoir soutenu et dirigé durant toute cette période.

Je remercie Messieurs les membres de jury pour leur collaboration durant l'examen de ce travail et leur participation à ma soutenance.

Je remercie vivement Monsieur Lakhdar BOULANOUAR, Professeur à l'université d'Annaba pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider ce jury.

Je remercie également Messieurs Noureddine OUELAA, Professeur à l'université de Guelma et Mohamed cherif DJAMAA, Maître de conférence à l'université de Guelma d'avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie Monsieur Mohieddine BENGHERSALLAH, Chargé de cours à l'université de Annaba d'assister comme membre invité dans ce jury.

Mes remerciements vont également à tous les copains et les agents du laboratoire pour leur aide.

ملخص

الصلب المقاوم للصدأ يشغل في هذه السنوات الأخيرة مكانة مرموقة على مستوى السوق الدولي. فهو مستعمل في مجال واسع في الصناعة اليوم، من ذلك: المواد الكهرومنزلية، السكاكين، صناعة السيارات، صناعة النقل البري والبحري، الأنابيب المعدة لنقل السوائل ومعدات الصحة. الصلب المقاوم للصدأ الأستينتيكي هو أحد عائلات الصلب المقاوم للصدأ. فهو صلب له ليونة عالية، قابلية تصلب القشرة، غير ممغنط كما أنه ناقل سيئ للحرارة. هذه الخصائص تجعله يُصنّف ضمن أنواع الفولاذ ذو التشغيلية السيئة. من هذا المنطلق تأتي أهمية دفع الدراسات حول تصرف هذا المعدن قبالة مختلف مواد القطع التي يمكن أن تكون لها مردودية أثناء التشغيل في التفرّيز.

يكمّن هذا العمل في دراسة تشغيلية الصلب المقاوم للصدأ الأستينتيكي (X2CrNi18-9 (AISI 304L في التفرّيز، باستعمال نوعين من مواد القطع، الكربيد المُلبّس (GC4040) و السّرّمي (CT530). الهدف من هذه الدراسة هو رؤية مدى تأثير مختلف عناصر القطع (سرعة القطع، التغذية بالسن، عمق التمريرة و طول القطع)، طريقة التشغيل (بالتضاد أو بالازدرداد)، بالتشغيل الجاف أو باستعمال سائل التبريد، على مختلف العناصر التكنولوجية (خشونة السطوح المشغلة، إجهادات القطع و تآكل أداة القطع)، هذا من جهة. ومن جهة أخرى و بهدف إيجاد نماذج رياضية لإمكانية التوقعات المستقبلية، قمنا بدراسة إحصائية للتناج، وذلك باستعمال طريقة مساحات الجواب.

Résumé

L'acier inoxydable occupe ces dernières années une assez bonne position dans le marché mondial vu sa résistance à la corrosion. Il est employé dans un large domaine dans l'industrie d'aujourd'hui, à savoir : Electroménager, ménager et coutellerie, industrie automobile, industrie des transports terrestres et maritimes, tubes destinés au transport de fluides et instruments médicaux. L'acier inoxydable austénitique est l'un des familles de l'acier inoxydable. C'est un acier qui a une ductilité élevée, écrouissable, non magnétisant et qui a une mauvaise conductibilité thermique. Ces caractéristiques le classe parmi les aciers ayant une mauvaise usinabilité. De ce fait vient l'importance de pousser les études sur le comportement de ce matériau face aux différents matériaux de coupe pouvant être rentable lors de son usinage en fraisage.

Ce travail consiste à étudier l'usinabilité de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 (AISI 304L) en fraisage, en utilisant deux nuances de matériaux de coupe, le carbure revêtu (GC4040) et le cermet (CT530). L'objectif de cette étude est de voir l'impact des différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe et longueur de coupe), du matériau de coupe, du mode d'usinage (en opposition ou en concordance) et de l'usinage à sec ou avec arrosage, sur les paramètres technologiques (la rugosité, l'effort de coupe et l'usure de l'outil), cela d'une part. D'une autre part, et dans le but de déterminer des modèles mathématiques pour faire des prédictions, nous avons fait une analyse statistique des résultats, en utilisant la méthode des surfaces de réponse.

Abstract

These last years, the stainless steel occupies a rather good position in the world market considering its corrosion resistance. It is employed in a broad field in the industry of today, namely: Electric household appliances and cutlery, in industry automobile, in industry of the surface transports, tubes intended for the transport of fluids and medical instruments. The austenitic stainless steel is one of the families of the stainless steel. It is a kind of steel which has a ductility raised, hammer-hardenable, not magnetizing and bad thermal conductivity. These characteristics classify it among steels having a bad workability. From this fact comes the importance to make studies on the behaviour of this material vis-a-vis various materials of cut which can be profitable during its machining in milling.

This work consists in studying the workability of the stainless steel austenitic X2CrNi18-9 (AISI 304L) in milling, by using two nuances of materials of cut, coated carbides (GC4040) and cermet (CT530). The objective of this study is to see the impact: various parameters of the mode of cut (cutting speed, feed by tooth, depth of cut and length of cut), material of cut, the mode of machining (in opposition or agreement), of dry machining or with watering, on the technological parameters (roughness, cutting forces and the wear of the tool), on one hand. On the other, and with the aim of determining mathematical models to make predictions, we made a statistical analysis of the results by using the method of surfaces of answer.

SOMMAIRE

- NOMENCLATURE :	9
- INTRODUCTION :	10
<i>Chapitre I : Etude bibliographique sur la coupe des métaux</i>	
I-1- INTRODUCTION:	13
I-2- DEFINITION DE L'USINABILITE:	13
I-3- CRITERES D'EVALUATION DE L'USINABILITE:	14
I-4- DEFINITION DU FRAISAGE:	15
I-4-1/ Paramètres de coupe:	15
I-4-2/ Géométrie de l'outil de coupe :	17
I-5- MATERIAU USINE :	18
I-5-1/ Définition :	19
I-5-2/ Famille des aciers inoxydables :	19
I-5-3/ Domaine d'utilisation :	22
I-6- MATERIAUX DE COUPE :	22
I-6-1/ Les aciers rapide :	22
I-6-2/ Les carbures :	22
I-6-3/ Les cermets :	23
I-6-4/ Les céramiques:	25
I-6-5/ Condition de coupe pour le fraisage :	25
I-7- ETAT DE SURFACE :	25
I-7-1/ Introduction:	25
I-7-2/Rugosité:	25
I-8- EFFORT DE COUPE :	28
I-8-1/ Définition et intérêt de leur mesure :	28
I-8-2/ Génération des efforts de coupe :	29
I-8-3/ Effort spécifique de coupe :	29
I-8-4/Puissance de coupe :	30
I-6-5/ Mesure des efforts de coupe :	30
I-9-USURE DES OUTILS DE COUPE :	31
I-9-1/ Définition :	31
I-9-2/ Phénomène provoquant l'usure :	31
I-9-3/ Différentes formes d'usure des outils :	32
I-9-4/ Relation entre l'usure et le temps :	35
I-9- 5/ Critère d'usure:	36
I-9-6/ Lois d'usure des outils de coupe :	36
I-10- FORMATION DE COPEAUX :	39
I-10-1/ Intérêt de contrôle de la formation de copeaux :	39
I-10-2/ Mécanisme de la formation du copeaux :	39
I-10-3/ Mécanisme de la formation de l'arête rapportée :	41
I-0-4/ Types de copeaux rencontrés :	42
I-11- TRAVAUX DE RECHERCHES SUR L'ACIER INOXYDABLE:	42
I-12- CONCLUSION :	46
I-13- PROBLEMATIQUE :	47

Chapitre II : Moyens utilisés et programme d'expérience

II-1-INTRODUCTION:	49
II-2-MOYENS UTILISES:	49
II-2-1/ Machine-outil:	49
II-2-2/Matériau usiné:	50
II-2-3/ Outil de coupe:	54
II-3- EQUIPEMENTS DE MESURE UTILISES :	56
II-3-1/ Rugosimètre:	56
II-3-2/ Microscope pour la mesure de l'usure :	56
II-3-3/ Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe:	57
II-4- PLANIFICATION DES EXPERIENCES:	58
II-4-1/ Introduction :	58
II-4-2/Méthode unifactorielle :	59
II-4-3/ Méthode multifactorielle :	60
II-5-CONDITIONS DE COUPE :	62

Chapitre III : Résultats expérimentaux et interprétations

III-1-INTRODUCTION:	66
III-2- RUGOSITE:	66
III-2-1/Influence des paramètres de coupe sur la rugosité pour le carbure revêtu.....	67
III-2-2/Influence des paramètres de coupe sur la rugosité pour le cermet:	70
III-2-3/ Influence du matériau de coupe sur la rugosité :	73
III-2-4/ Influence du mode d'usinage sur la rugosité :	75
III-2-5/ Influence de l'arrosage sur la rugosité :	79
III-3- EFFORT DE COUPE :	82
III-3-1/ Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe pour le carbure revêtu :	83
III-3-2/ Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe pour le cermet:.....	86
III-3-3/ Influence du mode d'usinage :	88
III-4- EVOLUTION DE L'USURE DES MATERIAUX ETUDIES :	92
III-4-1/ Introduction :	92
III-4-2/ Mécanisme de maintien de plaquette de coupe :	92
III-4-3/ Essais d'usure :	93
III-4-5/ Conclusion partielle :	105

Chapitre IV : Traitement et analyse des résultats

IV-1- INTRODUCRION :	107
IV-2- MODELES DE LA RUGOSITE EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE:	107
IV-2-1/ Résultats expérimentaux :	107
IV-2-2/ Méthode appliquée :	108
IV-2-3/ Analyse de la variance :	108
IV-3- MODELES DES EFFORTS DE COUPE EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE:	120
IV-3-1/ Résultats expérimentaux :	120
IV-3-2/ Méthode appliquée :	121
IV-3-3/ Analyse de la variance :	121

IV-4- MODELES DE LA TENUE DES PLAQUETTES DE COUPE EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE:.....	134
IV-4-1/ Résultats expérimentaux :.....	134
IV-4-2/ Méthode appliquée :.....	134
IV-4-3/ Analyse de la variance :.....	134
IV-5- Conclusion :.....	136
CONCLUSION GENERALE :.....	137
PERSPECTIVES :.....	138
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:.....	139

Nomenclature

a_p	Profondeur de passe [mm]
f_z	Avance par dent [mm/dent]
F_a	Effort axial [N]
F_r	Effort radial [N]
F_v	Effort tangentiel [N]
HB	Dureté Brinel
K_c	Effort spécifique de coupe [N/mm ²]
KT	Usure en cratère [mm]
L_c	Longueur de coupe [mm]
n	Fréquence de rotation [tr/min]
P_c	Puissance de coupe [W]
R^2	Coefficient de détermination
R_a	Rugosité arithmétique moyenne [μm]
R_t	Rugosité totale [μm]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
r_ϵ	Rayon du bec [mm]
S	Section du copeau [mm ²]
VB	Usure en dépouille [mm]
VC	Usure au bec de l'outil [mm]
V_c	Vitesse de coupe [m/min]
V_f	Vitesse d'avance [mm/min]
Z	Nombre de dent de la fraise
α	Angle de dépouille principale [degré]
χ_r	Angle de direction principale [degré]
γ	Angle d'attaque [degré]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [degré]

Introduction Générale

L'obtention des formes requises d'une pièce par enlèvement de matière, est encore à ce jour le procédé de fabrication le plus répandu. Malgré les progrès réalisés par les procédés de mise en forme des matériaux (formage, moulage,...), l'usinage reste le plus souvent nécessaire à l'obtention des produits finaux, surtout si les tolérances exigées sur le produit final sont faibles. Les performances dans le domaine de l'automatisation des machines-outils, le développement rapide des techniques de commande numérique, des outils de coupe et des logiciels de FAO ont aidé à maintenir la compétitivité du procédé d'usinage. Particulièrement si ces performances s'accompagnent de gains non négligeables en productivité et en qualité.

Afin d'améliorer encore plus cette compétitivité, les données sur l'usinabilité doivent être plus précises, et cela nécessite une stabilité plus élevée sur les paramètres de coupe. Malgré le nombre important d'études portées par les chercheurs, ce domaine a encore besoin d'être exploré. De notre part, nous avons décidé de contribuer à cette amélioration avec notre travail dans ce mémoire, par une étude intitulée : « *étude de l'usinabilité des alliages ferreux en fraisage* ». Elle consiste à étudier l'usinabilité de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 en fraisage en utilisant deux nuances de matériaux de coupe, le carbure revêtu et le cermet. Depuis si longtemps le procédé d'usinage qui a prit la part du lion parmi tous les procédés de fabrication par enlèvement de matière est le tournage. Ceci est l'une des causes qui nous a poussé à nous engager dans cette étude en utilisant le fraisage comme processus de coupe.

Les principaux types d'opérations de fraisage, si l'on considère l'effet sur la pièce ou la trajectoire d'outil sont les suivants:

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1- surfacage | 8- tronçonnage |
| 2- surfacage- dressage | 9- fraisage sous haute avance |
| 3- fraisage de profil | 10- tréflage |
| 4- fraisage de cavités | 11- fraisage en pente |
| 5- fraisage de rainures | 12- interpolation hélicoïdale |
| 6- tournage- fraisage | 13- interpolation circulaire |
| 7- fraisage de filets | 14- fraisage trochoïdal. |

En utilisant comme opération de fraisage le surfacage, La structure de notre mémoire est comme suit:

Nous avons présenté dans le premier chapitre l'étude bibliographique. Dans cette étude nous avons défini l'usinabilité et ces différents critères, le fraisage et différents paramètres qui

lui sont liés, l'acier inoxydable et son domaine d'utilisation. Nous avons évoqué les caractéristiques des matériaux de coupe qui peuvent être utilisés en usinage de l'acier inoxydable en fraisage. Nous avons présenté quelques travaux de recherche sur l'usinage des aciers et en particulier les aciers inoxydables et quelques notions sur les paramètres technologiques.

Dans le second chapitre, on a présenté les moyens et les instruments nécessaires à la réalisation des essais et la planification des expériences.

Dans le troisième chapitre, on a présenté les résultats expérimentaux concernant les paramètres technologiques étudiés; à savoir rugosité des surfaces usinées, efforts de coupe et usure et leur évolution en fonction des éléments du régime de coupe (avance par dent, profondeur de passe, vitesse de coupe et longueur de coupe).

Le quatrième chapitre a été consacré à l'exploitation des différents résultats obtenus dans le chapitre précédent qui mène à la détermination des différents modèles mathématiques de la coupe (modèle de la rugosité, des efforts de coupe et de l'usure) en fonction des différents paramètres de coupe.

Finalement, notre travail a été clôturé par une conclusion générale et des recommandations, ainsi qu'une liste de références bibliographiques.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA COUPE DES METAUX

I-1-INTRODUCTION:

Le principal but pour toutes les entreprises de fabrication mécanique, est d'arriver à réaliser le maximum de gain possible. Ce dernier ne peut être obtenu qu'en améliorant et maximisant la production. L'augmentation de la production à son tour ne peut avoir lieu qu'avec un développement technologique sans cesse d'une part des machines-outils, d'autre part des matériaux de coupe ayant des caractéristiques élevées en termes de : dureté, résistance mécanique, résistance à l'usure, conductivité thermique, géométrie appropriée de la partie active de l'outil de coupe. Ce but peut être réalisé en poussant plus les études sur les matériaux usinés vis-à-vis des moyens utilisés. Pour stabiliser au mieux les différents paramètres de coupe.

I-2/ DEFINITION DE L'USINABILITE:

L'usinabilité ou capacité d'un matériau d'être travaillé par outil de coupe est une propriété mécanique très complexe. Cette complexité vient du fait que, l'usinabilité est une propriété qui est sensible à de nombreux facteurs. Ces derniers forment dans la figure I-1 le schéma structural du processus de coupe [01, 02 et 03]. De ce fait, elle a été définie par plusieurs chercheurs de différentes manières, citons quelques définitions :

- ◆ D'après WEILL [04], l'usinabilité est l'aptitude d'un métal à être usiné. Elle peut être caractérisé par:

- L'énergie dépensée pour usiner un métal (Effort de coupe),
- La vitesse d'usure des outils d'usinage,
- L'état de surface du produit usiné,
- La morphologie du copeau.

◆ Selon BERARD GRUBER [05], l'usinabilité est l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et des formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Elle n'est pas une propriété simple de la matière car elle n'est pas directement mesurable. C'est une propriété mécanique complexe désignant la facilité plus ou moins grande d'un matériau à être amené par enlèvement de matière à une forme et à des côtes fixes.

◆ L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques 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 [06].

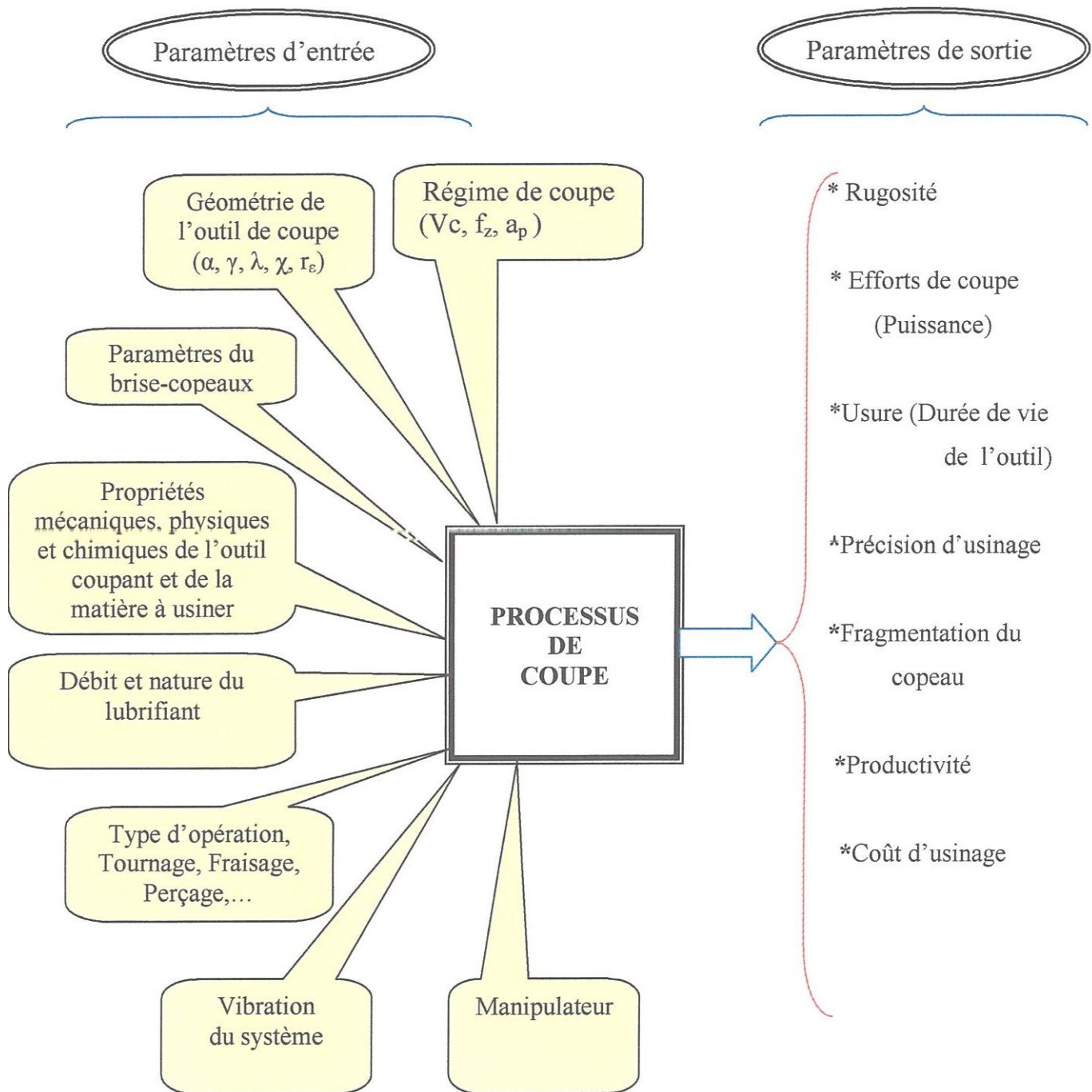


Fig. I-1 : Schéma structural de l'usinabilité.

I-3- CRITERES D'EVALUATION DE L'USINABILITE:

Suite à la différence dans les définitions de l'usinabilité, les critères de son évaluation diffèrent à leur tour d'un chercheur à un autre, mais la majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères dans l'ordre qui suit:

- La tenue de l'outil, un critère dépendant de (VB, KT, V₆₀).
- Les efforts de coupe.
- La qualité de la surface usinée.

L'absence de la température prouve qu'il s'agit d'un effet perturbateur lié fortement à l'usure et aux efforts de coupe.

D'après ces critères d'évaluation de l'usinabilité, on aperçoit finalement qu'il ne s'agit que des paramètres de sortie du schéma structural du processus de coupe figure. I-1. D'une autre part, ce schéma comprend des paramètres d'entrée à savoir, paramètres du régime de coupe, type d'opération, etc. En ce qui suit, on va évoquer en premier lieu quelques paramètres d'entrée et en deuxième lieu, quelques paramètres de sortie.

I-4- DEFINITION DU FRAISAGE :

Le fraisage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de matière faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance). [07]

I-4-1/Paramètres de coupe:

Les principaux paramètres du régime de coupe sont: [07] [08]

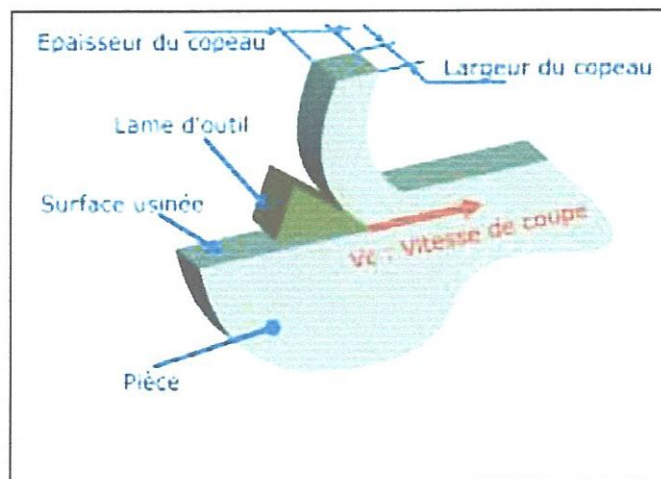


Fig. I-2: Paramètres de coupe.

La vitesse de coupe (V_c) en [m/ min] indique la vitesse de surface à laquelle l'arête de coupe usine la pièce. Il s'agit d'un paramètre d'outil faisant partie des conditions de coupe, qui garantit que l'opération est réalisée de manière efficace et dans le champ d'application recommandé du matériau de coupe.

$$V_c = (\pi.D.n / 1000) \quad (I-1)$$

Où, **D** : Le diamètre de la fraise, **n** : Fréquence de rotation.

La vitesse de rotation (n) en [tr/min] est le nombre de rotations par minute effectuées par la fraise sur la broche. Il s'agit d'un paramètre machine calculé à partir de la valeur recommandée de la vitesse de coupe pour une opération donnée.

$$n = (V_c \cdot 1000) / \pi \cdot D \quad (\text{I-2})$$

La vitesse d'avance également appelée avance de table, avance machine ou l'avance par minute (**V_f**) en [mm/min] est l'avance de l'outil par rapport à la pièce en distance par unité de temps, liée à l'avance par dent et au nombre de dents de la fraise.

$$V_f = Z \cdot f_z \cdot n \quad (\text{I-3})$$

L'avance par dent (f_z) en [mm/dent] est en fraisage, une valeur qui sert à calculer l'avance de table. Etant donné que la fraise est un outil à plusieurs dents, il est nécessaire d'avoir un paramètre qui garantit que chaque dent usine sous des conditions satisfaisantes. L'avance par dent correspond à la distance linéaire parcourue par l'outil lorsqu'une dent donnée est en prise. La valeur de l'avance par dent est calculée à partir de la valeur de l'épaisseur de copeau maximale recommandée.

L'épaisseur de copeaux maximale (h_{ex}) en [mm] est le facteur limitant le plus important d'un outil pour une opération. L'arête de coupe d'une fraise est conçue et testée, ainsi que des valeurs minimales et maximales.

Le nombre de dents total de l'outil (z), qui varie considérablement, est utilisé pour déterminer l'avance de table, tandis que le nombre effectif de dents (**z_c**) est le nombre de dents en prise. Un certain nombre de facteurs influencent le nombre de dents qui convient le mieux : la stabilité, la puissance de la machine et l'état de surface.

L'avance par tour (f) en [mm/ tr] est une valeur utilisée en particulier dans les calculs d'avance, souvent pour déterminer la capacité de finition d'une fraise. C'est un paramètre secondaire indiquant la distance parcourue par la fraise en un tour.

La profondeur de coupe axiale (a_p) en [mm] correspond à la quantité de métal que l'outil enlève sur la face de la pièce. Elle correspond à la distance à laquelle l'outil est réglé en dessous de la surface non usinée.

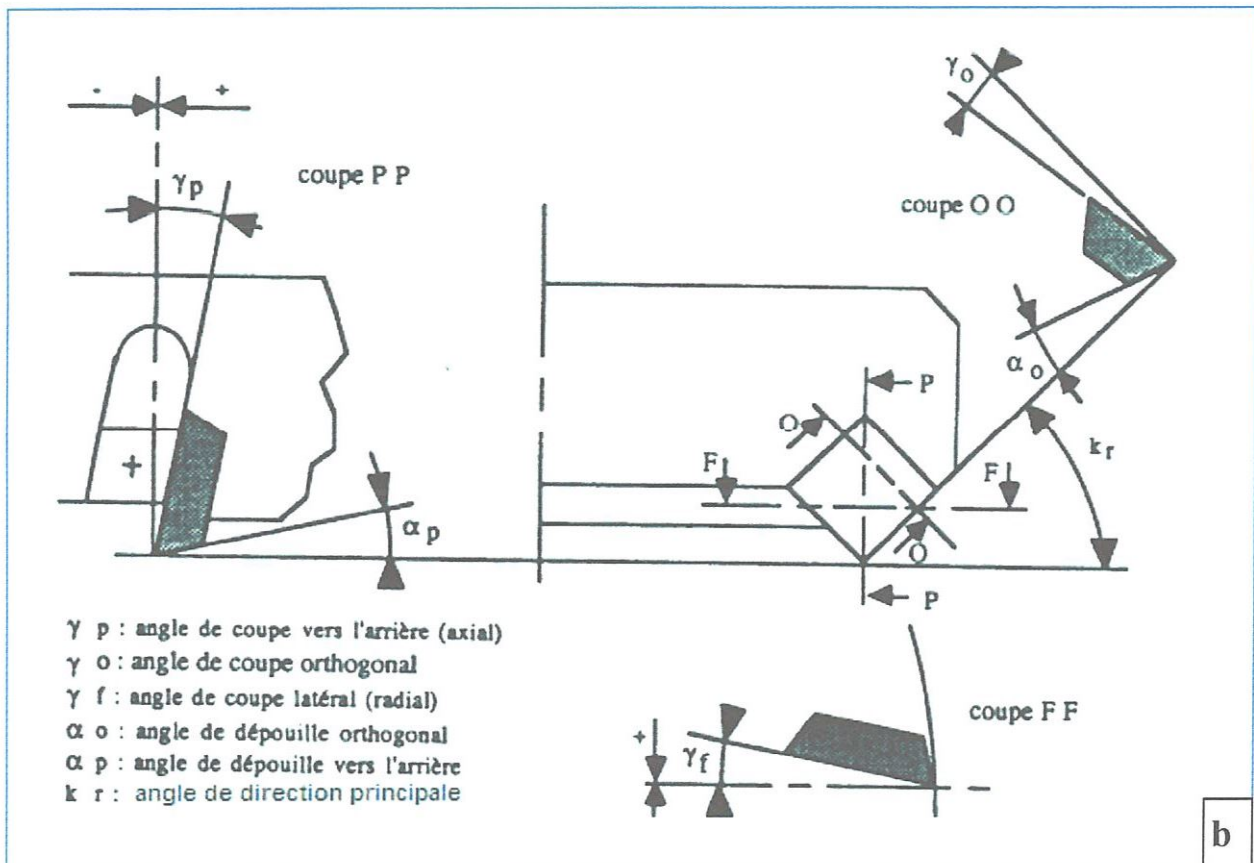
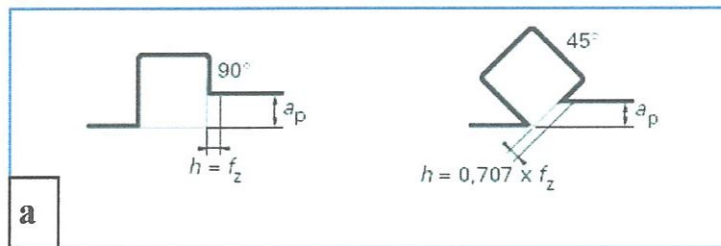
La largeur de coupe radiale (a_e) en [mm] est la largeur sur laquelle le diamètre de la fraise est engagé en coupe. Il s'agit de la largeur de la surface usinée ou, si le diamètre d'outil est plus petit que la largeur couverte par l'outil.

L'épaisseur moyenne de copeau (h_m) [mm] est utile pour déterminer les forces de coupe spécifiques et effectuer des calculs de puissance. Elle est calculée par rapport au type d'engagement de la fraise.

Le débit copeaux (Q) en [mm³/min] est le volume de métal par unité de temps et peut être déterminé à l'aide de la profondeur de coupe, de la largeur de coupe et de l'avance.

$$Q = a_e \times a_p \times V_f \quad (I-4)$$

I-4-2- Géométrie de l'outil de coupe:



a- Angle de direction principale, b- angles de l'outil,

Fig. I-3 : Géométrie de l'outil de coupe.

a- Angle de dépouille :

L'angle de dépouille (α) est l'angle de la face en contact avec la surface usinée, d'où il est toujours positif (fig.I-3).

b- Angle de direction principale :

L'angle de direction principale (χ_r) est lié au type d'opération à exécuter d'une part, d'autre part, selon cet angle sera l'effort imposé à chaque dent. Cela signifie que la charge par dent est égale à l'avance multipliée par le sinus de l'angle de direction principale concernée (fig. I-3). En surfacage général, l'angle de direction doit être de 75 à 90°. Ces deux angles permettent un bon rendement de la puissance machine tout en convenant à la fois pour l'ébauche et la finition, tandis que l'alternative 60° augmente l'efficacité de l'arête dans les condition d'usinage difficiles. Les fraises à surfacer avec de plus petits angles, 60 ou 45° par exemple donnent une coupe plus équilibrée et plus fluide. Et elles sont appropriées soit pour les fraises de faible diamètre sur des petites machines peu puissantes, soit pour les applications difficiles ou les matières à copeaux courts [7]

c- Angle d'attaque et brise copeaux :

La combinaison de l'arête de coupe concave et le brise-copeaux incorporé, concourt à diriger les copeaux à l'opposé de la fraise. Un angle de coupe accentué est également le résultat de cette géométrie (fig.I-3). Le contact entre la plaquette et le copeau est limité, ce qui réduit la génération de chaleur et permet une meilleure utilisation de la puissance machine disponible.

d- Rayon du bec :

Le rayon du bec de (r_e) l'outil est l'un des facteurs qui conditionnent la rugosité de la surface usinée d'une part, et détermine la résistance du bec de l'outil d'une autre part. D'où l'importance de son choix.

I-5- MATERIAU USINE:

Aujourd'hui l'environnement exerce d'immenses pressions sur les matériaux et cela, dans tous les secteurs industriels. Les matériaux doivent de plus en plus résister à une diversification des conditions atmosphériques, de pollutions, de procédés industriels, de solutions et d'agents nettoyants de plus en plus agressifs.

Dans de telles conditions, les aciers inoxydables ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. De ce fait ces aciers trouvent leur place parmi les autres matériaux et occupent une assez bonne position dans le marché mondial.

I-5 -1- Définition:

Les aciers inoxydables sont des aciers alliés spéciaux dont l'élément d'alliage de base est le chrome à des teneurs ($\text{Cr} \geq 10,5\%$) et des teneurs en carbone ($\text{C} \leq 1,20\%$), ainsi que d'autres éléments d'alliages qui agissent sur l'état structural et sur la résistance à la corrosion (nickel, molybdène, cuivre, titane, niobium,...).

I-5 -2- Famille des aciers inoxydables:

Les fortes additions d'éléments d'alliages alphagènes (Cr, Mo,...) ou gammagènes (Ni, Mn) modifient profondément l'état structural d'emploi de ces aciers, et alors on distingue cinq catégories [09]:

a- Aciers inoxydables martensitiques:

Les aciers inoxydables qui contiennent de 12 à 18% de chrome et des teneurs en carbone variable de 0,1 à 1% environ. Ils sont utilisés après trempe martensitique et revenu et sont susceptibles, de ce fait, d'acquies des performances mécaniques élevées mais du fait de leur composition et leur état structural, ils ne résistent pas à l'agression de tous les milieux. Les principales nuances de cet acier sont dérivées de la nuance X2Cr13/ 1.4006 (410) et on a aussi X20Cr13/ 1.4021.

b- Aciers inoxydables ferritiques:

Cet acier existe en trois groupes. La teneur en chrome du premier est de l'ordre de 11 à 12 %, avec une basse teneur en carbone (inférieur à 0,03% et typiquement de l'ordre de 0,015%). Les plus importantes nuances sont: X2CrTi12 / 1.4512 (409) et X2CrNi12 / 1.4003 ($\approx$ 410S). Le deuxième groupe, sa nuance de référence est : X6Cr17 / 1.4016 (430). Le troisième groupe reconnu sous le nom de superferritiques. La nuance caractéristique de ce groupe est : X2CrMoTi29-4 / 1.4592. D'une façon générale, il a la teneur de (12 à 20% de chrome) et l'acier inoxydable superferritiques (son pourcentage en chrome est > 20). Il ne comporte pas d'addition de carbone et les résidus qu'il existe ($< 0,08\%$) sont généralement fixés par du titane ou du niobium. Leur composition leur permet de rester ferritiques à toutes températures et de présenter des caractéristiques mécaniques intéressantes.

c- Aciers inoxydables austénitiques:

Les teneurs en chrome sont supérieures ou égales à 17% et des proportions en nickel (et

de manganèse) suffisantes (en général au moins 8% de nickel) pour assurer la stabilité de l'état austénitique à toutes températures. Ces aciers contiennent le plus souvent des éléments d'addition améliorant leurs tenues aux corrosions tels que le molybdène (solutions chlorurées), cuivre, titane, niobium (fixation des résidus de carbone). Les aciers austénitiques de base affichent relativement de faibles caractéristiques mécaniques de résistance qui peuvent être très sensiblement améliorées:

- Par écrouissage,
- Surtout par addition d'azote,
- Par précipitation, au cours d'un revenu, de composés intermétalliques à base de titane et d'aluminium ou de composés phosphorés.

Les nuances les plus courantes sont : X2CrNiMo17-13-3 / 1.4429, X2CrNiMoN18-12-4 / 1.4434.

d- Aciers inoxydables austéno-férritiques (duplex):

La composition de cet acier (en chrome, nickel, molybdène et silicium) notamment Equilibrée, pour conserver à l'état d'emploi une structure mixte constituée d'austénite (30 à 50%) et de ferrite (70 à 50%). Cet état confère à ces aciers des performances mécaniques élevées et une résistance particulière à certains types de corrosions (inter granulaires et sous contraintes). L'alliage le plus représentatif est le X2CrNiMoN22-5-3 / 1.4462.

e- Aciers inoxydables à durcissement par précipitation:

Il s'agit d'une famille d'acier inoxydable dont les caractéristiques sont obtenues à partir d'un traitement de durcissement secondaire suivant un traitement thermique de trempe ou d'hypertrempe. Il existe trois groupes d'aciers inoxydables à durcissement par précipitation:

- Aciers martensitiques à transformation directe, désigné par X5CrNiCuNb16-4/1.4542,
- Aciers semi-austénitiques ou à transformation martensitique indirecte, désigné par X8CrNiMoAl 15-7-2 / 1.4532,
- Aciers austénitiques à durcissement par durcissement secondaire, désigné par X6NiCrTiMoVB25-2 (A-286).

Remarque:

Les aciers inoxydables peuvent aussi être classer d'après leur structure cristalline qu'ils prennent après un traitement bien déterminé. De ce fait, il existe trois familles d'aciers inoxydables:

- Les aciers ferritiques (structure cubique centrée).

- Les aciers martensitiques (structure quadratique).
- Les aciers austénitiques (structure cubique à face centrée).

Dans cette étude le matériau choisi est l'acier inoxydable austénitique du type Fe-Cr-Ni. Cet acier représente 80% du marché mondial avec les aciers inoxydables ferritiques. Ceci est dû à leurs structures, qui leur confèrent une ductilité et une ténacité exceptionnelle depuis des températures cryogéniques jusqu'à des centaines de degrés Celsius. La nuance de base est X5CrNi18-10 / 1.4301 (304). La figure.I-4 présente les principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (molybdène) dérivés de la nuance de base.

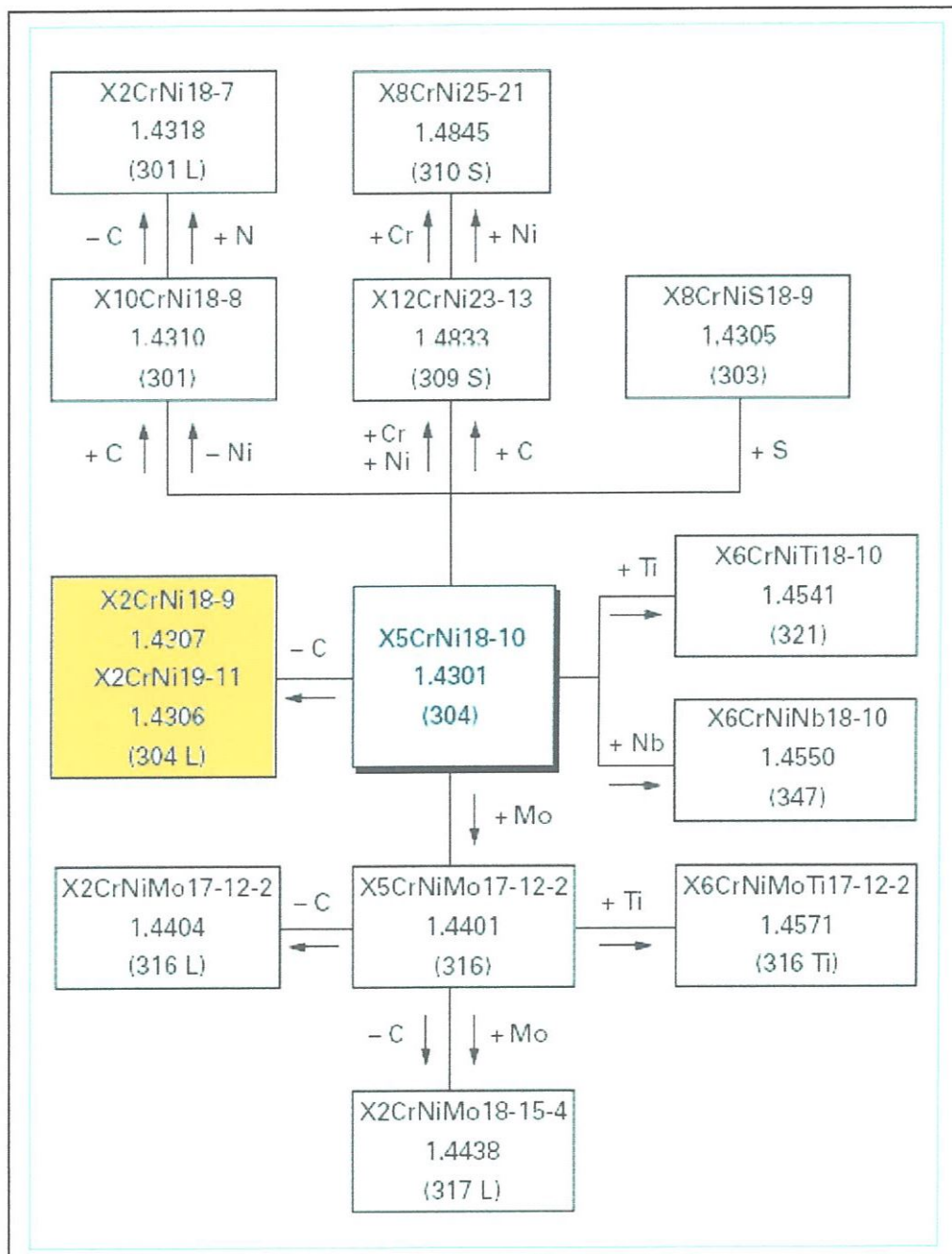


Fig. I-4: principaux aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (molybdène) dérivés de la nuance de base X5 Cr Ni 18-10/ 1.4301 (304) [09].

I-5-3- Domaine d'utilisation:

L'acier inoxydable est utilisé ces dernières années dans un large domaine. Il est utilisé dans les équipements pour les industries chimiques/pétrochimiques, agroalimentaires et pharmaceutiques. Utilisé dans les appareils électroménagers, ustensiles ménager, platerie, couverts et dans la coutellerie. Employé dans l'industrie automobile à savoir, le système d'échappement, la décoration, les organes de sécurité et certains éléments de structures. On le trouve aussi dans l'industrie des transports terrestres et maritimes, comme pour les wagons, les conteneurs citernes, les citernes routières et les conteneurs frigorifiques. Il est aussi employé dans les tubes destinés aux transports de fluides, destinés à la décoration, tubes pour applications structurales et les tubes destinés à équiper des échangeurs de chaleur [9].

De même il est utilisé dans les travaux de bâtiments à l'extérieur (comme couverture, murs rideaux, entrées d'immeubles et mobilier urbain) et à l'intérieur (comme décoration, escaliers mécaniques, cage ascenseurs et escaliers).

I-6- MATERIAUX DE COUPE :

Les principaux matériaux de coupe utilisés dans l'usinage des aciers inoxydables sont : Les aciers rapide (HSS), les carbure brasé, les carbure revêtu ou non revêtu, les cermets et les céramiques [9].

I-6-1- Les aciers rapide :

Les outils en acier rapide ne sont pratiquement plus utilisés pour l'usinage des aciers inoxydables.

I-6-2- Les carbures :

Les outils en carbures sont constitués à l'origine par des nuances binaires [carbure de tungstène cobalt (W-Co)] ont évolué où on a introduit du carbure de titane (TiC) ou du carbure mixte de niobium et de tantale [(Nb,Ta) C] pour améliorer la tenue à chaud. Ces outils contiennent entre (70 et 90)% de substances dures, (10 à 30)% de substances liantes. Les substances dures qui représentent la phase γ sont constituées de cobalt. La norme ISO 513[10], donne trois nuances de carbures obtenues selon les pourcentages et les contenus de la phase γ et la phase β . Ces trois nuances sont désignées par : P, M, K. La nuance P, destinée à l'usinage des aciers coulés et des fontes malléables à copeaux long. La nuance M, pour l'usinage des aciers au manganèse, les aciers austénitiques, les aciers de décolletage de même les fontes alliées et malléables à copeaux courts. La nuance K, Pour les aciers trempés, les métaux non

ferreux, les matières plastiques, le bois et les matériaux composites. L'outil d'ébauche doit avoir une ténacité importante pour pouvoir résister aux chocs, tandis que l'opération de finition nécessite un outil d'une résistance à l'usure élevée pour la qualité de l'état de surface et la précision d'usinage. L'usinage des aciers inoxydables nécessite la nuance M.

Actuellement, des carbures « micro gains » plus performants que les carbures classiques sont disponibles. Ces carbures « micro grains » sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène (0,2 à 1 μ m), liée à du cobalt (8 à 20%). Ils ont une ténacité plus élevée pour une dureté constante. Leur granulométrie procure un rayon d'acuité très petit ainsi que des angles de coupe très positifs. De plus le coût des plaquettes en carbure de tungstène « micro grain » est comparable à celui des plaquettes en carbure « classique ».

IL existe également des carbures revêtus (fig.I-5). Dont le but de ce revêtement est d'assurer une très forte résistance à la cratérisation ce qui améliore l'usure par diffusion. Réduit la friction au contact outil copeau, ce qui diminue les efforts de coupe [11].

On trouve différents types de revêtements : monocouche (TiN), multicouches (TiCN, TiN+TiC+TiN, TiC+Al₂O₃) [10]. Pour les aciers inoxydables la dernière couche est de préférence du nitrure de titane TiN.

Les principaux procédés de revêtement utilisés sont :

PVD : Dépôt Physique en phase Vapeur (Physical Vapor Deposition). On vaporise, sous vide le matériau de revêtement entre 150 et 500°C en utilisant un courant à haute tension. La vapeur produite se condense en un film de 2 à 5 μ m sur les surfaces à revêtir (substrat).

CVD : Dépôt Chimique en phase Vapeur (Chemical Vapor Deposition). C'est un procédé de revêtement par réaction chimique à température élevée de 900 à 1100°C sous une atmosphère inerte, réductrice ou recarburante. Un gaz transporteur amène une vapeur réactive appropriée dans un réacteur où se trouvent les pièces. L'épaisseur de 2 à 12 μ m dépend du matériau de revêtement, de la pression, du temps et de la température.

I-6-3- Les cermets :

Les cermets (céramique métal), sont constitués principalement de TiC ou de TiC/N, possèdent par rapport aux métaux durs conventionnels une densité beaucoup plus faible mais une dureté et une résistance à l'usure plus élevée. Les forts coefficients de dilatation thermique des cermets (7 à 9x10⁻⁶/°K) dus au TiC et TiN par rapport aux outils carbures (WC) sont co-

responsables de la faible résistance des cermets aux chocs thermiques. C'est également ce qui explique leurs faiblesses lors de l'usinage en coupe interrompue. Le remplacement du TiC par le TiN qui possède la plus grande conductivité thermique, a permis d'améliorer la résistance des cermets aux chocs thermiques. Les cermets sont utilisés pour la finition et l'usinage de précision demandant de grandes vitesses de coupe et des avances faibles. Ils se rapprochent ainsi du domaine d'utilisation des céramiques qui sont toutefois résistants. Leurs emplois diminuent ou suppriment le collage des copeaux, évitant ainsi les arrachements sur les matériaux malléables (inox, acier doux) et conduisant à une durée de vie accrue. Les cermets (fig.I-5) permettent d'atteindre des vitesses de coupe de 100 à 700m/min, avec des avances par dent pouvant atteindre 0,25mm sous un angle d'attaque de 45°. Ils permettent de choisir des profondeurs de passe en toute sécurité assez importantes ainsi que de travailler en coupe intermittente. Les cermets sont souvent une formule très avantageuse en fraisage, où ils permettent d'obtenir des finis « miroir » et peuvent remplacer une rectification [12].

En conclusion, les avantages d'utilisation des cermets sont récapitulés comme suit :

- Leurs résistances à la cratérisation et à la formation de l'arête rapportée dépassent celles des carbures de tungstène et des céramiques,
- Leurs résistances à l'usure sont trois à quatre fois plus grandes que celles des carbures non revêtus,
- Ils permettent des faibles à des moyennes avances,
- Leurs vitesses de coupe sont proches de celles des céramiques,
- Ils couvrent la plage des carbures revêtus.

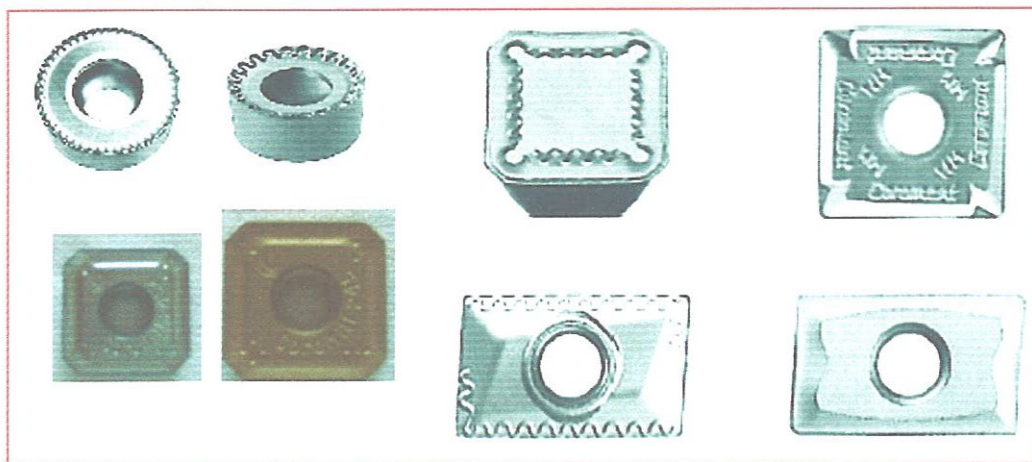


Fig. I- 5 : Plaquettes de coupe.

I-6-4- Les céramiques : Sont très peu utilisés pour l'usinage des aciers inoxydables et en particulier pour la coupe discontinue en raison de performances insuffisantes.

I-6-5- Conditions de coupe pour le fraisage:

Contenu des efforts de coupe généralement élevés, les machines utilisées doivent être puissantes. Il est recommandé d'utiliser des outils ou plaquettes en carbure revêtu ou non avec des fraises monobloc ou à plaquettes rapportées. Les régimes conseillés sont mentionnés dans le tableau (Tab. I-1).

	Vitesses de coupe (m/min)		Avances (mm/ (dent)
	Usinabilité améliorée	Nuance normale	
Fraise monobloc	90 - 200	50 - 150	0,012 – 0,125
Fraise à plaquettes rapportées	80 - 400	50 - 300	0,05 – 0,2

Tab. I-1: Régime de coupe pour le fraisage des aciers inoxydables avec des outils en carbure [9].

I-7- ETAT DE SURFACE:

I-7-1- Introduction :

L'état de surface joue un rôle déterminant sur la résistance à la fatigue d'une pièce mécanique. Généralement, l'évaluation de l'intégrité d'une surface obtenue par fraisage est basée sur quatre aspects principaux : brûlures de surface, dommages micro structurels, tensions résiduelles et rugosité de la surface. Moins de chaleurs accumulées dans la zone de coupe, moins il y a de risque de brûlures sur la pièce. Les tensions résiduelles en surface pénalisent la durée de fonctionnement de la pièce. L'expérience montre que les dommages micro structurels provoquent des tensions résiduelles fortes près des surfaces [13].

I-7-2-Rugosité:

a- principaux défauts de la rugosité:

L'aptitude d'une surface à une fonction donnée, dépend d'un ensemble de conditions, notamment des caractéristiques de ces états de surface. Les défauts de surface jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico- chimique. Dans notre cas, on ne s'intéresse qu'aux

défauts géométriques. Ces derniers sont conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure. I-6).

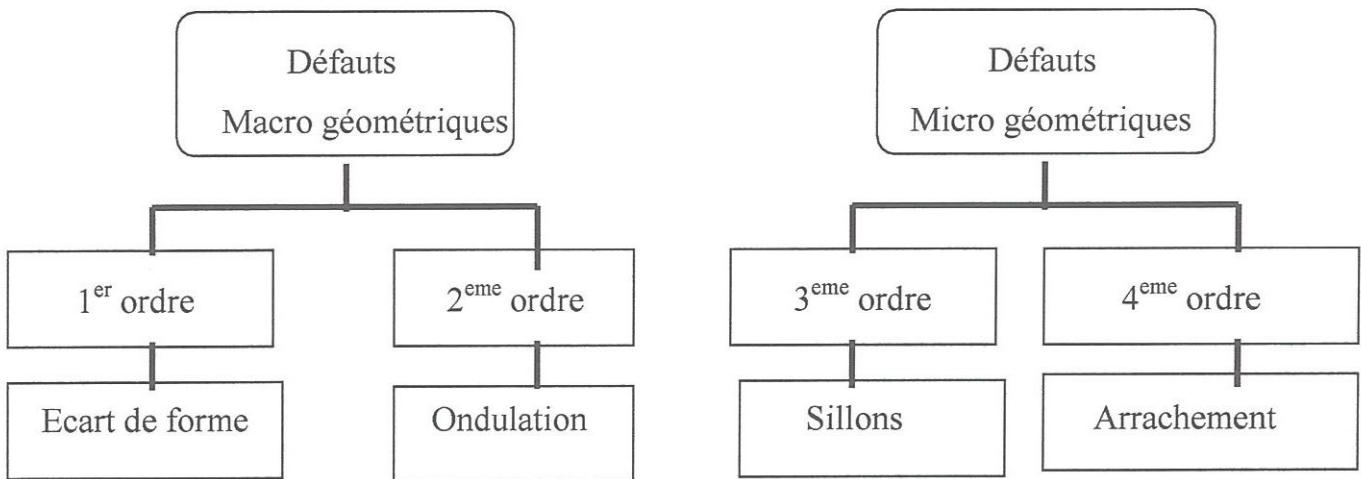


Fig. I-6 : Défauts macro géométriques et micro géométriques. [14]

Les défauts micro géométriques (3^{eme} et 4^{eme} ordre) caractérisent la rugosité de la surface. Celle-ci se définit à partir de l'état d'une portion d'une surface très limitée, donc indépendamment de la qualité macro géométrique globale de la surface. Les défauts du troisième ordre sont des défauts du déplacement de l'outil (stries ou sillons circulaire dans le surfacage). Les défauts du 4^{eme} ordre sont des défauts apériodiques constitués par des arrachements, fentes, etc.. Ces défauts découlent des imperfections associées à l'action de l'outil (présence du copeau adhérent) (Figure. I-7).

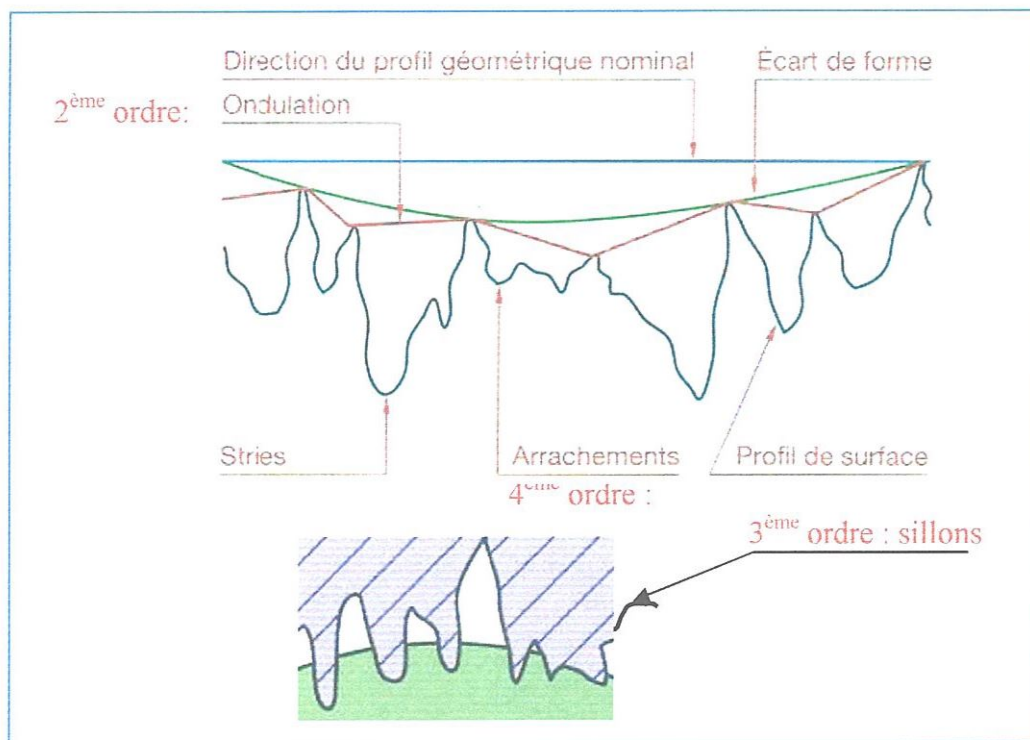


Fig. I-7: principaux défauts de surface. [14]

b- Principaux critères d'états de surface:

Considérons une coupe locale de surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage. Soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^L y dx = 0 \quad (I.5)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [15].

• Rugosité moyenne arithmétique Ra:

Ra représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.

Ra: est calculée sur une longueur d'évaluation (fig.I-8).

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx \quad (I.6)$$

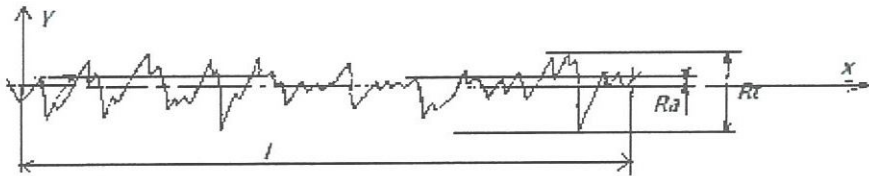


Fig. I-8- : Critères de rugosité Ra et Rt.

• Rugosité Rz :

Rz représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas (fig. I-9).

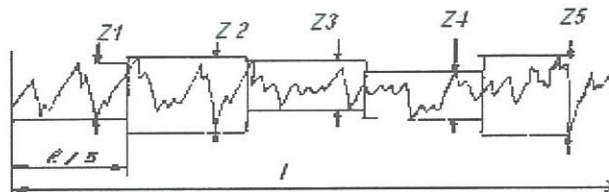


Fig. I-9 : Critères de rugosité Rz.

• Rugosité total Rt :

Rt représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil (Fig. I-8).

• Rugosité maximum Rmax :

Rmax est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité Rmax étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

• **Rugosité R_p :**

R_p est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur L .

I-8- EFFORT DE COUPE :

I-8-1- Définition et intérêt de leur mesure:

Le fraisage donne naissance à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées (figure. I-10) peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage.

F_v (ou F_y): composante dans le sens de rotation de la fraise appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.

F_a (ou F_x): composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance, ou effort axial.

F_r (ou F_z): composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres (suivant l'axe de la Fraise), appelée effort de refoulement ou effort radial.

F : La résultante de coupe - peu utilisée en pratique - représente la diagonale d'un parallélépipède. Elle est égale à la somme vectorielle des trois composantes ou à :

$$F = \sqrt{F_v^2 + F_a^2 + F_r^2} \quad (I.7)$$

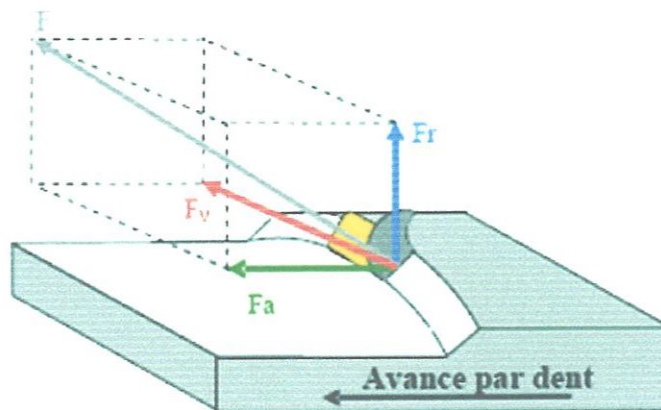


Fig. I-10: Composantes de l'effort de coupe [08].

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 les renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage

dans les conditions de l'apparitions des vibrations auto excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur le matériau coupé [04].

I-8-2-Génération des efforts de coupe:

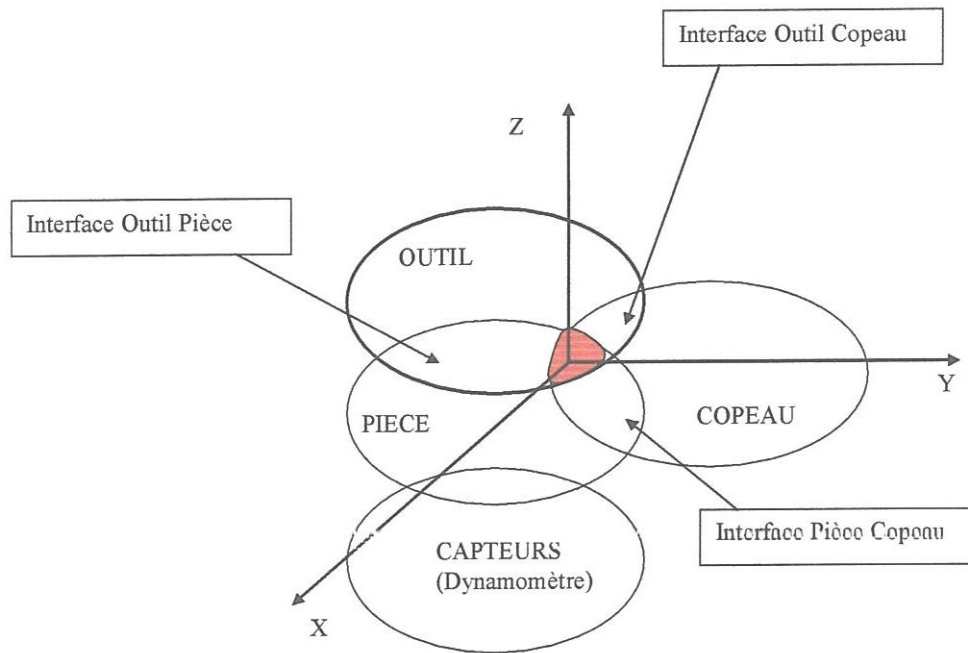


Fig. I-11 : Structure des efforts de coupe.

La génération des efforts à lieu pendant l'opération d'usinage. Les efforts produits par la coupe sont le résultat de forces de cisaillement et de frottement exercées par l'outil sur la pièce. On peut différencier trois zones (figure. I-11).

- **Zone 1:** est associée aux forces produites par l'interaction entre l'outil et le copeau.
- **Zone 2:** est associée aux forces exercées entre l'outil et la pièce usinée.
- **Zone 3:** est associée aux forces exercées entre le copeau et la pièce.

I-8-3- Effort de coupe spécifique :

L'effort de coupe spécifique (pression de coupe) est la force de coupe par unité de surface de coupe (fig. I-12). Ce coefficient varie en fonction de [16]:

- Matériau usiné;
- L'épaisseur de coupe;
- L'angle de coupe (diminution d'environ 1,5% pour une augmentation de 1°);
- L'usure de l'outil (30à 50% outil frottement usé);

$$F_v = K_c \cdot S \quad (I.8)$$

F_v : Effort tangentiel de coupe en Newton (N)

K_c : Effort spécifique de coupe en (N/mm²)

S : Section de copeau en (mm²)

$$S = a_p \cdot f \quad (I.9)$$

$$F_v = K_c \cdot a_p \cdot f_z \cdot Z \quad (I.10)$$

Z : Nombre de dent de la fraise

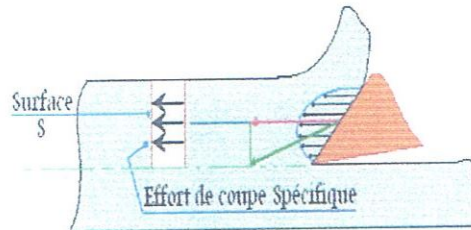


Fig. I-12: Effort de coupe spécifique.

L'effort de coupe spécifique est l'un des facteurs important qui caractérise l'usinabilité du matériau usiné. La connaissance de celui-ci permet d'évaluer la valeur de la force de coupe nécessaire en fonction de la section du copeau choisi.

I-8-4- La puissance de coupe (P_c) [W] : est un paramètre machine. La puissance nette peut être calculée pour s'assurer que la machine en question est adaptée à la fraise et à l'opération envisagée. Cette puissance est donnée par la relation :

$$P_c = F_v \cdot V_c \quad (I.11)$$

Et alors :

$$P_b = P_c / \eta \quad (I.12)$$

P_b : Puissance absorbée : Paramètre machine (W).

η : Rendement : paramètre machine.

I-8-5- Mesure des efforts de coupe:

La mesure des efforts de coupe est basée sur diverses méthodes exploitant des dynamomètres. Pour la plus part de ces dispositifs, la déformation élastique d'un élément de rigidité contrôlée du système dynamométrique est mesuré. Actuellement les dynamomètres piézoélectriques sont des outils indispensables dans la recherche expérimentale d'usinage. Ils sont également utilisés comme appareils de surveillance des outils de coupes lors de l'usinage industriel. La plus part des systèmes ont été réalisés pour la mesure simultanée de plusieurs composantes [16].

Pour terminer avec ce point concernant les efforts de coupe, on peut dire d'une façon générale, que la tendance est de minimiser les efforts de coupe lors de l'usinage des pièces. Ceci conduit à:

- Une consommation moindre de la puissance développée par la machine outil.
- Des faibles déformations statiques et dynamiques du système usinant MODOP.
- Améliorer l'état des surfaces des pièces usinées.

I-9-USURE DES OUTILS DE COUPE :

I-9-1- Définition:

L'usure d'outil est un processus de destruction des couches superficielles qui conduisent à la modification progressive de la forme de l'état de surface. Elle affecte également la géométrie de l'outil, la température, l'effort de coupe, la précision et la rugosité de la surface usinée.

I-9-2- Phénomènes provoquant l'usure:

D'après GELIN et VINCENT [17], d'une façon générale, l'usure de deux matériaux en contact est due à des phénomènes d'ordre mécanique et physico- chimique. Ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe et Selon Köning (professeur à l'université technique d'Aix- La – Chapelle), l'usure se divise comme cela se présente sur la figure (Fig. I-13).

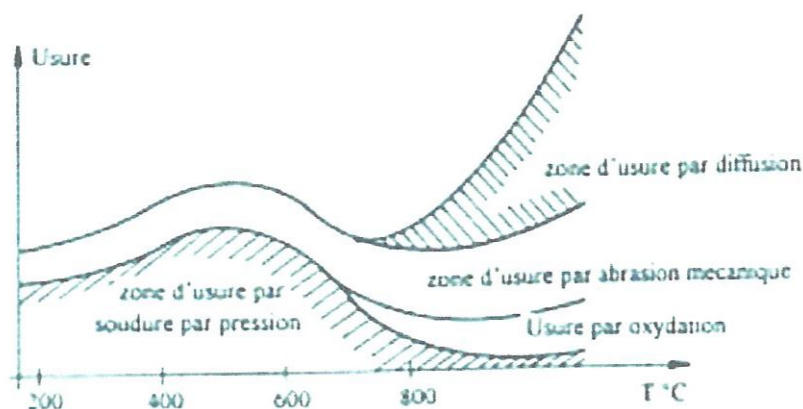


Fig. I-13: Causes d'usure et leur zone.

a- Phénomènes mécaniques :**• Usure par abrasion mécanique:**

L'usure par abrasion est essentiellement due aux frottements outil/pièce et copeau/outil. L'usure abrasive des outils résulte d'arrachement en surface de l'outil causé par des particules souvent anguleuses et de grande dureté contenues dans le matériau usiné (précipités en inclusions). Ces particules sont toujours renouvelées au cours de l'usinage [18].

• Usure par déformation plastique

L'usure par déformation plastique est due en fait à l'affaissement de l'arête de coupe sous l'action des efforts de coupe. Ceci est d'autant plus marqué lorsque la température à proximité du bec de l'outil augmente [17].

b- Phénomènes physico-chimiques :**• Usure par diffusion**

Ce type d'usure est essentiellement dû à la température. Il apparaît lors de l'usinage avec des vitesses de coupe trop élevée. Des éléments de l'outil sont transférés vers le copeau et la pièce et vis versa. Cette usure dépend de la solubilité du matériau de l'outil dans le métal usiné et de la température d'interface atteinte au cours d'usinage. L'usure par diffusion croît avec la vitesse de coupe [19].

Usure par corrosion:

Ce type d'usure est dû à la corrosion provoquée par le contact des deux matériaux constituant la pièce et l'outil et particulièrement sous l'effet des lubrifiants. C'est un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant. Cette réaction est créée par le frottement et mène à la formation d'une couche superficielle qui protège contre l'usure adhésive.

I-9-3- Différentes formes d'usure des outils:

Les formes d'usure d'une manière générale des outils de coupe (figure I-14) dépendent des paramètres essentiels déjà évoqués (couple outil matière, condition d'usinage). On répertorie également quatre zones principales d'usure et d'une façon plus claire l'outil est soumis aux 6 modes d'usures définis ci-après [20].

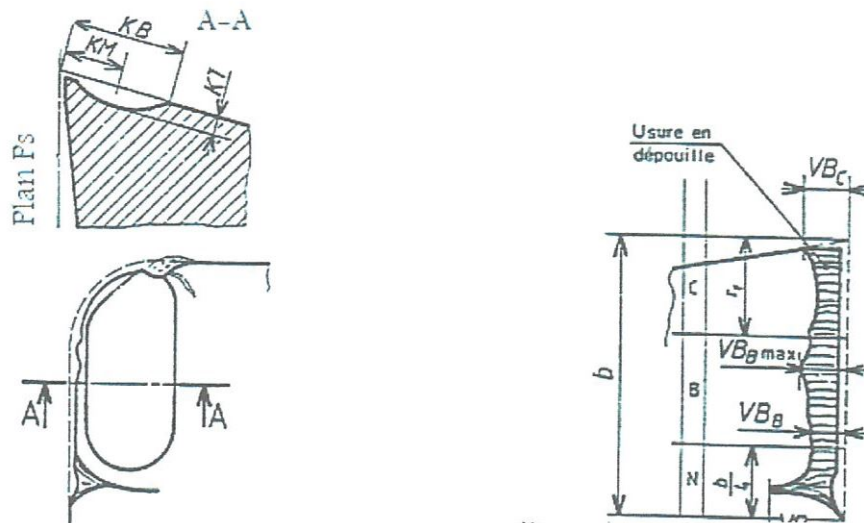


Fig. I-14: Schéma général des différentes formes d'usure.

• **Usure en dépouille:**

Elle résulte du frottement de la pièce contre la face en dépouille de l'outil et se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle représentant la dernière surface de l'outil en contact avec la surface usinée, l'usure en dépouille VB détermine l'état de surface de la pièce usinée et sa précision dimensionnelle (fig. I-15).

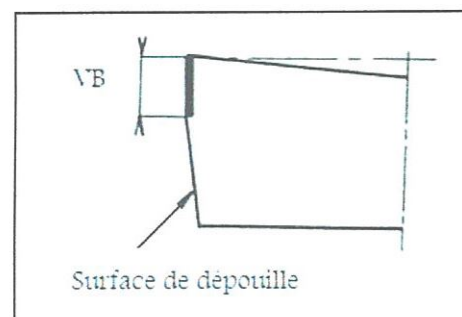
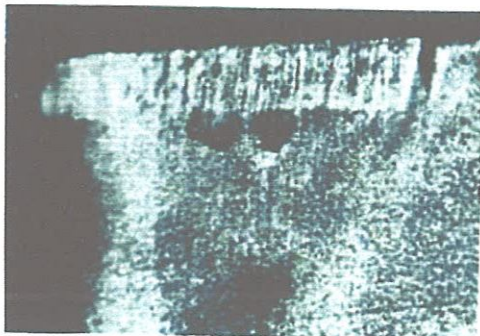


Fig. I-15: Usure en dépouille [04].

• **Usure en cratère :**

Elle se caractérise par la formation d'une cuvette sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau (fig. I-16). Les dimensions, la profondeur KT et la position d'un cratère évoluent, et influent en particulier sur le rayon d'enroulement du copeau ; le flan arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'un brise copeau naturel.

Cette forme d'usure est due aux températures élevées au niveau du contact outil copeau provoquant une réaction chimique ou une diffusion importante. Elle représente également une

caractéristique essentielle des outils carbure et aciers rapides, la forme du cratère est définie par sa profondeur maximale K_t , le rapport de cratérisation: $Y = K_t / K_m$.

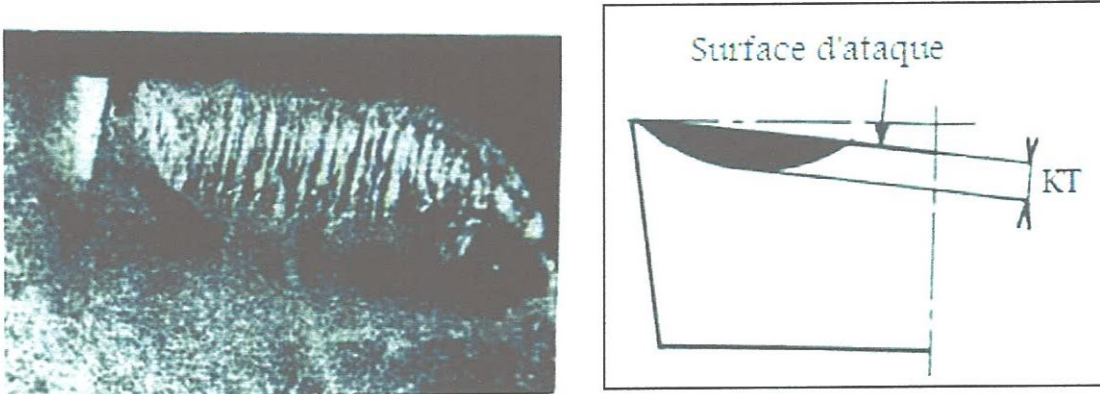


Fig. I-16: Usure en cratère [04].

- **Usure par déformation plastique:**

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des autres pressions régnant dans la zone de coupe. Cette déformation se traduit par un affaiblissement plastique de la pointe de l'outil, une déformation permanente et un refoulement sur les faces de dépouille.

- **Usure en entaille:**

C'est une forme d'usure de la face en dépouille qui se présente sous forme d'un sillon et se produit sur l'arête tranchante à la limite de la largeur de coupe. Elle résulte de l'absence de l'arête rapporté en ce point et à l'écrouissage de la pièce dans cette zone (fig. I-17).

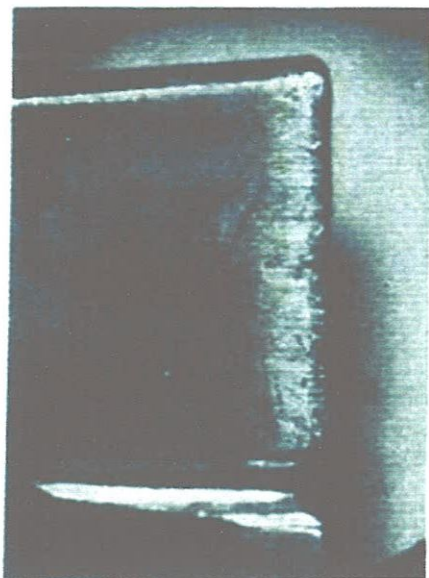


Fig. I-17: Usure en entaille [04].

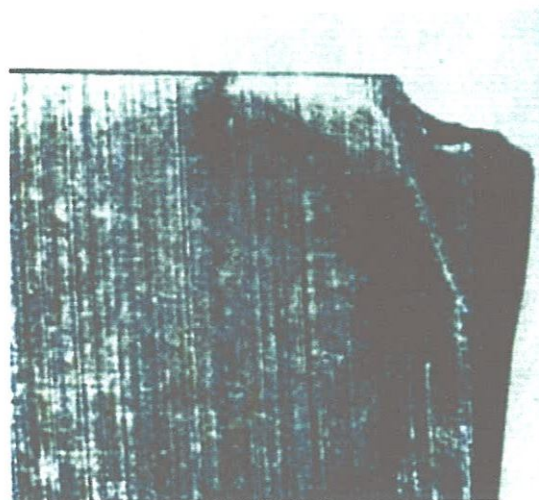


Fig. I-18: Usure par ébréchure [04].

- **Usure par écaillage ou par ébréchures:**

Dans le cas d'usinage avec des efforts cycliques ou des chocs thermiques provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchures sur l'arête ou sur la face de coupe suite à l'enlèvement de matière qui se fait par fragmentation aléatoire (fig. I-18).

- **Usure par rupture de la pointe de l'outil:**

Ce type de défaillance d'outil est rencontré dans le cas d'usinage des matériaux très durs et hétérogènes avec un outil en matériau fragile ; les outils en céramiques y sont très sensibles quand les conditions de coupe sont mal définies lors de l'usinage des matériaux comportant des inclusions.

I-9-4- Relation entre l'usure et le temps:

La durée de vie de l'outil de coupe est liée directement à l'usure, ou à sa détérioration pour un temps de coupe donnée. L'allure tracée sur la figure I-19, se divise en trois zones I, II, III. Elle représente la relation entre l'usure et le temps de coupe.

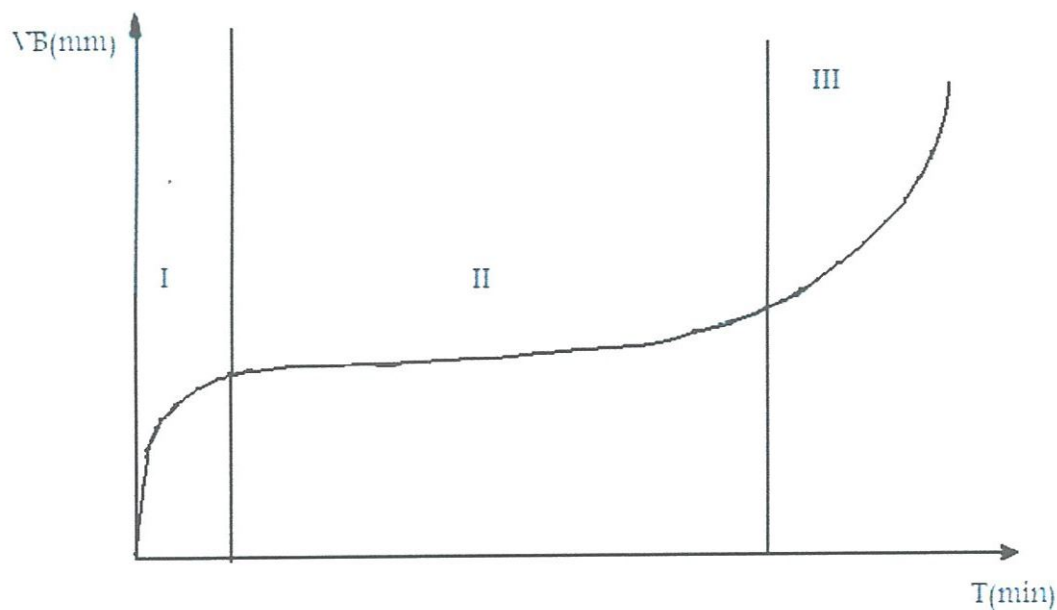


Fig. I-19: Evolution de l'usure en fonction du temps de coupe.

Zone I : est celle de rodage ou usure initiale, elle donne lieu à une usure intense qui se caractérise par l'arrachement de petite particules de la surface la plus en saillie.

Zone II : correspond à l'usure normale elle est plus stable, elle a une évolution presque linéaire.

Zone III: est la zone d'usure accélérée (catastrophique), elle exige le changement de la plaquette.

I-9-5- Critères d'usure:

Les différents critères actuellement utilisés pour les outils en carbure, et notamment ceux recommandés par les projets de la norme ISO sont basé sur l'évolution de l'usure frontale ou de la cratérisation. Ces critères sont pour toutes conditions de coupe, en usinage d'acier ou fonte.

- **Critère de l'usure frontale :** caractérisés par une largeur limite VB de la bande d'usure sur la face en dépouille de l'outil.

VB= 0,3 mm (ISO 8688) si elle est uniforme, si non la largeur maximale de cette bande sera : **VB=0,5 mm.**

- **Critères de cratérisation :** Défini par la valeur limite de la profondeur du cratère KT, ou par la valeur limite du rapport de cratérisation KT/KM, ou par une valeur limite de l'angle de cratérisation γ_c .

- **Critère de « mort outil » :** Utilisé principalement pour les outils en acier rapide.

- **Critères complémentaires:**

Si on désire dans certains cas avoir recours à des critères complémentaires, il est recommandé d'employer les critères suivants :

- **VB = 0,3 mm** ou **VB_{max} = 0,5 mm** ;
- La profondeur du cratère KT ; calculée par la formule :

$$KT = (0,1 + 0,3f) \text{ mm} ;$$

(f: avance mm/min).

I-9-6- Lois d'usure des outils de coupe:

a- Généralités:

Les conditions de coupe ont une influence non négligeable sur les coûts de fabrication. Par conséquent il est nécessaire de connaître les lois régissant le processus de coupe. En effet, connaissant les lois d'usure il est possible de déterminer les conditions de coupe économique, donc d'agir directement sur les coûts de fabrications inhérent à la coupe [16].

La loi d'usure d'un outil de coupe représente la variation du temps effectif de coupe (t) en fonction des conditions géométriques (pour le copeau et l'outil) et cinématique de l'usinage. La dureté effective de vie T est définie comme étant le temps d'usinage qui conduit à l'usure limite définie par les critères précédents [16]. La figure. I-20 indique l'allure de la variation de la tenue en fonction de la vitesse de coupe.

-Partie AB: Correspond à une usure par abrasion ou par adhésion.

-Partie BC: L'abrasion et l'adhésion diminuent et on assiste à une amélioration de la résistance à l'usure cela est dû à la présence de l'arête rapportée.

-A partir du point C: La dégradation continue jusqu'à la limite admissible de l'usure ou la destruction de l'outil. Cette zone peut être représentée en coordonnées bi logarithmiques reconnue sous le modèle de Taylor (fg. I-21).

Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour représenter la loi d'usure des outils de coupe, [16], parmi lesquels on cite:

a- Modèle de TAYLOR en (1906 -1907):

A partir de 1905 l'américain Taylor développe les travaux de recherche sur la relation entre les vitesses de coupe et la durée de vie des outils. Les résultats des travaux sont encore à l'heure actuelle d'ailleurs approfondis et améliorés. Taylor a proposé le modèle suivant :

$$T = C_v \cdot V^n \quad \text{ou} \quad VT^{1/n} = C_T \quad (\text{I.13})$$

Où V_c : Vitesse dépend des conditions de coupe.

T : Durée de vie en minutes

C_v, C_t : Constantes dépendantes des conditions de coupe.

n : Exposant de Taylor prenant pour valeur ;

0,12 à 0,18 pour les outils en acier rapide

0,2 à 0,3 pour les outils en carbure

> 0,45 pour les outils céramiques.

Sur un diagramme à échelle logarithmique et dans la gamme des vitesses usuelles, la courbe représentative peut être assimilée à une droite comme sous l'appellation droite de Taylor.

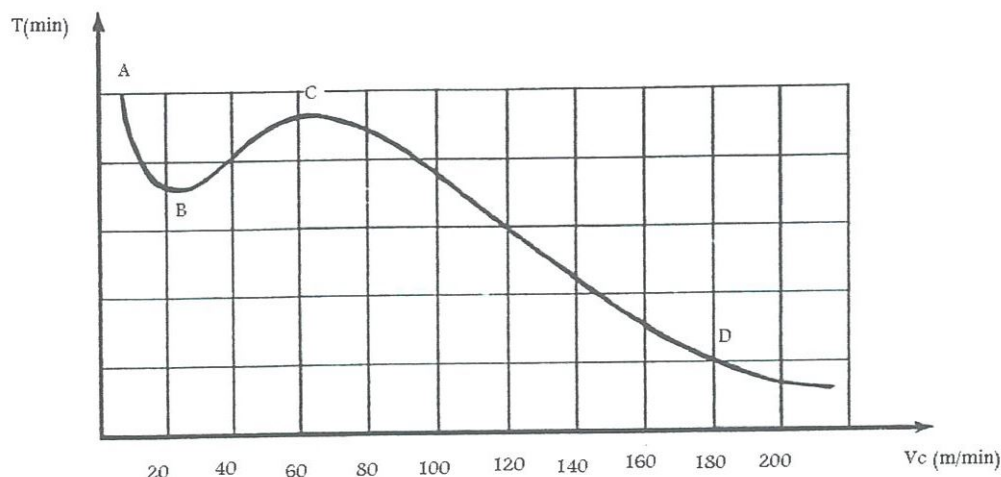


Fig. I-20: Influence de la vitesse de coupe V_c sur la tenue T . [03]

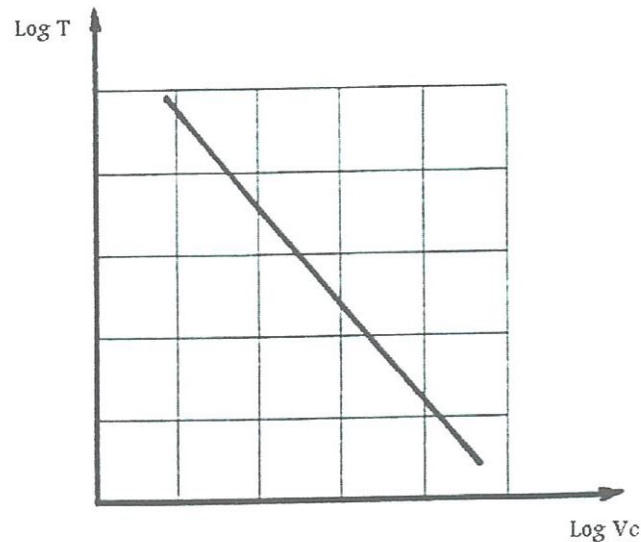


Fig. I-21 : La tenue en fonction de la vitesse de coupe en coordonnées bi logarithmiques. [03]

b- Modèle de Gilbert en 1950:

Ce modèle est la généralisation du modèle de Taylor, dans lequel la constante C_v est remplacée par une expression qui tient compte de la géométrie de copeau telle que :

$$C_v = C f^x a_p^y \quad (\text{I-14})$$

$$\text{Alors: } T = C f^x a_p^y V^n \quad (\text{I-15})$$

En prenant le logarithme des deux parties du modèle, (I.11) s'écrit :

$$\text{Log } T = \text{log } C + x \cdot \text{log } f + y \cdot \text{log } a_p + n \text{log } V \quad (\text{I-16})$$

En faisant le changement de variable le modèle () prend la forme :

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 \quad (\text{I-17})$$

La résolution du modèle ()t la suivante :

$$Y = b_1 X_1 + b_0 \quad \text{si } V \text{ et } a_p \text{ sont constantes}$$

$$Y = b_2 X_2 + b_0 \quad \text{si } V \text{ et } f \text{ sont constantes}$$

$$Y = b_3 X_3 + b_0 \quad \text{si } f \text{ et } a_p \text{ sont constantes}$$

c- Modèle de Kronenberg : en 1968:

$$T = C(v+K)^m \quad \text{ou encore} \quad T+K = CV^n \quad (\text{I-18})$$

En prenant le logarithme des deux parties de (I.14) , on aura:

$$\text{Log}(T+K) = n \text{log}(V) + \text{log}(C)$$

Posons: $x = \text{log}(V)$; $y = \text{log}(T+K)$ on obtient :

$$Y=nx+\log(C) \quad (I.19)$$

Le calcul de **n** et **C** se fait comme dans le cas du modèle de Taylor.

Remarque:

La loi de Taylor est facile à exploiter, elle s'adapte bien aux conditions de coupe généralement utilisées dans l'industrie. D'autres modèles de lois d'usure existent donnent des résultats un peu plus précis mais ils sont plus délicats à utiliser.

I-10-FORMATION DU COPEAU:

I-10-1/Intérêt de contrôle de la formation de copeau:

Le respect des trois critères : coût qualité et délai, impose l'utilisation des moyens de production plus performants et plus flexibles. La formation du copeau en fraisage est un phénomène micro-géométrique influant sur plusieurs grandeurs macro-géométriques. Sa maîtrise permet de:

- Fiabiliser le processus d'usinage
- Garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (état de surface et précision dimensionnelle);
- Assurer la productivité ;
- Renforcer la sécurité des opérateurs et de cellule d'usinage [21].

I-10-2-Mécanisme de la formation du copeau :

La phénoménologie de la formation du copeau (fig.I-22) fait intervenir un grand nombre de paramètres tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact outil –matière et des différents paramètres d'usinage. La compréhension des divers phénomènes qui entrent en jeu lors d'une opération de coupe nécessite une observation locale très fine.

Des expériences ont permis de mettre en exergue quelques phénomènes. Parmi ces méthodes expérimentales on peut citer :

- La méthode de visualisation et d'investigation métallographique des essais de coupe brusquement interrompue (quick stop)[22].
- Le procédé de microcinématographie [23], qui permet de visualiser la formation du copeau.

Les observations micrographiques mettent généralement en évidence la présence de 5 zones lors de la formations du copeau (fig. I-22) [23, 25].

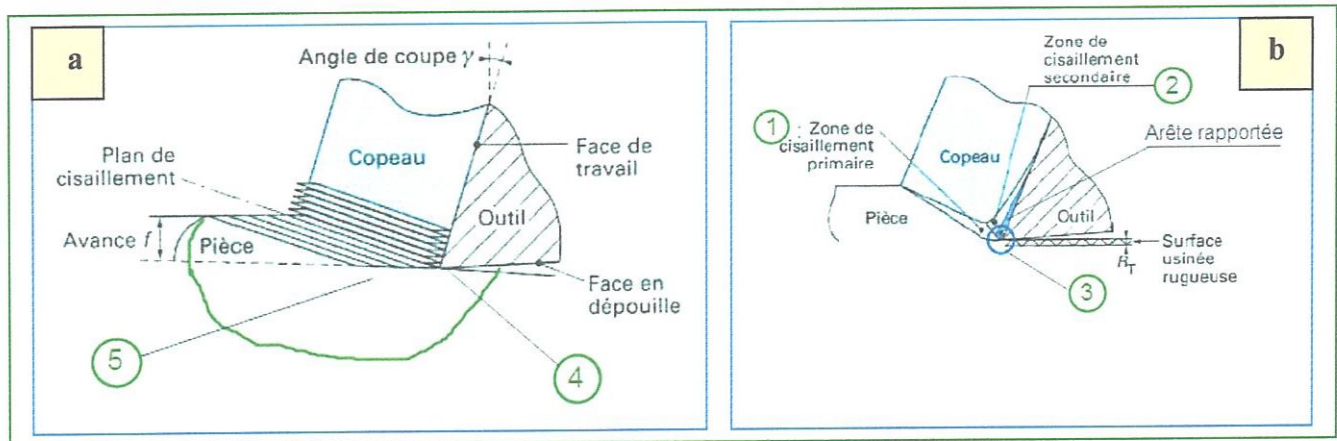


Fig. I-22 : Principales zones de cisaillement du copeau.

Zone 1: zone de cisaillement primaire. Elle résulte du changement de direction d'écoulement de la matière. Cette zone est le siège de cisaillement, ayant un taux de cisaillement intense engendrant une forte élévation de température due aux frottements internes.

Zone 2: zone de cisaillement secondaire induite par le frottement du copeau sur l'outil. Cette zone est la fois soumise à de forts taux de cisaillement et à une forte élévation de température engendrée par le frottement.

Zone 3: zone de séparation du métal en pointe d'outil. Dans cette région l'outil exerce un effort de compression sur le matériau qui est refoulé et se séparent en deux parties; le copeau et la pièce usinée la présence d'un chanfrein entre la face de coupe et la face de dépouille au niveau de cette retenue favorise la création d'arêtes rapportées.

Zone 4: zone de frottement au niveau de la surface de dépouille. Dans cette zone, les interactions avec l'outil sont moins importantes qu'au niveau de la zone de cisaillement secondaire. Dans ce cas c'est la matière constituant la pièce usinée qui est directement sollicitées.

Zone 5: zone d'amorce de déformations la formation du copeau provoque des déformations plastiques et élastiques de la structure du matériau en amont de l'outil conduisent à des contraintes résiduelles en surface des pièces usinée.

Toutes ces zones sont soumises à de grandes déformations, importantes et à des phénomènes de dislocations. Des influences thermiques sont aussi à noter (solllicitations thermomécaniques).

On assiste ainsi à des phénomènes particuliers : adhésion, soudage, diffusion, transformations chimiques, etc, l'interaction de l'ensemble de ces phénomènes conduit à la création d'une multitude de formes de copeaux et de sections [16].

I-10-3- Mécanisme de la formation de l'arête rapportée :

L'arête rapportée est un amas métallique en forme de coin, qui peut se former par couches successives sur l'arête de coupe de l'outil au cours de l'usinage. Le mécanisme de sa formation passe par quatre étapes figure I-23.

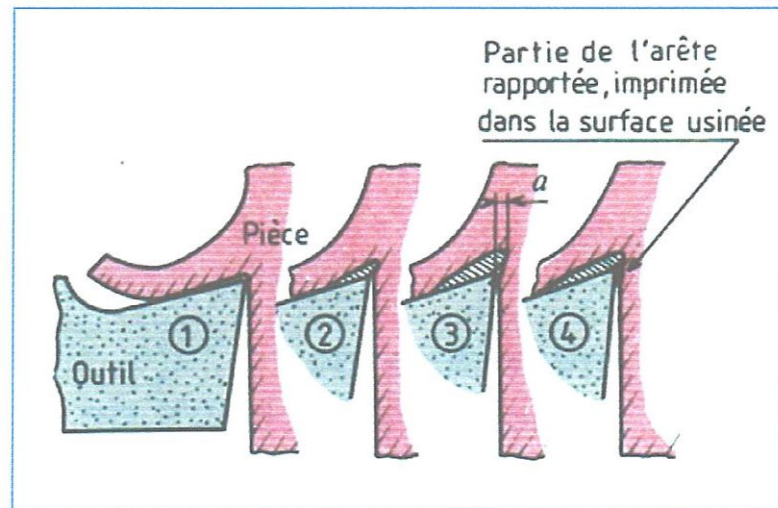


Fig. I-22 : Mécanisme de la formation de l'arête rapportée [25].

1,2 : Premières micro-soudures du métal à usiner dans l'outil, l'augmentation de la rugosité de la face de coupe entraîne une augmentation du frottement outil copeau qui a pour effet d'amplifier le phénomène de micro-soudure.

3 : L'enlèvement du copeau ne se fait plus par l'arête de l'outil mais par l'arête rapportée qui joue, malgré sa stabilité variable avec les conditions de coupe, le rôle d'arête auxiliaire.

4 : Une portion de l'arête rapportée se désagrège quand a devient très élevé, une partie est imprimée dans la surface usinée [25]

I-10-4- Types de copeaux :

Les mécanismes de coupe des aciers « durs » entraînent la formation de copeaux dentelés << dents de scie >> [13]

A partir du mémoire de magister de Bouchlaghem [16], quelques auteurs ont essayé de dresser une liste des différentes formes de copeaux obtenus. Komanduri et Brown ont classifié les formes des copeaux de la façon suivante;

Copeau continu: la continuité du matériau y est préservée et les déformations plastiques dans la zone de cisaillement sont quasi stationnaires.

Copeau segmenté: il est composé d'éléments plus ou moins connectés entre eux résultant de variations périodiques de la couche superficielle, ce qui conduit à des zones alternés de déformation locales très peu cisailées.

Copeau dentelé c'est-à-dire en forme de <<dents de scie>> il est en majorité formé d'éléments séparés due plutôt à une rupture du matériau qu'à un cisaillement de celui-ci. Komanduri et autres selon Bouchlaghem [16], proposent de justifier cette morphologie de copeau par une instabilité qui peut dépendre:

- Des conditions de coupe ($V_c, f, a_p, \dots$);
- Des caractéristiques métallurgiques et thermoplastiques du matériau;
- D'un cisaillement variable dans la zone de cisaillement;
- De conditions de frottement variables sur la face de coupe;
- Des interactions entre la zone primaire et secondaire;
- De la réponse de la machine – outil et des interactions avec le procédé de coupe.

I-11- TRAVAUX DE RECHERCHE SUR L'ACIER INOXYDABLE:

Plusieurs études ont été menées sur les aciers inoxydables à savoir, l'usinabilité, le comportement des différents types de plaquettes de coupes en carbure, l'usure, l'effort de coupe. En ce qui suit quelques travaux de recherches montrant les caractéristiques et les propriétés offertes par ce matériau.

O'Sullivan et Cotterell [26] ont étudié l'usinabilité des aciers inoxydables AISI 303 et l'effet du durcissement pendant l'usinage. Giu et autres [27], ont indiqué que les plaquettes revêtues en TiAlN, ont une grande résistance à l'usure par rapport aux plaquettes revêtues en TiN et ZrN. Novak et autres [28], Les aciers inoxydables austénitiques sont des nuances des aciers au chrome - nickel montrant une résistance à la corrosion très élevée en plus d'excellentes propriétés mécaniques non offertes par n'importe quel autre alliage. La famille des aciers inoxydables austénitiques est non magnétiques et ne peuvent pas être durcis par des procédés de traitement thermique, bien qu'ils puissent être renforcés par déformation à froid. Tetal [29], L'acier inoxydable austénitique AISI 304 est classé dans la famille des matériaux qui sont très difficile à usiner. Les opérations d'usinage des aciers inoxydables austénitiques sont habituellement accompagnées d'un certain nombre de difficultés telles que l'irrégularité de l'usure et la formation de l'arête rapportée respectivement

sur la face de dépouille de l'outil et la face d'attaque. Tetal et Groover [29, 30], La présence de l'arête rapportée est la cause de l'augmentation d'usure de l'outil et la détérioration de l'intégrité de surface de contact. La mauvaise usinabilité de ce matériau est expliquée par la très basse conductivité thermique (50% de celle des aciers au carbone), la ductilité élevée, la résistance à la traction élevée, la haute ténacité à la rupture et le durcissement élevé.

Plusieurs études sur l'usinage des aciers inoxydables austénitiques ont été faites afin d'évaluer la performance de différents matériaux d'outil de coupe lors de l'usinage de différentes nuances des aciers inoxydables. Parro et autres [31], ont étudié les caractéristiques d'usure des plaquettes en carbure revêtu en (TiN et Al_2O_3) en tournage des aciers inoxydables de X5CrMnN18-18. Ces études ont abouties à l'endommagement au bec de l'outil est dû au mécanisme d'usure dominant, qui était dû aux grands efforts de coupe. Agrawal et autres [32], ont étudié la performance des outils en carbure (revêtu et non revêtu) en tournage des aciers inoxydables austénitiques moulé. L'étude a indiqué que la composition des nuances de ces aciers a une influence sur l'usure de l'outil et sur l'adhérence outil-copeau. Nordin et autres [33], ont constaté que le revêtement multicouche TiN/TaN est meilleur que celui simple couche de TiN ou TaN à cause de la faible interaction outil – copeau. Abou-El-Hossein [34], présente dans ce travail une étude expérimentale sur la performance des plaquettes multicouche du carbure (TiN/TiCN/TiN) pour le fraisage de finition des aciers inoxydables AISI 304. L'usure de l'outil l'augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, et diminue avec l'augmentation de l'avance de coupe. L'optimisation des paramètres de coupe pour une opération de fraisage de finition, en employant une fraise en bout de finition à une seule dent, a été établie en termes de maximum de durée de vie de l'outil, maximum de productivité (fig. I-24,25).

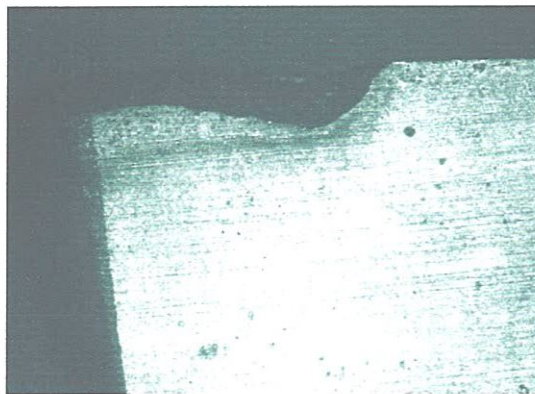


Fig. I-24: Usure en dépouille à $V_c=225\text{m/min}$; $f=0,025\text{mm/tr}$.

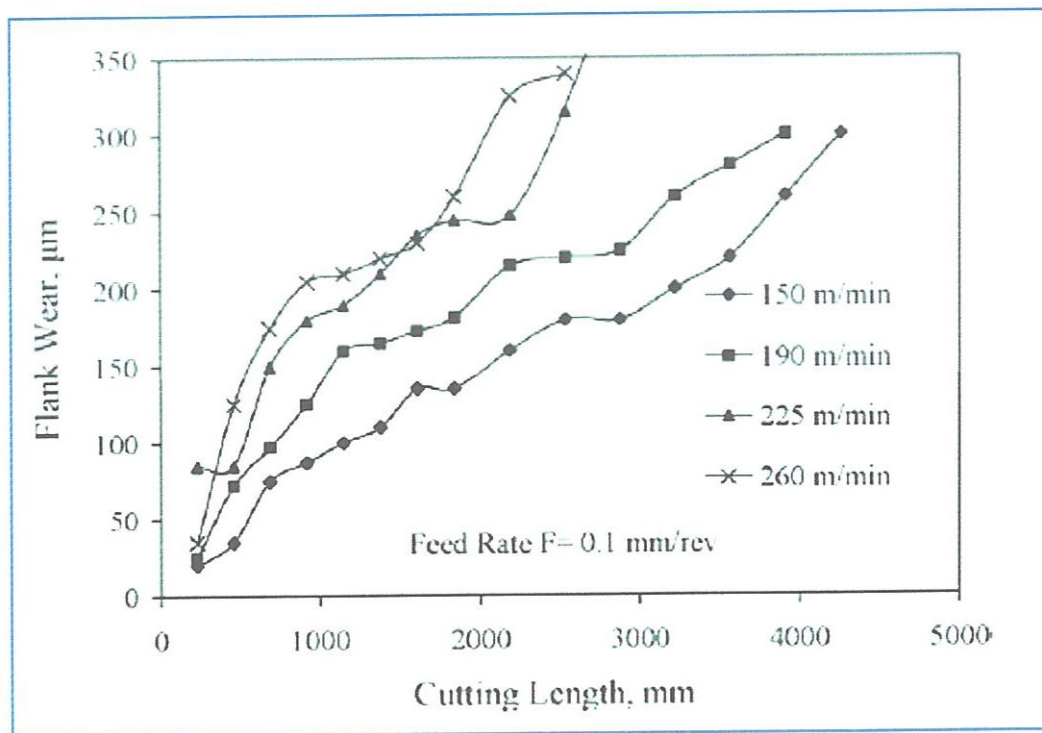


fig. I-25: Usure en dépouille en fonction de la longueur de coupe pour $f=0,1\text{ mm/tr}$.

Yallese [35], Les résultats des efforts de coupe et de la pression spécifique de coupe en fonction des conditions de coupe permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant face à l'acier étudié. La démarche couple outil matière, permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil. Selon Belhadi [36], L'avance possède l'influence la plus importante sur la rugosité. C'est le facteur sur lequel on doit agir, en le diminuant, pour améliorer la qualité de la surface usinée. L'influence de la profondeur de passe sur la rugosité des surfaces usinées est négligeable. E. Aslan [37], décrit une étude expérimentale pour l'optimisation des paramètres de coupe, lors du tournage d'un acier AISI 4140 avec une céramique mixte, en utilisant les techniques de Taguchi. L'effet de combiner trois paramètres de coupe, à savoir vitesse de coupe, avance et profondeur de passe pour exécuter deux mesures, usure en dépouille (VB) et rugosité (Ra), a été étudié en utilisant un choix orthogonal et l'analyse de la variance (ANOVA). Les paramètres optimaux de coupe pour chaque mesure ont été obtenus. Le rapport entre les paramètres et l'exécution des mesures a été déterminé en utilisant la régression linéaire multiple. M.A. Xavier [38], M. Adithan, La connaissance des performances des fluides de coupe dans l'usinage des différents matériaux est d'une importance critique, afin d'améliorer l'efficacité de n'importe quel processus d'usinage. L'efficacité peut être évaluée en se basant sur certains paramètres de processus tels que l'usure en dépouille, la rugosité de la surface usinée, les forces de coupe développées, la température

développée à l'interface de l'outil, etc.... L'objectif de ce travail est de déterminer l'influence des fluides de coupe sur la rugosité d'usure et de surface d'outil pendant l'usinage de l'acier AISI 304 avec l'outil en carbure.

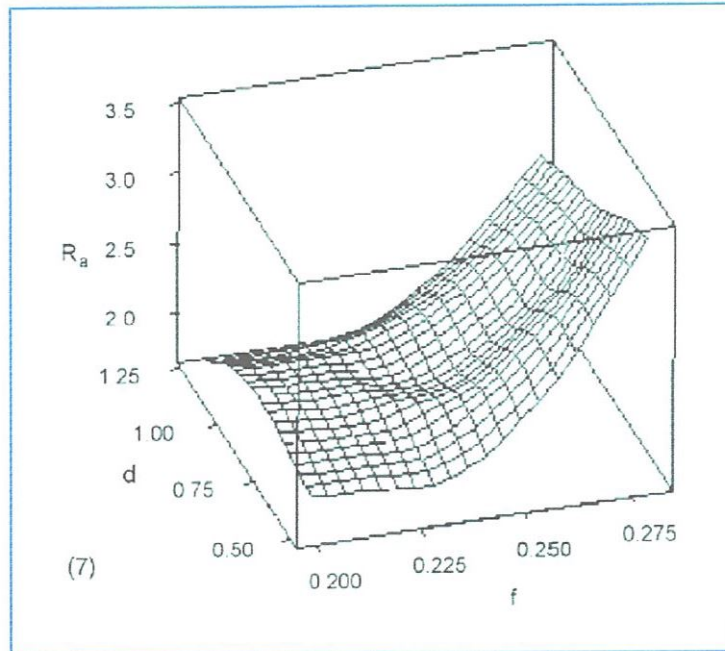


Fig. I-26 : Rugosité R_a en fonction de l'avance (f) et la profondeur de passe (d) [38].

I. Hajjaji [39], L'analyse des résultats expérimentaux de l'usinage de finition de l'acier X155CrMoV12 durcis à 56 HRC avec un outil CBN a montré que la vitesse de coupe et l'avance ont des effets statistiquement significatifs sur la rugosité alors que la profondeur de passe est un facteur qui pourra être négligé. L'application d'une approche statistique (surface des réponses) a permis de modéliser la rugosité arithmétique moyenne R_a en fonction des paramètres de coupe. Li [40], présente une étude expérimentale sur la propagation de l'usure de l'outil et la variation de l'effort de coupe lors du fraisage de finition de l'Inconel 718 avec des plaquettes en carbure revêtu. Les résultats expérimentaux ont montré que l'usure en dépouille est le mode de rupture prédominant qui affecte la durée de vie de l'outil. La propagation de l'usure en dépouille de l'outil dans les opérations de fraisage en opposition est plus rapide que celle dans les opérations de fraisage en avalant. La variation de l'effort de coupe avec la propagation de l'usure de l'outil est également analysée. Tandis que les effets thermiques pourraient être une cause significative de la variation de l'effort maximale lors de l'usinage à faible passe et que la propagation de l'usure de l'outil est responsable de l'augmentation progressive de la moyenne de l'effort

maximale lors d'une succession de passes d'usinage. Vivancos [41], présente une étude de la rugosité de la surface obtenue en fraisage de profil à grande vitesse des aciers dur pour la fabrication des matrices. L'influence de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur axiale et de la profondeur de passe radiale est étudiée en utilisant un plan d'expériences factorielle partielle de 2^{4-1} . Le matériau de la pièce est un acier K340, durci à 61 –62 HRC. Ce matériau peut être considéré comme un produit de remplacement pour les matériaux traditionnels d'acier de matrice. Le carbure revêtu avec (Al, Ti, Si)N a été employé comme outil de coupe en fraisage de finition. Plusieurs variables ont été contrôlées avant et pendant le processus d'usinage afin d'obtenir des expériences fiables. En conclusion, les auteurs de cette étude ont déterminé les facteurs et les interactions qui sont statistiquement significatifs pour modéliser la rugosité de la surface, R_a . W. BOUZID [42], présente une étude qui vise à optimiser les paramètres de coupe permettant de réduire la rugosité des surfaces fraisées. Cette étude a été faite sur deux nuances de matériaux, un acier au carbone et un acier inoxydable austénito-ferritique (duplex). En fraisage en bout, un plan complet d'expérience a permis de déduire, que le travail en avalant donne le meilleur état de surface. Pour ce type de fraisage aussi, un plan fractionnaire utilisant la table de Taguchi L25 (5^3) a été utilisé pour déduire pour chacune des deux nuances, la combinaison de paramètres permettant de minimiser la rugosité R_a et R_t . De même, des modèles empiriques ont été mis en place pour exprimer les paramètres de rugosité en fonction de l'avance, de la profondeur de passe et de la vitesse de coupe. La comparaison des différentes méthodes a montré une bonne cohérence entre les différents résultats.

I-12-CONCLUSION :

L'étude bibliographique sur la coupe des métaux réalisée dans ce chapitre, a permis de définir les aciers inoxydables, leurs familles et certains travaux de recherche réalisés sur l'usinage de ces aciers. De définir aussi les différents matériaux de coupe utilisés dans l'usinage des aciers inoxydables en fraisage, tels que, les carbures et les cermets. Dans ce chapitre on a évoqué aussi l'influence des différents paramètres d'entrée (régimes de coupe, géométrie de la partie active de l'outil et brise copeaux) sur le processus de coupe en général et en particulier sur les différents paramètres de sortie tels que, la rugosité de la surface usinée, efforts de coupe et usure de l'outil de coupe. Cette dernière qui représente l'un des points principaux dans cette étude à cause de son influence directe sur l'état de surface.

Problématique

Les aciers inoxydables sont des superalliages, qui ont une grande résistance à la corrosion, ce qu'ils les classent parmi les matériaux utilisés dans l'électroménager, ménager, coutellerie et instruments médicaux. Ces matériaux sont difficiles à usiner à cause de la présence du Chrome et du Nickel avec un taux élevé, parmi les éléments constitutifs.

Le fraisage à son tour, est un procédé d'usinage où la coupe est discontinue, et ceci pose aussi certains problèmes. Alors les questions qui se posent sont :

- Quelle est l'influence de l'interruption de la coupe sur l'usure?
- Quelle est son influence aussi sur l'état de la surface, et quel est l'ordre de grandeur qu'on peut atteindre ?
- En quoi se présente la difficulté d'usinage de cet acier?
- Comment se comporte le carbure revêtu et le cermet avec cet acier?
- Quels sont les paramètres de coupe qui ont plus d'influence sur :
 - ❖ La qualité de la surface.
 - ❖ Les efforts de coupe.
 - ❖ L'usure des outils.
 - ❖ Combien de temps peuvent tenir ces plaquettes de coupe avec cet acier.
- Quelles sont les conditions optimales pour l'usinage de cet acier.
- Est il possible de proposer des modèles pour la prédiction de l'usure ainsi que la rugosité et les efforts de coupe.

Ce sont les questions auxquelles nous nous sommes attachés à répondre au cours de ce travail.

CHAPITRE II

MOYENS UTILISES

ET

PROGRAMME D'EXPERIENCES

II-1-INTRODUCTION:

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des moyens mis en œuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le but de caractériser le comportement des matériaux de coupe étudiés, vis à vis du matériau à usiner. Cela mènera à la présentation des différents équipements utilisés qui ont servi au suivi de la rugosité des surfaces obtenues lors de l'usinage, de l'évolution de l'usure et des efforts de coupe générés. Nous présentons également les différentes méthodes utilisées pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les expériences nécessaires à notre étude ont été effectuées au Laboratoire pédagogique de Coupe des Métaux du département de Génie Mécanique (Université du 08 Mai 1945 de Guelma).

II-2-MOYENS UTILISEES:

II-2-1/ Machine-outil:

La fraiseuse qui a servie à nos essais est une fraiseuse universelle de la Société Nationale de Production des Machines Outils Industrielles (PMO), modèle **almo** de puissance 5 KW (fig. II-1).



Fig. II-1: Fraiseuse universelle **almo**.

a- Fréquences de rotation:

Les fréquences de rotation disponibles sur la fraiseuse sont présentées sur la figure. II-2.

b- Vitesses d'avances:

Les vitesses d'avances disponibles sur la fraiseuse sont mentionnées sur la figure. II-3.



Fig II-2 : Tableau des fréquences de rotation.

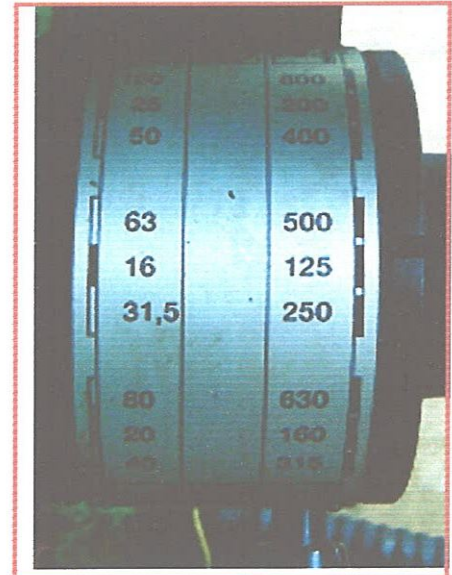


Fig. II-3 : Tableau des vitesses d'avances.

II-2-2- Matériau usiné:

Le matériau que nous avons utilisé dans nos essais pour tester nos plaquettes de coupe, est un acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 (304L), dérivé de la nuance de base X5CrNi18-10 (304). Ces aciers couvrent un large domaine d'utilisation, vu leurs bonnes résistances à la corrosion, notamment les équipements liés à la santé ou qui demandent beaucoup d'hygiène. Parmi leurs milieux d'emploi, le secteur médical tel que les instruments chirurgicaux à savoir : pinces, bistouris, ciseaux, etc..., l'intérieur des conteneurs frigorifiques, tubes de transport de fluide, l'industrie automobile (certains éléments de structures, les organes de sécurité), industries de transports terrestres et maritimes, électroménager, ménager et coutellerie, équipements pour industries, voitures ferroviaires. Etc. [9]. Pour ces essais nous avons utilisé les éprouvettes présentées sur les figures (II-4 ; II-5 ; II-6) :

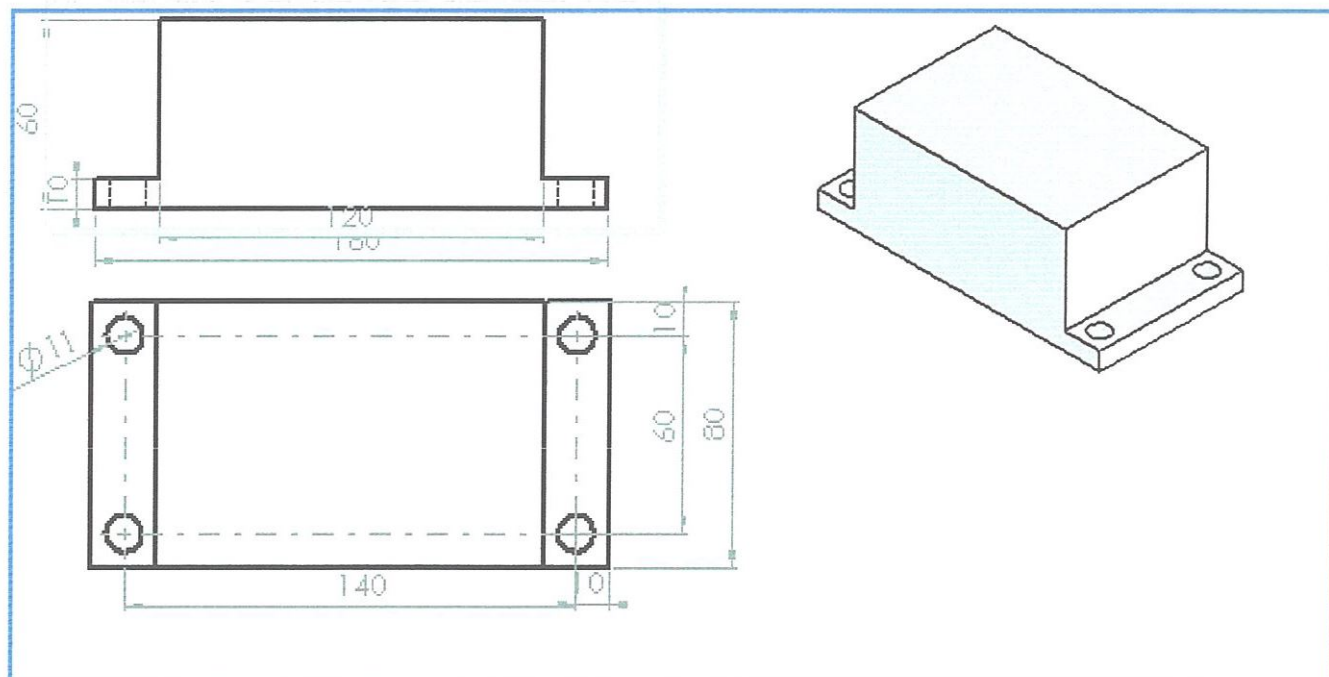


Fig.II-4 : Eprouvette pour les essais de l'effort de coupe.

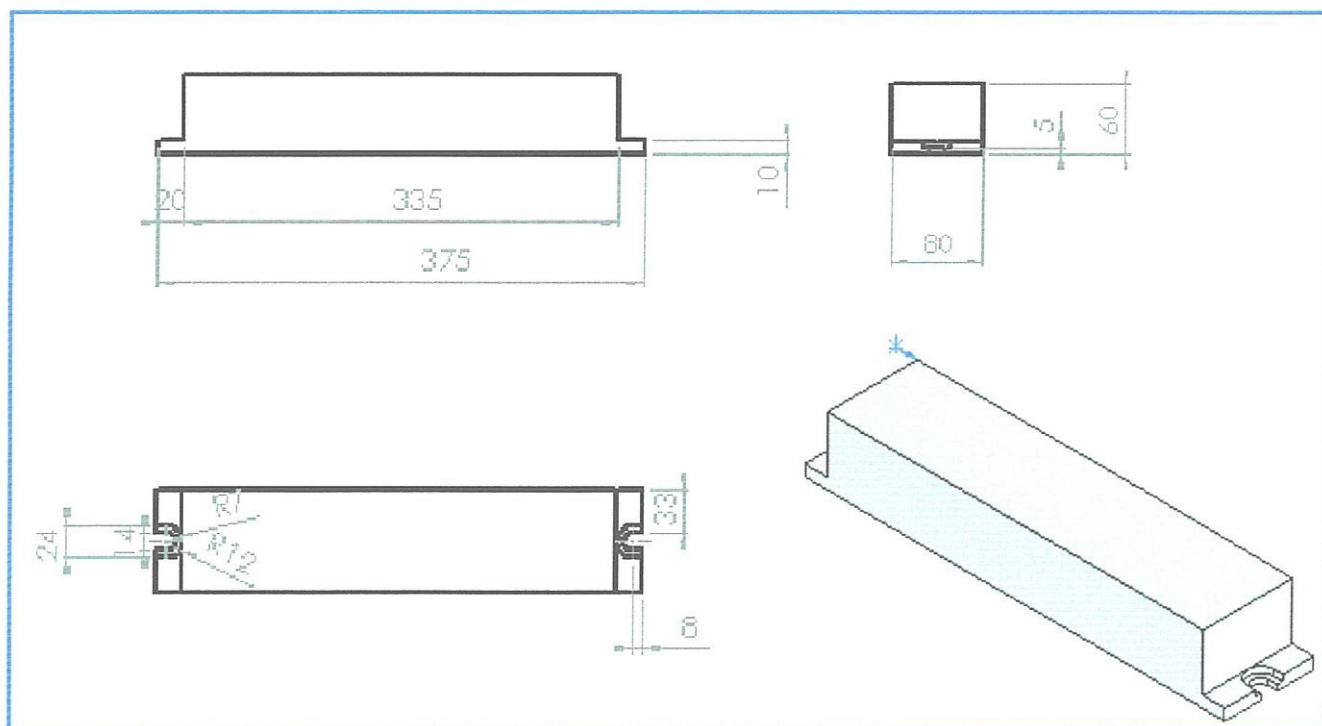


Fig.II-5 : Eprouvette pour les essais d'usure.

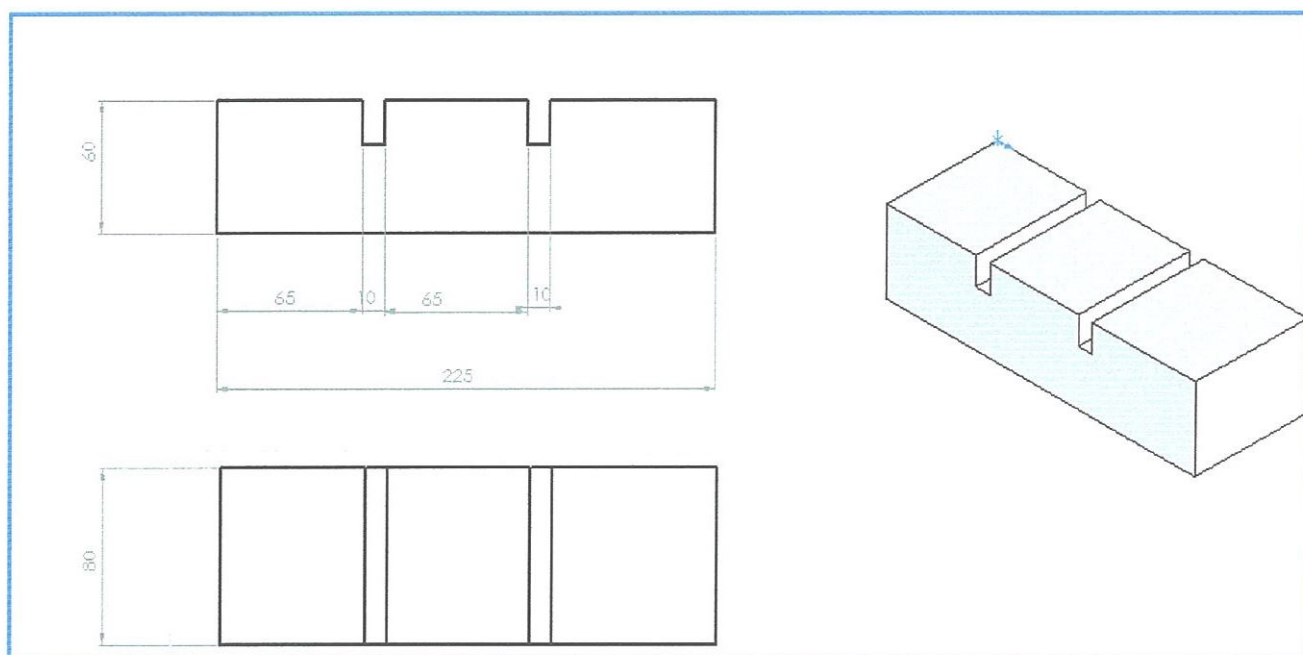


Fig. II-6 : Eprouvette pour les essais de la rugosité.

a- Désignation :

C'est un acier inoxydable austénitique fortement allié classé parmi les super alliages, sa désignation est présentée dans le tableau (Tab. II-1).

Niveau de la norme	CEN		AFNOR	Etats-Unis	
Norme	EN 10088-2		NFA35-573:1990	AISI	N°UNS*
Type de désignation	Symbolique	Numérique	Symbolique		
Désignation	X2CrNi18-9	1.4307	Z3CN18-10	304L	S30403

*UNS: Unified Numbering Systems (Systèmes De Numération Unifiés).

Tab. II-1: Désignation du matériau de la pièce [36].

b- Composition chimique :

La composition chimique de l'acier **X2 Cr Ni 18-9 (304 L)** qui est représentée dans le tableau (Tab II-2), a été réalisée au complexe sidérurgique d'El-Hadjar - metal-steel-.

Eléments Chimique	Pourcentages (%)	Eléments Chimique	Pourcentages (%)
C	0,02	Nb	0,013
Mn	1,44	Ni	7,69
Si	0,33	Cr	16,91
P	0,02	Mo	0,402
S	0,016	V	0,112
Cu	0,727	Sn	0,0121
Al	0,012	W	0,066
Ti	0,005	Fe	72,1

b. II-2: Composition chimique de l'acier X2 Cr Ni 18-9 (304L).

c- Caractéristiques mécaniques:

Les caractéristiques mécaniques à température ambiante de l'acier X2CrNi18-9 (304L) (d'après EN10088-3) sont représentées dans le tableau (Tab.II-3) [43].

d (mm)	Dureté max (HB)	Limite d'élasticité min.		Résistance à la traction	Allongement à la rupture min	
		R _{p0,2}	R _{p1,0}		R _m	A%
		N/mm ²			N/mm ²	long.
d ≤ 160	215	175	210	450-680	45	-

Tab. II-3: Caractéristiques mécaniques de l'acier X2CrNi18-9 (304L) [43].

La dureté de notre matériau (X2CrNi18-9) est de l'ordre de **142HB** (dureté mesurée au complexe CYCMA de Guelma).

d- Propriétés physiques:

Les propriétés physiques de cet acier à température ambiante d'après la norme européenne (EN 10088-1) sont présentées dans le tableau II-4.

Masse volumique	Module d'élasticité à 20°C	Conductivité thermique à 20°C	Capacité thermique massique à 20°C	Résistivité électrique à 20°C	Magnétisable
(kg/dm ³)	(KN/mm ²)	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	(j.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	(Ω x mm ² /m)	
7,9	200	15	500	0,73	non

Tab. II-4: Propriétés physiques de l'acier X2CrNi18-9 (304L) [43].

II-2-3- Outil de coupe:

L'outil de coupe qui a servi aux essais, est une fraise à surfacer de 100mm de diamètre, (**fig. II-7**). Elle est composée de trois éléments essentiels:

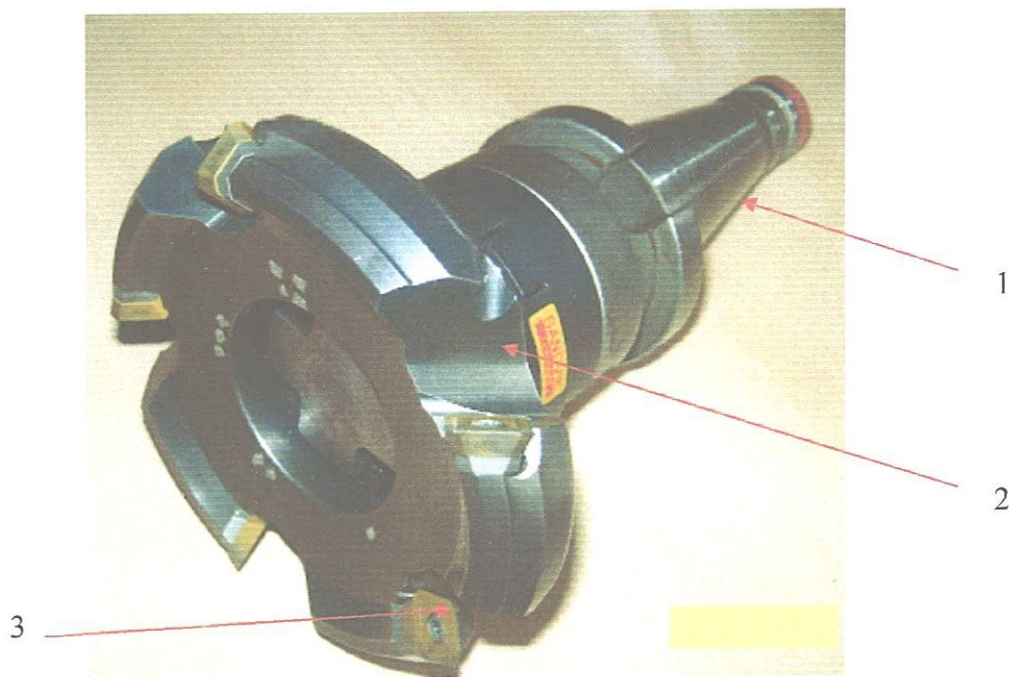
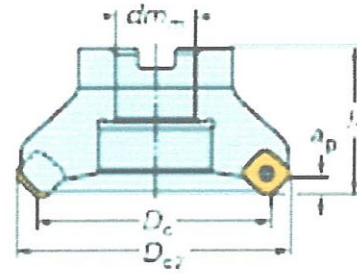


Fig. II-7 : Fraise à surfacer.

- D'un cône morse (1).
- D'une cloche **CoroMill 245** à surfacer (2) sur laquelle sont montées 5 plaquettes amovibles à fixation par vis fabriquée à la firme SANDVIK (fig. II-8), dont les caractéristiques géométriques de cette fraise sont données sur la figure II-8-b, et sur le tableau II-5.
- De plaquettes rapportées (3) dont les caractéristiques sont représentés dans les tableaux (II-6 ; II-7) et les figures (II-9 ; II-10):



(a)



(b)

Fig. II-8: fraise à surfacer Coromill 245.

Désignation	Dimensions							
R245-100Q32-12L	Dc	dm _m	D _{c2}	l ₁	a _p	tr/min	κ _r	γ
					Max	max		
	100	32	112,5	50	6	11300	45°	+23°

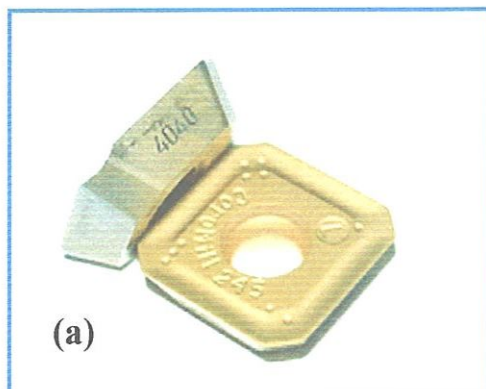
Tab. II-5: Caractéristiques géométriques et dimensions de la fraise.

κ_r : Angle de direction principale,

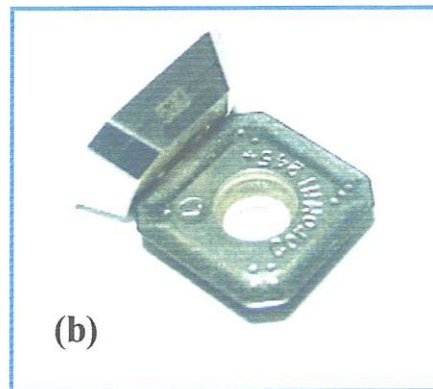
γ : Angle d'attaque.

	Matériau de coupe	Désignation SANDVIK	Désignation ISO
a	Carbure revêtu	GC4040 (M20-M40)	R245-12 T3 M-PL
b	Cermet	CT530 (M10-M30)	R245-12 T3 E-PL

Tab. II-6 : Désignation des plaquettes de coupe.



(a)



(b)

a: Carbure revêtu

b : Cermet

Fig. II-9: Plaquettes de coupe utilisées.

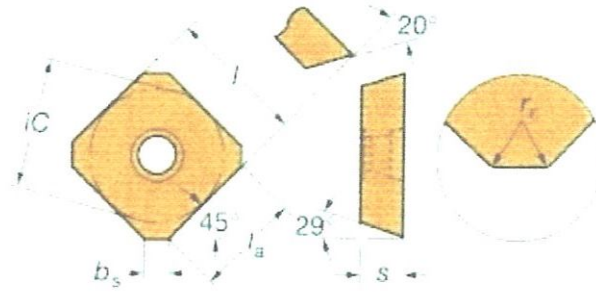


Fig. II-10: Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

	Designation	$l=iC$	s	bs	la	r_e
12	R245-12 T3 E-PL	13,4	3,97	2,1	10	1,5

Tab. II-7:Caractéristiques géométriques des plaquettes de coupe.

II-3- EQUIPEMENTS DE MESURE UTILISÉS :

II-3-1-Rugosimètre:

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) Surf test 201 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (fig. II-11). 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.



Fig. II-11: Rugosimètre Surf test Rj201

II-3-2- Microscope pour la mesure de l'usure:

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 de la fraise, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure II-12).



(a)



(b)

Fig. II-12 : Microscope Optique: a) Pour les photos de l'arrête rapportée de la plaquette de coupe.

- b) Pour:- Mesurer l'usure des plaquettes de coupe.
- Photographier l'usure des plaquettes de coupe.

II-3-3-Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe:

Pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) nous avons utilisé un dynamomètre qui se compose d'un support équipé de capteurs piézoélectriques, d'un transmetteur qui permet l'enregistrement sélectif des trois composantes de l'effort de coupe et d'un amplificateur de mesure à 4 canaux. L'acquisition des données sur PC se fait par une interface analogique numérique Black Star I/O 2308 via un câble RS232 (figure II.13).

Composants du système :

Le système de mesure des efforts de coupe se compose de :

- Amplificateur de mesure à 4 canaux, l'unité contient 3 amplificateurs autonomes et précis à tension continue avec facteur d'amplificateur réglable et un quatrième amplificateur sert à amplifier la tension de sortie délivrée par le thermocouple de l'outil pour mesurer la température de coupe.

- Transmetteur d'effort de coupe : enregistrement sélectif des trois composantes d'une force (Force de coupe, force axiale et force radiale).
- Transmetteur de mesure de la température des plaquettes.
- Transmetteur de force, moment de perçage.

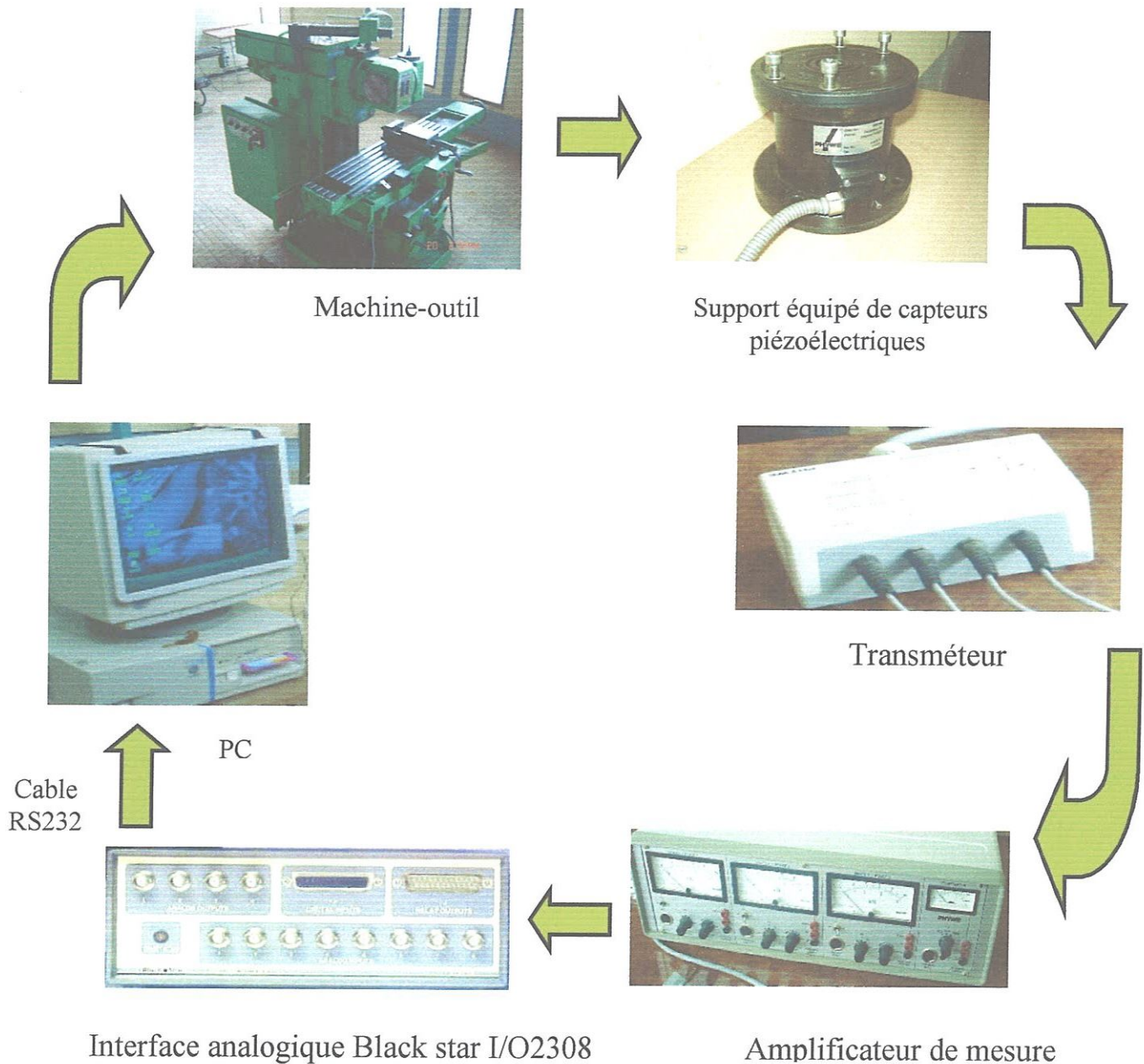


Fig. II-13 : Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.

II-4- Planification des expériences:

II-4-1- Introduction:

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_z , a_p), la géométrie de la partie active de l'outil (r , α , β , γ ,

ε_r , ... etc.), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, lubrification). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. La tenue, les efforts, la rugosité, la température de coupe présentent les paramètres de sortie. Dans cette étude plusieurs points seraient intéressants d'être traité. Mais à notre niveau on s'est limité à l'évolution des paramètres suivants:

- Evolution de la rugosité en fonction des paramètres (V_c , f_z , a_p) ;
- Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille VB ;
- Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres (V_c , f_z , a_p) ;
- Evolution des efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille VB ;
- Evolution de l'usure des matériaux de coupe.

Les essais ont été réalisés suivant deux méthodes de planification des expériences qui sont:

- méthode uni factorielle ;
- méthode multifactorielle.

II-4-2- Méthode unifactorielle:

Cette méthode est indispensable lorsqu'il s'agit de caractériser l'action d'un seul facteur X sur un paramètre Y. Pour cela, on donne une série de valeurs discrètes au facteur examiné [$X_i \in \{X_{\min}, X_{\max}\}$] tout en maintenant tous les autres facteurs constants (Tab. II-8).

Pour chaque $X=X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i , ($i = 1 \div N$). Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation $Y = f(X)$.

N°	Facteurs variables	Paramètres de sortie						
	X	Y_1	Y_2	-	Y_g	-	Y_n	Y_{moy}
1	X_1	Y_{11}	Y_{21}	-	Y_{g1}	-	Y_{n1}	Y_{moy1}
2	X_2	Y_{12}	Y_{22}	-	Y_{g2}	-	Y_{n2}	Y_{moy2}
3	X_3	Y_{13}	Y_{23}	-	Y_{g3}	-	Y_{n3}	Y_{moy3}
i	X_i	Y_{1i}	Y_{2i}	-	Y_{gi}	-	Y_{ni}	Y_{moyi}
-	-	-	-	-	-	-	-	-
N	X_N	Y_{1N}	Y_{2N}	-	Y_{gN}	-	Y_{nN}	Y_{moyN}

Tab. II-8: Matrice de planification par la méthode unifactorielle.

II-4-3- Méthode multifactorielle:

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes. 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_z , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe, durée de vue). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

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

Où: - N: nombre d'essais;

- q: nombre de niveau de variations des facteurs de base;

- k: nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons :

a- Effort de coupe et rugosité :

Trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyen (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 (Tab. II-9).

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs		
	V_c (m/min)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau moyen (0)	Valeur moyenne	Valeur moyenne	Valeur moyenne
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale	Valeur minimale
N° des essais	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

Tab. II-9: Matrice de planification par la méthode multifactorielle (Effort de coupe ; rugosité).

b- Essais d'usure :

Deux facteurs de base ($k=2$) où on n'a que deux niveaux de variation (un niveau supérieur (+1) et un niveau inférieur (-1)).

Nous avons alors: $N=2^2=4$.

Les essais ont été numérotés de 1 à 4. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe tout en gardant le paramètre de la profondeur de passe fixe. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont alors illustrées dans le tableau (Tab. II-10).

Niveau de facteurs	Valeurs naturelles des facteurs	
	Vc (m/min)	fz (mm/dent)
Niveau supérieur (+1)	Valeur maximale	Valeur maximale
Niveau inférieur (-1)	Valeur minimale	Valeur minimale
N° des essais	Valeurs codifiées des facteurs	
	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	-1
4	1	1

Fig. II- 10 : Matrice de planification par la méthode multifactorielle pour usure.

II-5-Conditions de coupe:

Les conditions de coupe qui ont été utilisées pour les différents essais réalisés sont mentionnées dans les tableaux qui suivent (de Tab. II-10 à Tab. II-14).

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	157	fz (mm/dent)	0,04-0,08-0,12
ap (mm)	0,3		0,16-0,20-0,25-0,32
Vc (m/min)	157	ap (mm)	0,3 – 0,6 – 0,9
fz (mm/dent)	0,16		1,2 – 1,8 – 2,4
fz (mm/dent)	0,16	Vc (m/min)	78,5- 111 –
ap (mm)	0,3		157- 222 - 314

Tab. II- 10 : Conditions de coupe pour les essais de rugosité

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	157	fz (mm/dent)	0,04- 0,12
ap (mm)	0,2		
Vc (m/min)	157	ap (mm)	0,2 - 0,3
fz (mm/dent)	0,04		
fz (mm/dent)	0,04	Vc (m/min)	157- 222
ap (mm)	0,2		

Tab. II- 11 : Conditions de coupe pour les essais de rugosité en fonction du mode d'usinage.

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	157	fz (mm/dent)	0,08 - 0,16(carbure revêtu). 0,12-0,16(cermet).
ap (mm)	0,3		
Vc (m/min)	157	ap (mm)	0,3 – 0,6
fz (mm/dent)	0,08		
fz (mm/dent)	0,08	Vc (m/min)	157- 222
ap (mm)	0,3		

Tab. II- 12 : Conditions de coupe pour les essais de rugosité en fonction de l'arrosage.

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	157	fz (mm/dent)	0,02-0,08- 0,16-0,25-0,32
ap (mm)	0,3		
Vc (m/min)	157	ap (mm)	0,3 – 0,6 – 0,9 - 1,2 – 1,5
fz (mm/dent)	0,12		
fz (mm/dent)	0,12	Vc (m/min)	78,5- 111 – 157- 222 - 314
ap (mm)	0,3		

Tab. II- 13 : Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe.

Paramètres constants	Valeurs	Paramètres variables	Valeurs
Vc (m/min)	111	fz (mm/dent)	0,11-0,22
ap (mm)	0,6		
Vc (m/min)	222	fz (mm/dent)	0,11 – 0,22
ap (mm/dent)	0,6		

Tab. II- 14 : Conditions de coupe pour les essais d'usure.

CHAPITRE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

ET INTERPRÉTATION

III-1- INTRODUCTION:

Les paramètres qui peuvent influencer le processus de coupe sont d'une manière générale les paramètres d'entrée cités dans la (fig.I-1). Les essais expérimentaux de la coupe effectués dans notre étude sur l'acier inoxydable X2CrNi18-9, ont été menés en se limitant sur quelques uns parmi cette diversité de paramètres qui sont:

- a- Les paramètres de coupe : V_c , a_p , f_z .
- b- Le matériau de coupe : Carbure revêtu, Cermet.
- c- La forme de la plaquette de coupe.

Les types d'essais que nous avons mené concernent :

- La rugosité : où on a étudié :

- L'influence des différents paramètres de coupe sur les critères de la rugosité (R_a , R_z , R_t).
- L'influence de la nuance du matériau de coupe sur les critères de la rugosité.
- L'influence du mode d'usinage - en opposition ou en concordance – sur les critères de la rugosité.
- L'influence de l'arrosage sur les critères de la rugosité.

- L'effort de coupe : où on a étudié pour les deux matériaux de coupe choisis aussi:

- L'influence des différents paramètres de coupe sur les différentes composantes d'effort de coupe (F_v , F_a , F_r).
- L'influence du mode d'usinage sur l'effort de coupe.

- L'usure des outils de coupe : où on a étudié l'usure des outils de coupe en fonction des paramètres de coupe. Dans notre travail, on a choisi deux paramètres, la vitesse de coupe et l'avance par dent. Ces paramètres qui ont plus d'influence sur ce phénomène d'usure d'après la bibliographie [30].

III-2- RUGOSITE:

Notre travail consiste à faire des essais expérimentaux en utilisant deux nuances de plaquettes de coupe, qui sont:

- Carbure revêtu (GC4040).
- Cermet (CT530).

III-2-1/ Influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité pour le carbure revêtu :

III-2-1-1/ Influence de l'avance par dent:

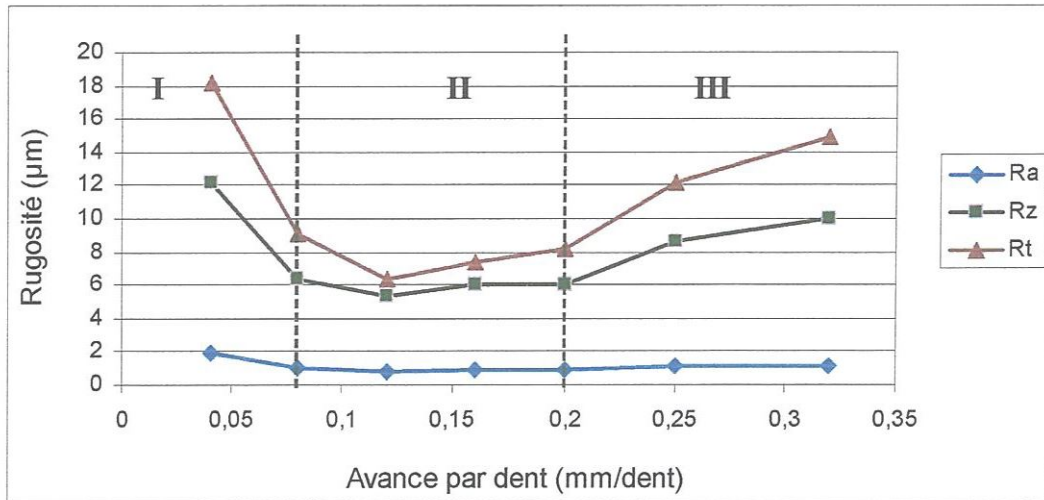


Fig.III-1: Effet de l'avance par dent sur la rugosité de l'acier X2CrNi18-9

avec le carbure revêtu GC1010, $V_c = 157 \text{ m/min}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$.

La figure (III-1) montre l'influence de l'avance par dent sur la rugosité de la surface de l'acier X2CrNi18-9. Dans la première zone qui couvre l'intervalle d'avance par dent $[0,04 \text{ à } 0,08 \text{ mm/dent}]$, on enregistre une mauvaise rugosité au point $0,04 \text{ mm/dent}$. Ceci peut s'expliquer par le micro copeau adhérent à la surface usinée (figure. III-2-a). Ce dernier qui est conséquence du frottement qui fait croître la température dans la zone de contact outil matière. Avec l'augmentation de l'avance par dent à $0,08 \text{ mm/dent}$, on enregistre une baisse de la rugosité. Ce qui montre l'un des points qui le rend difficile à usiner [30]. Dans la deuxième zone allant de $0,08 \text{ à } 0,2 \text{ mm/dent}$ on observe une certaine stabilité de la rugosité. Dans la troisième zone, on enregistre une augmentation apparente pour les trois critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) qui est respectivement de l'ordre de $(25,27; 66; 82) \%$. Ceci est dû aux traces permanentes laissées par la fraise sur la surface usinée et aussi aux copeaux adhérents sur la surface usinée (figure III-2-b-c-d). De ce fait on peut dire que, à faible avance par dent et à grande avance par dent, on remarque l'adhésion des micro copeaux. Ce qui nous permet de dire que l'intervalle qui donne des résultats optimaux est celui de la deuxième zone.

III-2-1-2/ Influence de la profondeur de passe:

La figure (III-3) montre l'influence de la profondeur de passe sur la rugosité de la surface de l'acier X2CrNi18-9. Dans cette figure, on observe deux zones. Dans la zone (I) on

observe une perturbation de la rugosité, particulièrement pour les critères R_z et R_t . Cette perturbation est due aux traces permanentes laissées par la fraise lors de l'usinage et aux micros copeaux adhérents à la surface usinée (fig. III-4). La zone (II) commence par une certaine stabilité pour les différents critères de la rugosité. A la profondeur de passe $a_p=2,4\text{mm}$, on a enregistré une augmentation de la rugosité pour les trois critères (R_a , R_z , R_t) respectivement de (176,2 ; 101 ; 64,77) %. Cette augmentation est attribuée à l'augmentation des efforts de coupe, ce qui influence la stabilité de l'usinage et par conséquent la rugosité de la surface. Les traces de la fraise sur la surface usinée (figure. III-5), peuvent aussi être à la base de cette augmentation de la rugosité. Ces traces qui sont dues au refoulement de la matière lors de l'usinage et cela à cause de la ductilité du matériau usiné et aussi aux plaquettes de coupe ébréchées.

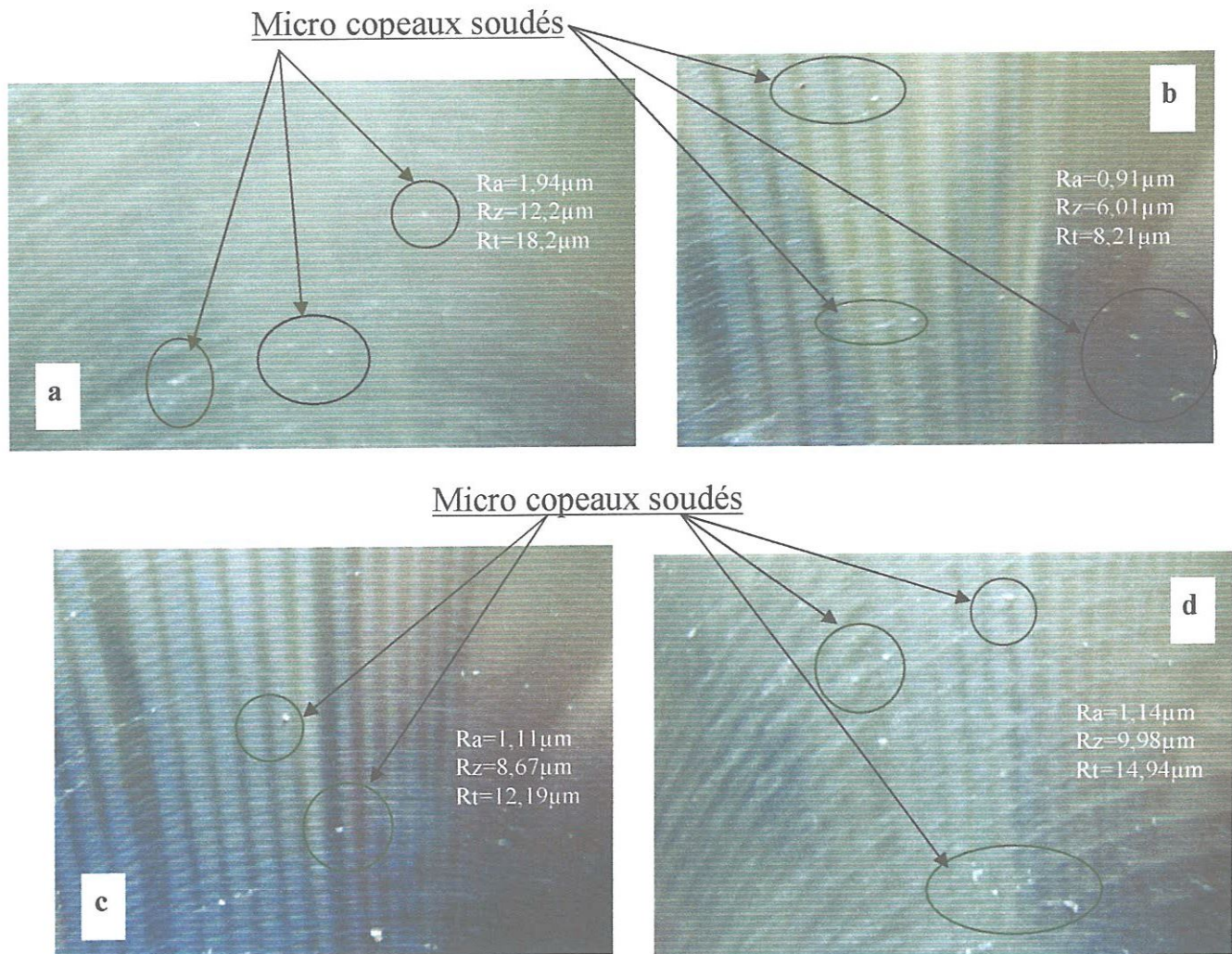


fig. III-2: Copeaux adhérents à la surface usinée.

a- $V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,3\text{mm}$;
 $f_z=0,04\text{mm/dent}$.

b- $V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,3\text{mm}$;
 $f_z=0,20\text{mm}$

c- $V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,3\text{mm}$;
 $f_z=0,25\text{mm/dent}$.

d- $V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,3\text{mm}$;
 $f_z=0,32\text{mm/dent}$.

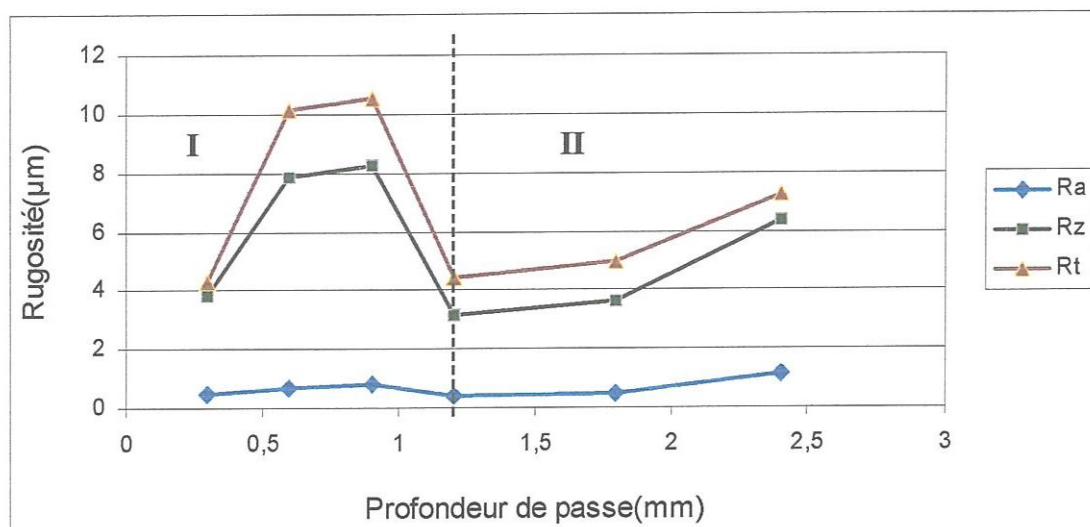
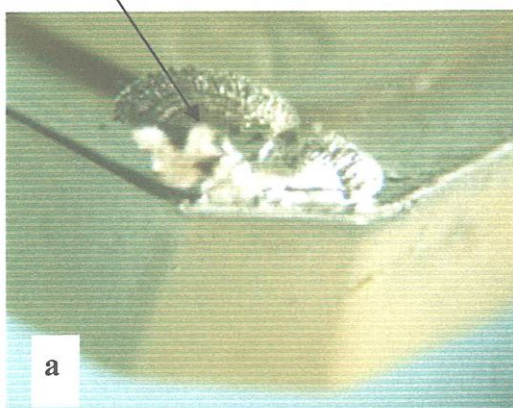


Fig. III-3: Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de l'acier X2CrNi18-9 avec le carbure revêtu. $V_c = 157\text{m/min}$; $f_z = 0,16\text{mm/dt}$.

Arête rapportée



Micros copeaux soudés

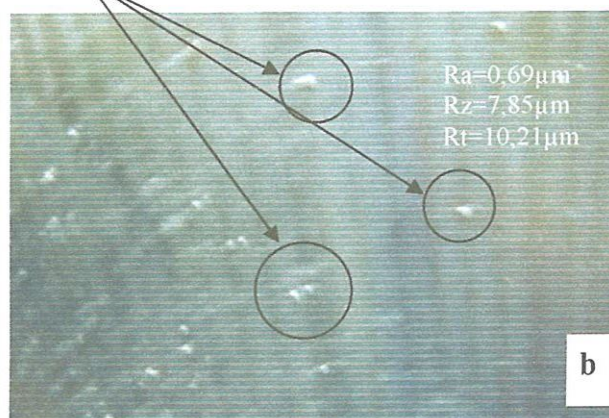


fig. III-4 : Photos à $V_c = 157\text{m/min}$, $a_p = 0,6\text{mm}$, $f_z = 0,16\text{mm/dent}$.

a- Arête rapportée observée sur la plaquette de coupe.

b- Micro copeau observé sur la surface usinée.

Refoulement de la matière

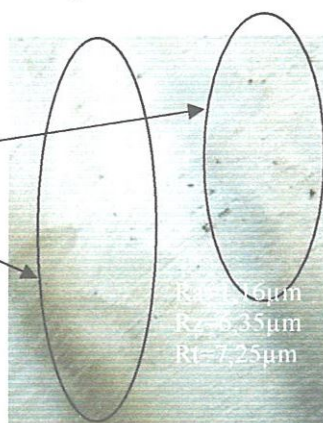


Fig. III-5 : Surface usinée avec les conditions de coupe, $V_c = 157\text{m/min}$, $f_z = 0,16\text{mm/dent}$, $a_p = 2,4\text{mm}$.

III-2-1-3/ Influence de la vitesse de coupe:

La figure (III-6) illustre l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de la surface usinée. Dans la zone (I), on enregistre une amélioration de l'état de la surface usinée avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Pour des vitesses passant de 78 à 157 m/min, les critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) marquent une baisse respectivement de (49, 29, 29) %. Dans la deuxième zone où la vitesse de coupe passe de 157 à 314 m/min, on enregistre une stabilité de la rugosité. Ceci est dû à la diminution des efforts de coupe qui se traduisent par une stabilité du système usinant.

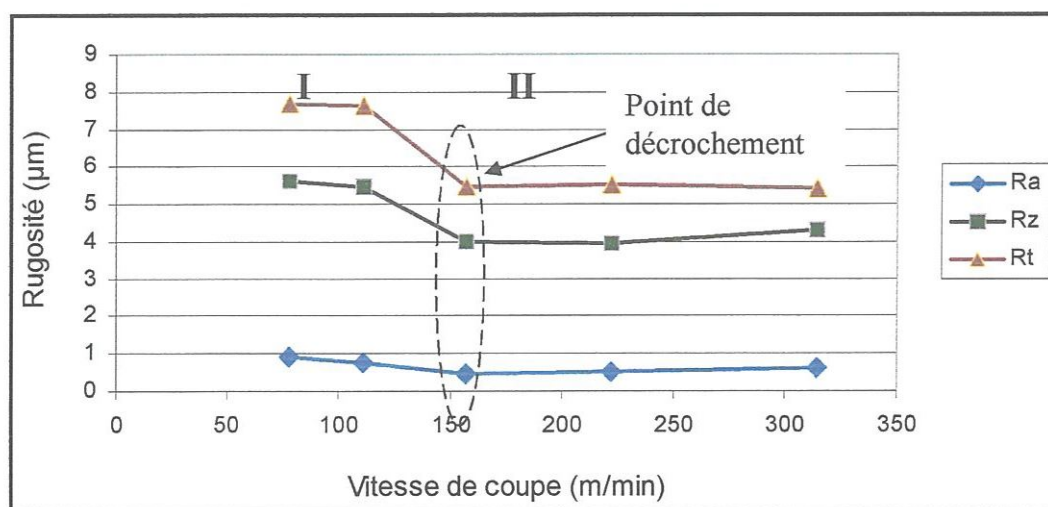


Fig.III-6: Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité avec le carbure revêtu.

$f_z = 0,16\text{mm/dent}$; $a_p = 0,3\text{mm}$.

III-2-2- Influence des paramètres du régime de coupe sur la rugosité pour le cermet:

III-2-2-1/ Influence de l'avance par dent:

La figure III-7 montre l'évolution de la rugosité de la surface usinée en fonction de l'avance par dent. Dans cette figure nous avons trois zones : Dans la zone (I) où l'avance par dent passe de 0,04 à 0,08 mm/dent nous avons une mauvaise rugosité au début, par la suite on enregistre une amélioration très nette. Ceci est dû à l'usure accélérée de la fraise au début de son utilisation et à l'adhésion du copeau à la surface usinée. Sur la zone (II) présentée dans le domaine de l'avance 0,08 à 0,2 mm/dent, on a une certaine stabilité de la rugosité pour le critère R_a et une légère augmentation pour les deux autres critères R_z et R_t . La troisième zone qui correspond aux grandes avances 0,2 à 0,32 mm/dent, on a une croissance remarquable pour les différents critères de la rugosité R_a , R_z et R_t qui est respectivement de l'ordre de

(174,47 ; 103,36 et 74) %. Ceci est dû aux sillons laissés par les dents de la fraise lors de l'usinage, qui sont de plus en plus espacées avec l'augmentation de l'avance. De ce fait les petites et les grandes avances sont déconseillées, seules les rugosités enregistrées dans la zone (II) sont les meilleures.

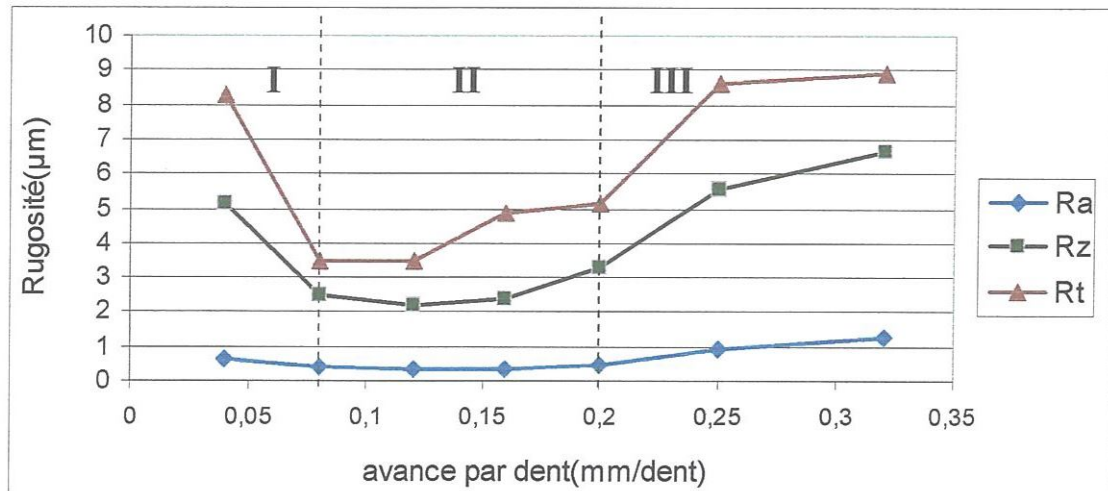


Fig.III-7: Effet de l'avance par dent sur la rugosité de l'acier X2CrNi18-9 avec le cermet, $V_c = 157\text{m/min}$; $a_p = 0,3\text{mm}$.

III-2-2-2/ Influence de la profondeur de passe:

Dans la figure III-8 sont présentés les résultats de la rugosité de la surface usinée en fonction de la profondeur de passe. Dans cette figure on remarque la présence de deux zones : Dans la première zone $[0,3 \div 1,8]$ mm, on observe une très légère augmentation de la rugosité pour les différents critères. Dans la seconde zone variant de $[1,8 \text{ à } 2,4]$ mm, nous avons une croissance remarquable précisément pour les critères de rugosité Rz et Rt qui est respectivement de l'ordre de (40 ; 116,66) %. Cette augmentation est due aux traces laissées par la fraise sur la surface usinée qui sont de la forme de bandes ondulées figure III- 9-c. Ces traces sont provoquées par le refoulement de la matière, à cause de la ductilité du matériau usiné et aussi aux ébréchures sur les plaquettes de coupe à la profondeur de passe 2,4mm et à l'arête rapporté figure (III-9- a et b). En effet le cermet est un matériau de coupe formé d'un mélange entre métal et céramique, ce qui le rend fragile devant les chocs mécaniques, surtout pour des profondeurs de passes assez importantes. Alors au-delà de cette profondeur de passe 1,8mm qui représente le point de décrochement entre les deux zones, la croissance devient apparente particulièrement pour Rt. Donc le domaine conseillé pour ce matériau de coupe est $[0,3 \div 1,8]$ mm de profondeur de passe.

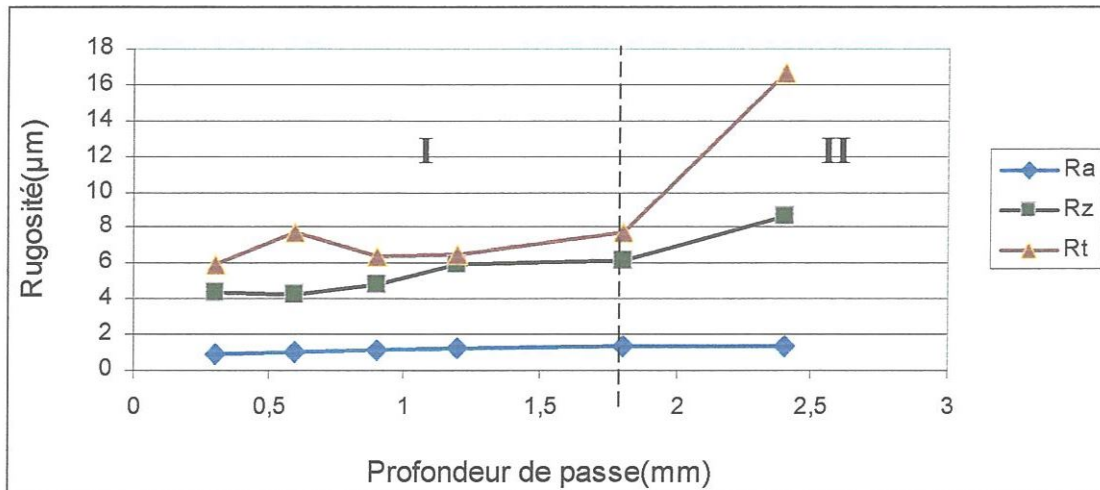


fig. III.8: Effet de la profondeur de passe sur la rugosité de l'acier X2CrNi18-9 avec cermet, $f_z = 0,16 \text{ mm/dent}$; $V_c = 157 \text{ m/min}$.

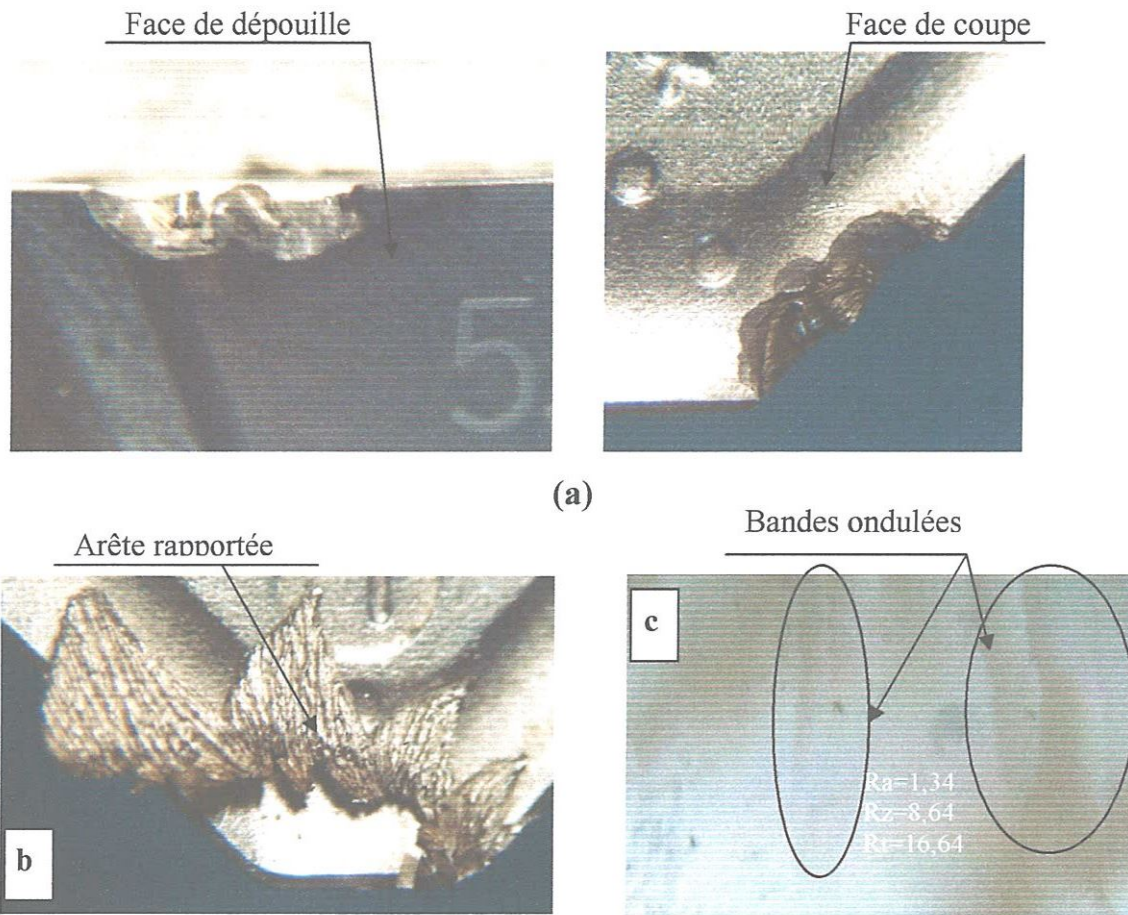


Fig. III-9 : Plaquette de coupe et surface usinée avec les conditions de coupe :

$f_z = 0,16 \text{ mm/dent}$; $a_p = 2,4 \text{ mm}$; $V_c = 157 \text{ m/min}$.

a - Ebréchure de plaquette de coupe en cermet.

b - Arête rapportée sur plaquette de coupe ébréchée.

c - Traces en forme de bandes ondulées.

III-2-2-3/ Influence de la vitesse de coupe:

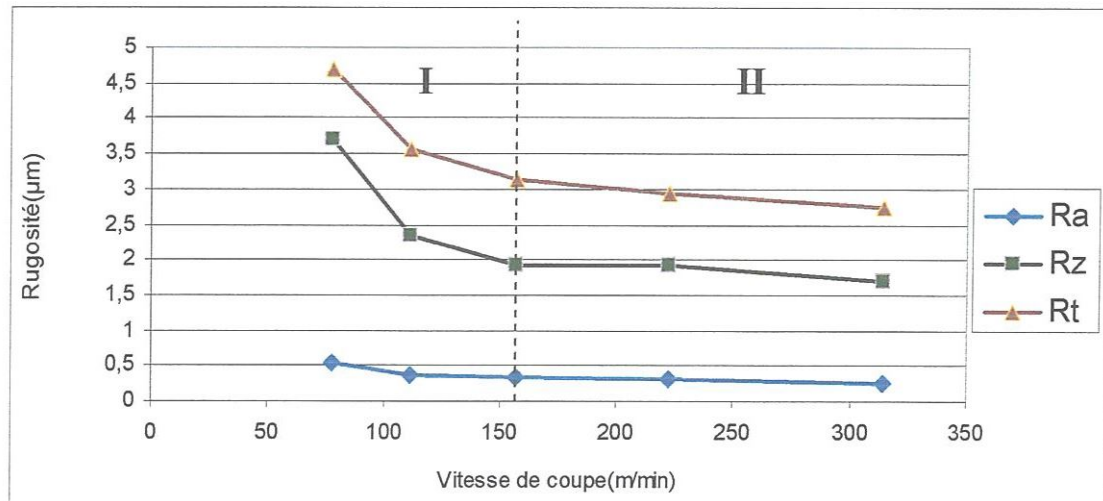


Fig.III-10: Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité de l'acier X2CrNi18-9 avec le cermet $f_z = 0,16\text{mm/dent}$; $a_p = 0,3\text{mm}$.

La figure III-10 présente l'évolution de la rugosité de la surface usinée de l'acier inoxydable X2CrNi18-9 en fonction de la vitesse de coupe en utilisant le cermet comme matériau de coupe. Cette figure peut être divisée en deux zones. Dans la première zone (78 à 157 m/min), nous avons une amélioration de la rugosité de la surface avec l'augmentation de la vitesse de coupe pour les différents critères Ra, Rz, Rt, qui est respectivement de l'ordre de (37 ; 48 ; 33) %. Dans la deuxième zone on enregistre une légère stabilité de la rugosité. Cela est dû en fait à l'augmentation de la vitesse de coupe qui fait diminuer les efforts de coupe, ce qui a pour effet un usinage stable et par conséquent l'état de surface s'améliore.

III-2-3- Influence du matériau de coupe sur la rugosité:

Selon qu'on utilise pour le fraisage de l'acier X2CrNi18-9 le carbure revêtu ou le cermet comme matériau de coupe, les résultats qu'on obtient en fonction des différents paramètres du régime de coupe (V_c , f_z , a_p), diffèrent d'un cas à un autre. Pour montrer l'influence du matériau de coupe, nous présentons dans les figures (III- 11 à III- 13) une comparaison entre les deux matériaux de coupe pour un critère de rugosité « Rt » en fonction des paramètres de coupe cités avant.

III-2-3-1- Influence de l'avance par dent sur la rugosité (Rt):

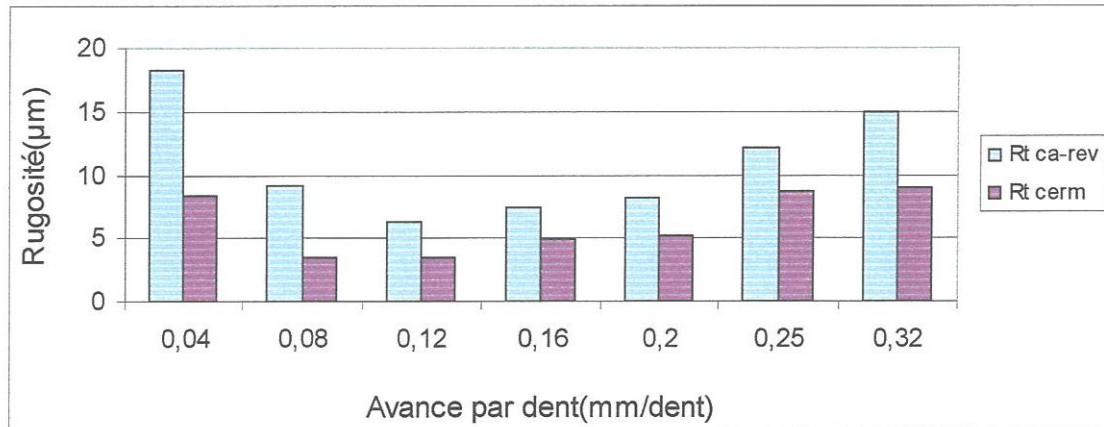


fig.III-11 : Effet de l'avance par dent sur la rugosité (Rt).

$V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,3\text{mm}$.

III-2-3-2- Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité (Rt):

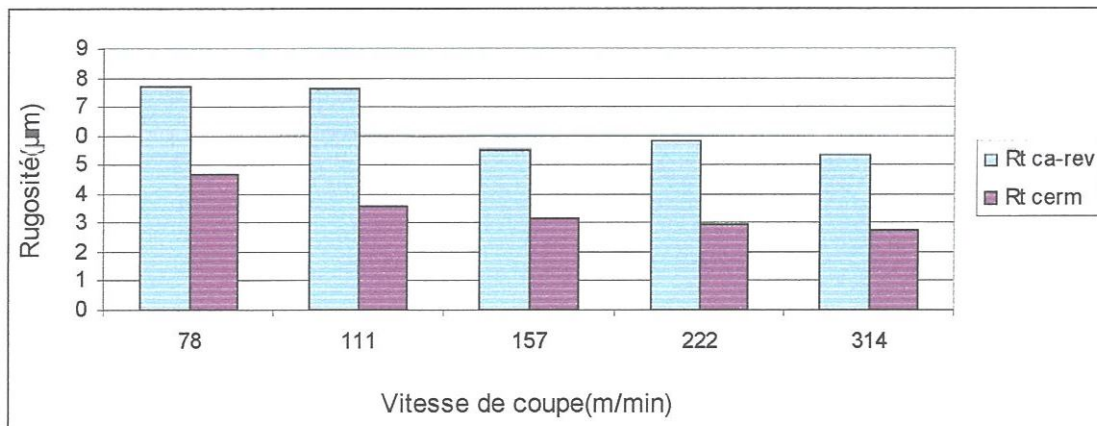


Fig.III-12: Effet de la vitesse de coupe sur la rugosité (Rt).

$f_z=0,16\text{mm/dent}$; $a_p=0,3\text{mm}$.

III-2-3-3- Influence de la profondeur de passe sur la rugosité (Rt):

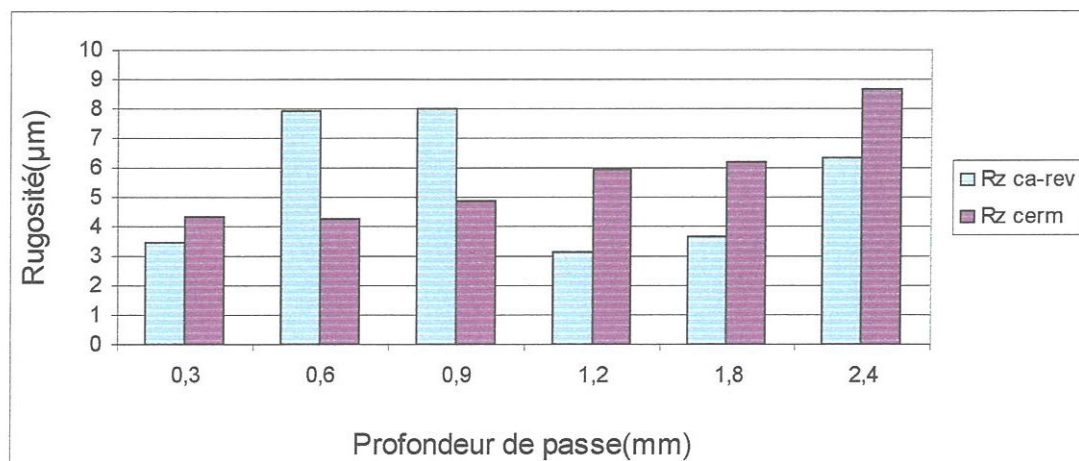


Fig.III-13 : Effet de la profondeur de passe sur la rugosité (Rt).

$V_c=157\text{m/min}$; $f_z=0,16\text{mm/dent}$.

La comparaison du comportement de ces deux matériaux de coupe « le carbure revêtu et le cermet » avec le critère de la rugosité totale R_t à déboucher sur les résultats suivants :

- Pour toutes les avances par dent testées, les rugosités R_t obtenues par le cermet (CT530) sont meilleures que celles obtenues par le carbure revêtu (GC4040).
- Pour toutes les vitesses de coupe testées, les rugosités R_t obtenues par le cermet sont meilleures que celles obtenues par le carbure revêtu.

L'amélioration des rugosités obtenues par le cermet en comparaison avec le carbure revêtu, est attribuée à la nature du matériau lui même «la composition chimique et les caractéristiques physiques chimiques ».

- D'une manière générale pour les grandes profondeurs de passe, les rugosités R_t obtenues par le carbure revêtu sont meilleures que celles obtenues par le cermet à cause des ébréchures de ce dernier.

III-2-4- Influence du mode d'usinage sur la rugosité:

Les figures (fig. III-14 à III-21) illustrent l'évolution de la rugosité de la surface usinée de l'acier X2CrNi18-9 en fonction des paramètres de coupe (V_c , a_p , f_z), et cela pour deux modes d'usinage (le fraisage en opposition et le fraisage en concordance).

III-2-4-1- Avec le carbure revêtu :

a- Influence de l'avance par dent sur la rugosité:

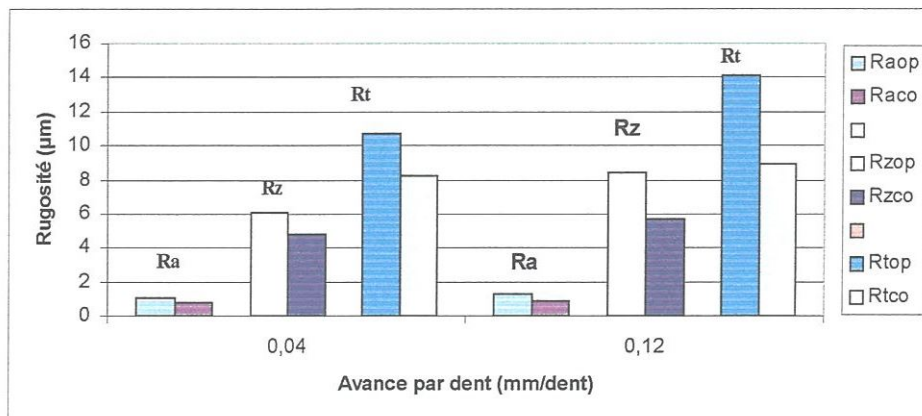
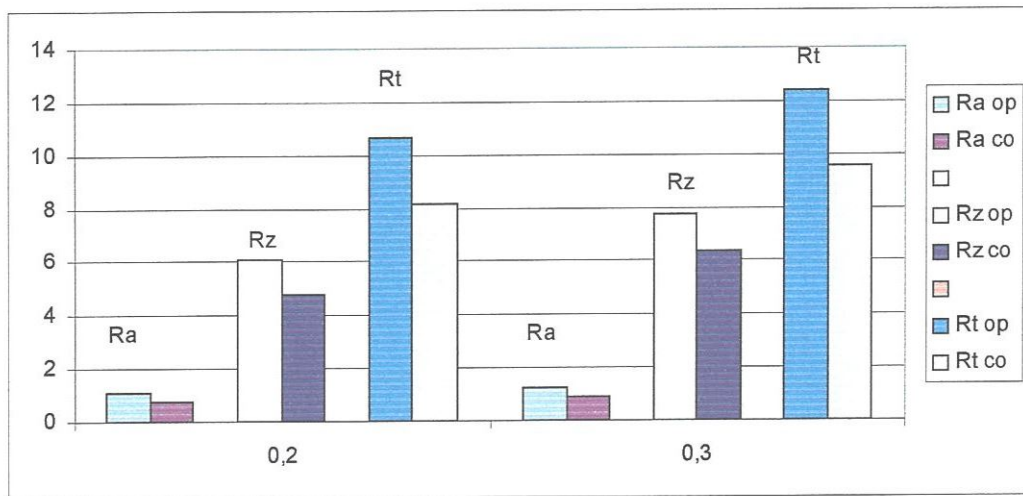
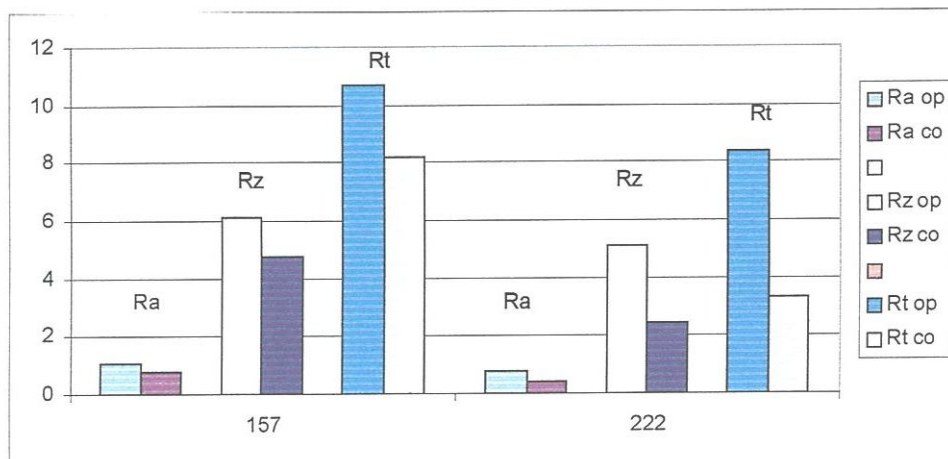


Fig.III-14 : Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu.

$V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,2\text{mm}$.

b- Influence de la profondeur de passe sur la rugosité:**Fig.III-15 :** Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu. $f_z=0,04\text{mm/dent}$; $V_c=157\text{m/min}$.**c- Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité:****Fig.III-16 :** Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le carbure revêtu. $f_z = 0,04\text{mm/dt}$; $a_p = 0,2\text{mm}$.

Les figures III-14 à III-16 montrent l'influence du mode d'usinage (en opposition ou en concordance) sur la rugosité de la surface usinée de l'acier X2CrNi18-9 avec le carbure revêtu. Ces figures montrent une augmentation de la rugosité avec l'augmentation de l'avance par dent et la profondeur de passe et son amélioration avec la croissance de la vitesse de coupe. Ces figures montrent aussi clairement que le fraisage en concordance donne des résultats d'état de surface meilleurs que le fraisage en opposition et cela pour toutes les conditions utilisées, figures (III-17 et III-18), comme cela a été constaté par [42].

**a-** Fraisage en opposition.**b-** Fraisage en concordance.

Fig. III-17 : Mode d'usinage avec le carbure revêtu,
 $V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,2\text{mm}$; $f_z=0,04\text{mm/dent}$.

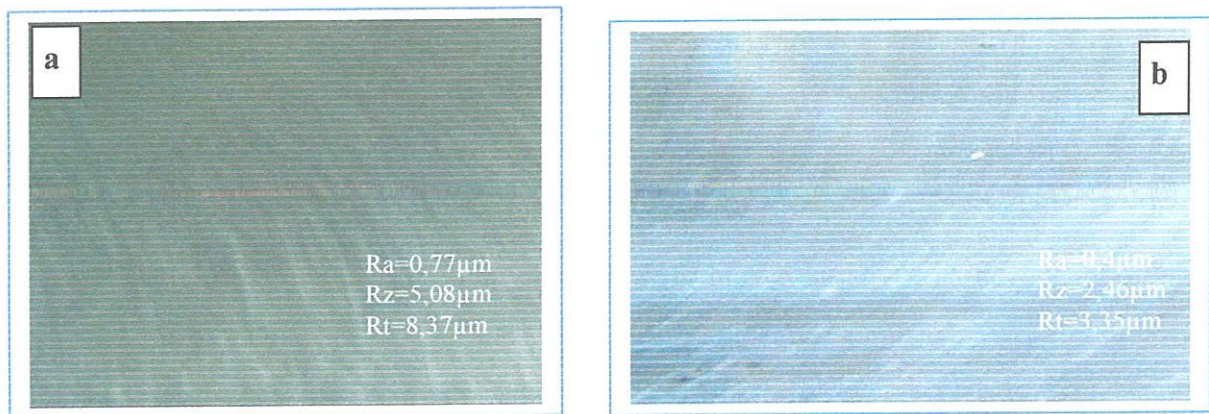
**a-** Fraisage en opposition.**b-** Fraisage en concordance.

Fig. III-18 : Mode d'usinage avec le carbure revêtu,
 $V_c = 222 \text{ m/min}$; $f_z = 0,04 \text{ mm/dent}$; $a_p = 0,2\text{mm}$.

D'après l'aspect des surfaces usinées dans les figures (III-17 et III-18), on observe une différence nette de la rugosité de la surface en fonction du mode d'usinage (fraisage en opposition ou fraisage en concordance). Ces figures montrent aussi l'influence de la vitesse de coupe sur l'état de la surface.

III-2-4-2- Avec le cermet:

D'une façon générale les figures (III-19 à III-21) montrent, pour différents paramètres de coupe (f_z ; a_p ; V_c), qu'il y a une différence dans le comportement selon le mode d'usinage et les valeurs des paramètres de coupe. Pour les faibles valeurs de paramètres de coupe, le fraisage en opposition donne des résultats meilleurs que le fraisage en concordance. Pour les valeurs supérieures d'une manière générale le fraisage en concordance donne des résultats

meilleurs que le fraisage en opposition. Cela est dû à la résistance à la coupe qui est faible au début et qui croît avec l'augmentation du paramètre de coupe pour le fraisage en opposition. Tandis que pour le fraisage en concordance, la fraise attaque par derrière et alors la résistance à la coupe diminue, cela d'une part.

a- Influence de l'avance par dent sur la rugosité:

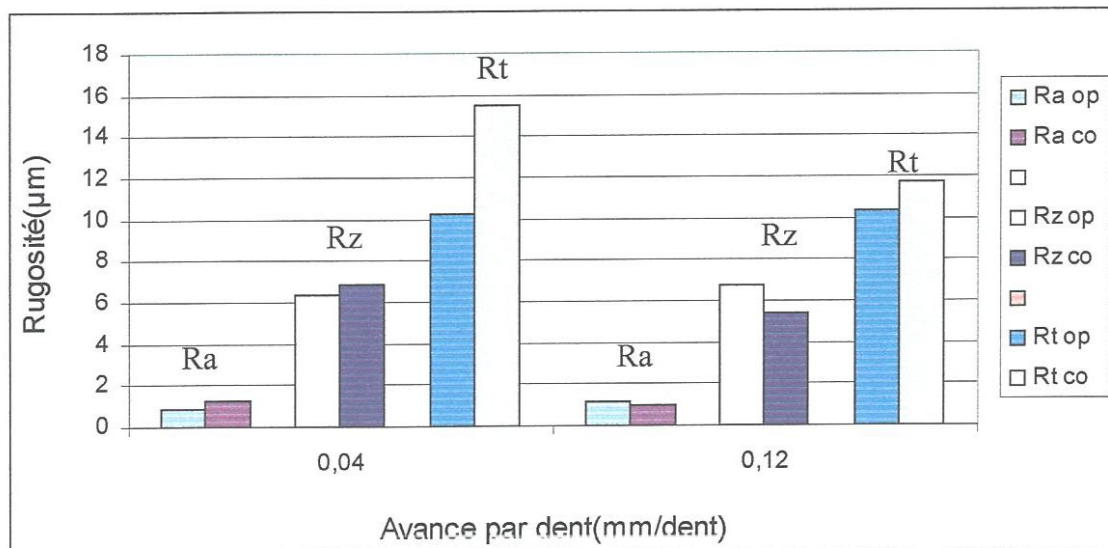


Fig.III-19 : Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet.

$V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,2\text{mm}$.

a- Influence de la profondeur de passe sur la rugosité:

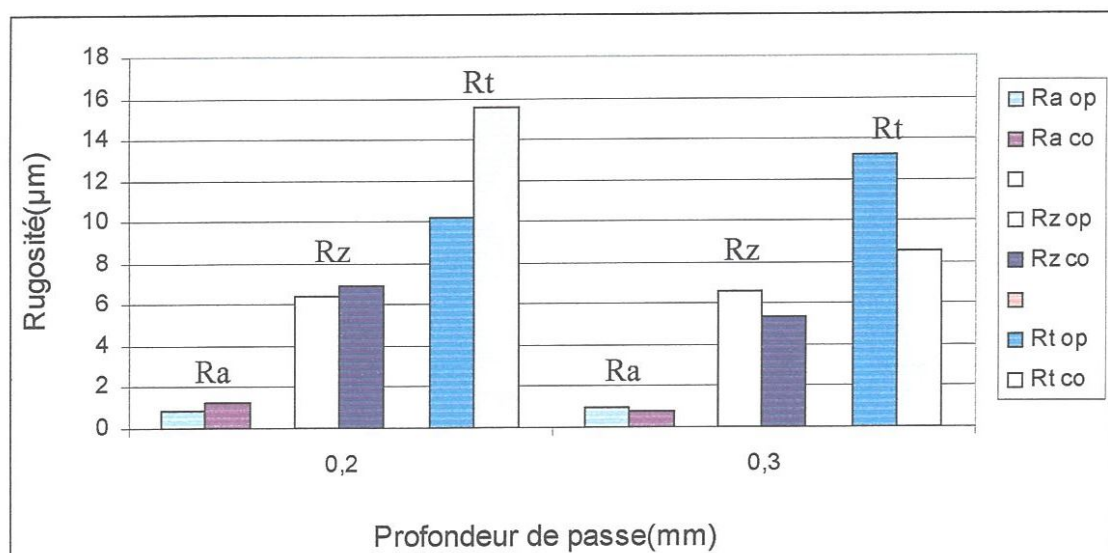


Fig.III-20 : Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet.

$f_z=0,04\text{mm/dent}$; $V_c=157\text{m/min}$.

c- Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité:

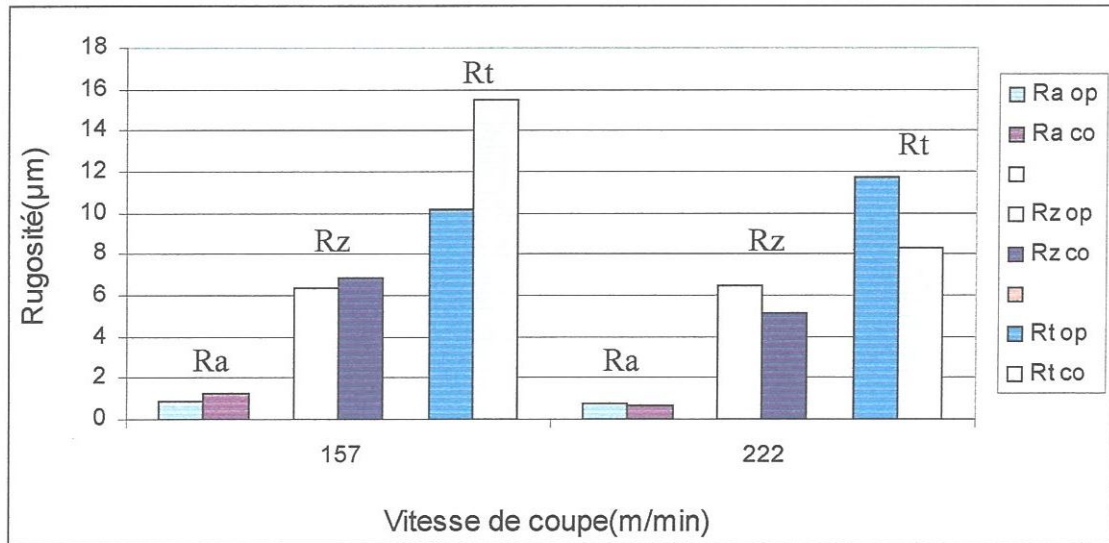


Fig.III-21 : Effet du mode d'usinage sur la rugosité avec le cermet.

$f_z=0,04\text{mm/dent}$; $a_p=0,2\text{mm}$.

III-2-5- Influence de l'arrosage sur la rugosité:

Les figures (III-22 à III-27) illustrent l'évolution de la rugosité de la surface usinée en fonction des paramètres du régime de coupe de coupe (V_c , a_p , f_z) pour le fraisage avec lubrification et sans lubrification. Ces essais ont été réalisés avec les deux matériaux de coupe utilisés dans notre étude « carbure revêtu et cermet ».

III-2-5-1- Avec carbure revêtu :

a- Influence de l'avance par dent sur la rugosité:

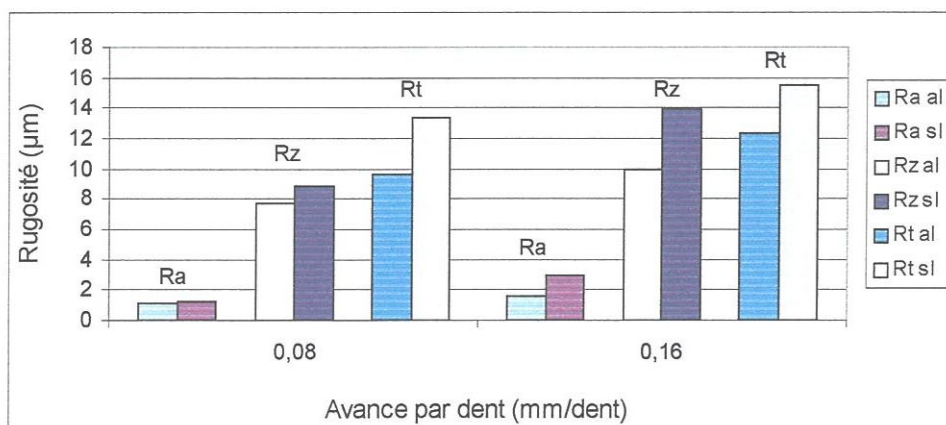
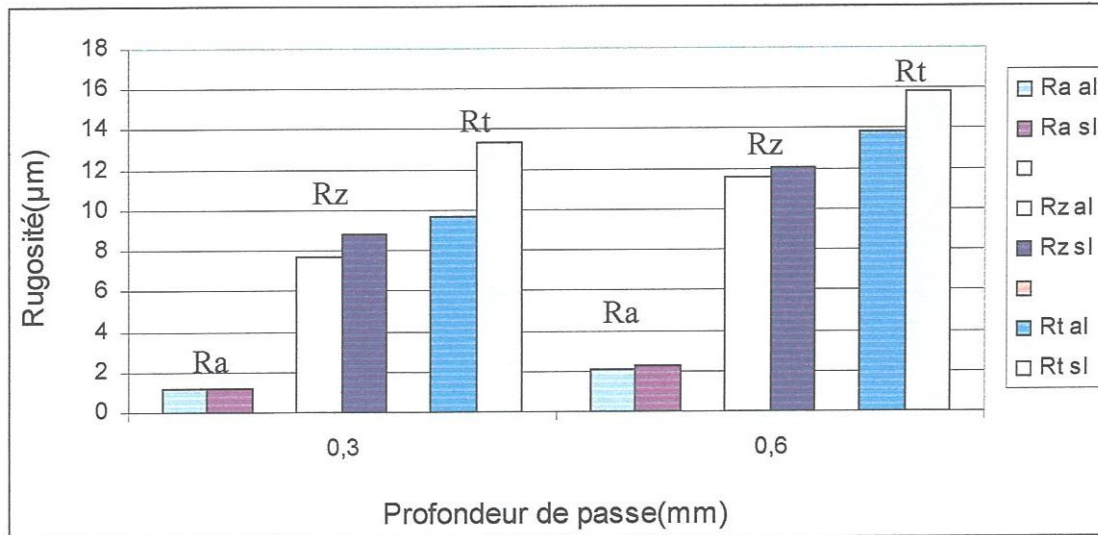


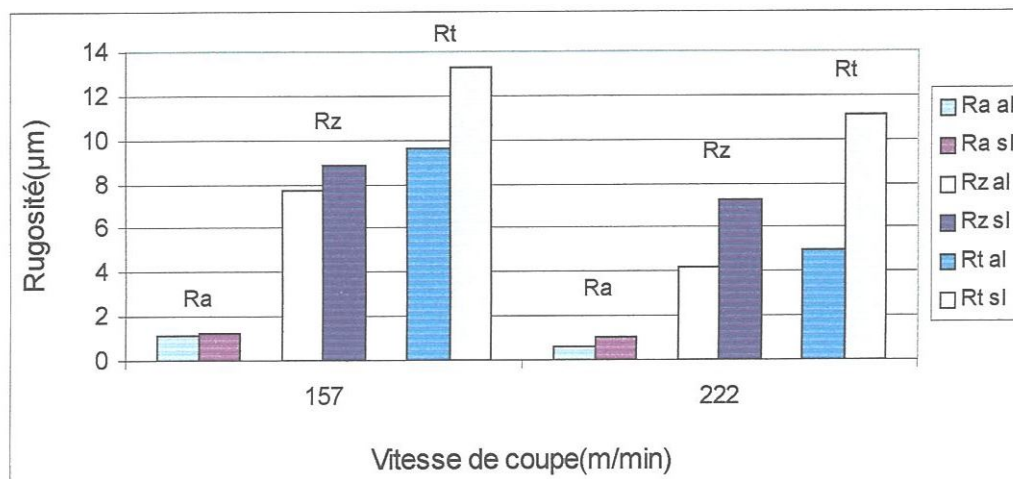
Fig. III-22 : Effet de l'arrosage sur la rugosité avec carbure revêtu

$V_c = 157\text{m/min}$; $a_p = 0,3\text{mm}$.

* al : Avec lubrification, sl : Sans lubrification,

b- Influence de la profondeur de passe sur la rugosité:**Fig. III-23:** Effet de l'arrosage sur la rugosité avec carbure revêtu

$V_c = 157 \text{ m/min}$; $f_z = 0,08 \text{ mm/dent}$.

c- Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité:**Fig. III-24 :** Effet de l'arrosage sur la rugosité avec carbure revêtu

$a_p = 0,3 \text{ mm}$; $f_z = 0,08 \text{ mm/dent}$.

Les figures (III-22 à III-24) illustrent l'évolution des différents critères de la rugosité de la surface usinée de l'acier inoxydable X2CrNi18-9 en fonction des paramètres de coupe. Ces figures montrent d'une manière générale que l'usinage avec lubrification donne des résultats meilleurs que l'usinage à sec pour différents paramètres de coupe. Cela est dû au fluide d'arrosage qui a permis le refroidissement du couple outil matière et l'évacuation du copeau enlevé. Ce qui a par conséquent empêché l'adhérence des micros copeaux.

III-2-5-2- Avec cermet :**a- Influence de l'avance par dent sur la rugosité:**

Les figures (III-25 à III-27) montrent l'évolution des différents critères (R_a , R_z , R_t) de la rugosité de la surface usinée de l'acier inoxydable X2CrNi18-9, en fonction des différents paramètres de coupe (f_z ; a_p ; V_c). D'une façon générale, ces figures montrent que l'usinage avec lubrification donne des résultats de rugosité meilleurs que celui à sec. Toutefois reste à remarquer que d'autant la différence entre ces deux modes d'usinage est claire quand on fait varier l'avance par dent (fig. III-25), d'autant cette différence devient assez faible pour la profondeur de passe (fig. III-26). Cela est dû au fait que le facteur prépondérant pour la rugosité est l'avance par dent, contrairement à la profondeur de passe.

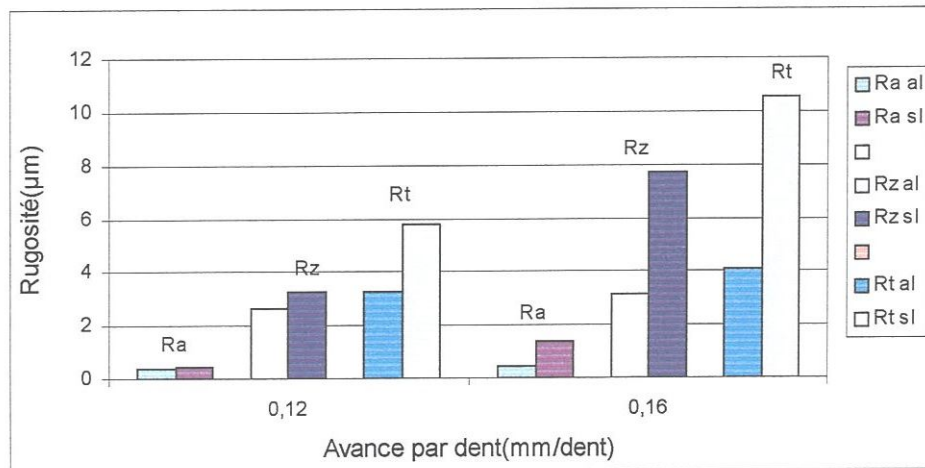


Fig. III-25 : Effet de l'arrosage sur la rugosité avec le cermet

$V_c = 222\text{m/min}$; $a_p = 0,3\text{mm}$.

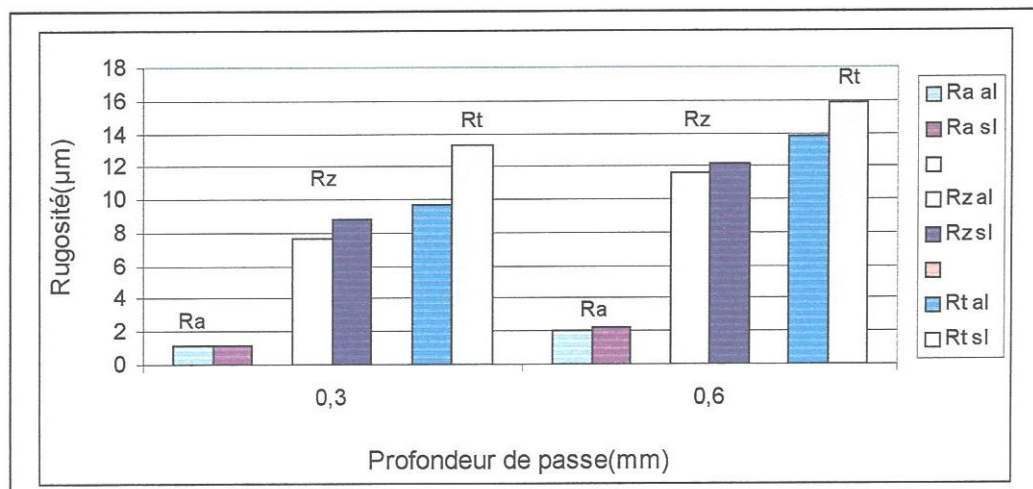
b- Influence de la profondeur de passe sur la rugosité:

Fig. III-26 : Effet de l'arrosage sur la rugosité avec le cermet

$V_c = 222\text{m/min}$; $f_z = 0,12\text{mm/dent}$.

c- Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité:

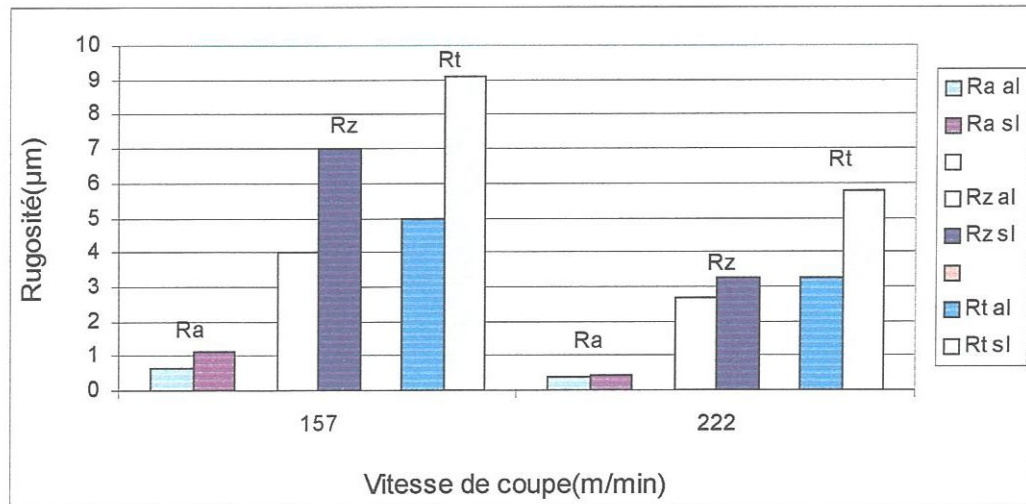


Fig. III-27 : Effet de l'arrosage sur la rugosité avec le cermet

$f_z = 0,12\text{mm/dent}$; $a_p = 0,3\text{mm}$.

III -3- EFFORTS DE COUPE:

Dans cette partie nous présentons à partir des figures (III-29 à III-36) les résultats de l'influence des conditions de coupe (V_c , f_z , a_p) sur les différentes composantes de l'effort de coupe (F_v , F_r , F_a) figure (III-28) dans une première étape. Dans une seconde étape l'influence du mode d'usinage (fraisage en opposition ou fraisage en concordance) en fonction des paramètres du régime de coupe sur les composantes de l'effort de coupe, lors du fraisage de l'acier X2CrNi18-9 avec les deux matériaux de coupe utilisés dans cette étude.

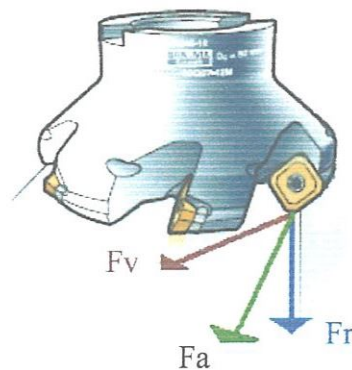


Fig. III-28 : Composantes de l'effort de coupe en fraisage.

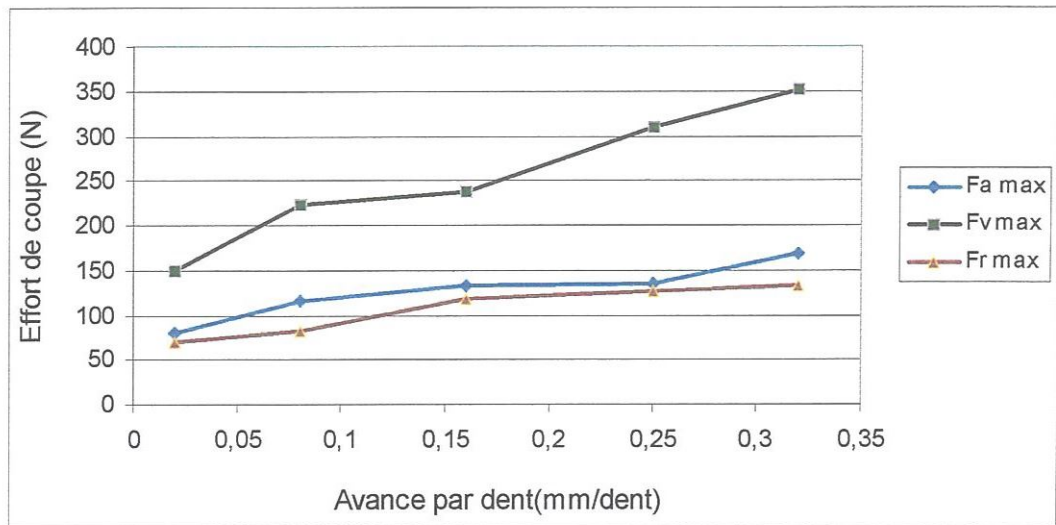
III-3-1/Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe pour le carbure revêtu:**III-3-1-1/ Influence de l'avance par dent:**

Fig.III-29 : Effet de l'avance par dent sur les efforts de coupe avec le carbure revêtu,

$V_c = 157 \text{ m/min}$; $a_p = 0,3 \text{ mm}$.

La figure III-29 présente l'évolution des efforts de coupe en fonction de l'avance par dent. Les résultats montrent une croissance des différentes composantes de l'effort de coupe avec la croissance de l'avance par dent. Ceci est dû au fait que cette dernière augmente la section de copeau cisailé, ce qu'il rend le métal plus résistant à la rupture et nécessite un effort plus grand pour l'enlèvement du copeau. On remarque que l'effort tangentiel est l'effort prépondérant par rapport aux deux autres et cela pour toutes les avances testées. Les conséquences sur le plan pratique de l'influence de l'avance par dent sur les efforts de coupe sont comme suit: L'augmentation de l'avance de 0,02 à 0,32 mm/dent fait croître les composantes de l'effort de coupe (Fa, Fv, Fr) respectivement de (107,4 ; 134,66; 91,3) %. On constate que l'effort tangentiel est l'effort le plus affecté par l'avance par dent, suivi par l'effort axial et en dernier lieu l'effort radial. Ceci est dû en fait au mouvement de coupe qui influe directement sur l'effort de coupe, ce qui classe ce dernier en premier lieu.

III-3-1-2- Influence de la profondeur de passe:

Les résultats sur la figure III-30 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. L'augmentation de la profondeur de passe fait croître directement la section du copeau, ce qui cause une augmentation de volume du métal cisailé et ceci nécessite un effort de coupe important pour l'enlever. Sur le plan pratique, avec l'augmentation de la

profondeur de passe de 0,2 à 1,5mm, on enregistre une augmentation des composantes de l'effort de coupe (F_a , F_v , F_r) successivement de (437 ; 115,3 ; 184) %. D'après ces résultats l'effort le plus affecté par la croissance de la profondeur de passe est l'effort axial suivi de l'effort radial et en dernière position l'effort tangentiel. Il faut noter que l'effort prépondérant ici est l'effort tangentiel suivi de l'effort axial et en dernier lieu l'effort radial.

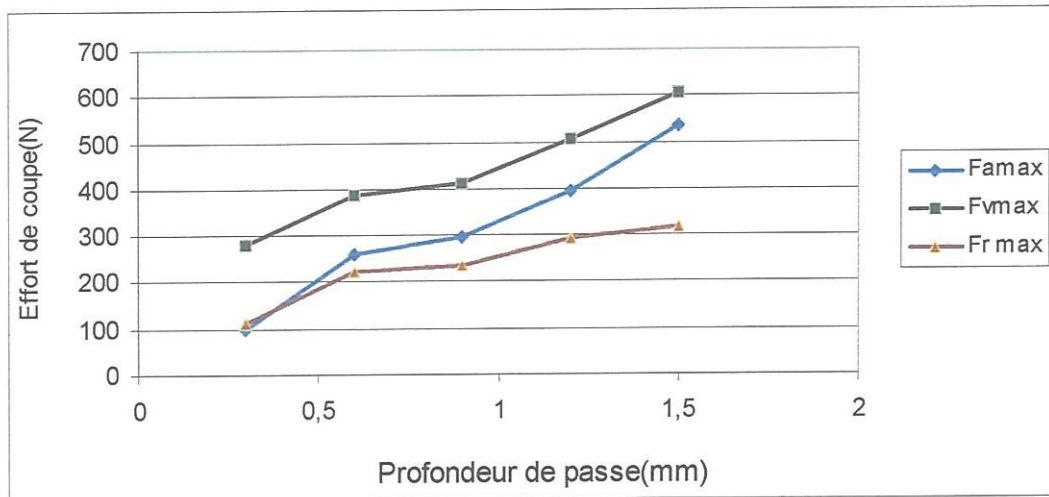


Fig. III -30: Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe avec carbure revêtu,
 $V_c = 157\text{m/min}$; $f_z = 0,12\text{ mm/dent}$.

III-3-1-3- Influence de la vitesse de coupe:

La figure III-31 montre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe. Les résultats présentés sur cette figure montrent qu'une augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution des composantes des efforts de coupe. Ceci est dû en fait à l'élévation de la température dans la zone de coupe comme le montre la figure III-32. D'après la couleur des copeaux qui rend le métal usiné plus plastique et par conséquent l'effort nécessaire à la coupe diminue. On remarque aussi l'apparition de l'arête rapportée avec l'augmentation de la vitesse de coupe comme indiquée dans la figure III-33. Cela est dû à la spécificité de l'usinage des aciers inoxydables (mauvaise conductibilité thermique). D'après l'examen de l'allure des courbes on aperçoit une nette diminution des efforts de coupe avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à $V_c=157\text{m/min}$ pour l'effort axial, vitesse après laquelle commence une certaine stabilité. Mais pour l'effort tangentiel et l'effort radial leur diminution continue avec l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à $V_c=222\text{m/min}$, vitesse après laquelle ces deux efforts se stabilisent. On enregistre alors d'une manière générale avec la variation de la vitesse de coupe de (78 à 314) m/min, une diminution des efforts de coupe

(F_a , F_v , F_r) respectivement de (73,56 ; 63,8 ; 64,4). Ces résultats montrent que l'effort axial est l'effort prépondérant comparativement aux deux autres.

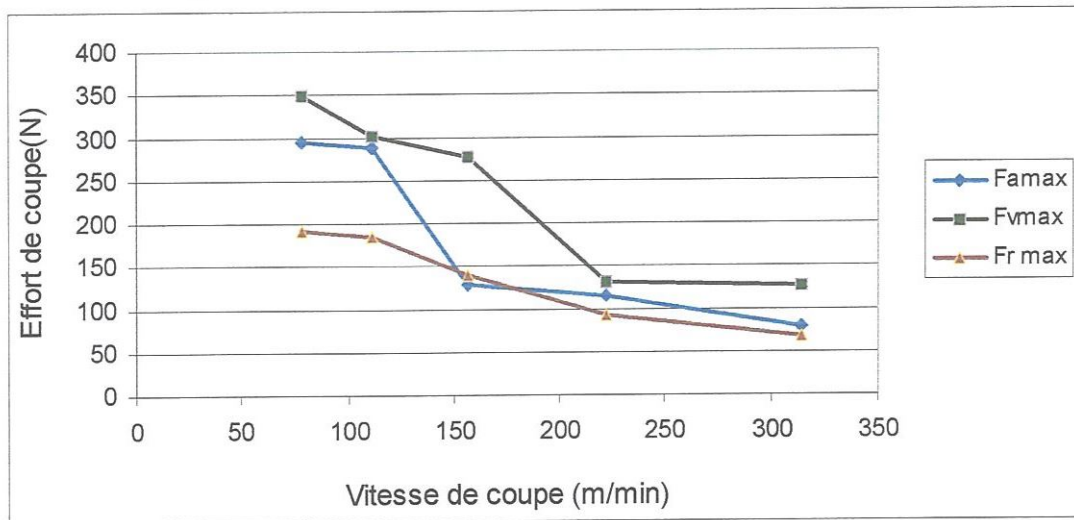


Fig. III- 31: Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe avec carbure revêtu, $f_z=0,12\text{mm/dent}$; $a_p=0,3\text{ mm}$.

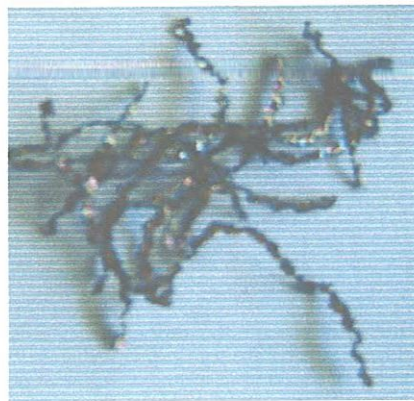


Fig. III- 32: Copeaux dans les conditions de coupe : $V_c=314\text{m/min}$, $f_z=0,12\text{mm/min}$, $a_p=0,3\text{mm}$.

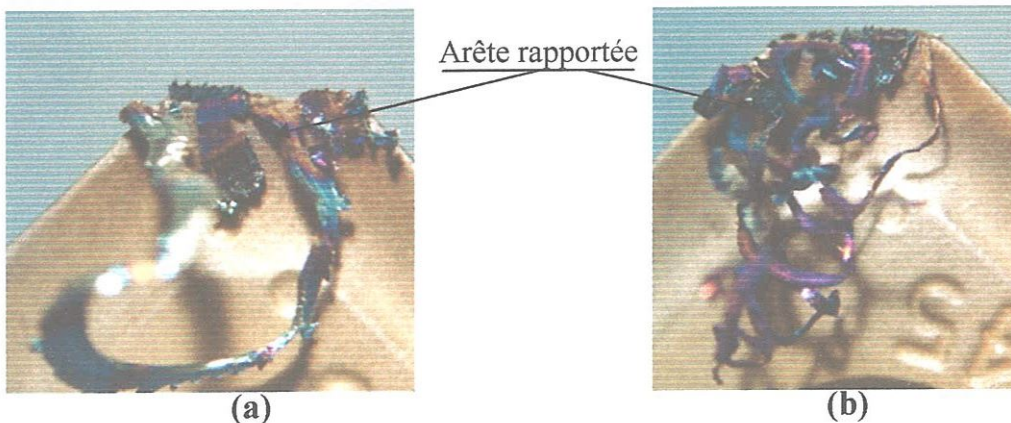


Fig. III-33: arête rapportée, $V_c=314\text{ m/min}$, $f_z=0,12\text{ mm/dent}$, $a_p=0,3\text{ mm}$

III-3-2/ Influence des paramètres de coupe sur les efforts de coupe pour le cermet:

III-3-2-1/ Influence de l'avance par dent:

Les résultats de la figure III-34 montrent l'impact de l'avance par dent sur les efforts de coupe, lors du fraisage de l'acier X2CrNi18-9. L'augmentation de l'avance par dent accroît la section du copeau à enlever, ce qui rend le métal déformé difficile à usiner et nécessite un effort de coupe important pour le cisaillement du copeau. Cette augmentation d'avance s'est répercutée sur une augmentation des efforts de coupe. Ce qui a donné en pratique pour un intervalle d'avance par dent qui vari de (0,02 à 0,32) mm/dent, une croissance des composantes des efforts de coupe (F_a , F_v , F_r) respectivement de (68 ; 74,2 ; 62,9) %. Ces résultats montrent que l'effort tangentiel est l'effort prépondérant, en deuxième lieu se classe l'effort axial (ou l'effort d'avance), suivi en fin par l'effort radial.

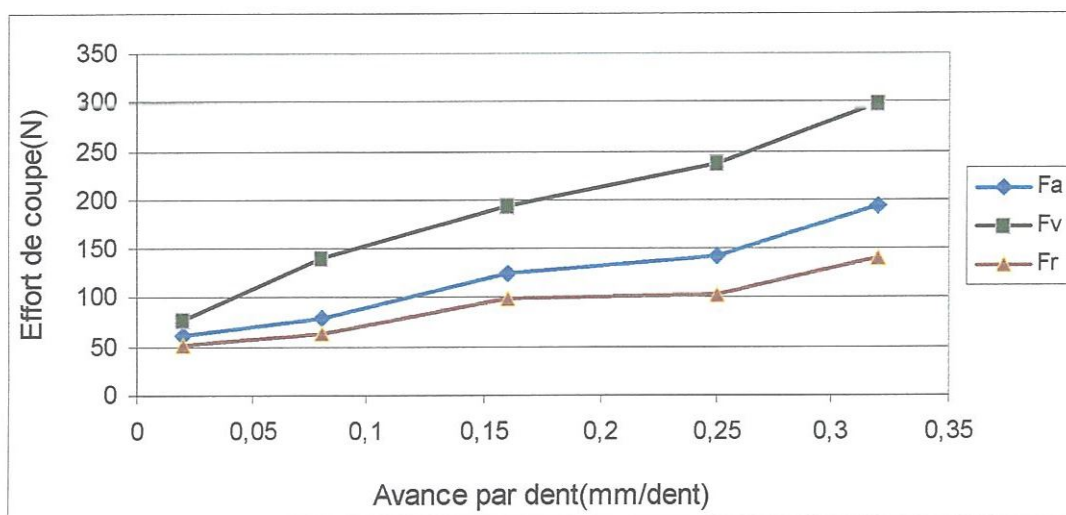


Fig. III -34. Evolution de l'avance par dent sur les efforts de coupe avec le cermet.

$V_c = 157 \text{ m/min}$; $a_p = 0,3 \text{ mm}$.

III-3-2-3- Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe:

La figure III-35 illustre l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe. Les résultats de cette figure montrent que l'effort de coupe se comporte inversement proportionnel avec l'augmentation de la vitesse de coupe, plus la vitesse croît plus l'effort décroît. Ceci est dû à la plasticité du matériau usiné, causée par l'élévation de la température dans la zone de coupe. D'après l'allure de ces courbes on remarque que la pente des courbes est très accentuée au début et ceci dans le premier intervalle de la vitesse de coupe qui vari de (78 à 157) m/min, c'est-à-dire pour les faibles vitesses. Cette diminution est de l'ordre de

(43,7 ; 44,3 ; 39,7) % respectivement pour les trois composantes de l'effort de coupe (F_a , F_v , F_r). Dans le deuxième intervalle de la vitesse de coupe, on remarque une certaine stabilité pour les trois composantes, on enregistre une diminution de (F_a , F_v , F_r) respectivement de (33 ; 35,4 ; 11,76) %. Cette analyse des allures des courbes, nous permet de dire que l'effort de coupe est très influencé par les faibles vitesses de coupe.

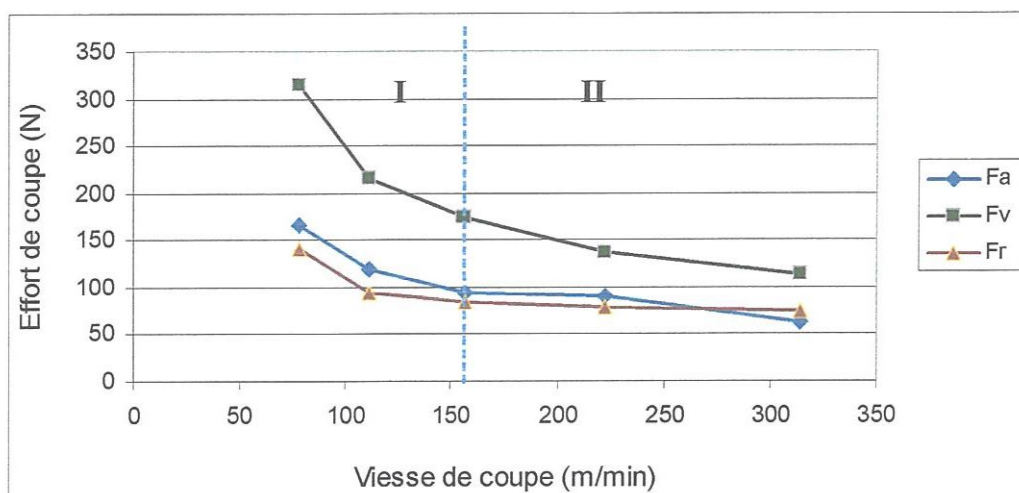


Fig. III- 35 : Evolution de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe avec le cermet.

$f_z = 0,12 \text{ mm/dent}$; $a_p = 0,3 \text{ mm}$.

III-3-2-2- Influence de la profondeur de passe:

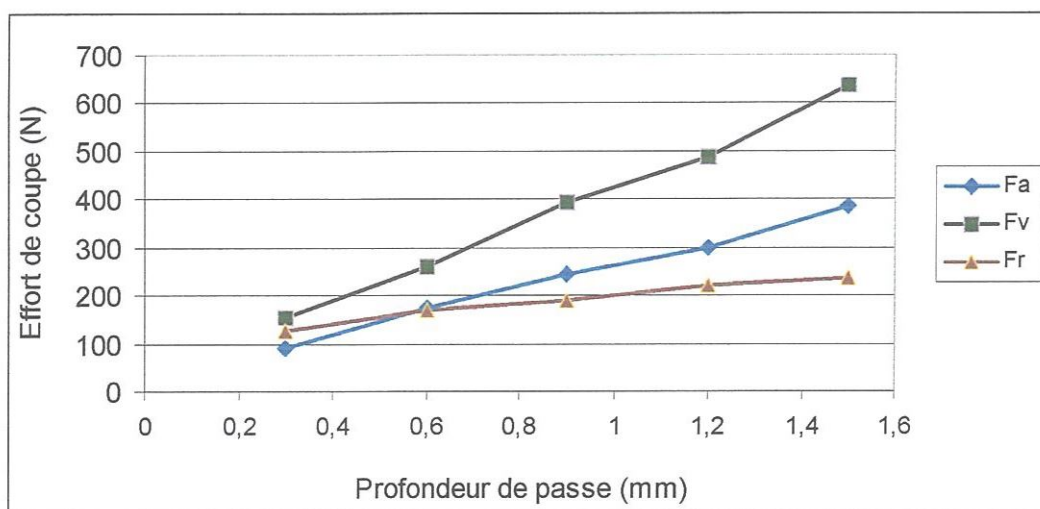


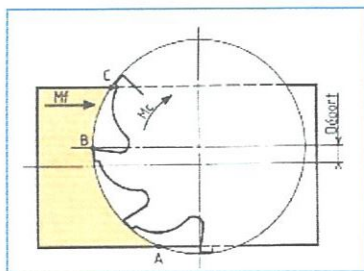
Fig. III -36: Evolution de la profondeur de passe sur les efforts de coupe avec le cermet.

$V_c = 157 \text{ m/min}$; $f_z = 0,12 \text{ mm/dent}$.

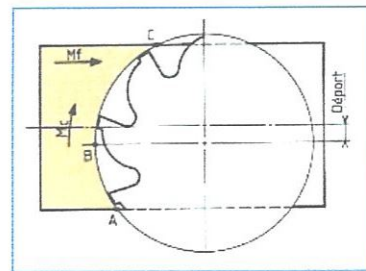
La figure III-36 présente l'influence de la profondeur de passe sur les efforts de coupe lors du fraisage de l'acier X2CrNi18-9. Les résultats montrent une augmentation des efforts de coupe avec la croissance de la profondeur de passe, ceci est également à cause de la croissance de la section du copeau et alors la croissance du métal déformé. On remarque dans cette figure, dans un premier temps que l'effort axial est le plus faible parmi les trois composantes. Mais sa croissance devient plus importante que l'effort radial à partir de la profondeur de passe 0,6mm. Sur le plan pratique, en augmentant la profondeur de passe 5 fois, on enregistre une croissance des efforts de coupe (F_a , F_v , F_r) respectivement de (331,5 ; 311,6 ; 84,25) %. Ces résultats montrent que la profondeur de passe influence en premier lieu l'effort axial ainsi que l'effort tangentiel, suivi finalement par l'effort radial. En plus des faits cités avant qui causent l'augmentation des efforts de coupe, on peut peut-être ajouter la dureté de ce matériau de coupe qui travaille en coupe discontinue, de ce fait les plaquettes de coupe s'ébrèchent, ce qui favorise par conséquent cette croissance des efforts de coupe.

III-3-3-Influence du mode d'usinage:

Les figures (III-38 à III-43) illustrent l'évolution de l'effort de coupe en fonction des régimes de coupe pour les deux matériaux étudiés et cela pour deux modes d'usinage (fraisage en opposition et fraisage en concordance figure III-37).



a- Fraisage en opposition



b- Fraisage en concordance

Fig.III-37 : mode d'usinage.

III-3-3-1- Avec carbure revêtu :

a- Influence de l'avance par dent:

Les résultats sur ces figures montrent d'une manière générale qu'avec le fraisage en concordance on fournit moins d'effort qu'avec le fraisage en opposition pour toutes les composantes d'effort de coupe. Cela est dû au fait que pour le fraisage en opposition, l'opposition des deux mouvements, mouvement de coupe et mouvement d'avance, augmente

la résistance à la coupe ce qui nécessite un surplus d'effort ; tandis que pour le fraisage en concordance la résistance à la coupe diminue car la coupe à lieu par l'arrière de l'avance. On remarque pour toutes ces figures que l'effort tangentiel est l'effort prépondérant pour les deux modes d'usinage.

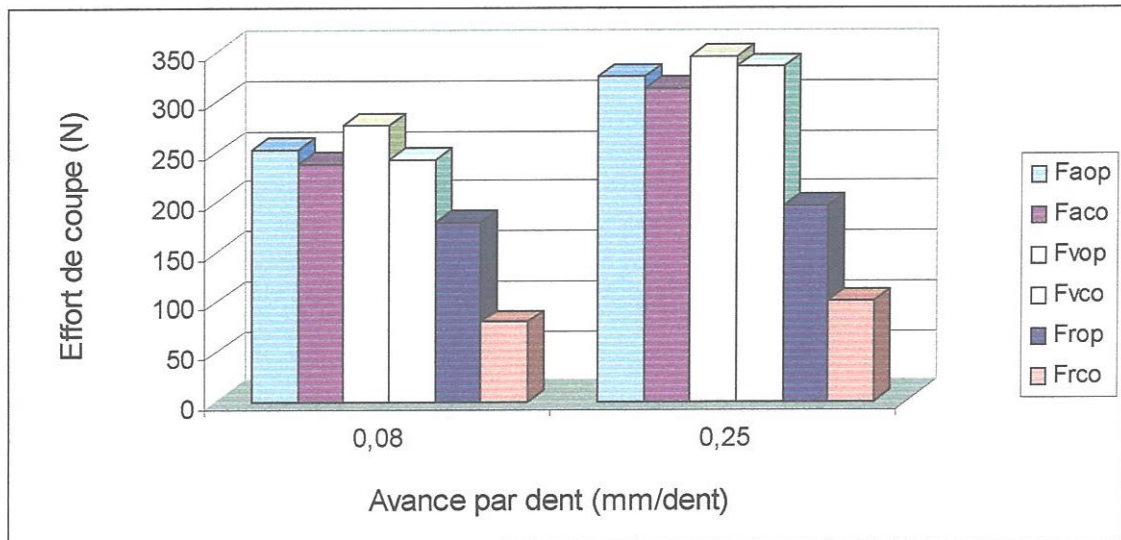


Fig. III-38 : Effet du mode d'usinage sur l'effort de coupe avec le carbure revêtu.

$V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,3\text{mm}$.

b- Influence de la vitesse de coupe :

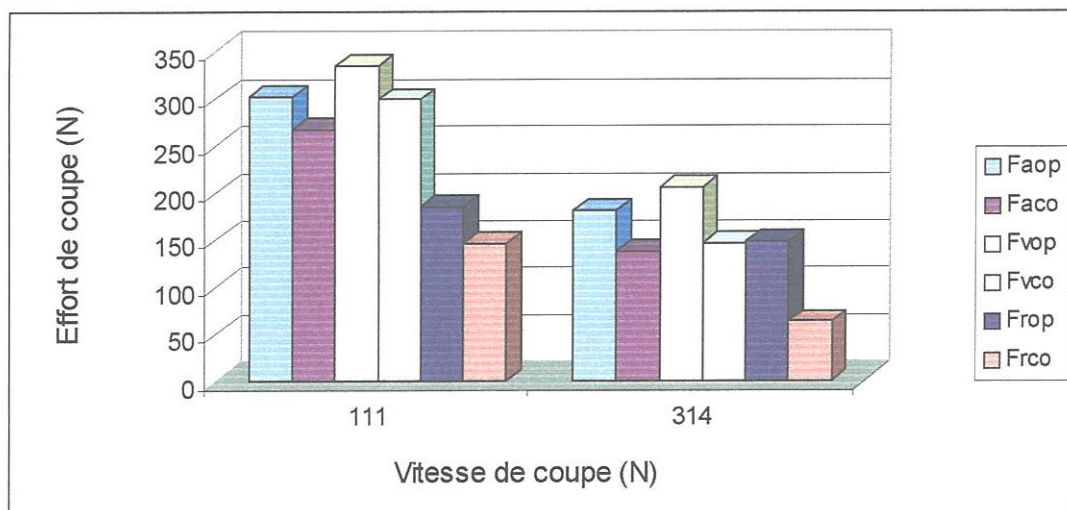


Fig. III-39 : Effet du mode d'usinage sur l'effort de coupe avec le carbure revêtu.

$f_z=0,12\text{mm/dent}$; $a_p=0,3\text{mm}$.

c- Influence de la profondeur de passe :

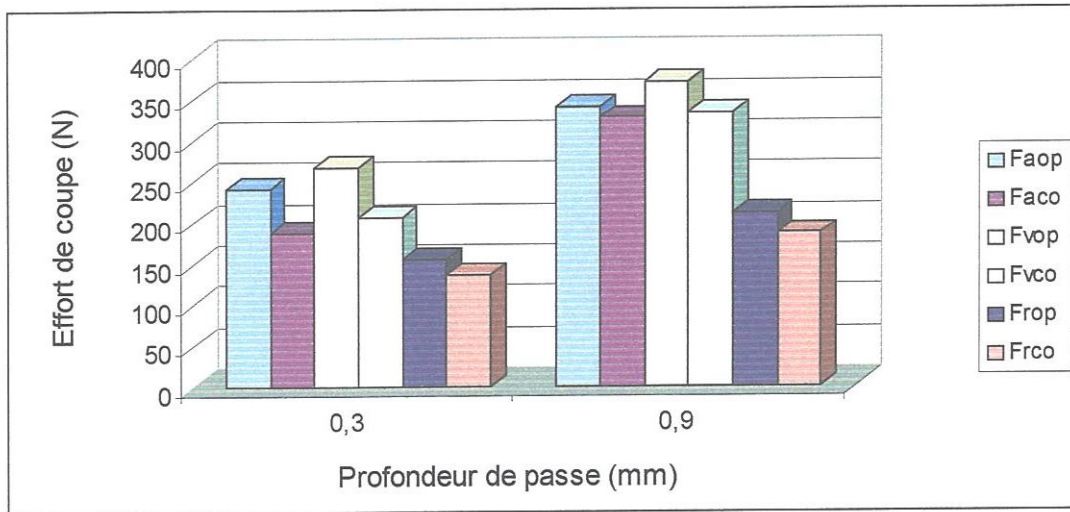


Fig. III-40 : Effet du mode d'usinage sur l'effort de coupe avec le carbure revêtu.

$V_c=157\text{m/min}$; $f_z=0,12\text{mm/dent}$.

III-3-3-2- Avec cermet :

a- Influence de l'avance par dent:

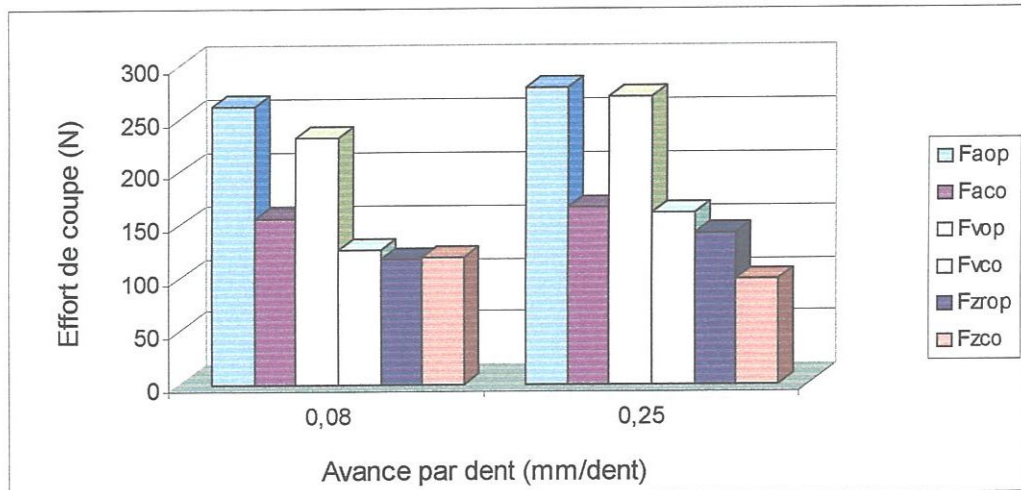


Fig. III-41 : Effet du mode d'usinage sur les efforts de coupe avec le cermet,

$V_c=157\text{m/min}$; $a_p=0,3\text{mm}$.

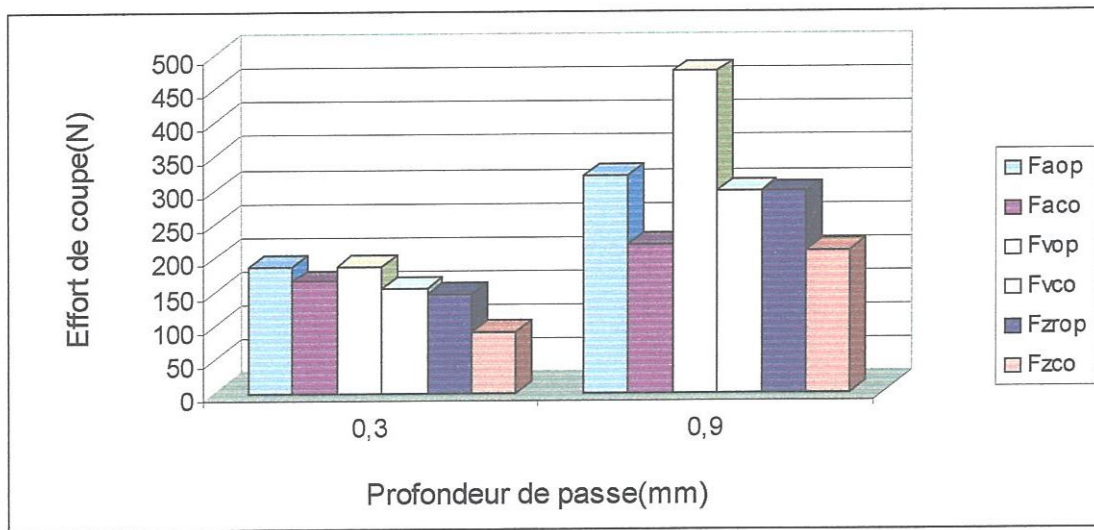
b- Influence de la profondeur de passe :

Fig. III-42 : Effet du mode d'usinage sur les efforts de coupe avec le cermet,
 $V_c=157\text{m/min}$; $f_z=0,12\text{mm/dent}$.

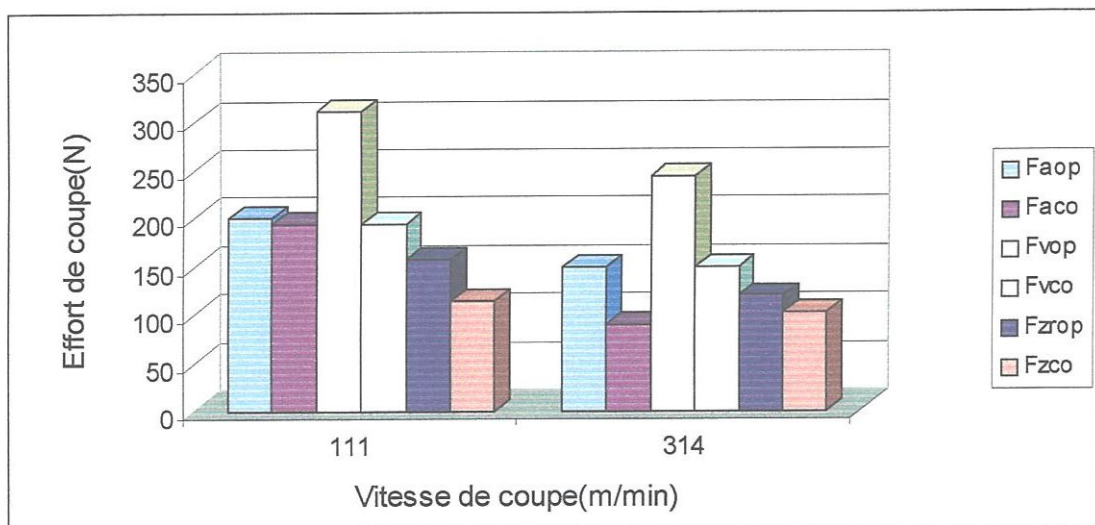
c- Influence de la vitesse de coupe :

Fig. III-43 : Effet du mode d'usinage sur les efforts de coupe avec le cermet,
 $f_z=0,12\text{mm/dent}$; $a_p=0,3\text{mm}$.

Les figures III-41 à III-43 illustrent l'effet des différents paramètres du régime de coupe (f_z, a_p, V_c) sur les efforts de coupe pour les deux modes d'usinage, fraisage en opposition et fraisage en concordance. Les résultats de ces figures montrent d'une façon générale, qu'avec le fraisage en opposition les efforts de coupe fournis sont supérieurs à ceux en fraisage en concordance pour toutes les composantes d'effort de coupe (F_a, F_v, F_r). La cause est la

confrontation face à face du mouvement de coupe avec le mouvement d'avance pour le fraisage en opposition. Ce qui cause un accroissement de la résistance à la coupe, d'où un supplément d'effort sera nécessaire. Par contre pour le fraisage en concordance cette résistance à la coupe n'aura pas lieu car la coupe se fait dans le même sens que le déplacement. On remarque dans toutes ces figures que l'effort tangentiel est l'effort prépondérant pour les deux modes d'usinage.

III- 4- EVOLUTION DE L'USURE DES MATERIAUX ETUDIES:

III-4-1- Introduction:

Dans cette partie nous présentons les résultats de l'influence des deux paramètres de régime de coupe (V_c , f_z) sur l'usure des plaquettes de coupe en fonction de la longueur de coupe. Ainsi que les résultats de la rugosité de la surface usinée de l'acier X2CrNi18-9 en fonction de l'usure de la fraise.

Notons que le type de l'usure que nous avons pris en considération dans nos essais, est surtout l'usure en dépouille (VB) avec une valeur admissible égale à (0,3mm) selon la norme I.S.O. Ce choix vient du fait que notre plaquette de coupe possède un brise copeau, ce qui minimise le contact copeau – face d'attaque de la plaquette de coupe, par conséquent l'outil sera beaucoup plus affectée par l'usure en dépouille qu'avec l'usure en cratère.

III-4-2- Mécanisme de maintien de la plaquette de coupe:

Du faite que les plaquettes de coupe que nous avons utilisé dans nos essais d'usure sont de forme prismatiques et possédant une inclinaison de la face de dépouille d'un angle de 23° . Il est alors difficile de prendre une mesure de l'usure sur le microscope optique. Afin de pouvoir faire les mesures avec le maximum de précision possible, nous avons conçu et réaliser un mécanisme permettant le maintien rapide des plaquettes avec une grande précision figure III-44. Ce mécanisme est spécifique pour ces plaquettes de coupe qui ont une forme bien déterminée.

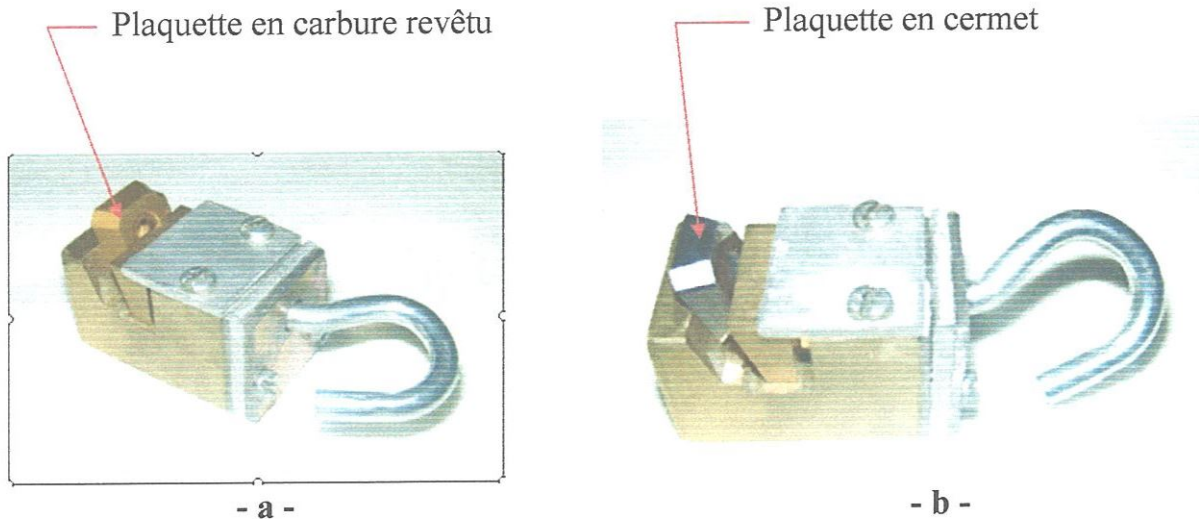


Fig.III-44: mécanisme de maintien des plaquettes de coupe.

III-4-3- Essais d'usure :

Les essais d'usure que nous avons réalisé, ont été menés en utilisant comme matériaux de coupe le carbure revêtu et en suivant un plan d'expérience 2². Nous avons pris comme paramètres variables la vitesse de coupe et l'avance par dent, alors que la profondeur de passe reste constante.

III-4-3-1-: Usure en dépouille en fonction de la longueur de coupe:

a- Premier régime de coupe :

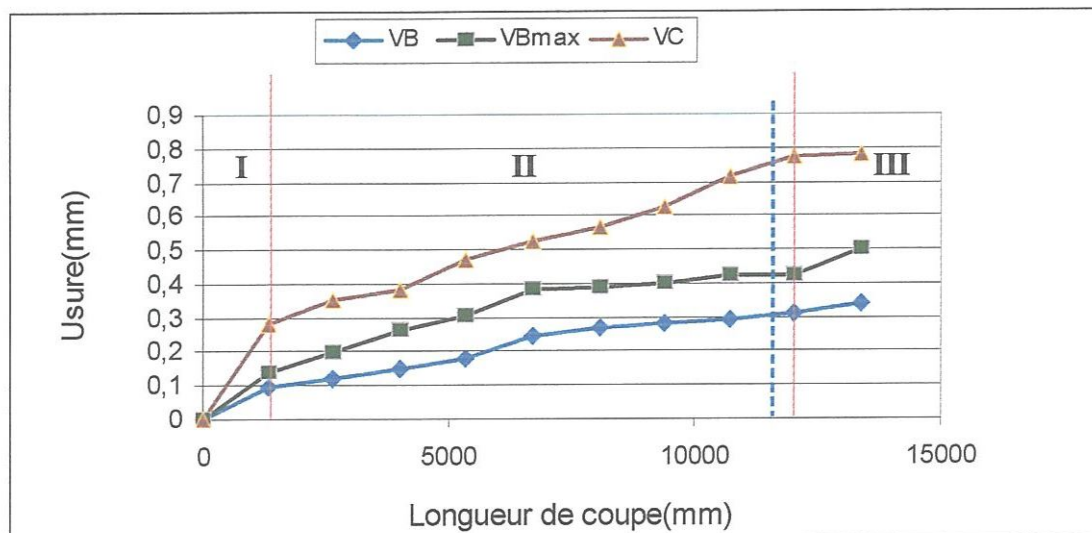


Fig.III-45- Usure en fonction de la longueur de coupe.

$V_c = 111 \text{ m/min}$; $f_z = 0,11 \text{ mm/dent}$; $a_p = 0,6 \text{ mm}$.

La figure III-45 illustre l'évolution de l'usure en fonction de la longueur de coupe (L_c). Les résultats sur cette figure montrent les trois formes d'usure qui sont : l'usure en dépouille (VB), l'usure en dépouille maximale (VBmax) et l'usure sur le bec de l'outil (VC). La valeur de l'usure mentionnée sur la courbe est la moyenne des cinq plaquettes de coupe de la fraise utilisée dans ces essais. Pour un faible régime de coupe [$V_c=111\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$]. Les résultats obtenus montrent que l'usure passe par trois étapes. La première étape montre une usure relativement accélérée, qui atteint $VB=0,094\text{mm}$ pour une longueur de coupe $L_c=1334\text{mm}$; ceci s'explique par la première mise en service de l'outil, qui favorise l'enlèvement du revêtement et l'élimination des aspérités au niveau des arêtes de coupe. La seconde étape représente la période d'usure normale, pendant laquelle l'outil parcourt une longueur de coupe $L_c=10720\text{mm}$ c'est-à-dire pour une longueur de coupe totale de $L_c=12060\text{mm}$ on atteint une usure $VB=0,312\text{mm}$. Au-delà de ce point, la température dans la zone de contact de la partie active va augmenter de plus en plus. Ce qui favorise l'accélération du mécanisme d'usure. Par conséquent l'outil perd ses qualités de coupe, Son changement alors devient indispensable. La figure III-46 illustre la morphologie de l'usure de l'une des plaquettes de coupe à différentes étapes.

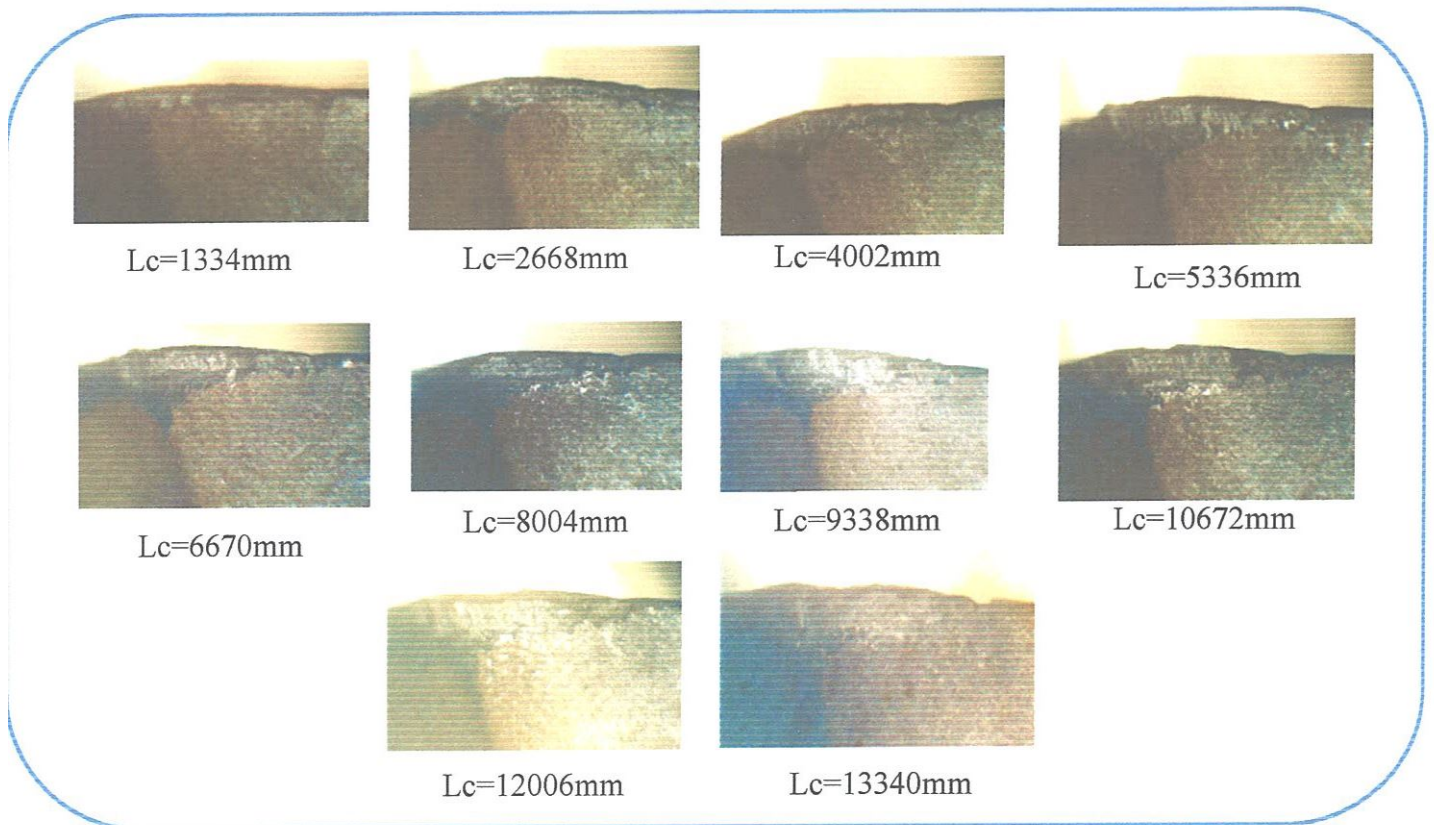
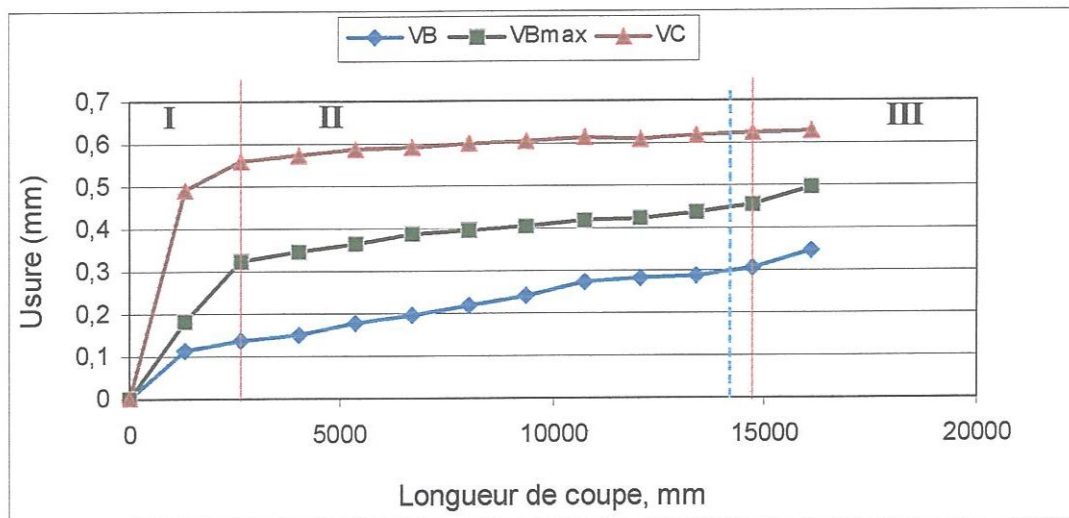


Fig.III-46 : Micrographies de l'usure pour une plaquette de coupe (régime : 1)

$V_c=111\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

b- Deuxième régime de coupe :**Fig.III-47-** Usure en fonction de la longueur de coupe.

$V_c = 111 \text{ m/min}$; $f_z = 0,22 \text{ mm/dent}$; $a_p = 0,6 \text{ mm}$.

La figure (fig. III-47) montre l'influence de la longueur de coupe sur les différentes formes d'usure (VB, VBmax, VC). La valeur de l'usure mentionnée sur la courbe est la moyenne des cinq plaquettes de coupe en carbure revêtu de la fraise que nous avons utilisée dans nos essais de fraisage de l'acier X2CrNi18-9. D'après l'allure des courbes de cette figure, on peut diviser cette dernière en trois phases. En augmentant l'avance par dent du double tout en gardant la vitesse de coupe et la profondeur de passe constantes. On observe qu'il y a une usure rapide dans la première phase jusqu'à atteindre respectivement ($VB=0,137$; $VB_{\max}=0,322$; $VC=0,559$) mm pour une longueur de coupe de l'ordre de $L=2680 \text{ mm}$. Donc c'est une usure accélérée, et sa représente la période de jeunesse. Ceci est dû à l'enlèvement du revêtement sur l'arête de coupe. Dans la deuxième phase on remarque une certaine stabilité jusqu'à ($VB=0,3$; $VB_{\max} = 0,45$; $V_c=0,62$) mm. Valeur à partir de laquelle, l'usure prend une allure assez accentuée. Cette deuxième phase est assez stable, pendant laquelle plus de 9660 mm de longueur de coupe exécutée, ce qui représente 3,5 fois plus la période de jeunesse. Ce qui représente un assez bon résultat. La figure III-48 illustre le suivi de la morphologie de l'une des plaquettes de coupe à différentes étapes.

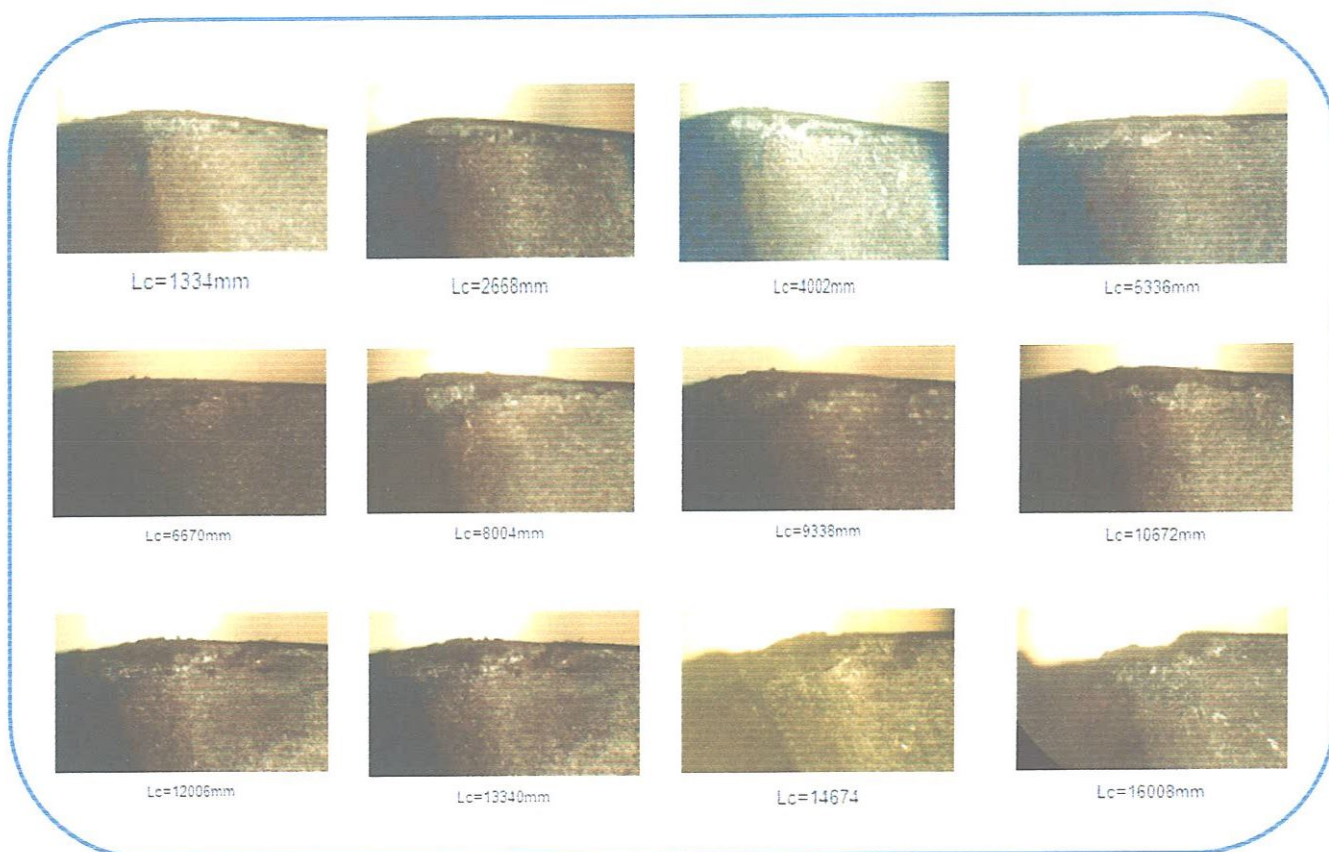


Fig. III- 48 : Micrographies de l'usure en dépouille pour une plaquette de coupe (régime : 2)
 $V_c=111\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

Troisième régime de coupe :

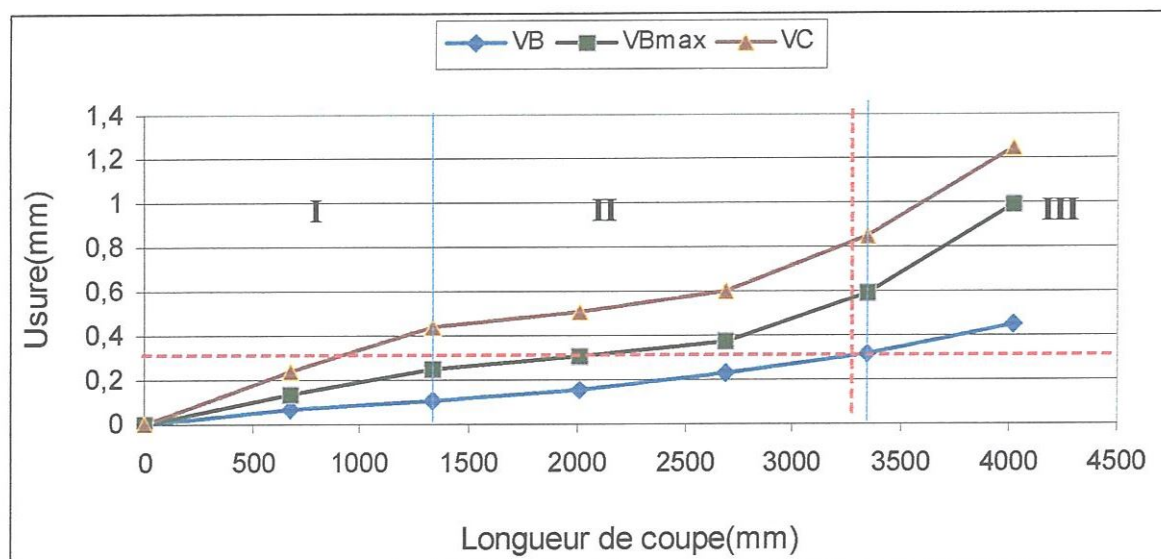


Fig. III- 49 : Usure en fonction de la longueur de coupe.
 $V_c = 222\text{m/min}$; $f_z = 0,11\text{mm/dent}$; $a_p = 0,6\text{mm}$.

La figure III-49 montre l'évolution de l'usure en fonction de la longueur de coupe avec les conditions du régime de coupe ($V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$). Les résultats de cette figure montrent qu'après une longueur de coupe usinée de l'ordre de 1340mm , on abouti déjà à une usure en dépouille de l'ordre de ($VB=0,101$; $VB_{\text{max}}=0,245$; $VC=0,442$) mm. Cela veut dire qu'on a une phase d'usure assez rapide «période de jeunesse». Ceci s'explique par l'enlèvement du revêtement des plaquettes de coupe et au rodage de l'outil. La seconde phase qui est si rapide au cours de laquelle on abouti à l'usure en dépouille admissible après seulement une longueur de coupe dans cette zone de l'ordre de $L_c \approx 2000\text{mm}$. Cela veut dire qu'on augmentons la vitesse de coupe du double tout en gardant les autres facteurs de coupe constant (comparativement au premier régime), La longueur totale usinée est de l'ordre de $L_c=3346\text{mm}$. Ce qui représente une tenue de l'outil plus de 3,5 fois moins. Cela est dû à l'élévation de la température dans la zone de contact du couple outil matière avec l'augmentation de la vitesse de coupe (figure III-50). Ce qui montre nettement à quel degré la vitesse de coupe affecte l'usure de l'outil, comme cela se présente clairement par le suivi de la morphologie de l'usure de l'une des plaquettes de coupe à différentes étapes (figure. III- 51).

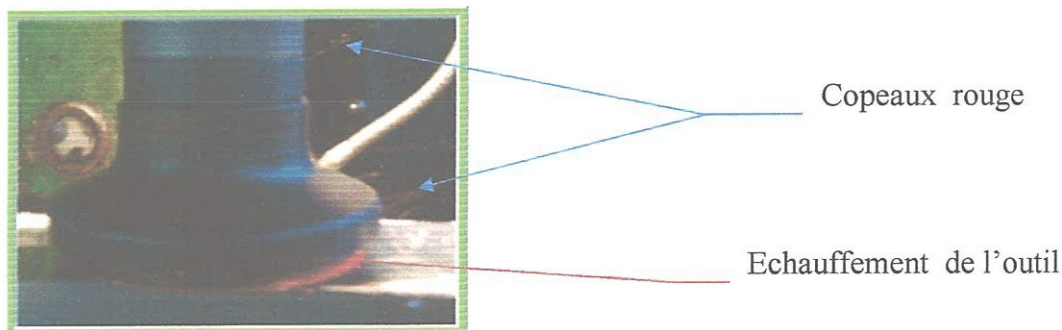


Fig. III-50 : Essais d'usure avec :
 $V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

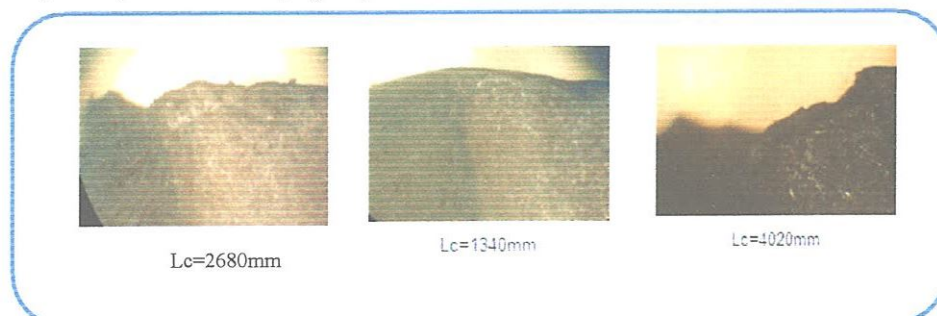


Fig. III-51 : Micrographies de l'usure en dépouille pour une plaquette de coupe (régime : 3)
 $V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

d- Quatrième régime de coupe :

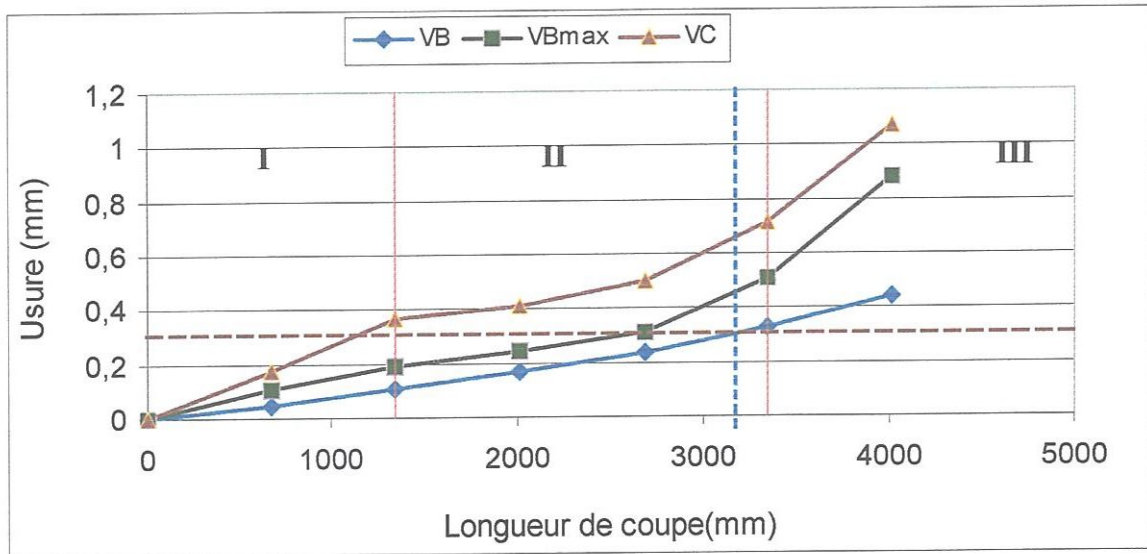


Fig.III-52- Usure en fonction de la longueur de coupe.

$V_c = 222\text{m/min}$; $f_z = 0,22\text{mm/dent}$; $a_p = 0,6\text{mm}$.

La figure III-52 montre l'influence de la longueur de coupe sur les différentes formes d'usure quand les paramètres du régime de coupe sont ($V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$). Après la première longueur de coupe usinée ($L_c=1340\text{mm}$), l'usure en dépouille à laquelle on a abouti est de l'ordre de ($VB=0,101$; $VB_{\max}=0,245$; $VC=0,442$) mm. Ces résultats montrent la rapidité avec laquelle s'use l'outil pendant cette phase de sa vie « phase de rodage ». La deuxième phase qui est si rapide au cours de laquelle on est arrivé à l'usure en dépouille admissible ($VB=0,3\text{mm}$ selon la norme ISO) après seulement une longueur de coupe de l'ordre de $L_c \approx 1700\text{mm}$. Ce qui veut dire En doublant la vitesse de coupe et l'avance par dent, la tenue de l'outil diminue approximativement 5 fois moins ($L_c=1768\text{mm}$). Ceci s'explique par l'élévation de la température dans la zone de coupe avec l'accroissement de la vitesse de coupe (figure III- 53). Ce qui active par conséquent les différents mécanismes d'usure (abrasion, adhésion et diffusion). La figure III- 54 illustre les micrographies de la morphologie de l'usure d'une plaquette de coupe. L'endommagement qu'a subi la plaquette montre à quel point la vitesse de coupe et l'avance par dent influent sur l'usure des plaquettes et par conséquent sur la tenue.

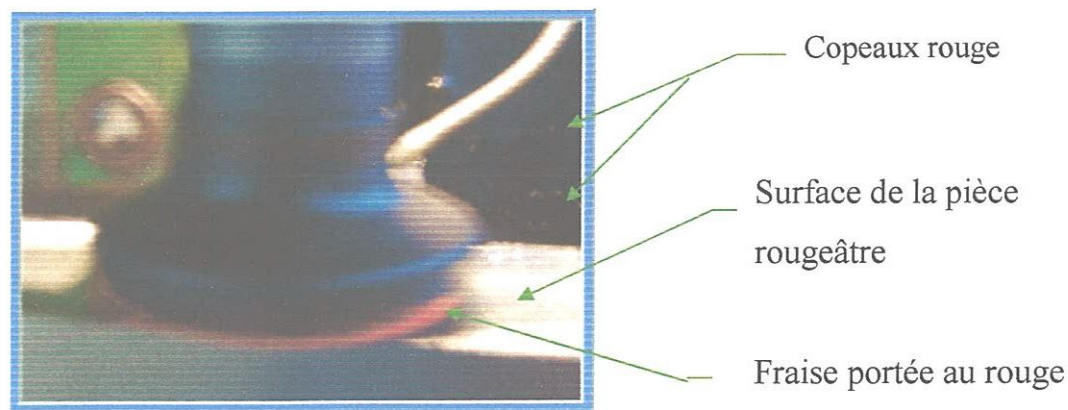


Fig. III-53 : Essais d'usure avec :

$V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

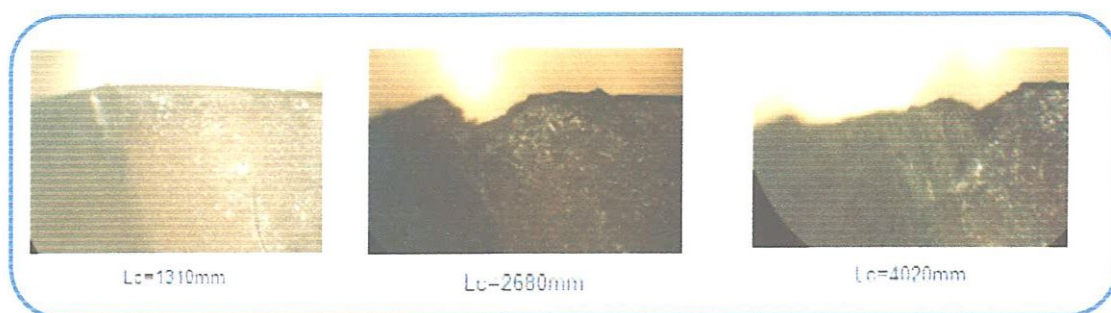


Fig. III-54 : Micrographie de l'usure en dépouille pour une plaquette de coupe (régime : 4)

$V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

III-4-3-2- Rugosité de la surface usinée en fonction de l'usure en dépouille :

a- Premier régime :

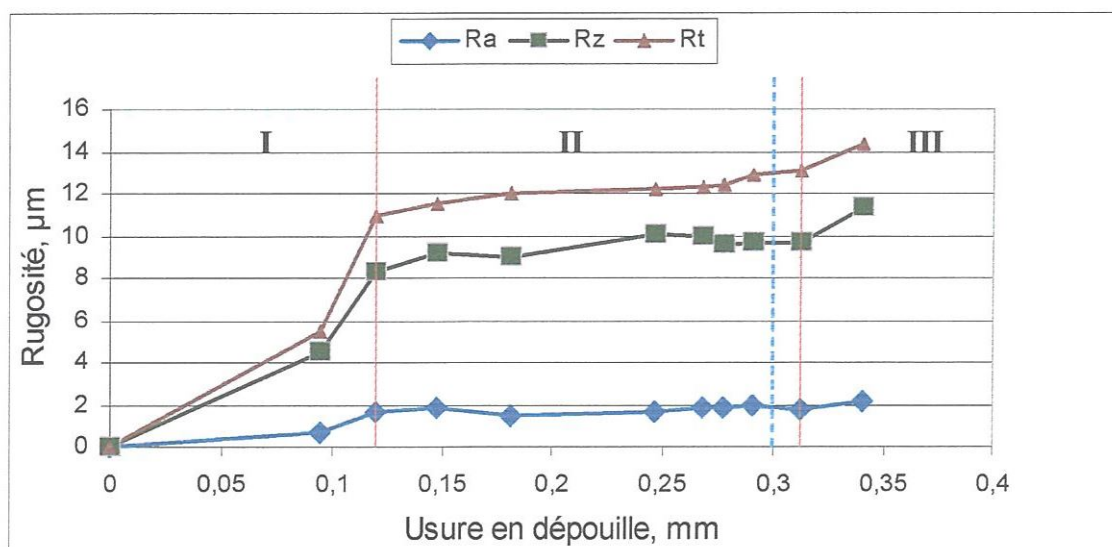


Fig. III-55- Rugosité en fonction de l'usure en dépouille.

$V_c = 111\text{m/min}$; $f_z = 0,11\text{mm/dent}$; $a_p = 0,6\text{mm}$.

La figure (fig. III-55) illustre l'évolution de la rugosité de la surface usinée en fonction de l'usure en dépouille pour un régime de coupe ($V_c=111\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$). Les résultats de cette figure montre une augmentation marquante de la rugosité dans la première zone, qui est respectivement pour les différent critères (R_a , R_z , R_t) de l'ordre de $(1,61 ; 8,33 ; 10,93) \mu\text{m}$, pour une usure en dépouille ($VB = 0,12\text{mm}$) après une longueur de coupe de ($L_c=2680\text{mm}$) figure III-56. Dans la deuxième zone qui correspond à la phase de l'usure normale, on enregistre une certaine stabilité de la rugosité pour les trois critères (R_a ; R_z ; R_t) qui est successivement de l'ordre de $(1,77 ; 9,62 ; 13,08) \mu\text{m}$ avec une usure ($VB=0,3\text{mm}$) après une longueur de coupe ($L_c=12060\text{mm}$) figure III-57. Ceci peut être expliqué par l'arrête rapportée sur les plaquettes de coupe qui augmente la courbure du rayon de l'arrête tranchante et alors minimise la profondeur des sillons creusés sur la surface usinée, ce qu'il améliore l'état de la surface. Dans la zone III qui commence à partir de $VB=0,312\text{mm}$ on remarque que la rugosité prend une allure ascendante de nouveau après une certaine stabilité.

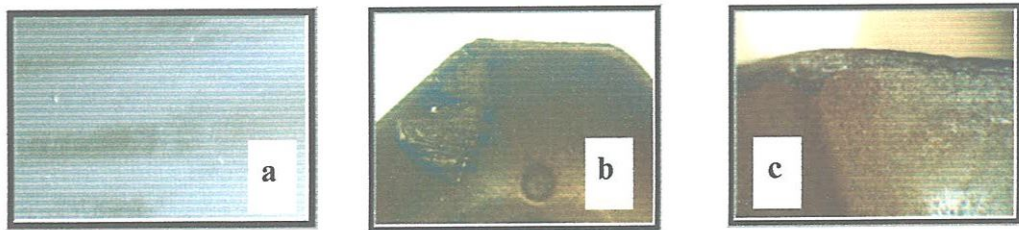


Fig. III-56 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=2680\text{mm}$),

$V_c=111\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

a- Etat de la surface usinée

b- Arête rapportée

c- Usure en dépouille de la plaquette

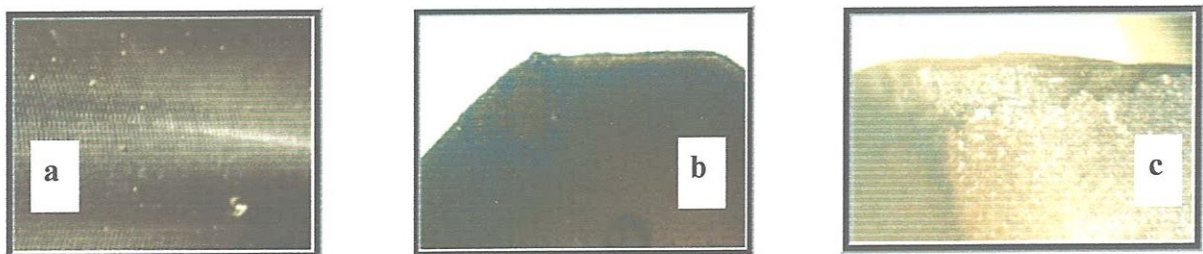


Fig. III-57 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=12060\text{mm}$),

$V_c=111\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

a- Etat de la surface usinée

b- Arête rapportée

c- Usure en dépouille de la plaquette

b- Deuxième régime :

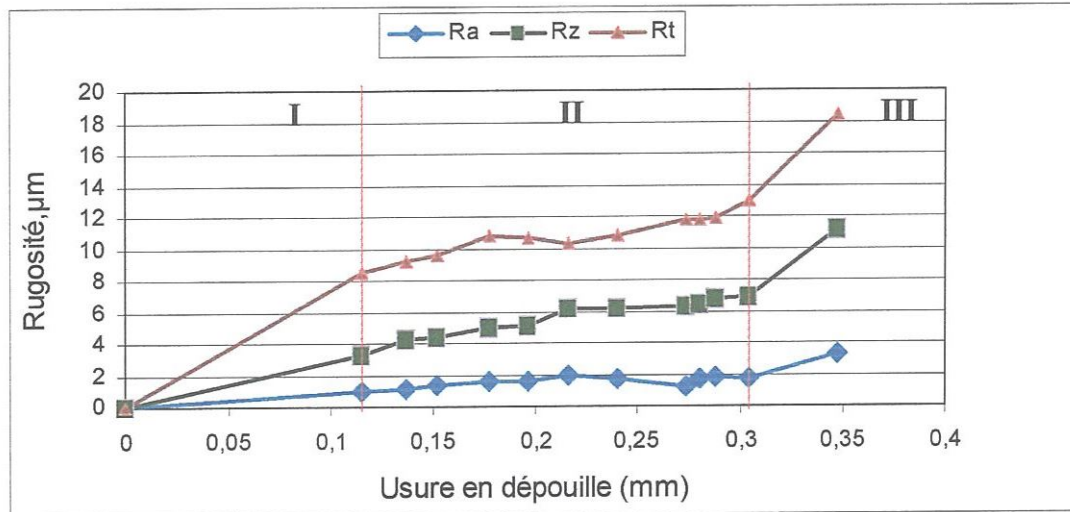
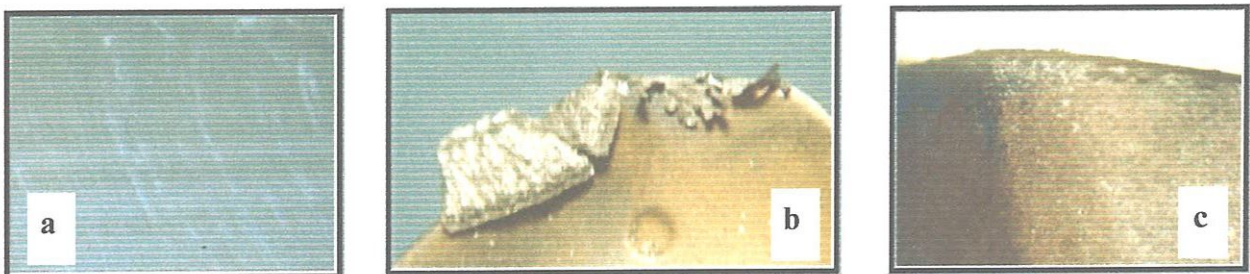


Fig.III-58- Rugosité en fonction de l'usure en dépouille.

$V_c = 111 \text{ m/min}$; $f_z = 0,22 \text{ mm/dent}$; $a_p = 0,6 \text{ mm}$.

La figure III-58 montre l'évolution de la rugosité avec l'usure des plaquettes de coupe lors de du fraisage de l'acier X2CrNi18-9 pour un régime de coupe ($V_c=111 \text{ m/min}$; $f_z=0,22 \text{ mm/dent}$; $a_p=0,6 \text{ mm}$). Les résultats de rugosité pour les critères (R_a , R_z , R_t) enregistrés durant une longueur de coupe de ($L_c=1340 \text{ mm}$) sont respectivement de l'ordre de (1,02 ; 3,3 ; 8,47) μm pour une usure en dépouille de ($VB=0,115 \text{ mm}$) figure III-59. Pendant la deuxième période de vie de l'outil « phase normale », on enregistre une certaine stabilité de la rugosité pour les différents critères (R_a , R_z , R_t) qui est respectivement de l'ordre de (1,79 ; 6,76 ; 9,63) μm pour une longueur de coupe de ($L_c=13400 \text{ mm}$) équivalente à une usure en dépouille de ($VB=0,304 \text{ mm}$) figure III-60. Au-delà de $VB=0,304$ (3^{ème} zone), les différents critères de rugosité augmentent rapidement et prennent les valeurs maximales (3,24 ; 11,1 ; 18,4) et cela pour une usure de $VB=0,347 \text{ mm}$.

Fig. III-59 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=1340 \text{ mm}$),

$V_c=111 \text{ m/min}$; $f_z=0,22 \text{ mm/dent}$; $a_p=0,6 \text{ mm}$.

a- Etat de la surface usinée

b- Arête rapportée

c- Usure en dépouille de la plaquette



Fig. III-60 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=12060\text{mm}$),
 $V_c=111\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

a- Etat de la surface usinée

b- Arête rapportée

c- Usure en dépouille de la plaquette

c- Troisième régime :

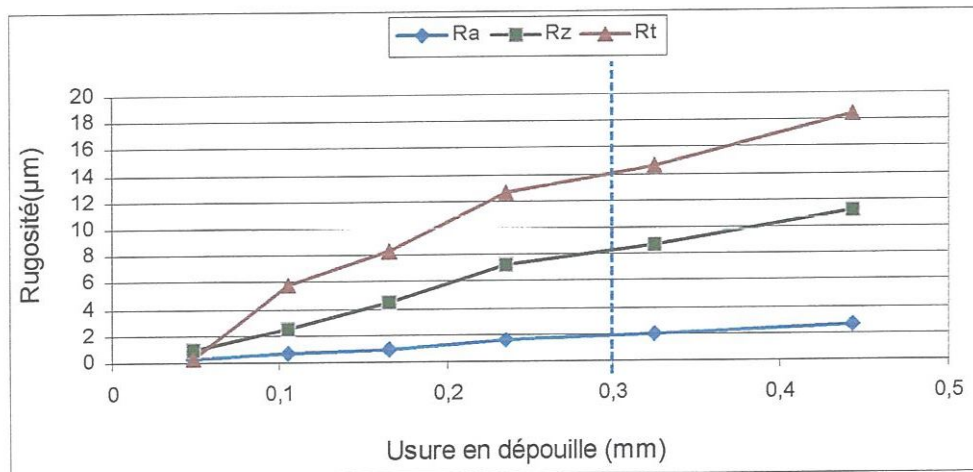


Fig.III-61- Rugosité en fonction de l'usure en dépouille,
 $V_c = 222\text{m/min}$; $f_z = 0,11\text{mm/dent}$; $a_p = 0,6\text{mm}$.

Sur la figure III-61 sont exposés les résultats de l'évolution de la rugosité de la surface usinée de l'acier X2CrNi18-9 avec l'usure en dépouille des plaquettes de coupe en carbure revêtu pour un régime de coupe ($V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$). Avec ces conditions de coupe on enregistre au début pour les trois critères de rugosité (Ra, Rz, Rt) respectivement (0,34 ; 2,46 ; 6,7) μm , pour une longueur de coupe de ($L_c=1340\text{mm}$) correspondant à une usure en dépouille ($VB=0,105\text{mm}$). Ce qui représente un bon résultat en particulier pour les critères Ra et Rz, comme le montre la figure (III-62-a et c). A partir $VB=0,325\text{mm}$, on enregistre une augmentation rapide qui atteint une rugosité (Ra, Rz, Rt) respectivement de (2,81 ; 11,2 ; 18,4) μm , pour une longueur de coupe ($L_c=4020\text{mm}$) correspondant à une usure ($VB=0,445\text{mm}$). Cela veut dire qu'en doublant la vitesse de coupe on dépasse la limite admissible de l'usure en dépouille ($VB=0,318\text{mm}$) pour une longueur de

3350mm. Ceci est dû à cette augmentation de vitesse qui cause une élévation de température dans la zone de coupe comme le montre le copeau grillé sur la figure (III-63- b et d) d'une part. D'autre part à la dégradation de l'état de la plaquette de coupe causé par ces conditions de coupe figure (III-63-c et e). Par conséquent l'augmentation de la vitesse de coupe à un grand impact sur la rugosité de la surface usinée.

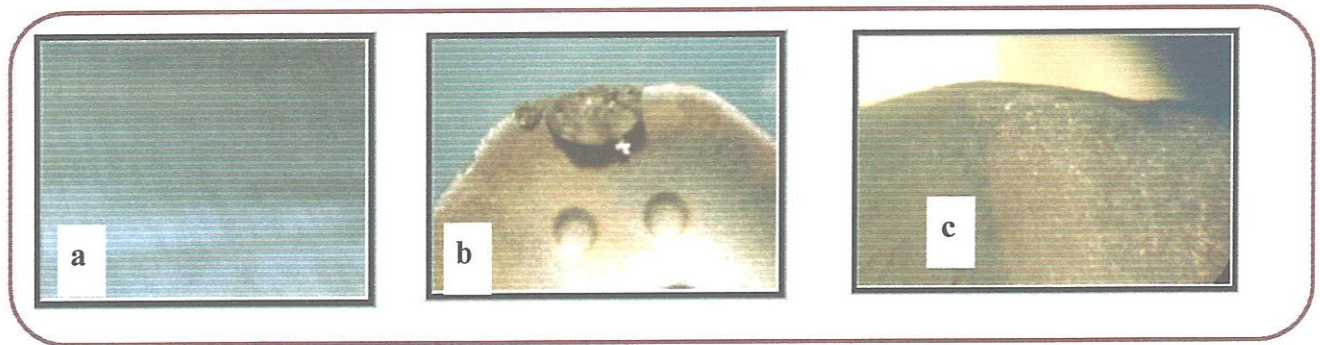


Fig. III-62 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=1340\text{mm}$),

$V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

a- Etat de la surface usinée

b- Arête rapportée

c- Usure en dépouille de la plaquette

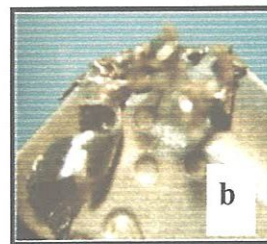
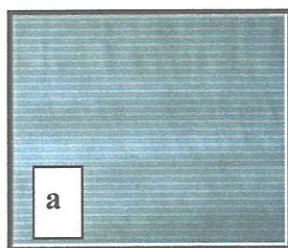


Fig. III-63 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=2680\text{mm}$),

$V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,11\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

a- Etat de la surface usinée

b- Arête rapportée

c- enlèvement de l'arête rapportée de la plaquette

d- Copeaux enlevés grillés

e- Usure en dépouille de la plaquette

d- Quatrième régime:

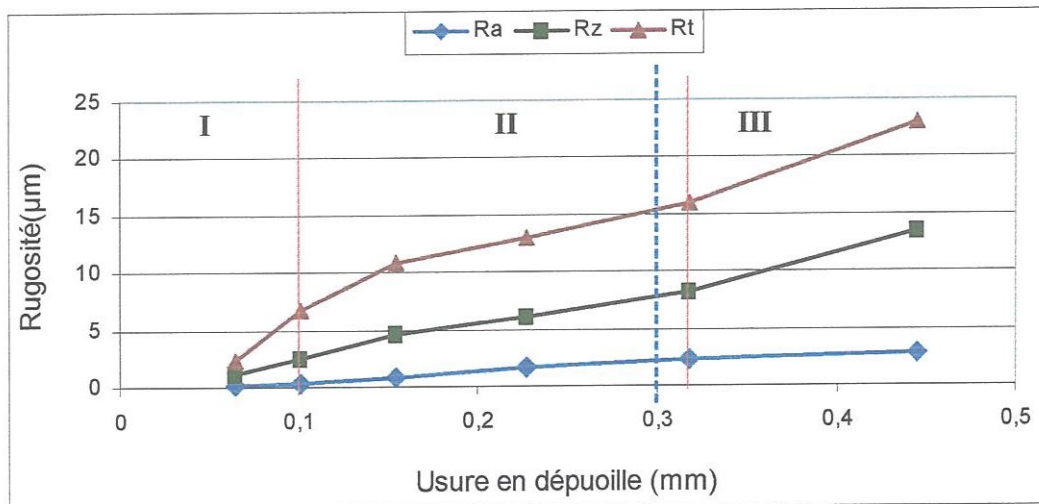
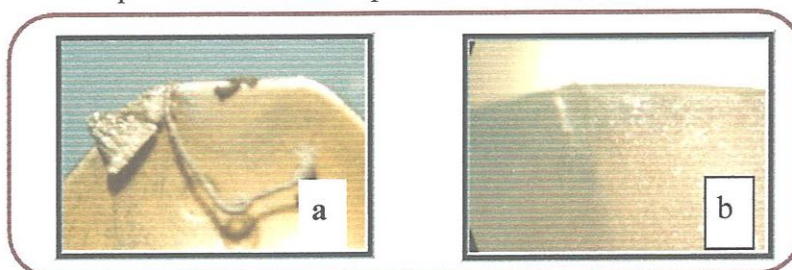


Fig. III-64- Rugosité en fonction de l'usure en dépouille.

$V_c = 222\text{m/min}$; $f_z = 0,22\text{mm/dent}$; $a_p = 0,6\text{mm}$.

La figure III-64 illustre l'influence de l'usure en dépouille sur la rugosité de la surface usinée de l'acier X2CrNi18-9 pour un régime de coupe ($V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$). On enregistre pour les trois critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) respectivement (0,34 ; 2,16 ; 6,7) μm , après seulement une longueur de coupe de ($L_c=1340\text{mm}$) correspondant à une usure en dépouille ($VB=0,101\text{mm}$). Ce qui représente un très bon résultat, et l'état de la plaquette de coupe fait preuve. Au-delà de ce point de mesure, on assiste à une augmentation continue. Après une longueur de coupe ($L_c=3350\text{mm}$) , on enregistre une rugosité pour les différents critères (R_a , R_z , R_t) successivement de (2,81 ; 13,56 ; 23,1) μm avec une usure en dépouille des plaquettes en carbure revêtu utilisées ($VB=0,445\text{mm}$). Cela veut dire qu'en doublant la vitesse de coupe et l'avance par dent, on obtient une dégradation d'état de surface pour les critères (R_a , R_z , R_t) respectivement de l'ordre de (87,9 ; 81,86 ; 71) %. Ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de contact couple outil matière figure III-53, suite à l'augmentation de la vitesse de coupe et l'avance par dent qui ont contribué à la dégradation fatale des plaquette de coupe figure III-66. Donc la rugosité de la surface usinée est affectée en grande partie par ces deux paramètres de coupe.

Fig. III-65 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=1340\text{mm}$),

$V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

a- Arête rapportée

b- Usure en dépouille

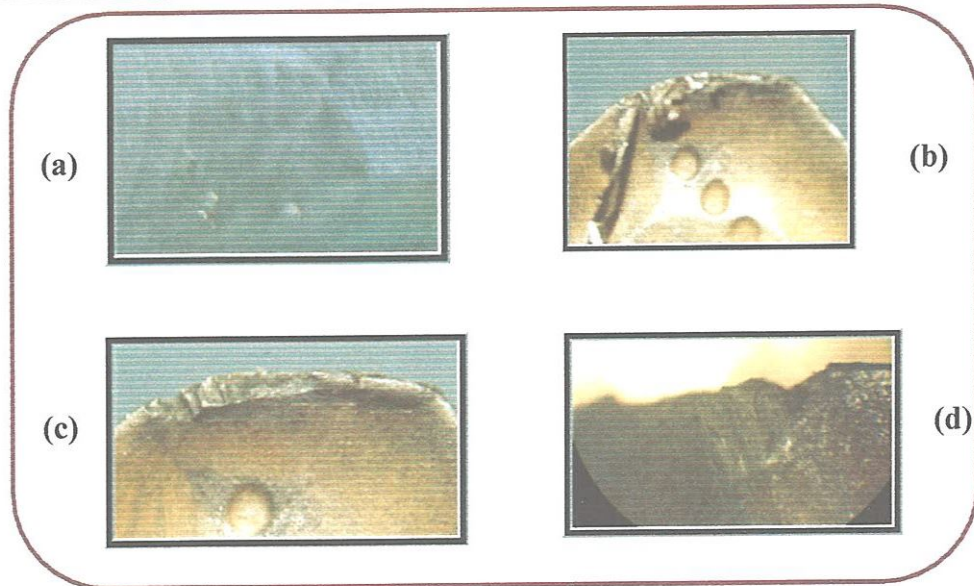


Fig.III-66 : Rugosité de la surface usinée pour ($L_c=4020\text{mm}$),
 $V_c=222\text{m/min}$; $f_z=0,22\text{mm/dent}$; $a_p=0,6\text{mm}$.

a- Etat de la surface

b- Arête rapportée

c- Enlèvement de l'arête
rapportée

d- Usure en dépouille

Conclusion partielle :

D'après les quatre cas d'essais d'usure étudié en fonction des deux paramètres de coupe « vitesse de coupe ou avance par dent » illustrées par les figures III-45 à III-66. On constate que l'influence de l'avance par dent sur l'usure en dépouille de l'outil de coupe est si faible comparativement avec l'influence de la vitesse de coupe, qui est au contraire si importante. Cela se présente clairement en comparant les résultats des figures III-45 et III-47 pour l'avance par dent d'un coté, et d'un autre coté les résultats des figures III-45 et III-49 pour la vitesse de coupe. Alors en augmentant la vitesse de coupe du double, l'usure de l'outil croît cinq fois plus, et par conséquent cela influe à son tour sur la rugosité de la pièce. Alors on parvient à conclure que le facteur qui influence le plus l'usure en dépouille de l'outil de coupe est la vitesse de coupe comme cela a été constaté par K.A. Abou-El-Houssein [34].

CHAPITRE IV

TRAITEMENT

ET ANALYSE DES RESULTATS

IV- 1- INTRODUCTION:

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques des différents paramètres technologiques étudiés, à savoir : rugosités, efforts de coupe et tenue des plaquettes de coupe GC4040. Ces modèles permettent d'exprimer les relations entre les éléments du régime de coupe (V_c , f_z et a_p) et les paramètres technologiques.

IV-2- MODELES DE LA RUGOSITE EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE :**IV-2-1- Résultats expérimentaux :**

Dans le tableau IV-1 sont présentés les valeurs expérimentales des différents critères de rugosité (R_a , R_z et R_t). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience 3^3 .

N° Essais	Facteurs			Critères de rugosité		
	V_c	f_z	a_p	R_a	R_z	R_t
1	111	0,08	0,3	1,07	6,52	9,58
2	111	0,08	0,6	1,01	6,48	10,91
3	111	0,08	0,9	1,38	8,2	10,58
4	111	0,16	0,3	0,99	6,06	7,66
5	111	0,16	0,6	0,68	5,22	6,41
6	111	0,16	0,9	1,32	8,62	10,69
7	111	0,25	0,3	1,7	8,28	10,47
8	111	0,25	0,6	1,9	10,53	12,55
9	111	0,25	0,9	2,12	13,83	16,69
10	157	0,08	0,3	0,64	4,8	8,9
11	157	0,08	0,6	0,94	5,95	9,33
12	157	0,08	0,9	0,98	7,1	9,97
13	157	0,16	0,3	0,99	6,08	8,15
14	157	0,16	0,6	1,23	8,38	12,43
15	157	0,16	0,9	1,35	8,47	12,57
16	157	0,25	0,3	1,42	8,57	11,71
17	157	0,25	0,6	1,9	10,13	12,3
18	157	0,25	0,9	1,52	9,55	12,29
19	222	0,08	0,3	0,74	5,58	9,28
20	222	0,08	0,6	0,89	5,93	10,2
21	222	0,08	0,9	1,2	7,16	11,65
22	222	0,16	0,3	0,64	3,94	4,83
23	222	0,16	0,6	1,1	7,4	13,15
24	222	0,16	0,9	1,32	8,13	10,36
25	222	0,25	0,3	1,25	7,52	9,25
26	222	0,25	0,6	1,27	9,21	12,16
27	222	0,25	0,9	1,44	10,79	17

Tableau.IV-1 : Résultats de l'expérimentation de la rugosité.

IV-2-2- Méthode appliquée :

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques est l'analyse de la surface de réponse, en utilisant un logiciel de statistique Minitab 15. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité. Pour cela on doit choisir un niveau de signification α à ne pas dépasser, que nous avons fixé à ($\alpha = 0,05$).

IV-2-3- Analyse de la variance (ANOVA) :**IV-2-3-1- Régression de la surface de réponse de Ra en fonction de Vc, fz, ap :**

L'analyse de la surface de réponse des résultats représentés dans le tableau IV-1, nous a permis de déterminer les coefficients de régression estimés pour le critère de rugosité Ra d'une manière générale (Tab.IV-2).

Terme	Coef	Coef ErT	T	P
Constante	3,2441	0,60923	5,325	0,000
Vc	-0,0269	0,00602	-4,463	0,000
fz	-12,7732	2,79737	-4,566	0,000
ap	1,9975	0,80162	2,492	0,023
Vc*Vc	0,0001	0,00002	4,944	0,000
fz*fz	56,6086	7,05091	8,029	0,000
ap*ap	-0,8210	0,56375	-1,456	0,164
Vc*fz	-0,0168	0,00756	-2,219	0,040
Vc*ap	-0,0031	0,00214	-1,460	0,163
fz*ap	0,3443	1,40612	0,245	0,809

S = 0,124281 R carré = 94,05 %

R carré (ajust) = 90,90 %

Tab. IV-2: Analyse de régression pour le critère Ra.

En éliminant les termes non significatifs, l'analyse de la surface de réponse nous permet d'obtenir les résultats représentés sur le tableau IV-3:

Terme	Coef	Coef ErT	T	P
Constante	3,7634	0,54564	6,897	0,000
Vc	-0,0288	0,00608	-4,735	0,000
fz	-12,5666	2,75313	-4,564	0,000
ap	0,5574	0,10079	5,530	0,000
Vc*Vc	0,0001	0,00002	4,789	0,000
fz*fz	56,6086	7,27833	7,778	0,000
Vc*fz	-0,0168	0,00781	-2,150	0,044

S = 0,128289 R carré = 92,54 %

R carré (ajust) = 90,30 %

Tab. IV-3: Analyse de régression pour le critère Ra après exclusion des termes non significatifs

La réponse de la rugosité de surface Ra en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. IV-1). Cette figure montre les effets de la variation des facteurs (Vc, fz et ap) sur Ra. Elle montre d'une manière générale l'effet significatif de l'avance par dent sur la rugosité de la surface suivi de la vitesse de coupe, en particulier pour les faibles vitesses. Ces diagrammes montrent que la mauvaise rugosité Ra est donnée pour $fz=0,25\text{mm/dent}$, $Vc=111\text{m/min}$.

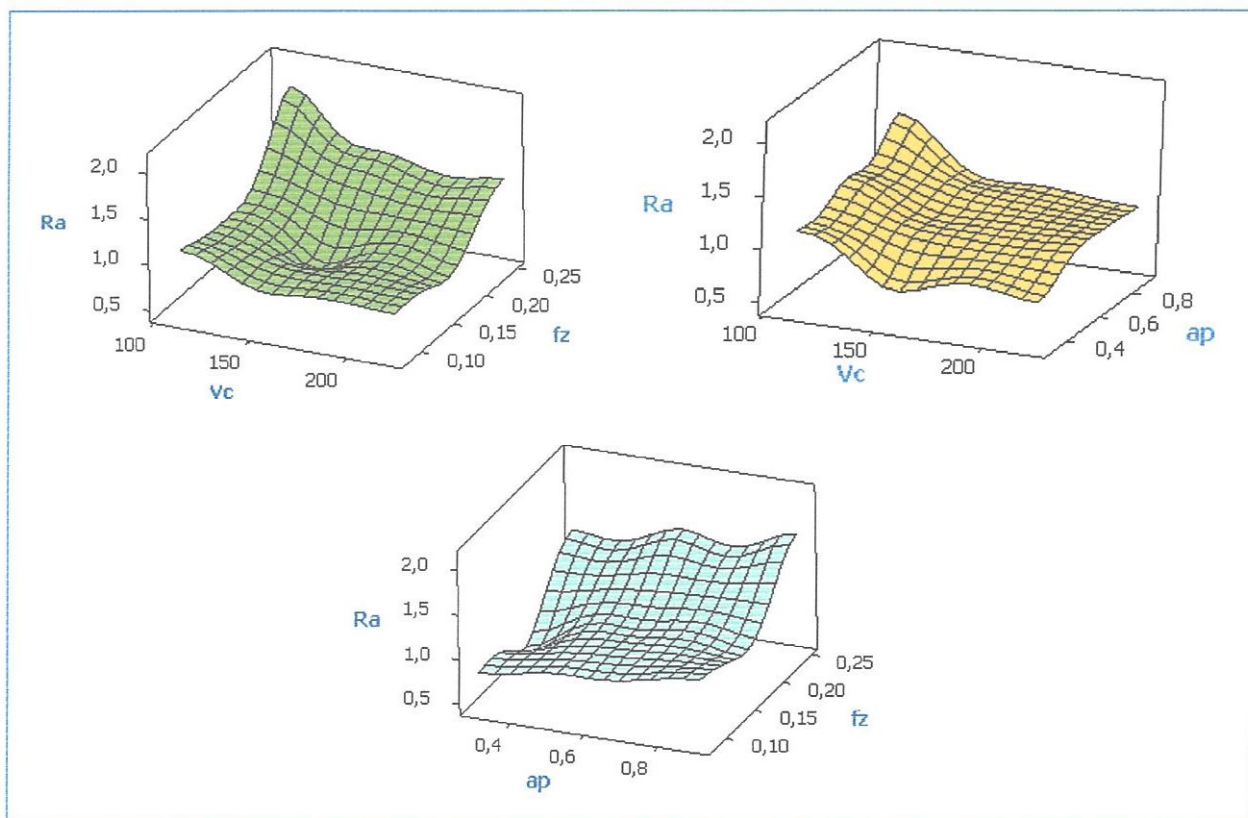


Fig-IV-1- Diagrammes de surfaces de Ra en fonction de (Vc, fz, ap).

La figure IV-2 montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité R_a . On constate que les faibles vitesses de coupe influent sur la rugosité et plus la vitesse augmente plus la rugosité s'améliore. Pour l'avance par dent plus cette dernière augmente plus elle affecte l'état de surface. Plus la profondeur de passe augmente plus son influence sur la rugosité diminue.

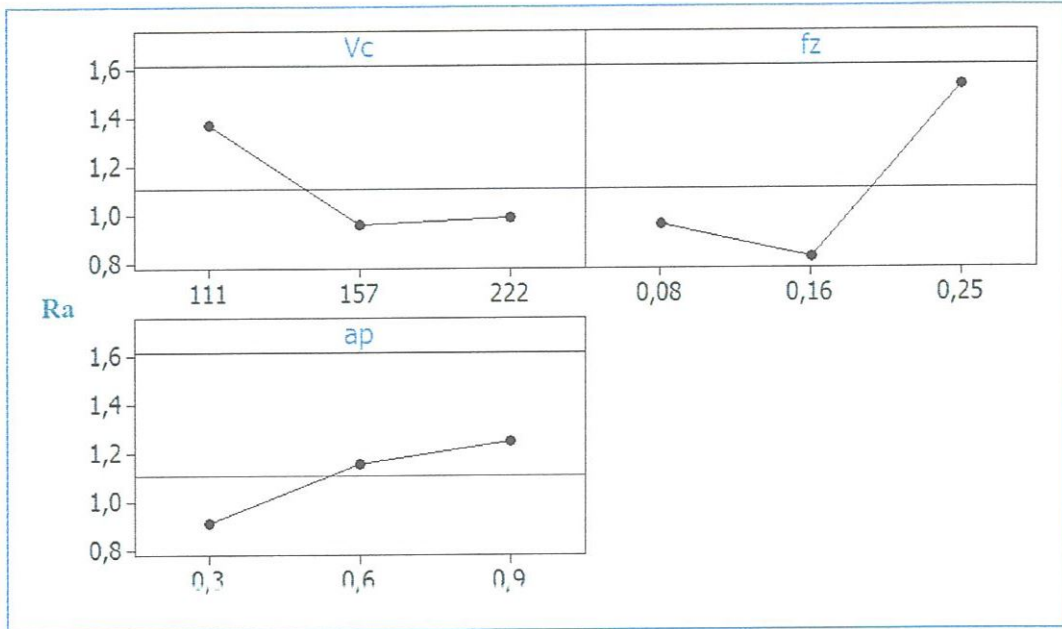


Fig.IV-2- Graphique des effets principaux pour R_a .

La figure IV-3 montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la rugosité R_a . Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe et l'avance par dent et entre la vitesse de coupe et la profondeur de passe, seulement cette dernière n'est pas significative.

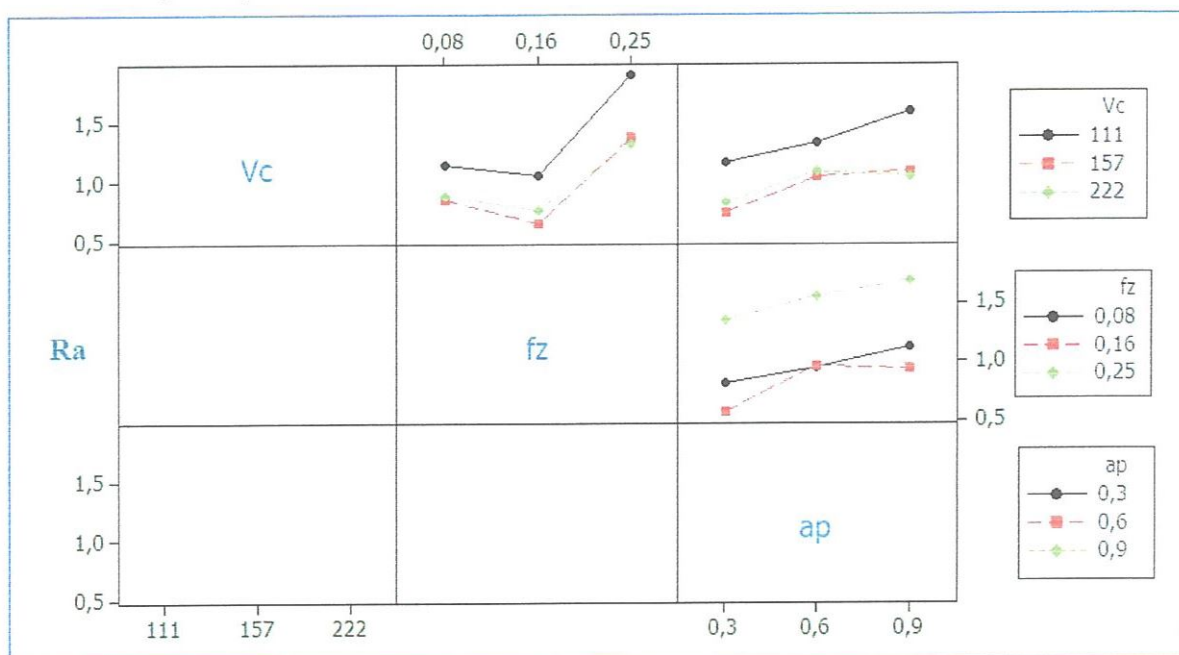


Fig.IV-3 : Diagramme d'interaction pour R_a .

En considérant un niveau de signification de 0,05, c'est-à-dire pour un intervalle de confiance de 95%, on constate que les trois paramètres de coupe prit (Vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe) ont un impact significatif sur la rugosité car la valeur de la probabilité P-value est inférieur à 0,05 (Tableau 2). La valeur de P-value des interactions $V_c \cdot V_c$, $f_z \cdot f_z$ et $V_c \cdot f_z$ qui est inférieur à 0,05 (Tableau 2) signifie aussi qu'ils ont un impact significatif dans l'intervalle de confiance considéré.

L'équation de régression de R_a est:

Modèle complet :

$$R_a = 3,2441 - 0,0269V_c - 12,7732f_z + 1,9975a_p + 0,0001V_c \cdot V_c + 56,6086f_z \cdot f_z - 0,821a_p \cdot a_p - 0,0168V_c \cdot f_z - 0,0031V_c \cdot a_p + 0,3443f_z \cdot a_p.$$

$$R^2 = 94,05 \, \%$$

Modèle réduit :

$$R_a = 3,7634 - 0,0269 V_c - 12,7732 f_z + 0,5574 a_p + 0,0001 V_c \cdot V_c + 56,6086 f_z \cdot f_z - 0,0168 V_c \cdot f_z.$$

$$R^2 = 92,54\%.$$

Pour valider le model de R_a , on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de R_a et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value < 0,024) (fig.IV-4).

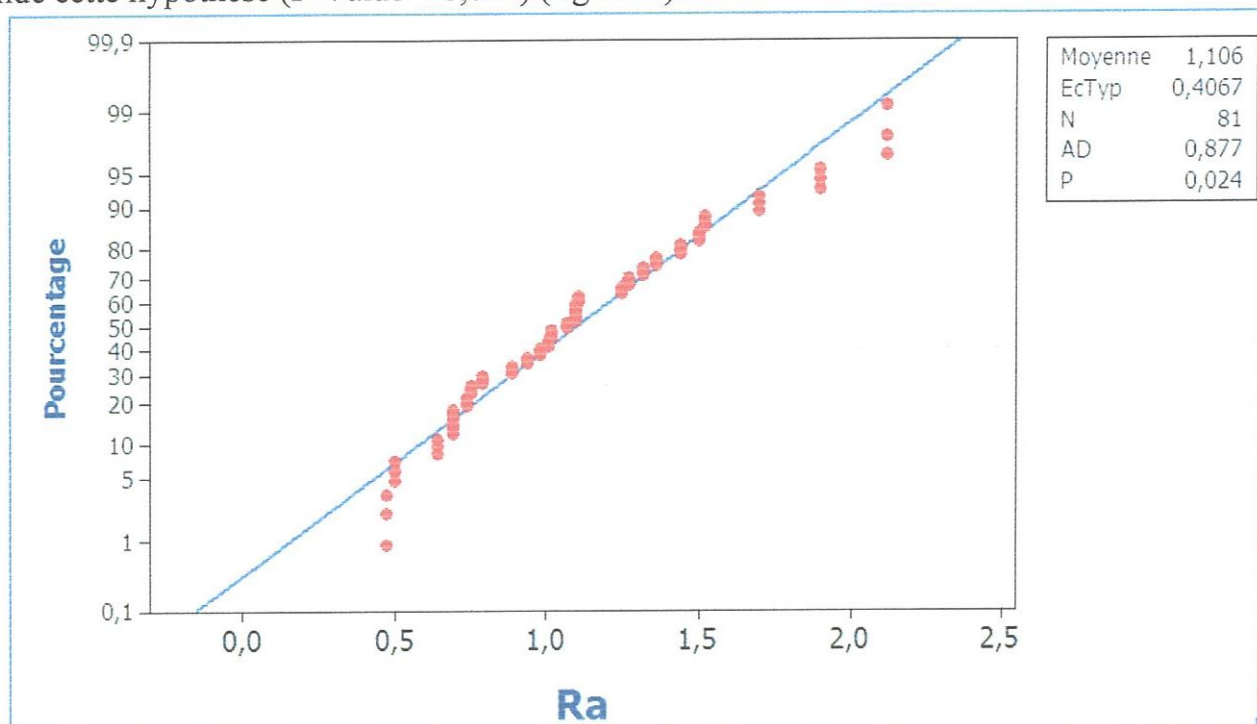


Fig.IV-4- Test de normalité de la distribution des résidus pour R_a .

Finalement la figure IV-5 montre le domaine d'influence de l'avance par dent et la vitesse de coupe sur la rugosité Ra.

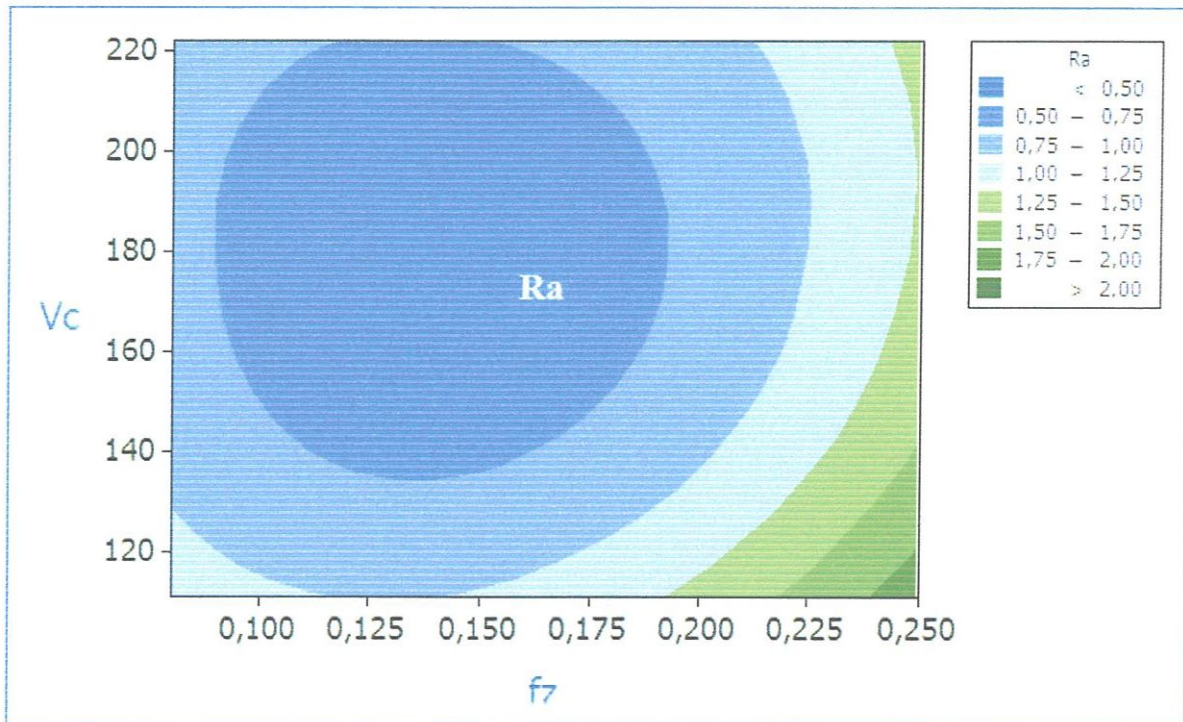


Fig. IV-5 : Graphique de Contour de Ra en fonction de Vc ; fz

IV-2-3-2- Régression de la surface de réponse : Rz en fonction de Vc, fz, ap :

L'analyse de la surface de réponse des résultats représentés dans le tableau IV-1, nous a permis aussi de déterminer les coefficients de régression estimés pour le critère de rugosité Rz d'une manière générale (Tab.IV-4).

Terme	Coef	Coef ErT	T	P
Constante	13,316	2,6303	5,062	0,000
Vc	-0,074	0,0260	-2,864	0,011
fz	-51,220	12,0771	-4,241	0,001
ap	2,962	3,4609	0,856	0,404
Vc*Vc	0,000	0,0001	3,127	0,006
fz*fz	231,373	30,4411	7,601	0,000
ap*ap	1,370	2,4339	0,563	0,581
Vc*fz	-0,072	0,0327	-2,216	0,041
Vc*ap	-0,008	0,0093	-0,883	0,390
fz*ap	11,402	6,0707	1,878	0,078

S = 0,536559 R carré = 96,39 %

R carré (ajust) = 94,47 %

Tab. IV-4: Analyse de régression pour le critère Rz.

En éliminant les termes non significatifs ($\alpha > 0,05$), l'analyse de la surface de réponse nous permet d'obtenir les résultats représentés sur le tableau IV-5:

Terme	Coeff	Er-T Coef	T	P
Constante	3,76	0,54564	6,897	0,000
Vc	-0,03	0,00608	-4,735	0,000
fz	-12,57	2,75313	-4,564	0,000
ap	0,56	0,10079	5,530	0,000
Vc*Vc	0,00	0,00002	4,789	0,000
fz*fz	56,61	7,27833	7,778	0,000
Vc*fz	-0,02	0,00781	-2,150	0,044

S = 0,1283 R-carré = 92,5% R-carré (ajus) = 90,3%

Tab. IV-5: Analyse de régression pour le critère Rz après exclusion des termes non significatifs.

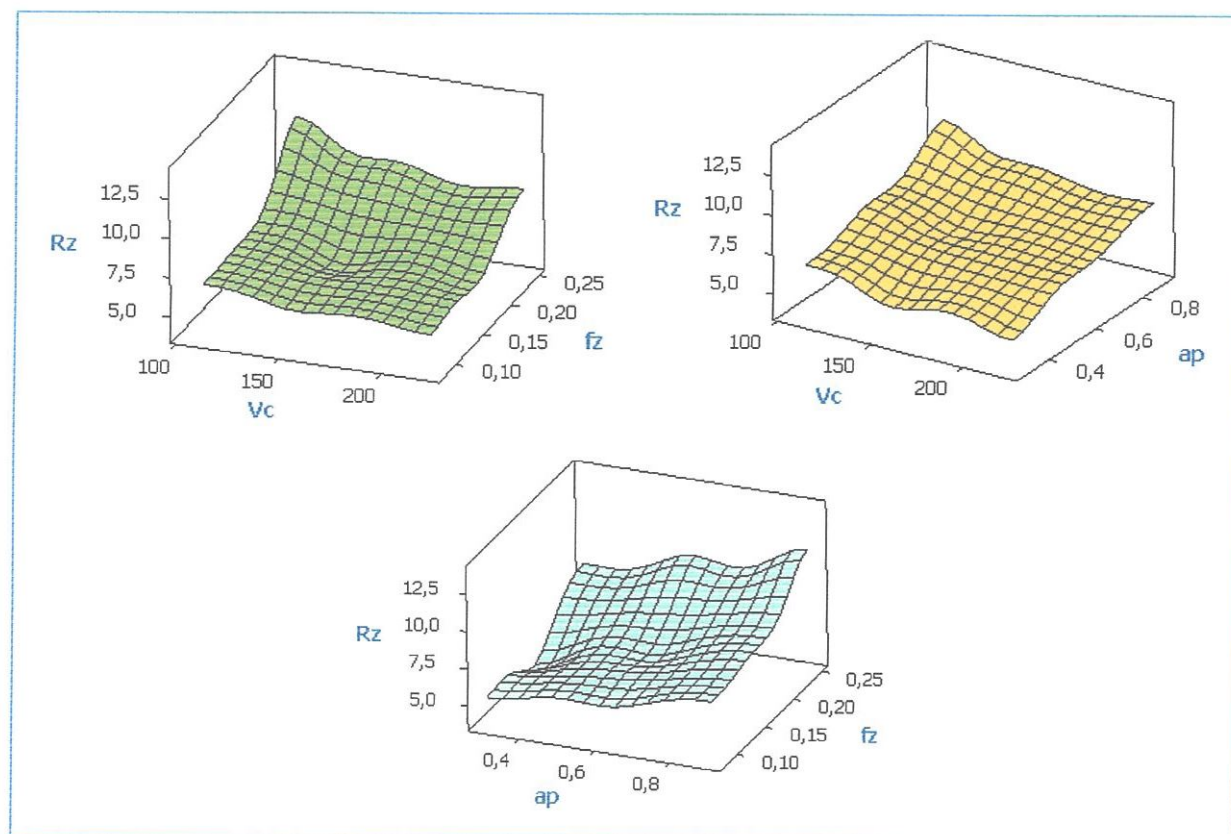


Fig-IV-6- Diagrammes de surfaces de Rz en fonction de (Vc, fz, ap).

La réponse de la rugosité de surface Rz en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. IV-6). Cette figure montre les effets de la variation des paramètres de coupe (Vc, fz et ap) sur la rugosité Rz de la surface usinée. Elle montre

d'une manière générale l'effet significatif de l'avance par dent sur la rugosité de la surface suivi de la vitesse de coupe. Ces diagrammes montrent que la mauvaise rugosité R_z est atteinte à la plus grande avance par dent et la plus faible vitesse de coupe.

La figure IV-7 montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité R_z . On constate que les faibles vitesse de coupe influent relativement sur la rugosité et plus la vitesse augmente plus la rugosité s'améliore. L'avance par dent est sans effet pour les faibles valeurs, mais son augmentation affecte considérablement l'état de surface. La profondeur de passe à son tour affecte la rugosité R_z d'une manière non négligeable.

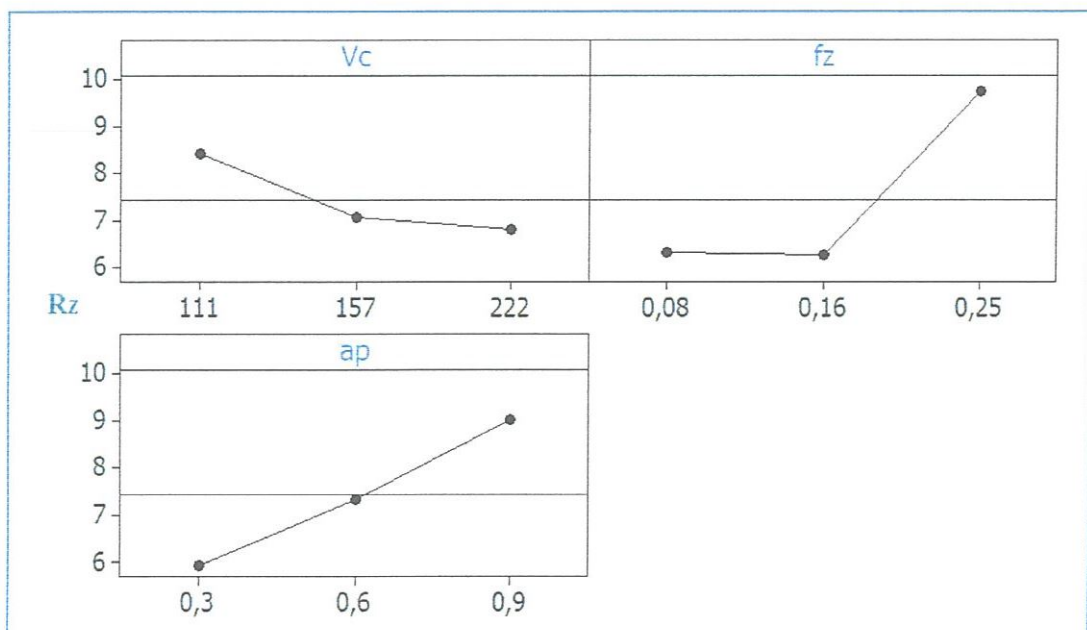


Fig.IV-7- Graphique des effets principaux pour R_z .

La figure IV-8 montre que nous avons des interactions entre chaque binôme des trois paramètres de coupe (V_c , f_z et a_p) pour la rugosité R_z . Seulement que l'interaction significative est celle entre la vitesse de coupe et l'avance par dent (P-value inférieur à 0,05 – Tab : IV-4), suivi de celle entre avance par dent et profondeur de passe avec un degré moins significatif. Tandis que le troisième cas est sans signification.

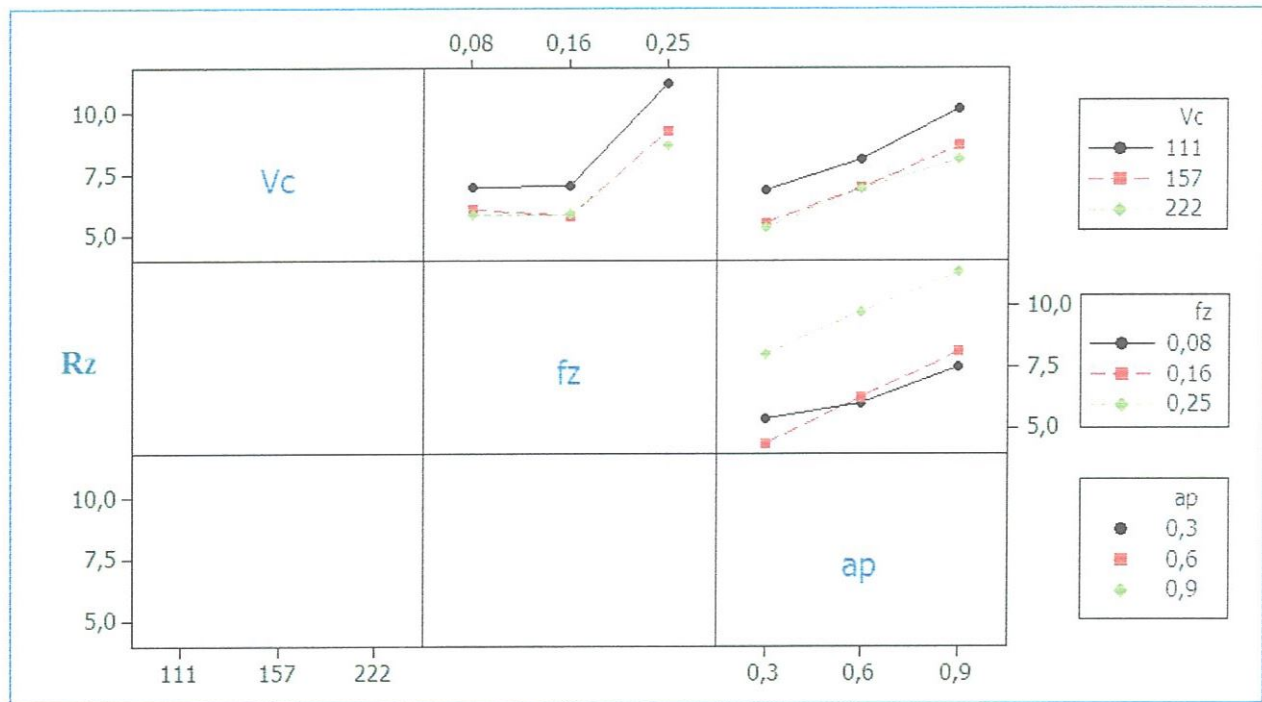


Fig.IV-8 : Diagramme d'interaction pour Rz.

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la Vitesse de coupe et l'avance par dent ont un impact significatif sur la rugosité car la valeur de la probabilité P-value est inférieure à 0,05 (Tableau IV-4). La profondeur de passe n'a pas d'influence sur Rz ($P = 0,404 > 0,05$). La valeur de P-value des interactions $Vc*Vc$, $fz*fz$ et $Vc*fz$ qui est inférieure à 0,05 (Tableau 4) signifie aussi qu'ils ont un impact significatif dans l'intervalle de confiance considéré.

L'équation de régression de Rz est:

Modèle complet :

$$Rz = 13,316 - 0,074Vc - 51,22fz + 2,962ap + 231,373fz*fz + 1,37ap*ap - 0,072Vc*fz - 0,08Vc*ap + 11,402fz*ap.$$

$$R^2 = 96,39 \, \%.$$

Modèle réduit :

$$Rz = 3,76 - 0,03 Vc - 12,57 fz + 0,56ap + 56,61 fz*fz - 0,02 Vc*fz.$$

$$R^2 = 92,5 \, \%.$$

Pour valider le modèle de Rz, on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de Rz et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P Value < 0,023) (fig.IV-9).

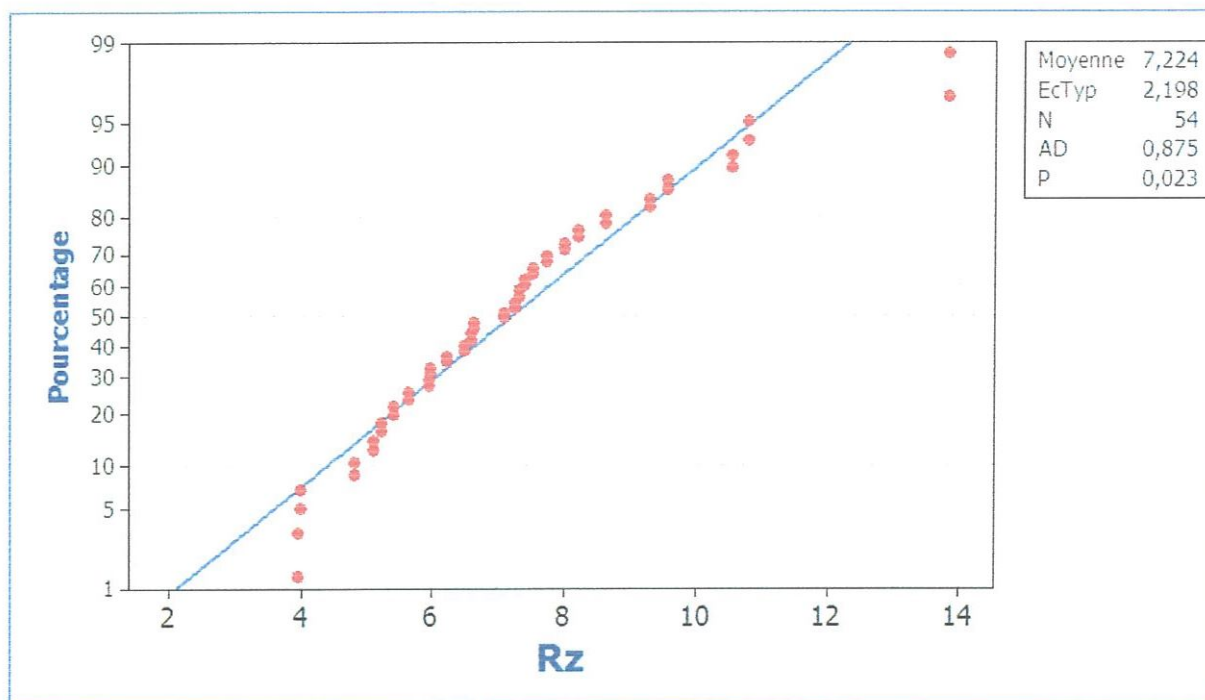


Fig.IV-9- Test de normalité de la distribution des résidus pour Rz.

IV-2-3-3- Régression de la surface de réponse : Rt en fonction de Vc, fz, ap :

L'analyse de la surface de réponse des résultats représentés dans le tableau IV-1, nous a permis aussi de déterminer les coefficients de régression estimés pour le critère de rugosité Rt d'une manière générale (Tab.IV-6).

Terme	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante	24,489	4,2767	5,726	0,000	
Vc	-0,088	0,0423	-2,087	0,052	
fz	-109,208	19,6370	-5,561	0,000	
ap	-4,599	5,6272	-0,817	0,425	
Vc*Vc	0,000	0,0001	1,813	0,088	
fz*fz	393,836	49,4962	7,957	0,000	
ap*ap	4,198	3,9574	1,061	0,304	
Vc*fz	-0,086	0,0531	-1,626	0,122	
Vc*ap	0,012	0,0151	0,819	0,424	
fz*ap	14,630	9,8707	1,482	0,157	

S = 0,872429 R carré = 92,28% R carré (ajust) = 88,19%

Tab. IV-6: Analyse de régression pour le critère de rugosité Rt.

En éliminant les termes non significatifs, l'analyse de la surface de réponse nous permet d'obtenir les résultats représentés sur le tableau IV-7:

Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P
Constante	17,2	1,5547		11,077	0,000
Vc	-0,0	0,0041		-5,411	0,000
fz	-114,5	18,3558		-6,240	0,000
ap	4,8	0,7583		6,384	0,000
fz*fz	393,8	54,7547		7,193	0,000
S = 0,9651					
R-carré = 87,8%		R-carré (ajus) = 85,6%			

Tab. IV-7: Analyse de régression pour le critère de rugosité Rt après exclusion des termes non significatifs.

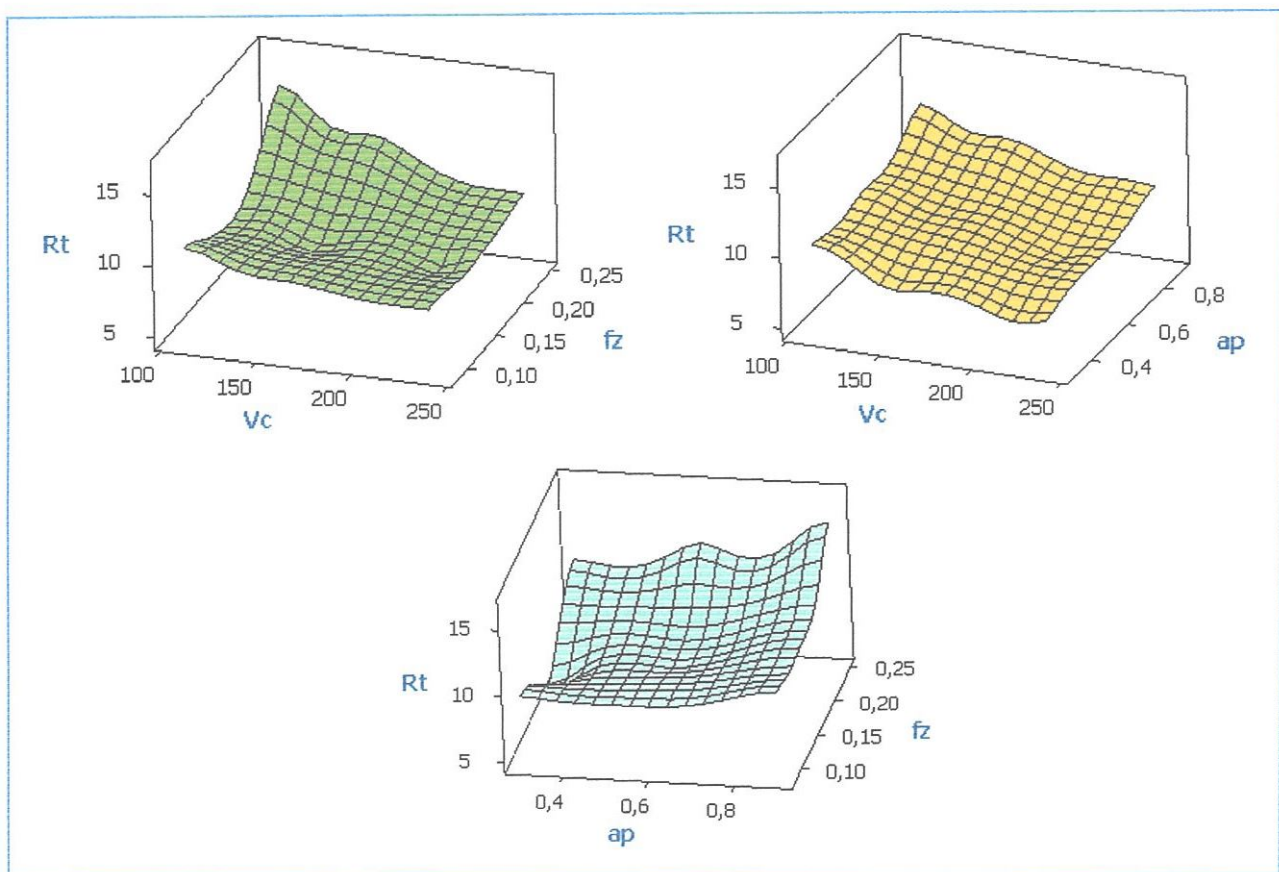


Fig-IV-10- Diagrammes de surfaces de Rt en fonction de (Vc, fz, ap).

La réponse de la rugosité de surface Rt en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. IV-10). Cette figure montre les effets de la variation des paramètres de coupe (Vc, fz et ap) sur le critère de rugosité Rt de la surface usinée. Elle

montre d'une manière générale l'effet significatif de l'avance par dent sur la rugosité de la surface usinée suivi de la vitesse de coupe, par contre l'impact de la profondeur de passe est insignifiant comparativement aux deux autres facteurs. Ces diagrammes montrent que la mauvaise rugosité R_t est atteinte à la plus grande avance par dent et la plus faible vitesse de coupe.

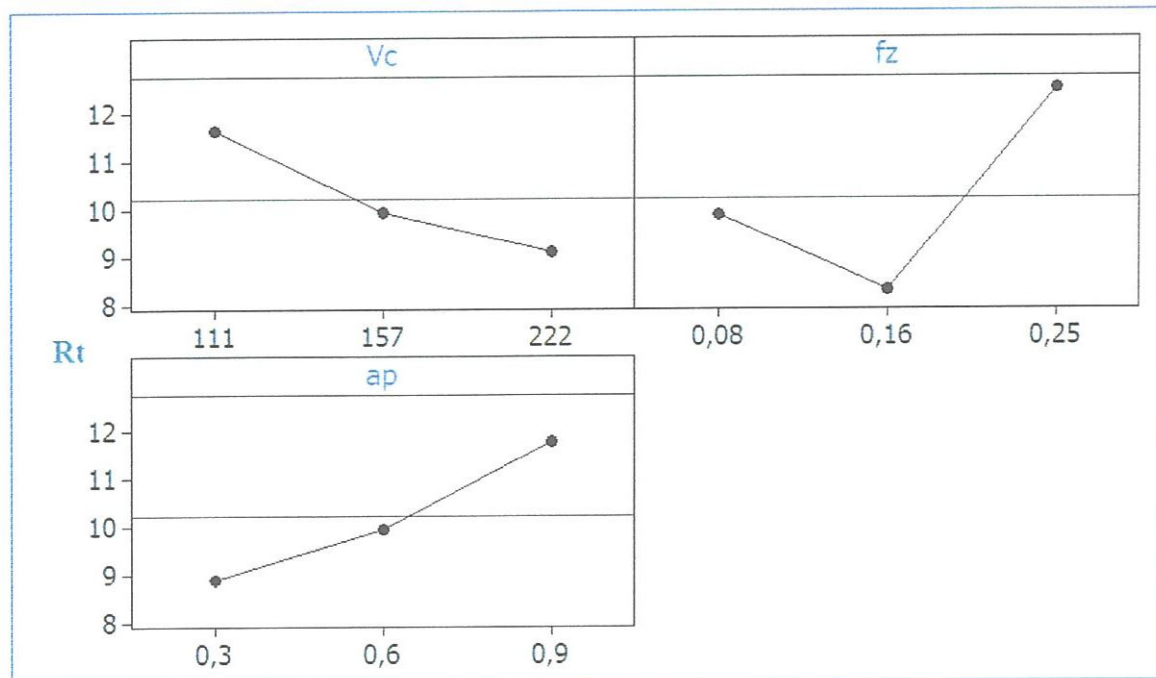


Fig.IV-11- Graphique des effets principaux pour R_t .

La figure IV-11 montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité R_t . On constate que les faibles vitesses de coupe influent relativement sur la rugosité et plus la vitesse augmente plus la rugosité s'améliore. L'avance par dent a un effet pour les plus faibles valeurs, mais son augmentation à 0,25mm/dent affecte considérablement l'état de surface. La profondeur de passe commence à affecter la rugosité R_t de la surface usinée au delà de 0,6mm.

La figure IV-12 montre qu'il n'y a aucune interaction entre les différents paramètres de coupe pour la rugosité R_t .

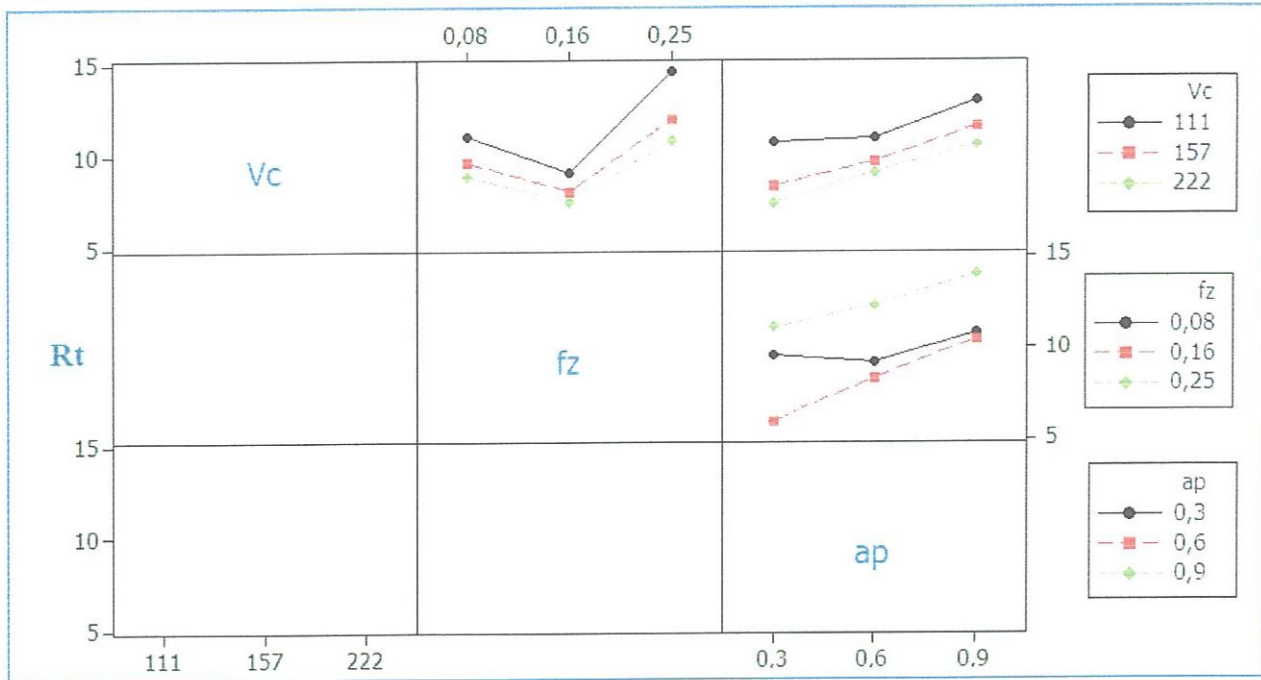


Fig.IV-11 : Diagramme d'interaction pour Rt.

En considérant un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules l'avance par dent et la vitesse de coupe ont un impact significatif sur la rugosité car la valeur de la probabilité P-value est inférieure à 0,05 pour le premier paramètre et proche de 0,05 pour le second (Tableau 4). La profondeur de passe n'a pas d'influence sur Rz ($P = 0,404 > 0,05$). La valeur de P-value de l'interaction $fz*fz$ qui est inférieure à 0,05 (Tableau 4) signifie aussi qu'elle a un impact significatif dans l'intervalle de confiance considéré.

L'équation de régression de Rt est:

Modèle complet :

$$Rt = 24,489 - 0,088Vc - 109,208fz - 4,599ap - 393,836fz*fz + 4,198ap*ap - 0,086Vc*fz + 0,012Vc*ap + 14,63fz*ap.$$

$$R^2 = 92,28 \, \%$$

Modèle réduit :

$$Rt = 17,2 - 0,001Vc - 114,53 fz + 393,82 fz*fz.$$

$$R^2 = 87,8 \, \%$$

Pour valider le modèle de Rt, on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de Rt et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value = 0,051) (fig.IV-12).

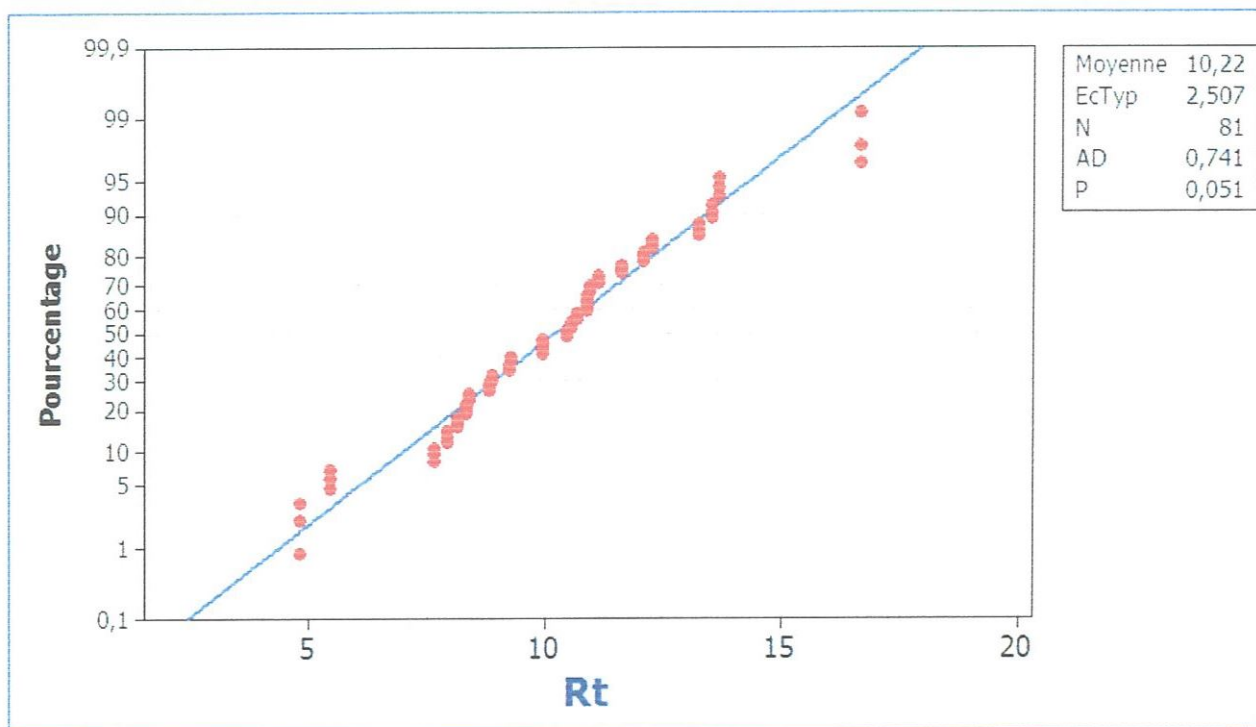


Fig.IV-12- Test de normalité de la distribution des résidus pour Rt.

Les diagrammes des surfaces de réponse, les graphiques des effets principaux ainsi que les autres diagrammes représentés dans cette première partie de ce chapitre ont donné une idée très claire sur le degré d'influence de chaque paramètre de coupe sur la rugosité. Selon les modèles des différents critères de la rugosité, l'avance par dent est le paramètre qui a la plus grande influence sur la rugosité de la surface usinée.

IV-3- MODELES DE L'EFFORT DE COUPE EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE :

IV-3-1- Résultats expérimentaux :

Dans le tableau IV-8 sont présentés les valeurs expérimentales des différentes composantes de l'effort de coupe (F_a , F_v et F_r). Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience 3^3 .

N° Essais	Facteurs			Composantes de l'effort de coupe		
	Vc	fz	ap	Fa	Fv	Fr
1	111	0,08	0,3	326	425	201
2	111	0,08	0,6	451	510	301
3	111	0,08	0,9	551	633	406
4	111	0,16	0,3	326	425	201
5	111	0,16	0,6	499	567	316
6	111	0,16	0,9	644	742	504
7	111	0,25	0,3	395	533	215
8	111	0,25	0,6	601	704	431
9	111	0,25	0,9	706	861	530
10	157	0,08	0,3	223	296	188
11	157	0,08	0,6	370	398	232
12	157	0,08	0,9	397	515	311
13	157	0,16	0,3	261	348	130
14	157	0,16	0,6	390	491	263
15	157	0,16	0,9	542	649	409
16	157	0,25	0,3	249	390	142
17	157	0,25	0,6	560	602	330
18	157	0,25	0,9	592	750	433
19	222	0,08	0,3	151	178	122
20	222	0,08	0,6	281	369	261
21	222	0,08	0,9	311	473	293
22	222	0,16	0,3	175	292	99
23	222	0,16	0,6	265	404	242
24	222	0,16	0,9	481	549	376
25	222	0,25	0,3	227	309	134
26	222	0,25	0,6	461	527	305
27	222	0,25	0,9	570	672	407

Tableau.IV-8 : Résultats de l'expérimentation de la rugosité.

IV-3-2- Méthode appliquée :

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe est l'analyse de la surface de réponse, en utilisant un logiciel de statistique Minitab 15. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur l'effort de coupe. Pour cela on doit choisir un niveau de signification α à ne pas dépasser, que nous avons fixé à ($\alpha = 0,05$).

IV-3-3- Analyse de la variance (ANOVA) :**IV-3-3-1- Régression de la surface de réponse de Fa en fonction de Vc, fz, ap :**

L'analyse de la surface de réponse des résultats représentés dans le tableau IV-8, nous a permis de déterminer les coefficients de régression estimés pour la composante de l'effort de coupe F_a d'une manière générale (Tab.IV-9).

Terme	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante	603,63	174,59	3,457	0,003	
Vc	-5,11	1,73	-2,960	0,009	
fz	-873,39	801,64	-1,090	0,291	
ap	724,14	229,72	3,152	0,006	
Vc*Vc	0,01	0,00	1,988	0,063	
fz*fz	1385,26	2020,59	0,686	0,502	
ap*ap	-388,27	161,55	-2,403	0,028	
Vc*fz	2,56	2,17	1,180	0,254	
Vc*ap	-0,20	0,61	-0,332	0,744	
fz*ap	1413,47	402,95	3,508	0,003	
S = 35,6152		R carré = 96,51%		R carré (ajust) = 94,66%	

Tab. IV-9: Analyse de régression pour la composante F_a .

En éliminant les termes non significatifs, l'analyse de la surface de réponse nous permet d'obtenir les résultats représentés sur le tableau IV-10:

Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P
Constante	270,0	74,630	3,618	0,002	
Vc	-1,5	0,157	-9,849	0,000	
fz	3,9	272,862	0,014	0,989	
ap	690,8	215,908	3,200	0,004	
ap*ap	-388,3	168,804	-2,300	0,032	
fz*ap	1413,5	421,036	3,357	0,003	
S = 37,21		R-carré = 95,3%		R-carré (ajus) = 94,2%	

Tab. IV-10: Analyse de régression pour la composante F_a après exclusion des termes non significatifs.

La réponse de l'effort F_a en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. IV-13), cette figure montre les effets de la variation des facteurs de coupe (V_c , a_p et f_z) sur F_a . Elle montre d'une manière générale l'effet significatif de la vitesse de coupe sur l'effort de coupe suivi de la profondeur de passe. Ces diagrammes

montrent que l'effort F_a est d'autant important qu'on a une faible vitesse de coupe, grande profondeur de passe.

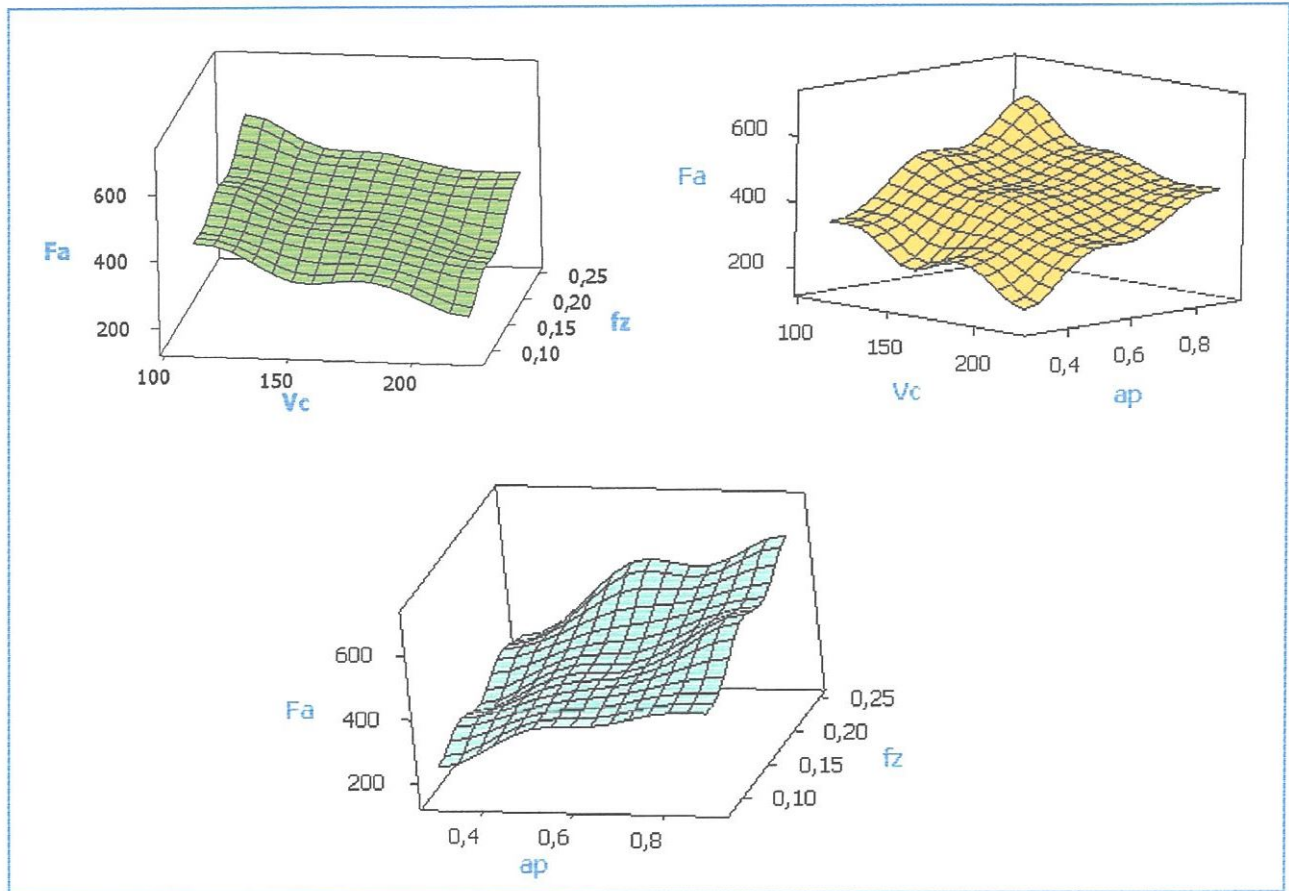


Fig-IV-13- Diagrammes de surfaces de F_a en fonction de (V_c , f_z , a_p).

La figure IV-14 montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe F_a . On constate que les faibles vitesses de coupe influent sur l'effort de coupe et plus la vitesse augmente plus l'effort diminue. L'impact de croissance de l'avance par dent sur l'effort de coupe est faible. Tandis que la profondeur de passe est le facteur qui a l'influence majeure sur F_a parmi tous les facteurs.

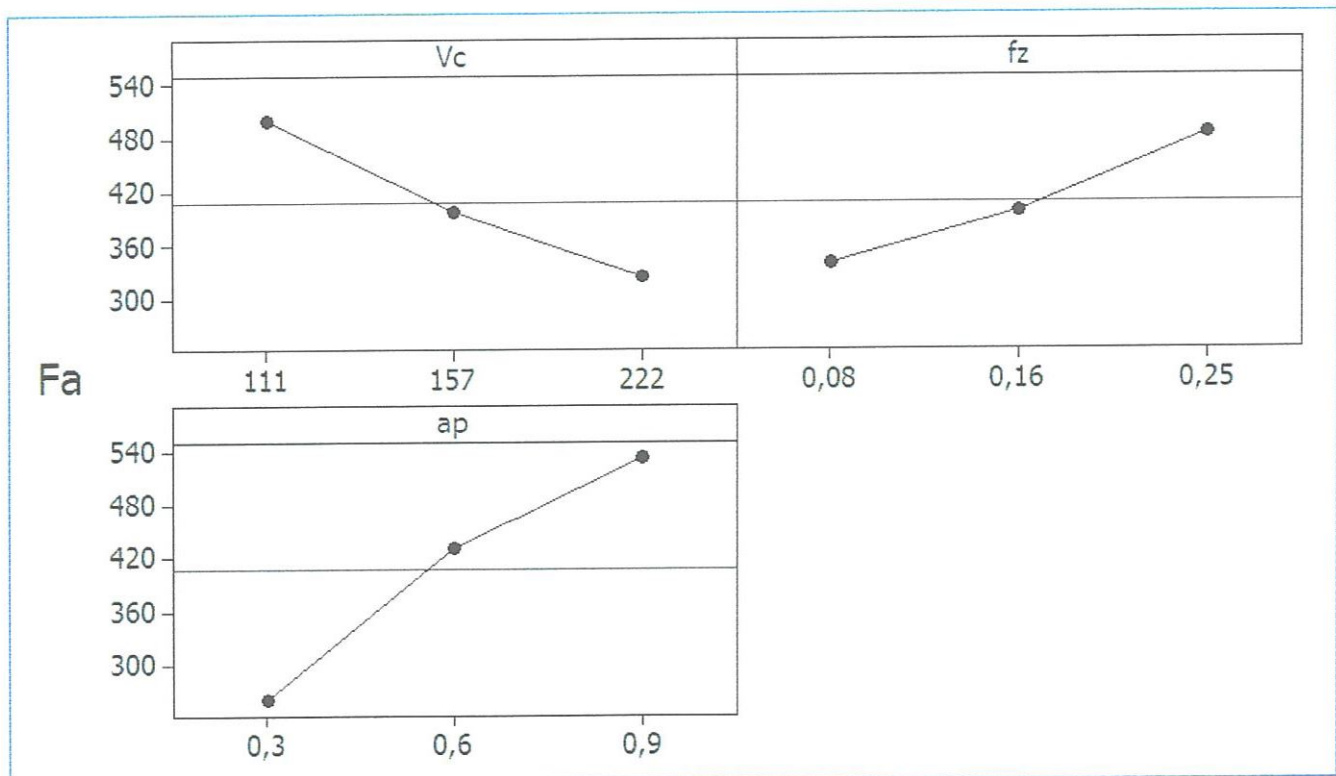


Fig.IV-14- Graphique des effets principaux pour F_a .

La figure IV-15 montre qu'il y a interaction entre l'avance par dent et la profondeur de passe, mais elle est insignifiante, car la probabilité P-value de f_z est inférieure à 5% pour l'effort de coupe F_a .

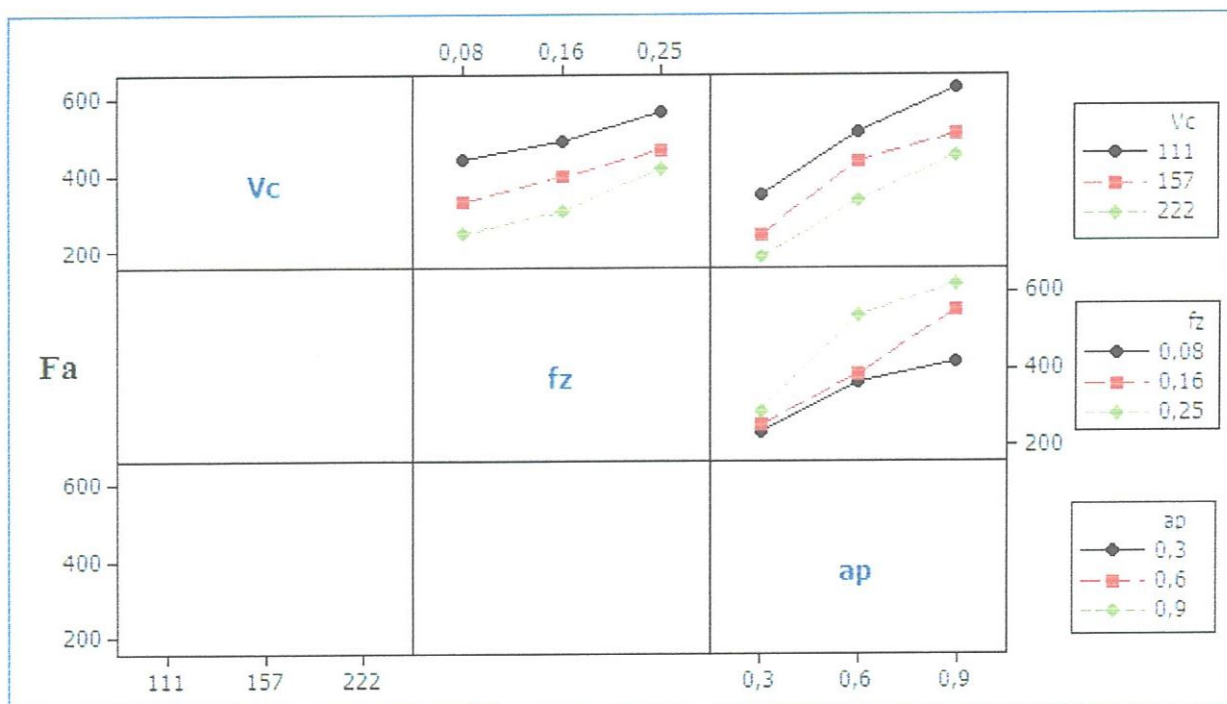


Fig.IV-15 : Diagramme d'interaction pour F_a .

En considérant un niveau de signification de 0,05, c'est-à-dire pour un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la Vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un impact significatif sur l'effort de coupe F_a car la valeur de la probabilité P-value est inférieure à 0,05 (Tableau IV-9). La valeur de P-value des l'interactions $ap*ap$ et $fz*ap$ qui sont inférieure à 0,05 (Tableau IV-9) signifie aussi qu'elles ont un impact significative dans l'intervalle de confiance considéré.

L'équation de régression de F_a est:

Modèle complet :

$$F_a = 603,63 - 5,11 V_c - 873,39 f_z + 724,14 a_p + 0,01 V_c * V_c + 1385,26 f_z * f_z - 388,27 a_p * a_p + 2,56 V_c * f_z - 0,2 V_c * a_p + 1413,47 f_z * a_p.$$

$$R^2 = 96,51\%.$$

Modèle réduit :

$$F_a = 270,0 - 1,51 V_c + 3,9 f_z + 690,796 a_p - 388,272 a_p * a_p + 1413,5 f_z * a_p.$$

$$R^2 = 95,3 \ %.$$

Pour valider le model de F_a , on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de F_a et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value < 0,009) (fig.IV-16).

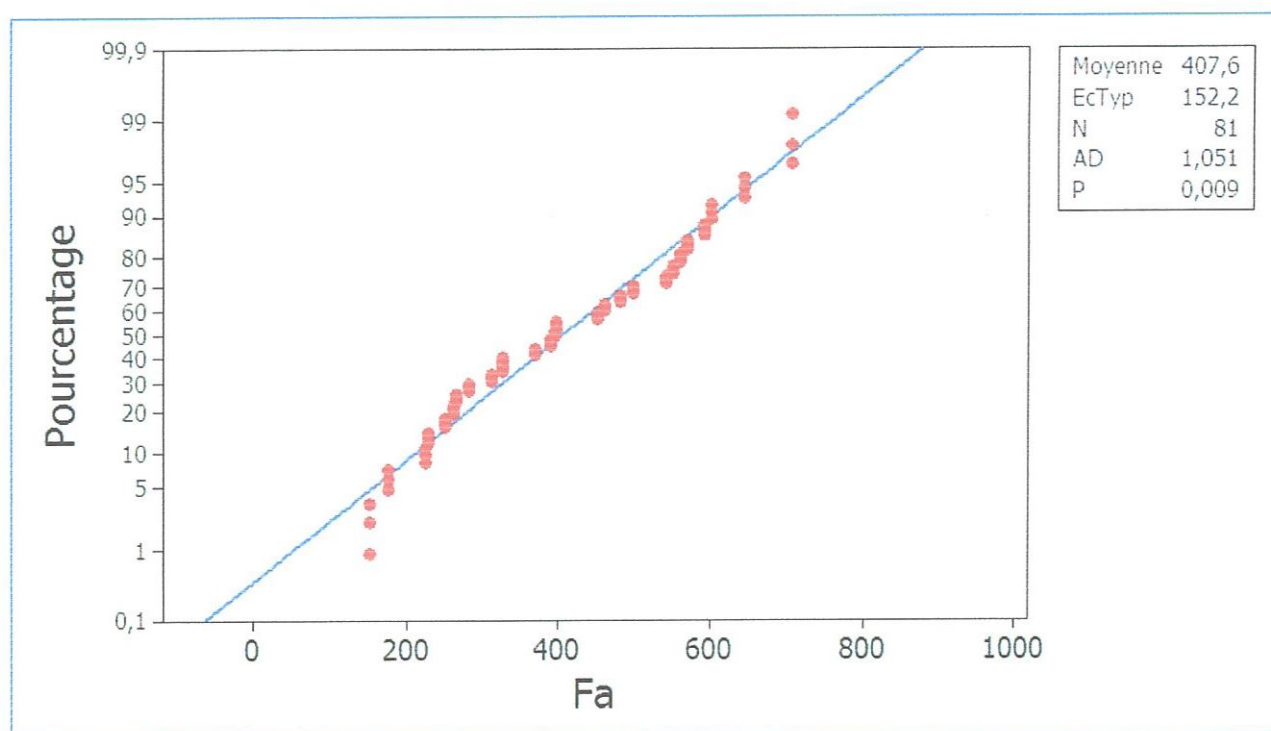


Fig.IV-16- Test de normalité de la distribution des résidus pour F_a .

Finalement la figure IV-17 montre le domaine d'influence de la profondeur de passe et la vitesse de coupe sur l'effort de coupe F_a .

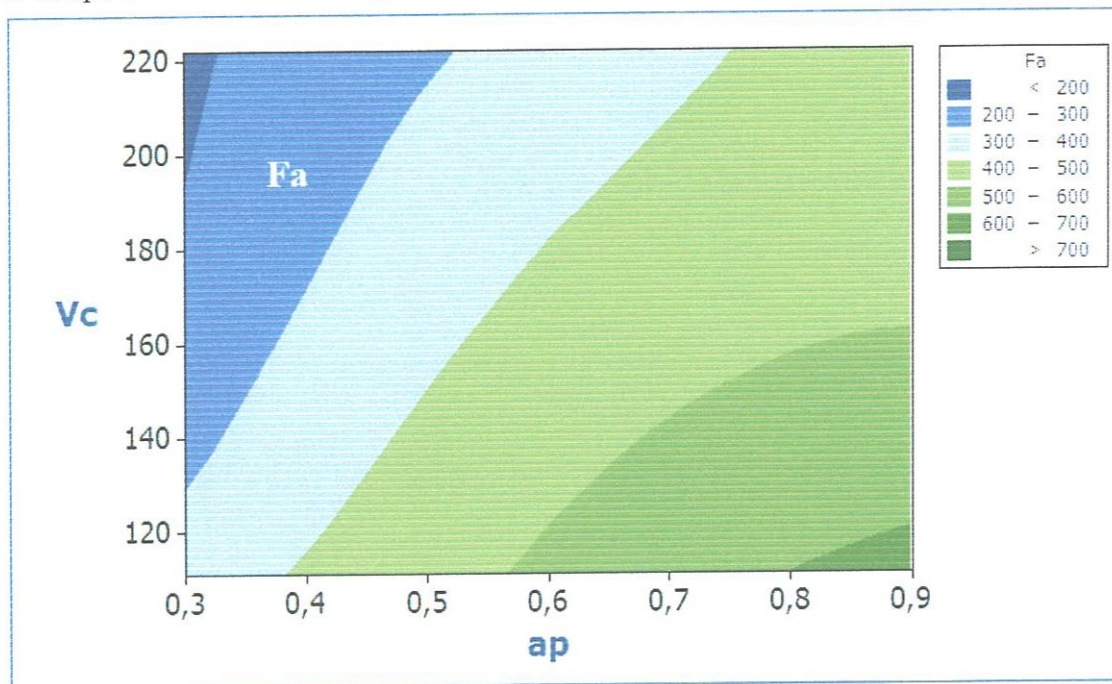


Fig. IV-17 : Graphique de contour de F_a en fonction de V_c ; f_z

IV-3-3-1- Régression de la surface de réponse de F_v en fonction de V_c , f_z , a_p :

L'analyse de la surface de réponse des résultats représentés dans le tableau IV-8, nous a permis aussi de déterminer les coefficients de régression estimés pour la composante de l'effort de coupe F_v d'une manière générale (Tab.IV-11).

Terme	Coef	Coef ErT	T	P
Constante	698,56	107,01	6,528	0,000
V_c	-5,23	1,06	-4,940	0,000
f_z	199,26	491,35	0,406	0,690
a_p	341,20	140,80	2,423	0,027
$V_c * V_c$	0,01	0,00	3,558	0,002
$f_z * f_z$	924,11	1238,46	0,746	0,466
$a_p * a_p$	-64,20	99,02	-0,648	0,525
$V_c * f_z$	-0,83	1,33	-0,625	0,540
$V_c * a_p$	0,31	0,38	0,822	0,422
$f_z * a_p$	1075,40	246,98	4,354	0,000

$$S = 21,8294 \quad R \text{ carré} = 98,83\% \quad \text{carré (ajust)} = 98,21 \%$$

Tab. IV-11: Analyse de régression pour la composante F_v .

En éliminant les termes non significatifs, l'analyse de la surface de réponse nous permet d'obtenir les résultats représentés sur le tableau IV-12:

Terme	Coeff	Er-T	Coef	T	P
Constante	688,70	80,589		8,546	0,000
Vc	-5,18	0,962		-5,379	0,000
fz	370,02	152,424		2,428	0,024
ap	314,72	41,743		7,540	0,000
Vc*Vc	0,01	0,003		3,736	0,001
fz*ap	1075,40	235,195		4,572	0,000

S = 20,79 R-carré = 98,7% R-carré (ajus) = 98,4%

Tab. IV-12: Analyse de régression pour la composante Fv après exclusion des termes non significatifs.

La réponse de l'effort Fv en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. IV-18), cette figure montre les effets de la variation des facteurs de coupe (Vc, ap et fz) sur Fv. Elle montre d'une manière générale l'effet significatif de la profondeur de passe sur l'effort de coupe suivi de la vitesse de coupe. Ces diagrammes montrent que l'effort Fv est d'autant important qu'on a une faible vitesse de coupe, grande profondeur de passe.

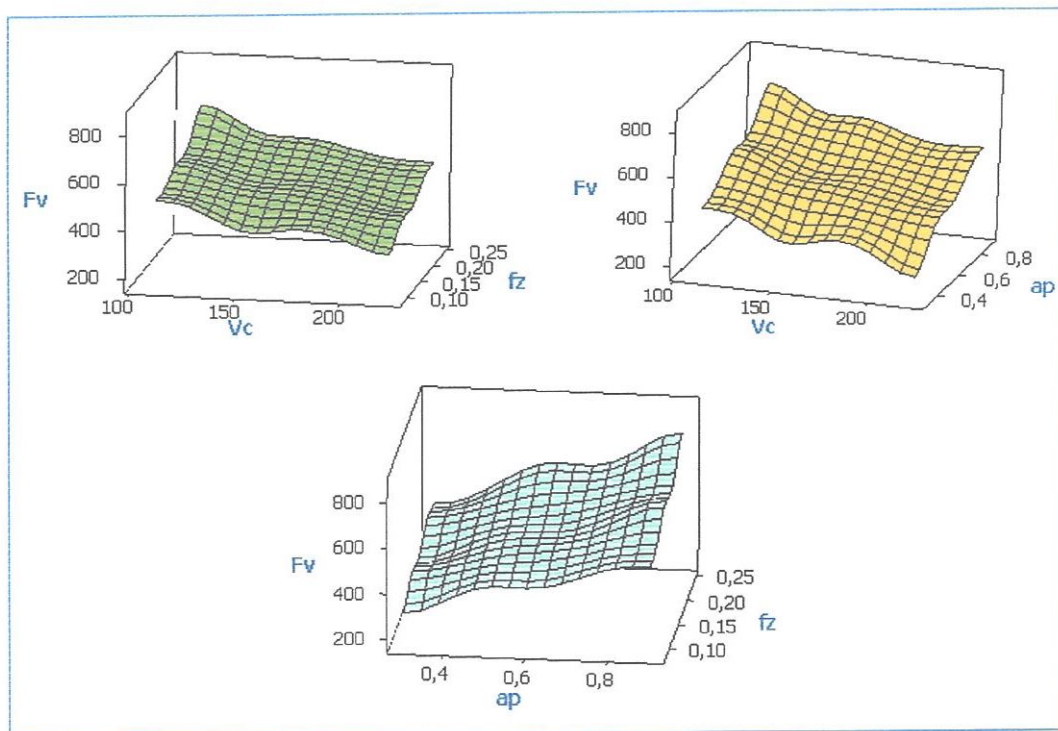


Fig-IV-18- Diagrammes de surfaces de Fv en fonction de (Vc, fz, ap).

La figure IV-19 montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe F_v . On constate que les faibles vitesses de coupe influent sur l'effort de coupe et plus la vitesse augmente plus l'effort diminue. L'impact de croissance de l'avance par dent sur l'effort de coupe est faible. Par contre la profondeur de passe est le facteur qui a la plus grande influence sur F_v parmi ces facteurs de coupe.

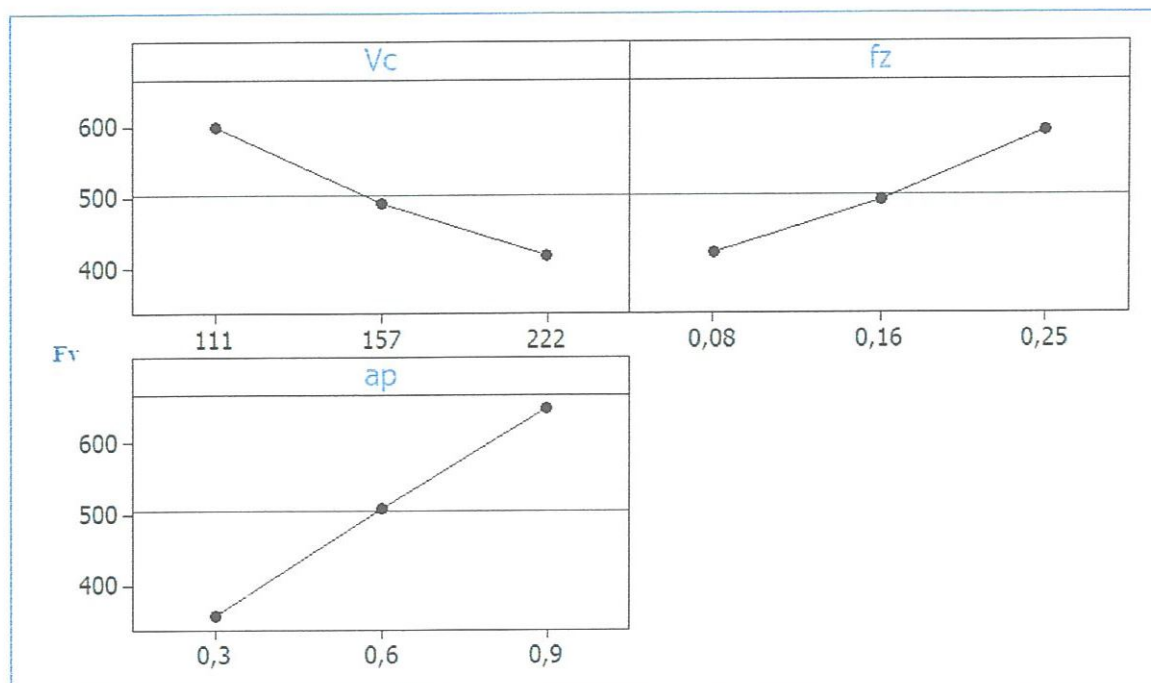


Fig.IV-19- Graphique des effets principaux pour F_v .

La figure IV-20 montre qu'il n'y a aucune interaction entre les différents binômes des paramètres de coupe pour l'effort de coupe F_v .

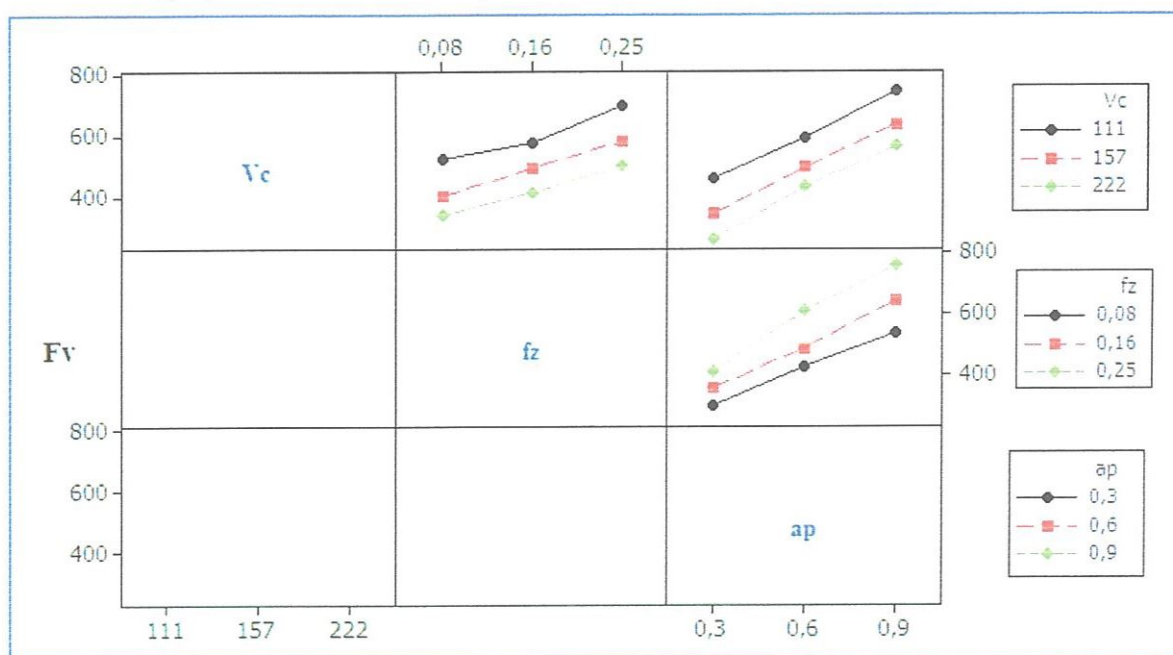


Fig.IV-20 : Diagramme d'interaction pour F_v .

En considérant un niveau de signification de 0,05, c'est-à-dire pour un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la Vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un impact significatif sur l'effort de coupe F_v car la valeur de la probabilité P-value est inférieure à 0,05 (Tableau IV-9). La valeur de P-value de l'interaction V_c*V_c qui est inférieure à 0,05 (Tableau IV-9) signifie aussi qu'elle a un impact significative dans l'intervalle de confiance considéré.

L'équation de régression de F_v est:

Modèle complet :

$$F_v = 698,56 - 5,23V_c + 199,26f_z + 341,2ap + 0,01V_c*V_c + 924,11f_z*f_z - 64,2ap*ap - 0,83V_c*f_z + 0,31V_c*ap + 1075,4f_z*ap.$$

$$R^2 = 98,21 \ %.$$

Modèle réduit :

$$F_v = 688,70 - 5,18V_c + 370,02f_z + 314,72ap + 0,011V_c*V_c + 1075,4f_z*ap.$$

$$R^2 = 98,7 \ %.$$

Pour valider le modèle de F_v , on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de F_v et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value < 0,045) (fig.IV-21).

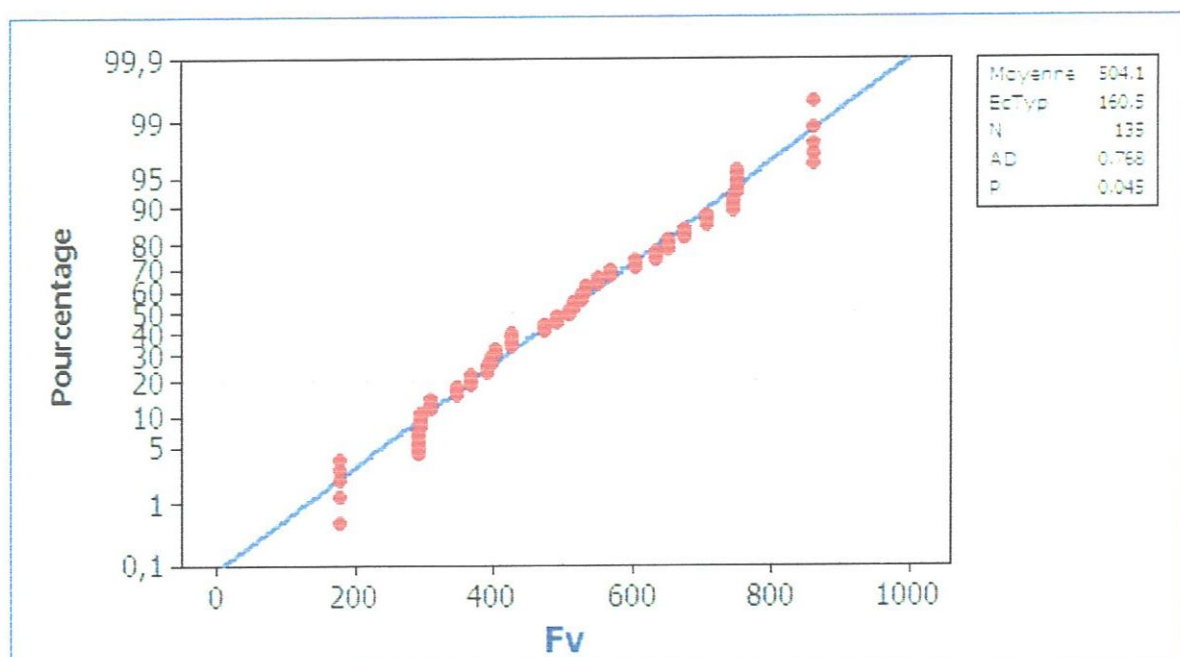


Fig.IV-21- Test de normalité de la distribution des résidus pour F_v .

IV-3-3-3- Régression de la surface de réponse de Fr en fonction de Vc, fz, ap :

L'analyse de la surface de réponse des résultats représentés dans le tableau IV-8, nous a permis aussi de déterminer les coefficients de régression estimés pour la composante de l'effort de coupe Fr d'une manière générale (Tab.IV-13).

Terme	Coef	Coef ErT	T	P
Constante	414,35	129,00	3,212	0,005
Vc	-4,14	1,28	-3,246	0,005
fz	-389,76	592,32	-0,658	0,519
ap	483,83	169,74	2,850	0,011
Vc*Vc	0,01	0,00	3,171	0,006
fz*fz	972,22	1492,98	0,651	0,524
ap*ap	-161,11	119,37	-1,350	0,195
Vc*fz	-1,61	1,60	-1,003	0,330
Vc*ap	-0,46	0,45	-1,015	0,324
fz*ap	1218,64	297,73	4,093	0,001

S = 26,3154 R carré = 96,83% R carré (ajust) = 95,15%

Tab. IV-13: Analyse de régression pour la composante Fr.

En éliminant les termes non significatifs, l'analyse de la surface de réponse nous permet d'obtenir les résultats représentés sur le tableau IV-14:

Terme	Coef	Er-T Coef	T	P
Constante	528,6	102,698	5,148	0,000
Vc	-4,7	1,227	-3,815	0,001
fz	-329,6	194,242	-1,697	0,105
ap	215,2	53,195	4,046	0,001
Vc*Vc	0,0	0,004	3,150	0,005
fz*ap	1218,6	299,722	4,066	0,001

S = 26,49 R-carré = 96,0% R-carré (ajus) = 95,1%

Tab. IV-14: Analyse de régression pour la composante Fr après exclusion des termes non significatifs.

La réponse de l'effort Fr en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. IV-22), cette figure montre les effets de la variation des facteurs de

coupe (V_c , a_p et f_z) sur F_r . Elle montre d'une manière générale l'effet significatif de la profondeur de passe sur l'effort de coupe suivi de la vitesse de coupe. Ces diagrammes montrent que l'effort F_r est d'autant important qu'on a une grande profondeur de passe, faible vitesse de coupe.

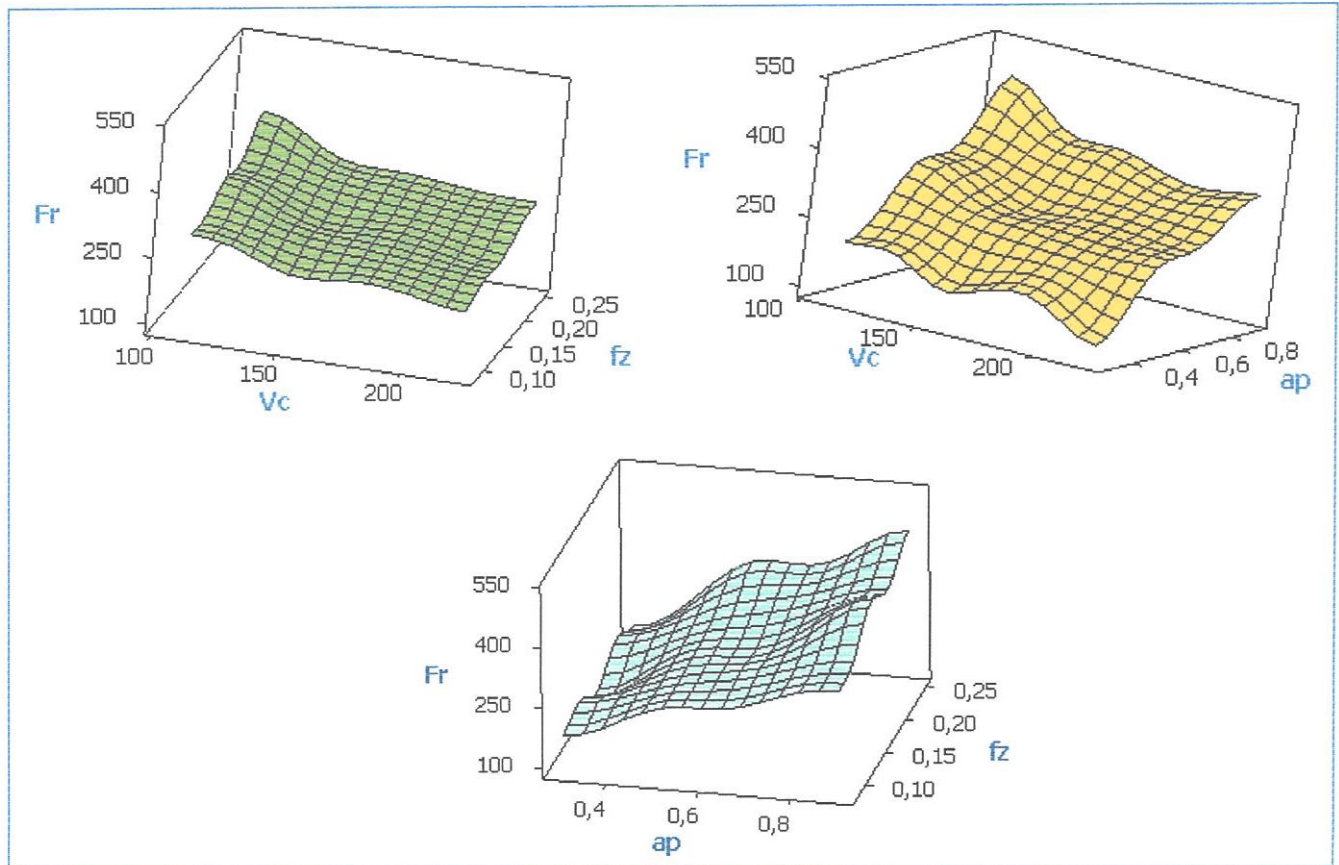


Fig-IV-22- Diagrammes de surfaces de F_r en fonction de (V_c , f_z , a_p).

La figure IV-23 montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe F_r . On constate que les faibles vitesses de coupe influent sur l'effort de coupe et plus la vitesse augmente plus l'effort diminue. L'impact de la croissance de l'avance par dent sur l'effort de coupe est insignifiant. Tandis que la profondeur de passe est le facteur qui a l'influence majeure sur F_a parmi les trois facteurs.

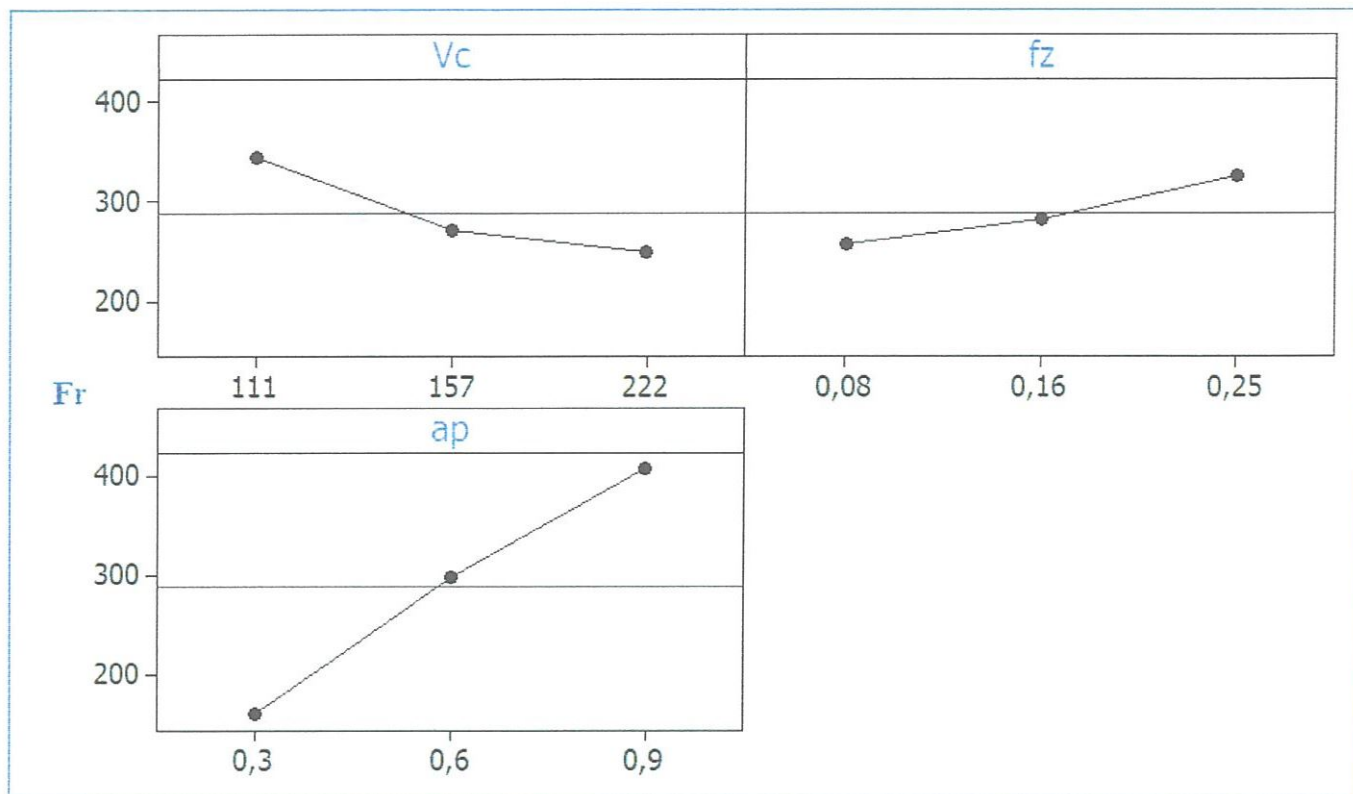


Fig.IV-23- Graphique des effets principaux pour Fr .

La figure IV-24 montre qu'il n'y a aucune interaction entre les différents binômes des paramètres de coupe pour l'effort de coupe Fr . La seule interaction dans ce diagramme $fz*ap$ est insignifiante car la valeur de P-value est inférieure à 0,05.

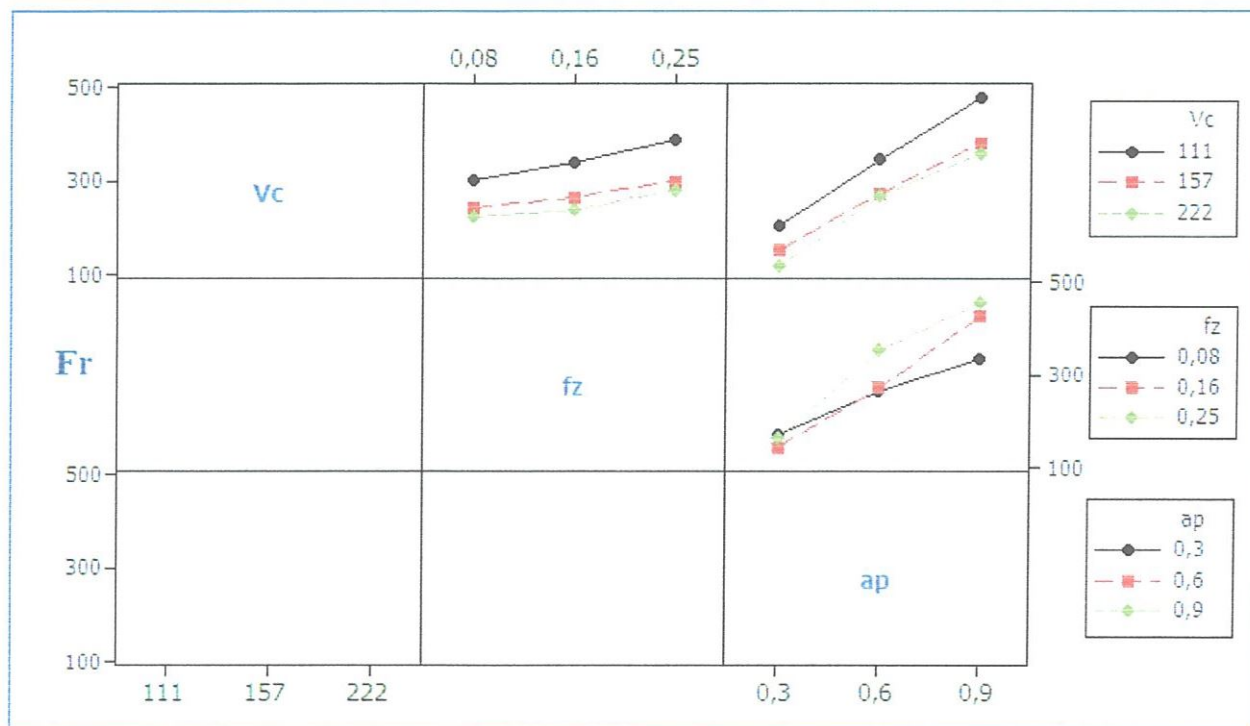


Fig.IV-24 : Diagramme d'interaction pour Fr .

En considérant un niveau de signification de 0,05, c'est-à-dire pour un intervalle de confiance de 95%, on constate que seules la Vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un impact significatif sur l'effort de coupe Fr car la valeur de la probabilité P-value est inférieure à 0,05 (Tableau IV-13). La valeur de P-value des l'interactions $ap*ap$ et $fz*ap$ qui sont inférieure à 0,05 (Tableau IV-13) signifie aussi qu'elles ont un impact significative dans l'intervalle de confiance considéré.

L'équation de régression de Fr est:

Modèle complet :

$$Fr = 414,35 - 4,14Vc - 389,76fz + 483,83ap + 0,01Vc*Vc + 972,22fz*fz - 161,11ap*ap - 1,61Vc*fz - 0,46Vc*ap + 1218,64fz*ap.$$

$$R^2 = 96,83 \%$$

Modèle réduit :

$$Fr = 528,6 - 4,68Vc - 329,6fz + 215,2ap + 0,001Vc*Vc + 1218,64fz*ap.$$

$$R^2 = 96,0 \%$$

Pour valider le modèle de Fr , on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de Fr et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value < 0,024) (fig.IV-25).

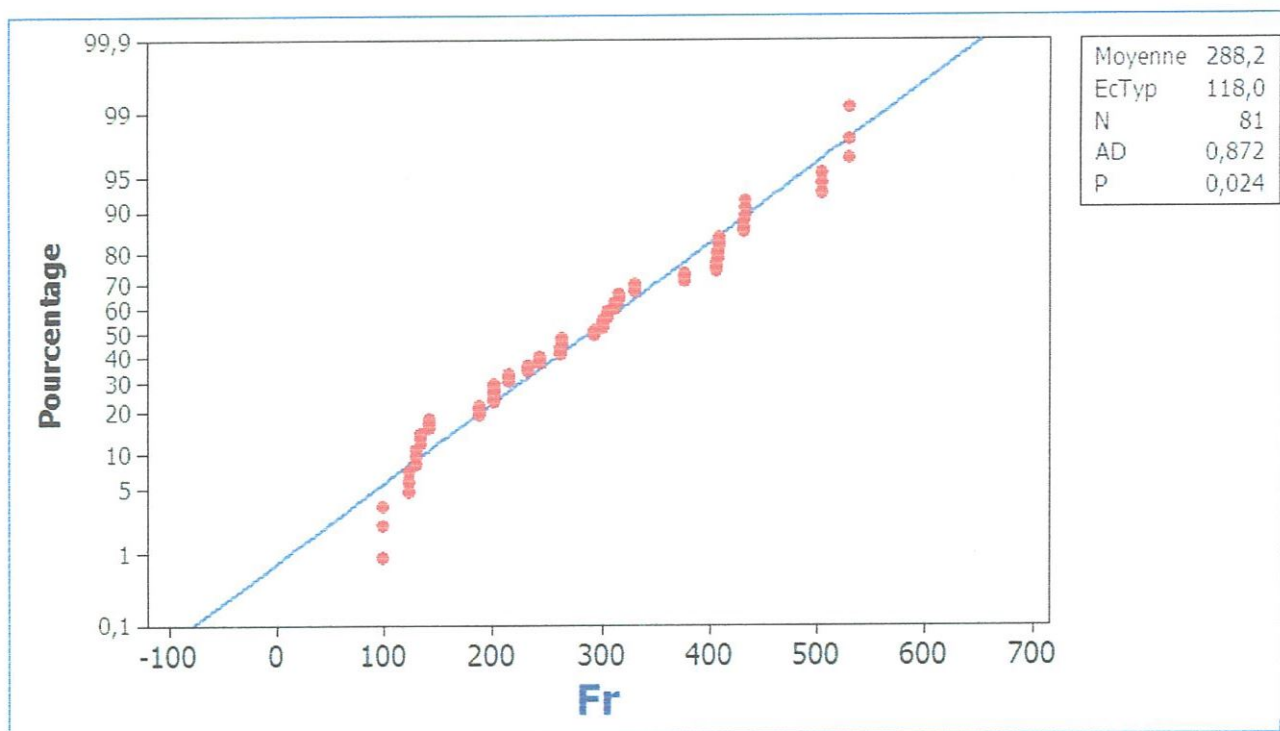


Fig.IV-25- Test de normalité de la distribution des résidus pour Fr .

IV-4- Modèles de la tenue des plaquettes de coupe en fonction des paramètres de coupe :

IV-4-1- Résultats expérimentaux :

Dans le tableau IV-15 sont présentés les valeurs expérimentales de la longueur de coupe L_c . Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des facteurs de coupe (V_c et f_z) selon un plan d'expérience 2^2 .

N°	Facteurs		Paramètre
	$V_c(\text{m/min})$	$f_z(\text{mm/dent})$	Longueur de coupe
1	111	0,12	11481
2	111	0,2	14248
3	222	0,12	3196
4	222	0,2	3227

Tab.IV-15 : Longueur de coupe de la plaquette GC4040

Pour $V_B = 0,3\text{mm}$ et $a_p = 0,6\text{mm}$.

IV-4-2- Méthode appliquée :

La méthode appliquée pour la détermination du modèle mathématique est l'analyse de la surface de réponse, en utilisant un logiciel de statistique Minitab 15. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la tenue de l'outil. Pour cela on doit choisir un niveau de signification α à ne pas dépasser.

IV-4-3- Analyse de la variance (ANOVA) :

IV-4-3-1- Régression de la surface de réponse de L_c en fonction de V_c , f_z :

L'analyse de la surface de réponse des résultats représentés dans le tableau IV-15, nous a permis de déterminer les coefficients de régression estimés pour la longueur de coupe.

La réponse de la tenue L_c en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. IV-1). Cette figure montre les effets de la variation des facteurs (V_c et f_z) sur L_c . Elle montre d'une manière générale l'effet significatif de la vitesse de coupe sur la longueur suivie de la vitesse de coupe, en particulier pour les faibles vitesses. Ce diagramme montre que l'augmentation de la vitesse de coupe a une grande influence sur la tenue.

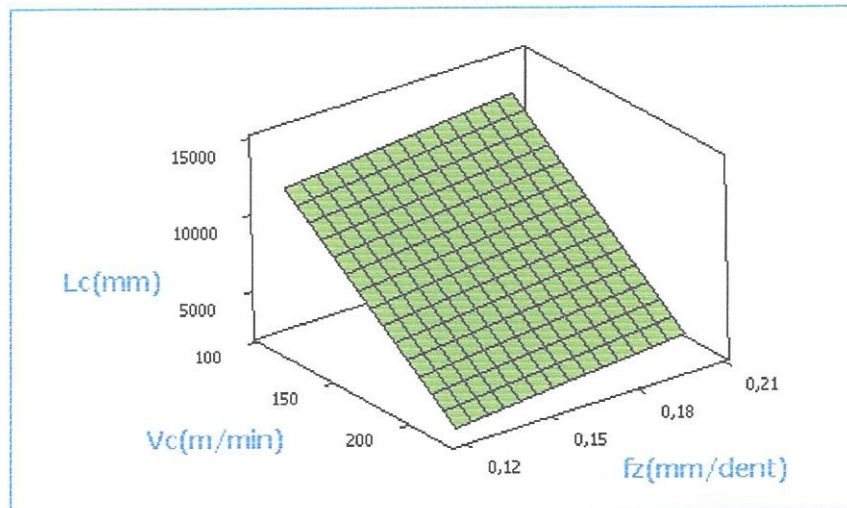


Fig-IV-26- Diagrammes de surfaces de L_c en fonction de (V_c , f_z).

La figure IV-27 montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la longueur de coupe L_c . On constate que l'impact de la vitesse de coupe est si important sur la tenue de l'outil. Plus la vitesse de coupe augmente, plus la tenue de l'outil exprimée par la longueur de coupe diminue. Par contre l'impact de l'avance par dent sur la tenue de l'outil est si faible, ceci est exprimé par sa faible pente.

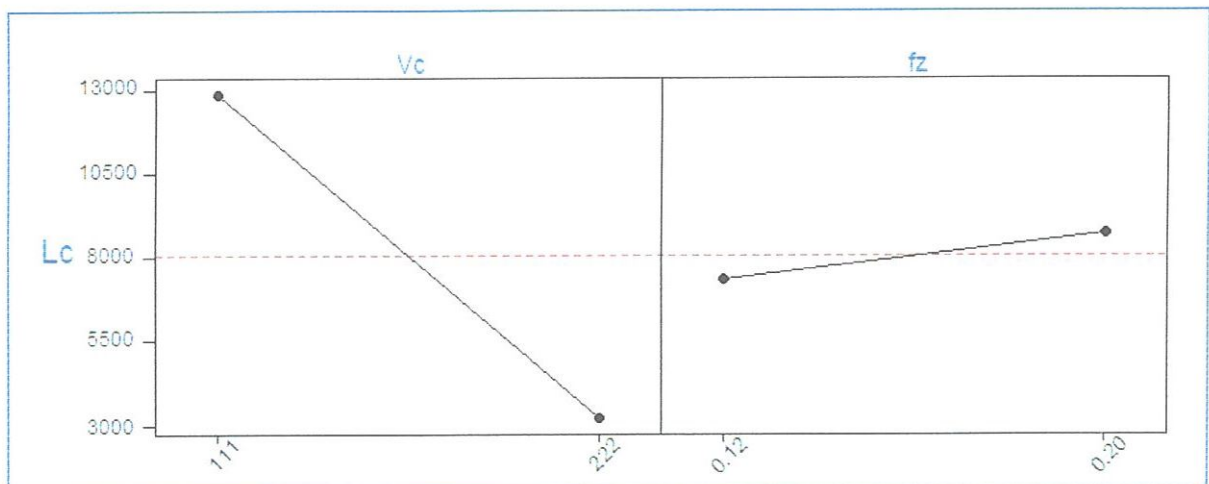


Fig.IV-27- Graphique des effets principaux pour la longueur de coupe L_c .

Modèle de prédiction de L_c :

Le modèle de prédiction de la tenue de l'outil exprimé par L_c s'écrit :

$$L_c = 19719,5 - 87V_c + 17487,5f_z.$$

$$R^2 = 98,1 \, \%$$

IV-5- Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de déterminer les coefficients de détermination et les modèles mathématiques qui nous permettent de mieux voir le degré d'influence des différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe et longueur de coupe) sur les différents paramètres technologiques étudiés (rugosité de la surface usinée, effort de coupe et usure de l'outil) lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. Ces modèles qui sont d'une grande importance économique dans le milieu industriel, parcequ'ils permettent de prédire les conditions d'usinage pour optimiser le processus de coupe. A partir de ces résultats, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- L'avance par dent a un impact considérable sur les différents critères de la rugosité étudié (R_a , R_z , R_t), suivi en deuxième lieu par la profondeur de passe.
- Les efforts de coupe sont très influencé par la profondeur de passe et l'avance par dent, tandis que la vitesse de coupe influe peu.
- La longueur de coupe est un facteur déterminant de la tenue de l'outil. Il influence directement l'usure de l'outil, ce qui cause une dégradation de l'état de surface.

Conclusion générale

L'étude expérimentale de l'usinabilité de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 en fraisage, en utilisant comme matériaux de coupe, le carbure revêtu (GC4040) et le cermet (CT530). Nous a permis de mettre en évidence, d'une part l'impact des paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe et longueur de coupe) sur le comportement des paramètres technologiques à savoir (rugosité de la surface usinée, effort de coupe et usure de l'outil de coupe). D'autre part l'influence du mode d'usinage (en opposition ou en concordance), usinage à sec ou avec lubrification, sur ces paramètres technologiques. Ce qu'il nous a mené à tirer les conclusions suivantes :

- * L'avance par dent inférieur à 0,08mm/dent est à éviter pour les deux nuances tester. car on a enregistré des rugosités élevées.
- * L'avance par dent est le facteur qui affecte le plus, la rugosité de la surface usinée pour les trois critères étudié (Ra, Rz et Rt).
- * Le domaine conseillé de l'avance par dent qui permet d'obtenir la meilleure rugosité est situé entre 0,08 et 0,2 mm/dent.
- * Les rugosités des surfaces usinées obtenues par le cermet sont meilleurs que celles obtenue par le carbure revêtu en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent.
- * Le fraisage en concordance donne d'une manière générale de meilleurs résultats d'état de surface que le fraisage en opposition, $Rt_{op}=14,16\mu m$; $Rt_{co}=8,95\mu m$ ($f_z=0,12mm/dent$). Sauf que pour le cermet et à faibles valeurs de paramètres de coupe, le fraisage en opposition à donner des résultats meilleurs.
- * Le fraisage avec lubrification à donner de meilleurs résultats d'état de surface que le fraisage à sec pour les deux matériaux de coupe utilisés.
- * L'effort de coupe diminue considérablement avec la croissance de la vitesse de coupe.
- * La profondeur de passe est le paramètre qui a la plus grande influence sur l'effort de coupe, suivi par l'avance par dent.
- * Pour toutes les conditions de coupe testées, l'effort de coupe prépondérant est l'effort tangentiel suivi par l'effort axial et en dernier lieu vient l'effort radial.
- * L'augmentation de la vitesse de coupe lors de l'usinage de cet acier inoxydable avec le carbure revêtu favorise l'apparition de l'arête rapportée.

- * L'augmentation de la vitesse de coupe a un impact beaucoup plus important sur la tenue de l'outil que l'avance par dent.
- * La tenue de la fraise diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.
- * La longueur usinée croît avec l'augmentation de l'avance par dent.
- * Les conditions de coupe optimales en termes d'usure sont obtenues à $V_c=111\text{ m/min}$; $f_z=0,11\text{ mm/dent}$.
- * Les modèles de prédiction déterminent statistiquement, ainsi que les coefficients de détermination, valident les résultats obtenus expérimentalement.
- * Le graphique des effets principaux a bien montré que l'avance par dent est le paramètre de coupe le plus influent sur la rugosité, et que la profondeur de passe est le paramètre qui influe plus sur les efforts de coupe.
- * Le graphique de contour permet de situer directement un intervalle du paramètre technologique étudié en fonction des paramètres de coupe considérés.

Perspectives

- * Etudier l'usinabilité dans d'autres matériaux inoxydables
- * Etudier le comportement de nouvelles nuances de matériaux de coupe
- * Etudier l'impact des vibrations sur le processus de coupe en fraisage
- * Déterminer des modèles mathématiques avec un plus grand nombre de facteurs.

References bibliographiques

- [01] S. BISSEY. Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : Cas du fraisage des aciers traités thermiquement. Thèse doctorat à l'ENSAM, N°d'ordre : 2005-04.
- [02] Cours 1^{ère} année magistère, Techniques et modélisation des processus de coupe.
- [03] M BENGHERSALLAH. Détermination de l'usinabilité des aciers au cours du fraisage. Thèse de magister, Université de Annaba, 1995.
- [04] R. WEILL. Technique d'usinage, Dunod. Paris 1971.
- [05] B. GRUBER, Outillage et mesure, Dunod spes, pp 51-63. 1981.
- [06] A.A. CZAPLIKI, « L'usinabilité de la coupe des métaux », revue de la société royale Belge des ingénieurs et industries n° 12, pp.708-738. 1962.
- [07] SANDVIK, Fraisage « principes, principales opérations » Technique de l'ingénieur [BM 7082-BM7083] (2004).
- [08] A BENYOUCEF. Modélisation de l'effort de coupe dans le cas du fraisage hémisphérique par une approche mécanistique. Mémoire de magister, Université de Batna, 06-2006.
- [09] P-J.CUNAT, Aciers inoxydables « Critères de choix et structure, Propriétés et résistance à la corrosion, mise en œuvre » Technique de l'ingénieur [M 4540, M4541, M4542] (2004).
- [10] GLADEL G ; GOURDET D ; TOUS J.L. Matériaux pour outils de coupe. Technique de l'ingénieur, B7080, pp 2-16, 1984.
- [11] REYER J.P et ROBY J, « Application des revêtements céramiques dans l'industrie mécaniques » CETIM Information, n° 94, pp.56, 1986.
- [12] SANDVIK, Fraisage « Etude de cas » Technique de l'ingénieur [BM 7084] (2004).
- [13] T.G. Dawson, Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools, Georgia institute of technology (2002).
- [14] A. CHEVALIER. Guide du dessinateur industriel, Hachette technique - édition -2004.
- [15] CETIM, Etats de surface – Description – Elaboration - Mesure, Notes techniques n°18,1979.
- [16] BOUCHLAGHEM, Etude de l'impact des conditions de coupe et de l'usure sur les différents paramètres technologiques en tournage dur, Mémoire de magister, Université de Guelma (2005).
- [17] D. Gelin; M. Vincent, Eléments de fabrication, édition ellipses 1995.

- [18] M.A. YALLESE, Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, Thèse de doctorat, Université Annaba, 2005.
- [19] T.N Loladze, of the theory of diffusion wear, annals of the CIRP, 30(1), pp71-75, 1981.
- [20] Dietrich. Retcol, précis de méthodes d'usinage, 5ème édition p 109 Nathan 1985.
- [21] F. Geiskopt, Y. Calandon et E. Due, Usinage à grande vitesse, Nipport ENScachan, LURPA, 1999
- [22] Cao G CARRO, M SANTOCHI, La formation du copeau et la surface usinée, INSA Lyon, pages 367-376 ; 1979.
- [23] G. WARNECKE, G. HUMMEL, Enlèvement de copeaux sur des matériaux métalliques – formation de copeaux – découpe dans la microstructure, film c 1246, Institut du Film Scientifique Gottingen, 1977.
- [24] E. FELDER, Procédé d'usinage « présentation » Technique de l'ingénieur [B7000] (2004)
- [25] R. Butin et M. Pinot, Technologie de fabrication T III – édition Foucher – (1983)
- [26] D. O'Sulliran, M. Cotterell, Machinability of austenitic stainless steel, SS303, Mater. Process. Technol. 124 (2002) 153–159.
- [27] J. Giu, G. Barber, S. Tung, R.-J. Gu, Tool life and wear mechanisms of uncoated and coated milling inserts, Wear 225–229 (1999) 273–284.
- [28] CJ NOVAK, in D. Peckner, I.M. Bernsrein (Eds) Handbook of stainless steels, MacGraw-Hill, New york, 1997, pp. 4-1- 4-7.8.
- [29] K. Tetel, Machining of stainless steels Handbook, 9th ed, ASM International, 1989. p. 681.
- [30] M.P. Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing-Materials Processes, and systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1990.
- [31] J. Parro, H. Hänninen, V. Kauppinen, Tool wear and machinibilty of X5CrMnN 1818 stainless steels, J. Mater. Process. Technol. 199 (2001) 14-20.
- [32] S. Agrawal, A.K. Chakrabari, A.B. Chattopadhyay, A study of the machining of cast austenitic stainless steels with carbide tools, J. Mater Process. Technol. 52 (1995) 610-620.
- [33] M. Nordin, R. Sudström, T.I. Selinder, S. Hogmark, Wear and failure mechanisms of multilayered PVD TiN/TaN coated tools when milling austenitic stainless steels, Surf, Coat. Technol 133-134 (2000) 240-246.

- [34]: K.A. Abou-El-Hossein, Z. Yahya, High-speed end-milling of AISI 304 stainless steels using new geometrically developed carbide inserts, *J. Materials Processing Technology* 162–163 (2005) 596–602
- [35] M.A.Yallese, L.Boulanouar, N-E.Zeghib, S.Belhadi, J-F.Rigal, Etude des efforts de coupe et de la temperature lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 par un outil CBN, *Revue. Synthèse* N° 16, juin (2007) 74-86
- [36] S. Belhadi, M.A.Yallese, L. Boulanouar et N. Ouelaa, Influence des conditions de coupe sur la rugosité de l'acier 45NiCrMo16 traité usiné avec un outil CBN, *ENSET*,
- [37] Ersan Aslan, Necip Camus, Burak Birgören, Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool, *Materials and Design* 28 (2007) 1618–1622
- [38] Xavier, M.A., Adithan, M, Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel, *J. Mater. Process. Tech.* (2008), doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.02.068
- [39] I.Hajjaji, A.BenAmara, R.Fredj, Etude expérimentale de l'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface en tournage dur, *Premier Congrès International, CMSM'2005*, Monastir Tunisie
- [40] H.Z. Li, H. Zeng, X.Q. Chen, An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts, *J. Mater. Process. Technol.* 180 (2006) 296–304
- [41] J. Vivancos, C.J. Luis, J.A. Ortiz, H.A. Gonz'alez, Analysis of factors affecting the high-speed side milling of hardened die steels, *J. Mater. Process. Technol.* 162–163 (2005) 696–701
- [42] W. BOUZID, A. ZAGHAL, L. SAÏ, Optimisation de la rugosité des surfaces fraises, *Revue de mécanique appliquée et théorique*, vol. 1,5. 341-356 (2003).
- [43] A. KOZLOWSKI, Données numériques sur les aciers inoxydables, *Technique de l'ingénieur*, M323, pp 19-44, (2004).