

**République Algérienne Démocratique & populaire**  
**Université 8 Mai 1945 Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



**THÈSE**

Présentée pour obtenir le grade de

**DOCTEUR**  
de  
**L'université de 8 Mai 1945 Guelma**

Spécialité : Génie Mécanique

Présenté par

**BERKANI SOFIANE**

**Comportement des carbures métalliques lors de l'usinage des aciers  
inoxydables : Application aux austénitiques et martensitiques**

**Directeur de thèse : Pr. Yallese Mohamed Athmane**

Devant le jury d'examen composé de :

Pr.	Boulanouar Lakhdar	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
Dr. (MC/A)	Belbah Ahmed	Université 8Mai 1945 -Guelma	Examineur
Pr.	Amirat Abdelaziz	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
Pr.	Yallese Med. Athmane	Université 8 Mai 1945 -Guelma	Rapporteur
Dr. (MC/B)	Belhadi Salim	Université 8 Mai 1945 -Guelma	Invité

## REMERCIEMENTS

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

Je remercie aussi Monsieur le Professeur L. Boulanouar pour avoir présidé le jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur A. BELBAH, à Monsieur le professeur A. Amirat et à Monsieur S. Belhadi pour leur participation au jury.

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

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

## ملخص:

المميزات الفيزيائية للأصلاب الغير قابلة للصدأ تلعب دورا هاما على قابلية تشغيلها. من بين هذه الخصائص، الناقلية الحرارية و معامل الاحتكاك. ضعف الناقلية الحرارية للأصلاب المضادة للصدأ تولد ارتفاع مهم لدرجات الحرارة في منطقة القطع و عدم إجلائها بسرعة. فيما يخص معامل الاحتكاك، الأصلاب المضادة للصدأ لها قيم عالية جدا لهذا المعامل.

العمل الحالي يتعلق بدراسة تطبيقية لخراطة الأصلاب الغير قابلة للصدأ X2CrNi18-9 et X20Cr13 بواسطة أداة قطع من الكريبيد المغطى بثلاث طبقات [Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN]. الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو استعمال طريقة (RSM) لإيجاد تأثير شروط القطع (سرعة القطع، سرعة التغذية، عمق التمريرة و زمن القطع) على قوة القطع، ضغوطات القطع، استطاعة القطع، خشونة السطح و تآكل أداة القطع. وأيضا قمنا بإيجاد القيم المثالية من أجل تحديد قيم صغيرة لشروط القطع. لدراسة تأثير هذه الشروط و إيجاد معادلات تطور مختلف ظواهر القطع بدلالة شروط القطع. و أخيرا قمنا برسم هذه المعادلات على شكل منحنيات ثلاثية الأبعاد.

**الكلمات الرئيسية:** صلب مقابل الصدأ، AISI304، AISI420، أدوات القطع المغلفة، قوى القطع، حالة

اسطح، التاكل، ANOVA، RSM.

## Résumé

Les propriétés physiques des aciers inoxydables jouent un rôle important sur leur aptitude à être usinés. Parmi ces propriétés physiques, il y a la conductivité thermique et le coefficient de frottement. Les faibles conductivités thermiques des aciers inoxydables provoquent un échauffement important dans la zone de contact outil-copeau, et ne favorisent pas une bonne évacuation de la chaleur produite à l'interface de contact entre le copeau et l'outil. Quant aux coefficients de frottement, les aciers inoxydables possèdent des valeurs élevées.

Le présent travail concerne une étude expérimentale de tournage sur les aciers inoxydables X2CrNi18-9 et X20Cr13 par un outil de coupe en carbure à triple revêtement [Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN]. L'objectif principal de cette étude est d'utiliser la Méthodologie de surface de réponse afin de déterminer l'effet des paramètres de régime de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur de passe et le temps de coupe sur les efforts de coupe, les pressions de coupe, la puissance de coupe, la rugosité de la surface usinée et l'usure en dépouille de l'outil. En plus, on a fait une optimisation multi-objective pour trouver les conditions de coupe optimales afin de minimiser les différents paramètres technologiques. Analyse de variance (ANOVA) a été utilisé pour étudier la signification de ces paramètres sur les variables des réponses, et aussi pour déterminer l'équation de régression pour les paramètres de sortie en fonction des paramètres de coupe. Les équations de régression ont été tracées sous forme d'une surface en 3D.

**Mots clés :** Acier inoxydable, AISI304, AISI420, Outil de coupe revêtu, Analyse de la variance (ANOVA), Méthodologie de la surface de réponse (RSM), Effort de coupe, Rugosité, Usure en dépouille.

## **Abstract**

The physical properties of stainless steels play an important role in their ability to be machined. Among these physical properties, there is the thermal conductivity and the coefficient of friction. The low thermal conductivity of stainless steels cause significant heating in the tool-chip contact area, and do not promote good dissipation of heat generated at the contact interface between the chip and the tool. As for coefficients of friction, the stainless steels have high values.

The actual work presents an experimental study on turning of stainless steels X2CrNi18-9 and X20Cr13 using [Ti (C, N) / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / TiN] coated carbide cutting tool. The main objective of this study is to use the response surface methodology to determine the effect of cutting parameters such as cutting speed, feed rate, depth of cut and cutting time on cutting forces, specific cutting forces, cutting power, roughness of machined surface and tool flank wear. In addition, a multi-objective optimization was used to find the optimum cutting conditions to minimize different technological parameters. Analysis of variance (ANOVA) was used to study the significance of these parameters on the different output variables, and also to determine the equation of regression for the output settings based on the cutting parameters. The regression equations were plotted as a 3D surface.

**Keywords:** Stainless steel, AISI304, AISI420, coated carbide tool, Analysis of variance (ANOVA), Response surface methodology (RSM), cutting force, Surface roughness, Flank wear.

## Index des figures

Figure I-1	Méthodologie du COM
Figure I-2	Domaine de fonctionnement défini par le COM
Figure I-3	Structures de diverses nuances de carbure
Figure I-4	Micrographie d'une nuance de cermet
Figure I-5	Différents type de céramiques
Figure I-6	Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN)
Figure I-7	Propriétés des nuances de coupe CBN
Figure I-8	Système substrat + revêtement pour une application d'usinage
Figure I-9	Principaux défauts de surface
Figure I-10	Principaux critères de rugosité
Figure I-11	Schéma des différentes composantes de l'effort de coupe en tournage
Figure I-12	Mécanismes d'usure
Figure I-13	Différents formes d'usure
Figure I-14	Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304
Figure I-15	Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale
Figure I-16	Conductivité thermique des aciers inoxydables
Figure I-17	L'évolution de l'usure en dépouille en fonction de la vitesse de coupe
Figure I-18	L'évolution de l'arête rapportée en fonction de la vitesse de coupe
Figure I-19	L'usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC
Figure I-20	Evolution de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe pour les différentes nuances de coupe
Figure I-21	Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction de la fréquence de rotation
Figure I-22	Usure en dépouille pour différentes plaquettes de coupe
Figure I-23	Configuration expérimentale de l'usinage lubrifié
Figure I-24	Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'avance à différentes vitesses de coupe
Figure I-25	Evolution de la rugosité en fonction de l'avance à différentes vitesses de coupe
Figure I-26	Images des plaquettes utilisées
Figure I-27	Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différentes vitesses de coupe et avances pour un angle d'attaque $-5^\circ$
Figure I-28	Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différents angles d'attaque pour $V_c=170$ m/min
Figure I-29	La variation de l'effort de coupe tangentiel en fonction de la vitesse de coupe pour les différentes nuances de coupe
Figure I-30	L'usure en dépouille en fonction du temps
Figure II-1	Tour parallèle modèle SN 40 C
Figure II-2	Eprouvettes pour différents essais
Figure II-3	Photo de la plaquette de coupe utilisée
Figure II-4	Porte outil utilisé
Figure II-5	Montage du dynamomètre sur la table de la machine
Figure II-6	Capteur d'effort de coupe KISTLER
Figure II-7	Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »
Figure II-8	Chaîne de mesure des efforts de coupe

Figure II-9	Microscope pour la mesure de l'usure
Figure II-10	Mesure de rugosité sans démontage de la pièce
Figure III-1	Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe
Figure III-2	Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance
Figure III-3	Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe
Figure III-4	Evolution des efforts spécifiques en fonction de la vitesse de coupe
Figure III-5	Evolution des efforts spécifiques en fonction de l'avance
Figure III-6	Evolution des efforts spécifiques en fonction de la profondeur de passe
Figure III-7	Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de Régime de coupe
Figure III-8	Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe
Figure III-9	Evolution de la rugosité en fonction de l'avance
Figure III-10	Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe
Figure III-11	Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour les deux matériaux pour $V_c=280\text{m/min}$ , $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$
Figure III-12	Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour les deux matériaux pour $V_c=330\text{m/min}$ , $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$
Figure III-13	Comparaison des tenues de l'outil pour les deux aciers inoxydables à $VB_{\text{admissible}}=0.3\text{mm}$
Figure III-14	Valeurs de l'usure en dépouille $VB$ en fonction du temps d'usinage de l'acier X20Cr13 pour $V_c = 280 \text{ m/min}$ , $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p=0,2\text{mm}$
Figure III-15	Valeurs de l'usure en dépouille $VB$ en fonction du temps d'usinage de l'acier X20Cr13 pour $V_c = 330 \text{ m/min}$ , $f = 0,08 \text{ mm/tr}$ et $a_p=0,2\text{mm}$
Figure III-16	Evolution de la rugosité en fonction du temps pour les deux matériaux pour $V_c=280\text{m/min}$ , $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$
Figure III-17	Evolution de la rugosité en fonction du temps pour les deux matériaux pour $V_c=330\text{m/min}$ , $f=0.08\text{mm/tr}$ et $a_p=0.2\text{mm}$ .
Figure III-18	Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour les différentes vitesses de coupe et avances à $a_p=0.2\text{mm}$
Figure III-19	Evolution de la rugosité $R_a$ en fonction du temps pour les différentes vitesses de coupe et avances à $a_p=0.2\text{mm}$
Figure IV-1	Les valeurs expérimentales et prédits de la rugosité de surface
Figure IV-2	Les valeurs expérimentales et prédits de l'effort de coupe
Figure IV-3	Les valeurs expérimentales et prédits de l'effort spécifique
Figure IV-4	Les valeurs expérimentales et prédits de la puissance de coupe
Figure IV-5	Graphe 3D pour $R_a$
Figure IV-6	Graphe 3D pour $F_c$
Figure IV-7	Graphe 3D pour $K_c$
Figure IV-8	Graphe 3D pour $P_c$
Figure IV-9	Graphe d'optimisation pour ( $R_a$ , $F_c$ , $K_c$ and $P_c$ )
Figure IV-10	Les valeurs expérimentales et prédits de la rugosité de surface
Figure IV-11	Les valeurs expérimentales et prédits de l'effort de coupe
Figure IV-12	Les valeurs expérimentales et prédits de l'effort spécifique
Figure IV-13	Les valeurs expérimentales et prédits de la puissance de coupe
Figure IV-14	Graphe 3D pour $R_a$
Figure IV-15	Graphe 3D pour $F_c$

Figure IV-16	Graphe 3D pour $K_c$
Figure IV-17	Graphe 3D pour $P_c$
Figure IV-18	Graphe d'optimisation pour ( $R_a$ , $F_c$ , $K_c$ et $P_c$ )
Figure V-1	$R_a$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $t$
Figure V-2	Micro-soudures adhérentes sur la surface usinée et arête rapportée collée sur la plaquette de coupe
Figure V-3	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées pour la rugosité $R_a$
Figure V-4	$V_B$ en fonction de $V_c$ , $f$ et $t$
Figure V-5	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées pour l'usure $V_B$
Figure V-6	La tenue en fonction de $V_c$ , $f$
Figure V-7	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées pour la tenue ( $T$ )
Figure VI-1	Réseau de neurones artificiels
Figure VI-2	Topologie d'un réseau de neurones
Figure VI-3	Représentation d'un neurone formel
Figure VI-4	Différentes fonction de transfert de réseau de neurones
Figure VI-5	Processus d'apprentissage du réseau de neurones
Figure VI-6	Architecture choisie pour l'usure en dépouille
Figure VI-7	Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour l'usure en dépouille $V_B$
Figure VI-8	L'évolution de l'usure en dépouille en fonction de paramètres de coupe
Figure VI-9	Architecture choisie pour la rugosité $R_a$
Figure VI-10	Rugosité de la surface en fonction de paramètres de coupe
Figure VI-11	Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité de la surface $R_a$
Figure VI-12	Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour l'usure $V_B$
Figure VI-13	Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour la rugosité $R_a$
Figure VI-14	Architecture choisie pour $R_a$ et $F_c$
Figure VI-15	$R_a$ et $F_c$ en fonction de paramètres de coupe
Figure VI-16	Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour $R_a$ et $F_c$
Figure VI-17	Architecture choisie pour $R_a$ et $F_c$
Figure VI-18	$R_a$ et $F_c$ en fonction des paramètres de coupe
Figure VI-19	Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour $R_a$ et $F_c$
Figure VI-20	Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour $R_a$ (X2CrNi18-9)
Figure VI-21	Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour $F_c$ (X2CrNi18-9)
Figure VI-22	Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour $R_a$ (X20Cr13)
Figure VI-23	Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour $F_c$ (X20Cr13)



## Index des tableaux

Tableau I-1	Caractéristiques mécaniques et physiques des carbures
Tableau I-2	Céramiques utilisées pour les outils de coupe
Tableau I-3	Domaines d'utilisation des différentes nuances de coupe CBN
Tableau II-1	Composition chimique de l'acier X2CrNi18-9
Tableau II-2	Composition chimique de l'acier X20Cr13
Tableau II-3	Informations relatives à la plaquette de coupe
Tableau II-4	Caractéristiques de porte plaquette utilisé
Tableau II-5	Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée)
Tableau II-6	Conditions de coupe pour les essais d'usure et de la rugosité en fonction du temps (essais longue durée)
Tableau II-7	Matrice de planification pour un plan $3^3$
Tableau II-8	Matrice de planification pour un plan $3^2$
Tableau II-9	Matrice de planification pour un plan de Taguchi $L_{16}$
Tableau II-10	Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan 27 essais
Tableau II-11	Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan 9 essais
Tableau II-12	Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan 16 essais
Tableau III-1	Valeurs de la rugosité pour différentes conditions de coupe
Tableau IV-1	Plan orthogonal pour les différentes réponses
Tableau IV-2	ANOVA pour Ra
Tableau IV-3	ANOVA pour Fc
Tableau IV-4	ANOVA pour Kc
Tableau IV-5	ANOVA pour Pc
Tableau IV-6	Optimisation de réponses
Tableau IV-7	Conditions de coupe utilisées pour les tests de confirmation
Tableau IV-8	Tests de confirmation pour la rugosité et l'effort de coupe
Tableau IV-9	Plan orthogonal pour les différentes réponses
Tableau IV-10	ANOVA pour Ra
Tableau IV-11	ANOVA pour Fc
Tableau IV-12	ANOVA pour Kc
Tableau IV-13	ANOVA pour Pc
Tableau IV-14	Optimisation de réponses
Tableau IV-15	Conditions de coupe utilisées pour les tests de confirmation
Tableau IV-16	Tests de confirmation pour la rugosité et l'effort de coupe
Tableau V-1	Résultats de l'usure en dépouille (VB) et de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres du régime de coupe et du temps d'usinage (plan complet $N=3^3$ ).
Tableau V-2	Résultats de l'analyse de variance pour Ra
Tableau V-3	Résultats de l'analyse de variance pour l'usure VB
Tableau V-4	Conditions d'optimisation
Tableau V-5	Optimisation par MSR de la rugosité et de l'usure
Tableau V-6	Résultats de la tenue (T) en fonction des paramètres du régime de coupe (plan complet $N=3^2$ ).
Tableau V-7	Analyse de la variance (ANOVA) pour la tenue (T)
Tableau V-8	conditions d'optimisation
Tableau V-9	Optimisation par MSR de la tenue (T)
Tableau VI-1	Résultats expérimentaux de VB
Tableau VI-2	Valeurs statistiques de l'analyse ANN de VB

Tableau VI-3	Résultats expérimentaux de Ra
Tableau VI-4	Valeurs statistiques de l'analyse ANN de Ra
Tableau VI-5	Coefficients de corrélation pour RSM et ANN
Tableau VI-6	Résultats expérimentaux de Ra et Fc pour l'acier X2CrNi18-9
Tableau VI-7	Valeurs statistiques de l'analyse ANN de Ra et Fc
Tableau VI-8	Résultats expérimentaux de Ra et Fc pour l'acier X20Cr13
Tableau VI-9	Valeurs statistiques de l'analyse ANN de Ra et Fc
Tableau VI-10	Coefficients de corrélation pour RSM et ANN

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

<b>Vc</b>	Vitesse de coupe [m/min]
<b>f</b>	Avance par tour [mm/tr]
<b>ap</b>	Profondeur de passe [mm]
<b>Pc</b>	Puissance [w]
<b>t</b>	Temps d'usinage [min]
<b>HRC</b>	Dureté Rockwell [HRC]
<b>Fa</b>	Composante de l'effort de coupe dans la direction d'avance [N]
<b>Fp</b>	Composante de l'effort de coupe dans la direction de pénétration [N]
<b>Fc</b>	Composante de l'effort de coupe dans la direction de coupe [N]
<b>Fr</b>	Effort résultant [N]
<b>Ka</b>	Effort spécifique axial (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Kp</b>	Effort spécifique radial (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Kc</b>	Effort spécifique tangentiel (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Ra</b>	Rugosité moyenne arithmétique [μm]
<b>Rz</b>	Profondeur moyenne de la rugosité [μm]
<b>Rt</b>	Rugosité totale [μm]
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficient de détermination
<b>VB</b>	Usure en dépouille [mm]
<b>RSM</b>	Méthodologie de surface de réponse
<b>ANOVA</b>	Analyse de la variance
<b>Con%</b>	Pourcentage de contribution [%]
<b>ANN</b>	Réseaux de neurones artificiels

## Sommaire

<b>Nomenclature</b>	16
<b>Introduction générale</b>	17
<b><u>CHAPITRE I : Généralité sur l'usinage et état de l'art</u></b>	
<b>I-1 Usinabilité</b>	20
I-1-1 Définitions de l'usinabilité	20
I-1-2 L'usinabilité des aciers inoxydables	20
I-1-3 Critères d'évaluation de l'usinabilité	20
<b>I-2 Couple Outil-Matière</b>	21
<b>I-3 Nuances de coupe et revêtements</b>	24
I-3-1 Généralités	24
I-3-2 Les matériaux de coupe	24
I-3-3 Revêtements pour outil de coupe	30
I-3-4 Les principaux revêtements	30
<b>I-4 Rugosité des surfaces usinées</b>	31
I-4-1 Principaux défauts de surface	31
I-4-2 Principaux critères de rugosité	32
<b>I-5 Efforts de coupe</b>	33
<b>I-6 Duré de vie et endommagement des outils de coupe</b>	34
I-6-1 Usure des outils de coupe	34
I-6-2 Mécanismes et formes d'usure	35
I-6-3 Facteurs influençant l'usure	36
<b>I-7 Les aciers inoxydables</b>	37
I-7-1 Naissance des aciers inoxydables	37
I-7-2 Nuances des aciers inoxydables	38
I-7-2-1 Aciers martensitiques	38
I-7-2-2 Aciers ferritiques	38
I-7-2-3 Aciers austénitiques	38
I-7-2-4 Aciers dits duplex	39
I-7-3 Rôle des éléments d'alliage	40
I-7-4 Influence des propriétés physiques	41
<b>I-8 Etat de l'art</b>	44

## **CHAPITRE II : Procédure expérimentale**

<b>II-1 Introduction</b>	58
<b>II-2 Matériels utilisés</b>	58
II-2-1 Machine-outil	58
II-2-2 Les matériaux utilisés pour les essais d'usinage	58
II-2-3 Plaquette de coupe	60
II-2-4 Porte outil	61
II-2-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	62
II-2-6 Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille VB	65
II-2-7 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	66
II-2-8 Autres équipements	67
<b>II-3 Conditions de coupe</b>	67
<b>II-4 Planification des expériences</b>	68
II-4-1 Méthode de planification des expériences	68
II-4-2 Conditions de coupe choisies pour la modélisation	70
<b>II-5 Conclusion</b>	71
<b><u>CHAPITRE III: Evolution des paramètres technologiques en fonction des conditions de coupe</u></b>	
<b>III-1 Introduction</b>	74
<b>III-2 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe</b>	74
III-2-1 Influence de la vitesse de coupe	74
III-2-2 Influence de l'avance	75
III-2-3 Influence de la profondeur de passe	76
<b>III-3 Evolution des pressions de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe</b>	77
III-3-1 Influence de la vitesse de coupe	77
III-3-2 Influence de l'avance	78
III-3-3 Influence de la profondeur de passe	79
<b>III-4 Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe</b>	80
<b>III-5 Evolution de la rugosité en fonction des paramètres du régime de coupe</b>	82
III-5-1 Influence de la vitesse de coupe	82
III-5-2 Influence de l'avance	83

III-5-3 Influence de la profondeur de passe	84
<b>III-6 Evolution de l'usure en dépouille et la rugosité en fonction du temps</b>	85
III-6-1 Première partie	85
III-6-2 Seconde partie	89
III-6-2-1 Evolution de l'usure en dépouille	89
III-6-2-2 Evolution de la rugosité de la surface Ra	90
<b>III-7 Conclusion</b>	91
<b><u>CHAPITRE IV: Modélisation mathématique de Fc, Kc, Pc et Ra par MSR</u></b>	
<b>IV-1 Introduction</b>	94
<b>IV-2 TESTE DE VALIDITÉ DES MODÈLES</b>	95
<b>IV-3 OPTIMISATION</b>	97
<b>IV-4 Analyse par la méthode de la surface de réponse pour l'acier X2CrNi18-9</b>	98
IV-4-1 Analyse de la variance	99
IV-4-2 Equations de la régression pour différentes réponses	101
IV-4-3 Analyse de la surface de réponse	103
IV-4-3-1 Rugosité de surface	103
IV-4-3-2 Efforts de coupe tangentiel	104
IV-4-3-3 Effort spécifique et puissance de coupe	105
IV-4-4 Optimisation multi-objective des réponses	107
IV-4-5 Tests de confirmation	108
<b>IV-5 Analyse par la méthode de la surface de réponse pour l'acier X20Cr13</b>	109
IV-5-1 Analyse de la variance	109
IV-5-2 Equations de la régression pour différentes réponses	111
IV-5-3 Analyse de la surface de réponse	113
IV-5-3-1 Rugosité de surface	113
IV-5-3-2 Efforts de coupe tangentiel	114
IV-5-3-3 Effort spécifique et puissance de coupe	115
IV-5-4 Optimisation multi-objective des réponses	116
IV-5-5 Tests de confirmation	116
<b>IV-6 Conclusion</b>	117
<b><u>CHAPITRE V: Modélisation mathématique de l'usure VB et la rugosité de la surface par MSR</u></b>	
<b>V-1 Introduction</b>	119
<b>V-2 Modélisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de la surface en fonction des paramètres d'usinage</b>	119

V-2-1	Modélisation de la rugosité de surface $Ra$ en fonction des paramètres d'usinage	120
V-2-1-1	Analyse de la variance	120
V-2-1-2	Equation de régression et surface de réponse	121
V-2-1-3	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	123
V-2-2	Modélisation de l'usure en dépouille $VB$ en fonction des paramètres de coupe	123
V-2-2-1	Analyse de la variance	123
V-2-2-2	Equation de régression et surface de réponse	124
V-2-2-3	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	125
<b>V-3</b>	<b>Optimisation des conditions de coupe pour <math>VB</math> et <math>Ra</math></b>	126
<b>V-4</b>	<b>Modélisation de la tenue (T) en fonction des paramètres d'usinage</b>	127
V-4-1	Analyse de la variance pour la tenue (T)	128
V-4-2	Equation de régression et surface de réponse de la tenue (T)	128
V-4-3	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	129
<b>V-5</b>	<b>Optimisation des conditions de coupe pour la tenue (T)</b>	130
<b>V-6</b>	<b>Conclusions</b>	131
<b><u>CHAPITRE VI : Modélisation de l'usure en dépouille et la rugosité de la surface</u></b>		
<b><u>par l'approche ANN</u></b>		
<b>VI-1</b>	<b>Introduction</b>	133
<b>VI-2</b>	<b>Réseau de neurones artificiels</b>	133
VI-2-1	Calcul de la valeur prédite	134
VI-2-2	Les neurones formels	135
VI-2-3	Différentes fonctions de transfert	136
VI-2-4	Perceptron simple	136
VI-2-5	Perceptron multicouches	137
VI-2-6	Algorithme de rétro-propagation	137
VI-2-7	Apprentissage	137
<b>VI-3</b>	<b>Modélisation de l'usure en dépouille et la rugosité de la surface par ANN</b>	137
VI-3-1	Modélisation de l'usure en dépouille $VB$	137
VI-3-2	Modélisation de la rugosité de la surface $Ra$	140
<b>VI.4</b>	<b>Comparaison entre les modèles ANN et RMS</b>	143
<b>VI-5</b>	<b>Modélisation de <math>Ra</math> et <math>Fc</math> par ANN pour l'acier X2CrNi18-9</b>	144
<b>VI-6</b>	<b>Modélisation de <math>Ra</math> et <math>Fc</math> par ANN pour l'acier X20Cr13</b>	147
<b>VI-7</b>	<b>Comparaison entre les modèles ANN et RMS pour X2CrNi18-9 et X20Cr13</b>	150

<b>VI.8 Conclusion</b>	151
<b>Conclusion générale</b>	152
<b>Références bibliographiques</b>	154



# Introduction générale

Lors d'une opération d'usinage, les outils de coupe sont soumis à d'importantes sollicitations thermomécaniques accélérant leur processus d'usure. Leur durée de vie se retrouve ainsi considérablement réduite, entraînant des coûts de remplacement non négligeables pour les industriels.

Ainsi, parmi les stratégies d'optimisation des procédés d'usinage, l'utilisation d'outils de coupe revêtus s'avère être une solution efficace. Cela se vérifie particulièrement lors de l'usinage à sec de matériaux difficiles à usiner tels que les aciers inoxydables. Ces aciers, surtout les austénitiques, sont considérés comme des matériaux difficiles à usiner en raison de leur point de fusion élevé, de leur faible conductivité thermique, et de leur écrouissage important. Selon les conditions de coupe et le matériau usiné, la présence d'une ou de plusieurs couches de revêtement va modifier considérablement le contact outil/pièce usinée. Cela permettra à l'outil de coupe de supporter de manière optimale les différentes sollicitations thermomécaniques. L'utilisation de revêtement joue également un rôle clé en usinage à sec, qui constitue de nos jours un challenge environnemental, économique et scientifique. En effet, l'absence de lubrifiants et la méthode de lubrification minimale doivent être accompagnées d'une prise de mesures protectrices des outils de coupe. Parmi ces mesures, nous pouvons citer l'utilisation d'outils revêtus adaptés aux conditions de coupe et aux matériaux des pièces usinées.

Les travaux réalisés portent sur la compréhension du comportement en usinage à sec des aciers inoxydables utilisés, on parle ici sur l'évolution de différents paramètres technologique (efforts de coupe, pressions de coupe, puissance de coupe, la rugosité de la surface usinées et aussi l'usure en dépouille de l'outil) en fonction de conditions de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance par tour, la profondeur de passe et le temps d'usinage.

Cette thèse s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre concerne l'étude bibliographie sur l'usinabilité des matériaux et les critères de son évaluation, des notions sur le couple outil-matière, les différents matériaux de coupe utilisés en usinage, la classification des aciers inoxydable et les différents phénomènes intervenants lors de la coupe. La fin de ce chapitre débouche sur un résumé de quelques travaux de recherche (publications) qui concernent l'usinage des aciers inoxydables ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation des conditions de coupe.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés tels que ; tour, rugosimètre, plate forme Kistler pour la mesure des efforts de coupe...etc. Egalement, Les matériaux à usinés (acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 et l'acier inoxydable martensitique X20Cr13) sont présentés d'une manière détaillée ainsi que l'approche expérimentale adopté.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation des résultats expérimentaux de la comparaison entre l'usinabilité des deux aciers inoxydables utilisés. Les résultats qui présentent l'évolution des paramètres technologiques (efforts de coupe, efforts spécifiques, puissance de coupe, rugosité de la surface usinée et l'usure en dépouille de l'outil) en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et temps d'usinage) sont exposés d'une manière claire qui permet de faire la comparaison entre les deux aciers inoxydables utilisés.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons les modèles mathématiques et l'analyse par la méthode de la surface de réponse ainsi les graphes en 3D qui illustrent l'évolution de différents phénomènes rencontrés lors de la coupe ( $F_c$ ,  $K_c$ ,  $P_c$  et  $R_a$ ) en fonction des paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ). Ce chapitre présente aussi une optimisation multi-objectifs des paramètres technologiques étudiés pour le choix optimal des conditions de coupe.

Le cinquième chapitre présente une étude sur la modélisation de l'usure en dépouille (VB) de l'outil en carbure métallique et de la rugosité de la surface ( $R_a$ ) pendant l'usinage de l'acier X2CrNi18-9 en utilisant la méthodologie de surface d réponse ainsi que l'analyse de la variance (Anova). Cette étude est suivie par une optimisation des conditions de coupe.

Dans le dernier chapitre, nous utilisons l'approche ANN (réseaux de neurones) pour modéliser l'usure en dépouille, la rugosité de la surface et l'effort de coupe tangentiel en fonction de différents paramètres de régime de coupe. Dans un premier temps, nous appliquons l'ANN pour modéliser l'usure en dépouille et la rugosité de la surface usinée lors de l'usinage de l'acier X2CrNi18-9 pour un plan de 27 essais. Dans un deuxième temps, nous présentons la modélisations par la méthode de réseau de neurones artificiels de l'effort de coupe tangentiel et la rugosité en fonction de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe lors de l'usinage des deux aciers inoxydables X2CrNi18-9 et X20Cr13. Finalement et pour vérifier l'efficacité et la robustesse de la méthode des ANN, nous avons fait une comparaison entre cette dernière et la méthode de la surface de réponse.

Cette thèse de doctorat termine par une conclusion générale qui expose une synthèse des résultats obtenus durant ce travail de recherche ainsi que les perspectives.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur l'usinage et état de l'art**

## **I-1 Usinabilité**

### **I-1-1 Définitions de l'usinabilité**

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée [1]. Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux l'usinabilité est définie sous différentes formes :

- ❖ Selon A. Czaplicki [1] : L'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée.
- ❖ Selon Bernard Gruber [2] : l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable, l'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des côtes fixes.
- ❖ D'après [3] : La notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être mis en forme par outil coupant.

### **I-1-2 Facteurs influençant l'usinabilité**

L'usinabilité est le terme utilisé pour désigner l'exécution de l'usinage d'un matériau par un outil de coupe. La facilité avec laquelle un matériau donné peut être usiné avec un outil de coupe est usinabilité. L'usinabilité dépend [4]:

- a) La composition chimique de la matière à usinée
- b) La structure
- c) Les propriétés mécaniques
- d) Les propriétés physiques
- e) Les conditions de coupe

### **I-1-3 Critères d'évaluation de l'usinabilité**

Suite à la différence dans les définitions de l'usinabilité, les critères de son évaluation sont différents aussi d'un chercheur à un autre :

- a) Les critères de l'usinabilité sont [1] :
- La durée de vie de l'outil permettant la production maximale ;
  - Les efforts de coupe qui déterminent la puissance nécessaire à la broche de la machine-outil ;
  - La rugosité de la surface usinée permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée.
- b) Les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant [5]:
- La rugosité de la surface usinée, définissant l'aptitude au fini de surface ;
  - La force de coupe définissant la résistance de la coupe ;
  - La durée de vie de l'outil, ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée d'outil donnée ou l'usure pour un temps donné. Par contre d'autres chercheurs prennent l'usure comme l'effet le plus observable.
- c) D'après S. K. Hansda [4], les principaux critères sont classés de la manière suivante:
- La durée de vie de l'outil ;
  - L'effort de coupe ;
  - La température de coupe ;
  - Les caractéristiques du copeau (couleur, type du copeau, épaisseur du copeau).

## I-2 Couple Outil-Matière

La méthodologie du couple Outil-Matière (COM) [59] est une démarche expérimentale qui permet de caractériser le processus de coupe et d'en uniformiser la formulation. Pour ceci, la norme propose une méthodologie et une modélisation des coefficients spécifiques de coupe. La norme NF E 66-520 définit l'ensemble des démarches et des procédures expérimentales de réalisation du COM pour un outil (géométrie et nuance donnée) et une matière. Le COM détermine l'ensemble des paramètres définissant le domaine de fonctionnement de l'outil dans la matière considérée. La démarche du COM permet d'obtenir :

- la définition du domaine de fonctionnement de l'outil coupant en précisant les valeurs extrêmes (minimale et maximale) de chaque paramètre de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de passe).
- Une estimation de la durée de vie de l'outil sur le domaine envisagé au travers de l'évaluation des paramètres de la loi d'usure selon le modèle de Taylor généralisé.

- Une estimation de la puissance consommée en utilisant la notion de coefficient d'énergie spécifique de coupe.

La norme définit deux critères énergétiques, l'effort spécifique de coupe  $K_c$  (équation I.1) ou la puissance spécifique de coupe  $W_c$  (équation I.2). La détermination de ces deux grandeurs s'appuie essentiellement sur la puissance de coupe consommée uniquement par l'effort de coupe  $F_c$  sans prendre en compte les moments.

$$K_c = \frac{F_c}{A_p} = \frac{60.P_c}{V_c.f.ap} \text{ en (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{I.1})$$

Où  $A_p = ap.f$ , la section de coupe et  $F_c$ , l'effort de coupe.

$$W_c = \frac{P_c}{Q} = \frac{1000.P_c}{ap.ae.Vf} \text{ en (W.cm}^{-3}\text{.min}^{-1}\text{)} \quad (\text{I.2})$$

Avec  $P_c$ , la puissance de coupe (W) et  $Q$ , le débit du copeau ( $\text{cm}^3.\text{min}^{-1}$ ).

Afin d'extrapoler les résultats obtenus par le COM, la norme définit un modèle pour ces deux grandeurs à partir d'une valeur référence (l'avance  $f_{ref}$  et le coefficient  $K_{c,ref}$  (tournage) ou l'épaisseur du copeau  $h_{ref}$  (fraisage) et  $W_{ref}$ ). Par la suite, pour une avance  $f$  donnée (tournage) ou pour une épaisseur du copeau donnée  $h$  (fraisage), le coefficient  $K_c$  (tournage) peut être calculé avec l'équation I.3 ou le coefficient  $W_c$  (fraisage) avec l'équation I.4.

$$K_c = K_{c,ref} \cdot \left( \frac{f_{ref}}{f} \right)^{mc} \quad (\text{I.3})$$

$$W_c = W_{c,ref} \cdot \left( \frac{h_{ref}}{h} \right)^{mc} \quad (\text{I.4})$$

L'évolution de ces deux critères prend en compte uniquement l'avance (instantanée) et ne dépend pas d'autres paramètres de coupe (angle de coupe, vitesse de coupe, etc.)

La procédure de mise en œuvre du COM dans le cadre du fraisage peut être résumée à l'aide du diagramme présenté dans la figure I-1.

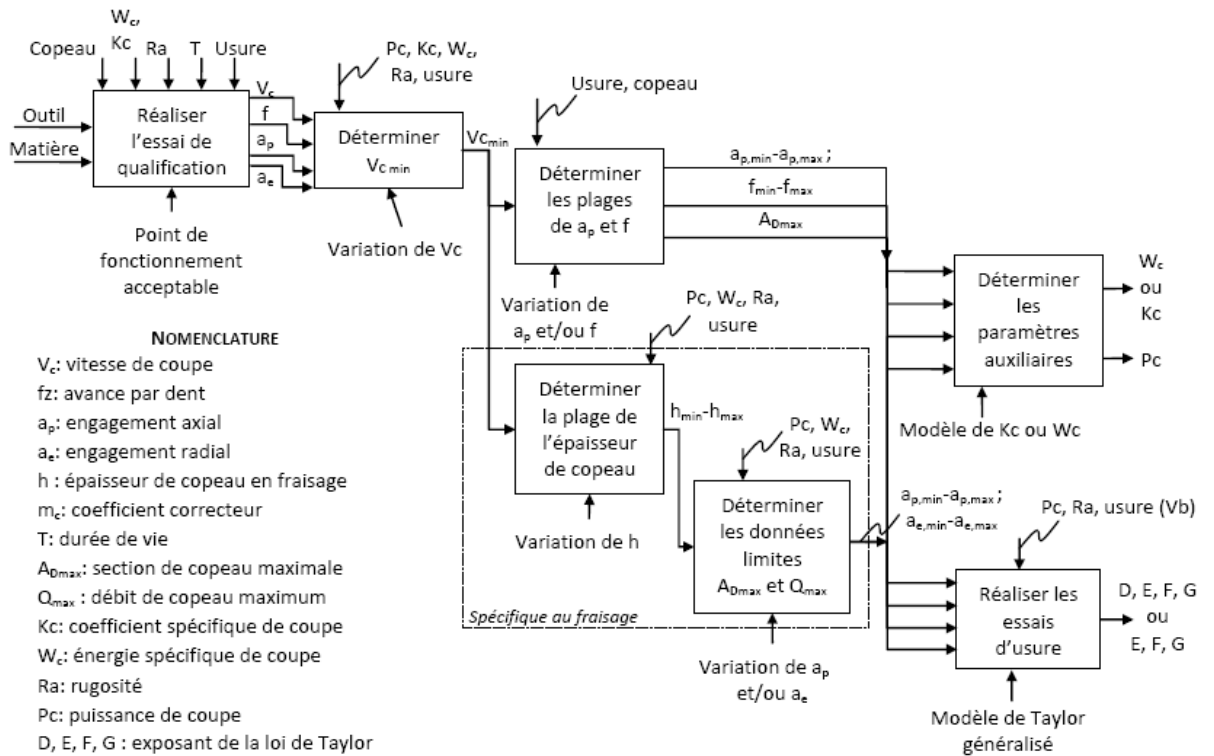


Figure I-1 : Méthodologie du COM, [AFNOR, 1997].

Cette méthodologie permet donc de déterminer les plages de fonctionnement (figure I-2) pour les différents paramètres de coupe. Ces plages caractérisent un outil coupant et un matériau à usiner précis à partir d'essais d'usinage, de mesures de puissance spécifique de coupe, de contrôles d'usure et d'état de surface.

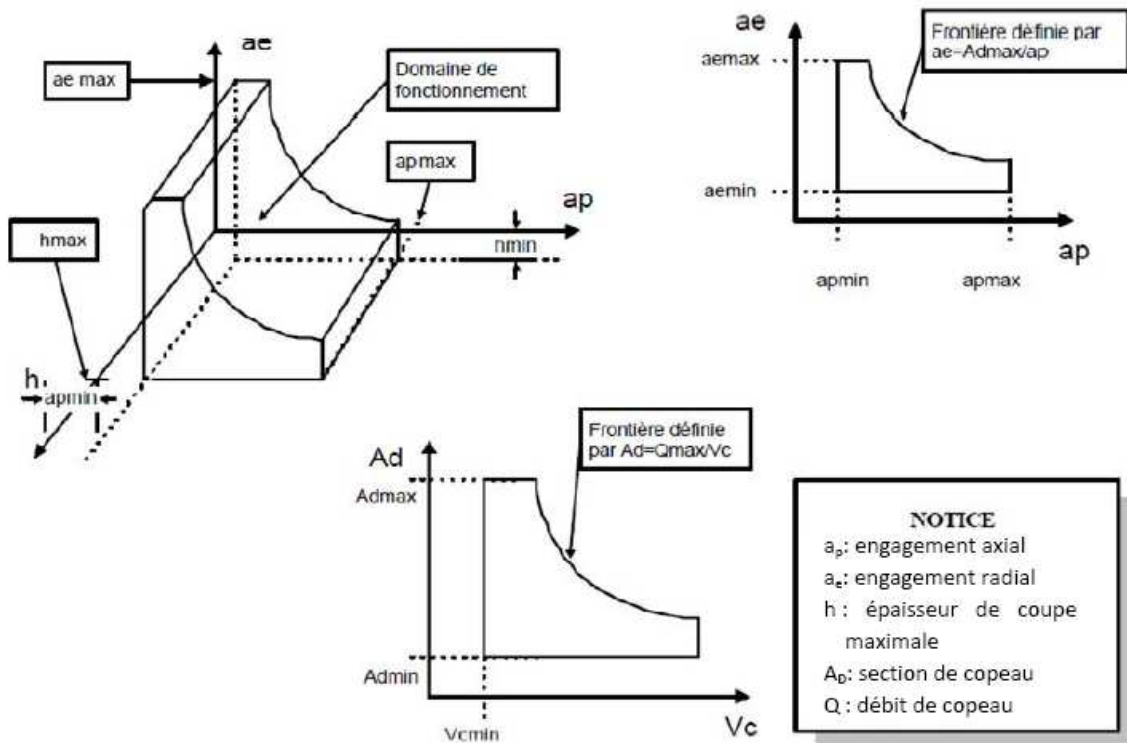


Figure I-2 : Domaine de fonctionnement défini par le COM



La mesure ou le calcul de l'effort de coupe ou de la puissance de coupe sont les principaux indicateurs utilisés pour la détermination des différents paramètres. Dans les deux cas, des erreurs ou des approximations sont commises. Afin de s'en convaincre, un essai de tournage peut être réalisé. La puissance de coupe réelle peut être obtenue à partir de mesure à vide et lors de l'usinage. Par ailleurs, l'effort de coupe peut être mesuré avec un dynamomètre (3 ou 6 composants). Avec cet effort et selon le COM, la puissance de coupe peut être évaluée. L'écart de la puissance de coupe réelle (déduite de mesures avec un wattmètre) et de la puissance de coupe calculée incitera certainement à la réflexion... En effet, si la puissance de coupe est obtenue à partir de la mesure d'un wattmètre, celle-ci prend en compte l'ensemble des actions de coupe (efforts et moments). Aussi, le protocole défini par le COM conduit à la surestimation du coefficient spécifique de coupe lié à l'effort de coupe (second membre de l'équation I.1).

Par ailleurs, si l'effort de coupe est mesuré avec un dynamomètre (premier membre de l'équation I.1) alors l'estimation du coefficient spécifique de coupe est correcte. Cependant, l'évaluation de la puissance de coupe consommée définie par le COM sera sous-estimée du fait du non prise en compte des moments de coupe.

### **I.3. Nuances de coupe et revêtements**

#### **I.3.1. Généralités**

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau qui constitue l'arête de coupe : ténacité et résistance à l'abrasion [6]. D'une manière générale, un matériau est d'autant plus tenace que les contraintes, statiques ou dynamiques (chocs), provoquant sa rupture sont plus élevées. Plus précisément, on caractérise cet aspect des matériaux de coupe par leur ténacité, facteur critique d'intensité de contrainte, provoquant la propagation de fissure, leur contrainte de rupture en flexion ou leur résilience (rupture par chocs).

Il existe plusieurs matériaux de coupe tels que, les aciers rapides, les carbures, les cermets, les céramiques, CBN et diamant.

#### **I.3.2. Les matériaux de coupe**

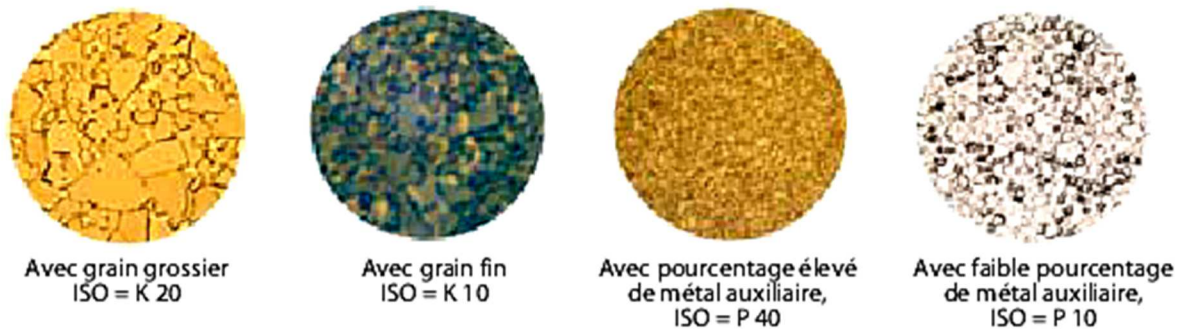
##### **❖ Carbures**

Les carbures frittés en particulier, qui sont fabriqués à partir d'une série de divers carbures et d'un métal auxiliaire, jouent un rôle important dans la mise en forme par enlèvement de copeaux (Figure I.3). Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme

de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaire, la partie active de ces outils étant raffûtée au fur et à mesure de son usure.

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

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



**Figure I-3 :** Structures de diverses nuances de carbure [7].

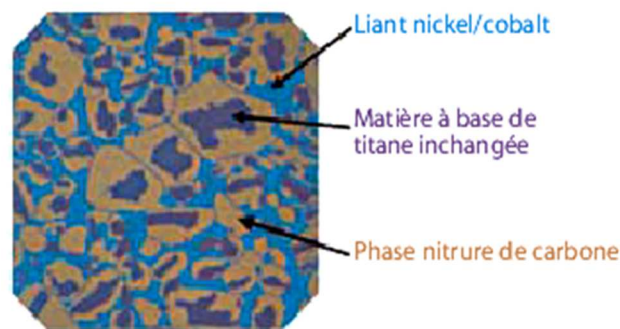
Le tableau I-1 présente une série de qualités privilégiées :

**Tableau I-1 :** Caractéristiques mécaniques et physiques des carbures.

PHASE	SYMB.	DÉSIGNATION	TEMPERATURE DE FUSION (°C)	DURETÉ (HV10) À 100°C
$\gamma$	TiC	carbure de titane	3200	3200
	NbC	carbure de niobium	3500	2400
	TaC	carbure de tantale	3800	1800
$\alpha$	WC	carbure de tungstène	2600	2100

### ❖ Cermets

Cermet, un terme formé de deux syllabes : *cer* vient de céramique et *met* de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo<sub>2</sub>C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co (figure 1-4).



**Figure I-4 :** Micrographie d'une nuance de cermet [7].

Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport  $N/(C+N)$  qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. Le tableau I-8 montre l'influence du rapport  $N/(C+N)$  sur les propriétés des cermets. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

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

### ❖ Céramiques

Les céramiques (figure I-5) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le tableau I-2.

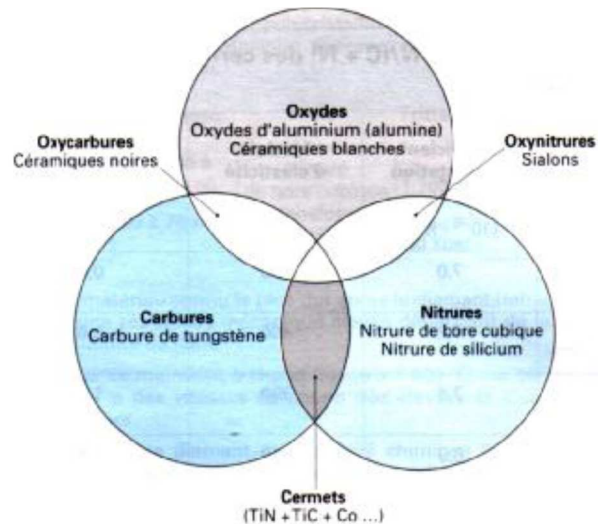


Figure I-5 : Différents type de céramiques

Tableau I-2 : Céramiques utilisées pour les outils de coupe

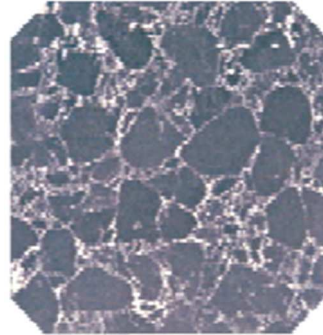
Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques blanches  Au début : $Al_2O_3$ Actuellement : $Al_2O_3 + ZrO_2$	Céramiques mixtes noires $Al_2O_3-TiC$ (30%) $Al_2O_3-TiN-TiC$ $Al_2O_3-WC, TaC$	Céramiques renforcées vertes (whiskers)  $Al_2O_3$ -fibres SiC	Sailon gris  Base $Si_3N_4$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

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

❖ **Nitrure de bore cubique (CBN)**

Le CBN (nitrure de bore cubique en français) n'existe pas à l'état naturel. C'est un produit de synthèse de la métallurgie des poudres (Figure I-6). Il est obtenu, à partir de nitrure de bore de structure hexagonale au naturel, par frittage à haute température (1800°K) et haute pression (5 GPa). Il est essentiellement dédié à l'usinage de pièces en acier présentant une dureté de 45 à 70 HRC. 90% des outils employés pour cet usinage, dit dur, sont en CBN, les céramiques et les cermets se partageant les 10% restant. Le nitrure de bore cubique (CBN) est utilisé comme corps de coupe polycristallin sous trois formes différentes :

- Plaquette monobloc ;
- Revêtement aggloméré par frittage sur un support en carbure ;
- Corps de coupe brasé sur un support en carbure.

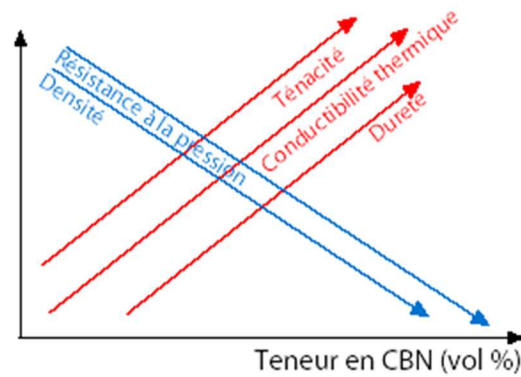


**Figure I-6 :** Microstructure du nitrure de bore cubique (CBN) [7].

Propriétés :

- Dureté extrême ;
- Dureté à chaud élevée jusqu'à 2 000 °C ;
- Haute résistance à l'usure par abrasion ;
- Relativement cassant, mais plus tenace et plus dur que la céramique de coupe ;
- Bonne stabilité chimique pendant l'usinage.

Les propriétés d'une nuance de coupe CBN peuvent varier en raison du changement de la taille du cristal, de la teneur et du type de liant. Une teneur en CBN faible associée à un liant céramique améliore la résistance à l'usure et la stabilité chimique. Cette nuance de coupe convient particulièrement pour la finition d'aciers et de fontes durs. Une teneur plus élevée en CBN entraîne une augmentation de la ténacité. Les CBN sont essentiellement utilisés dans les applications impliquant une grosse ébauche avec des contraintes d'arête mécaniques et des sollicitations thermiques élevées. Ils conviennent principalement à l'usinage de fontes dures et d'alliages réfractaires (Figure I-7 et tableau I-3).



**Figure I-7** : Propriétés des nuances de coupe CBN [7].

**Tableau I-3** : Domaines d'utilisation des différentes nuances de coupe CBN.

	<b>Teneur en CBN faible</b>	<b>Teneur en CBN élevée</b>
Caractéristiques Propriétés	Teneur en CBN < 60% Faible résistance à la pression. Faible conductibilité thermique.	Teneur en CBN de 80 à 95% Ténacité à la rupture élevée. Conductibilité thermique élevée.
Utilisation privilégiée	Finition : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acier trempé ;</li> <li>• Fonte ;</li> <li>• Revêtements durs (à base de Co, Ni et Fe).</li> </ul>	Ebauche : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acier trempé ;</li> <li>• Fonte trempée ;</li> <li>• Revêtements durs (à base de Co, Ni et Fe).</li> </ul> Finition : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonte trempée ;</li> <li>• Fonte grise perlitique.</li> </ul>

Parmi les domaines d'utilisation du CBN, citons les aciers forgés, les aciers trempés et les fontes, les alliages réfractaires ainsi que les métaux pulvérisés à base de cobalt et de fer. Il est recommandé d'utiliser le CBN pour l'usinage de matières dures supérieures à 45 jusqu'à 65 HRC. Si les matières sont trop tendres, il faut s'attendre à une usure inhabituellement importante. Les tranchants en CBN permettent en outre d'atteindre d'excellentes qualités de surface.

### ❖ Diamants

Les diamants sont des métaux très durs. Ils ont un faible coefficient de frottement et une faible aptitude à l'adhésion (collage, soudage aux métaux). Une tenue à la chaleur élevée, une résistance à l'usure importante.

### I-3-3 Revêtements pour outil de coupe:

Le rôle principal attribué aux revêtements est de protéger l'outil durant l'usinage. Il est incontestable que les revêtements permettent d'améliorer la durée de vie des outils [3]. Cependant peu de littérature existe pour expliquer le processus de protection du revêtement. Les revêtements sont depuis quelques années un nouvel axe de recherche dans le monde industriel afin d'améliorer les conditions de coupe et la productivité. Ils prennent une place de plus en plus importante dans le monde de l'usinage, puisque en 2001, 90% des outils carbures fabriqués sont revêtus [8].

Le principe consiste à recouvrir d'un film mince (jusqu'à 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) les outils en matériaux ayant des propriétés particulières comme par exemple une très grande dureté (2000 à 3200 HV) ou des coefficients de frottements faibles.

Comme nous pouvons le voir sur la figure I-8, le rôle recherché pour le revêtement est complexe. Il doit à la fois protéger le substrat de l'usure (adhésion, abrasion, oxydation, diffusion), faire office de barrière thermique, résister à la fissuration et tout ceci grâce à un dépôt d'épaisseur très faible [9].

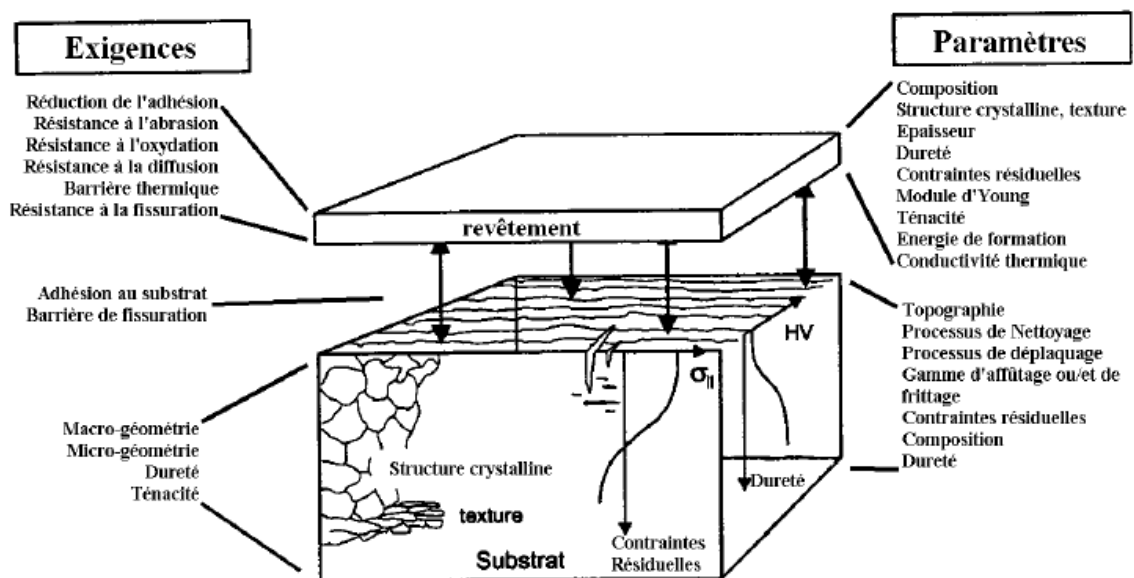


Figure I-8 : Système substrat + revêtement pour une application d'usinage [10].

### **I-3-4 Les principaux revêtements**

#### **❖ Nitrure de titane (TiN)**

C'est un traitement standard obtenu par déposition physique en phase vapeur. La dureté de surface atteint 81 HRC, le coefficient de frottement lors de la coupe est d'environ 0,4 et la stabilité thermique est assurée jusqu'à environ 550 °C. Ce traitement est adapté à la coupe de beaucoup de matériaux, en particulier les métaux ferreux, les aciers courants alliés et non alliés, les aciers durs et les aciers rapides.

#### **❖ Carbonitrure de titane (TiCN)**

La dureté est plus importante, jusqu'à 90 HRC et le coefficient de frottement plus faible, environ 0,3. Ce revêtement convient parfaitement pour la coupe de matériaux réputés difficiles comme les aciers moulés, les alliages d'aluminium, les aciers à outils, le cuivre, l'inconel, les alliages de titane et les métaux non ferreux en général.

#### **❖ Nitrure de titane et d'aluminium (TiAlN)**

Ce revêtement à hautes performances procure une dureté de surface pouvant atteindre 80 HRC. Il garde sa dureté à haute température grâce à la formation d'une couche d'alumine mauvaise conductrice de la chaleur qui permet d'évacuer un maximum de calories en les transférant dans les copeaux plutôt que dans l'outil lui-même. Il devient possible d'atteindre des vitesses de coupe très élevée avec très peu de liquide de refroidissement, ou même pas du tout. Le faible coefficient de frottement permet d'usiner des matériaux abrasifs comme l'acier moulé, les alliages d'aluminium, les aciers à outils ou encore les alliages de nickel.

#### **❖ Nitrure d'aluminium et de titane (AlTiN)**

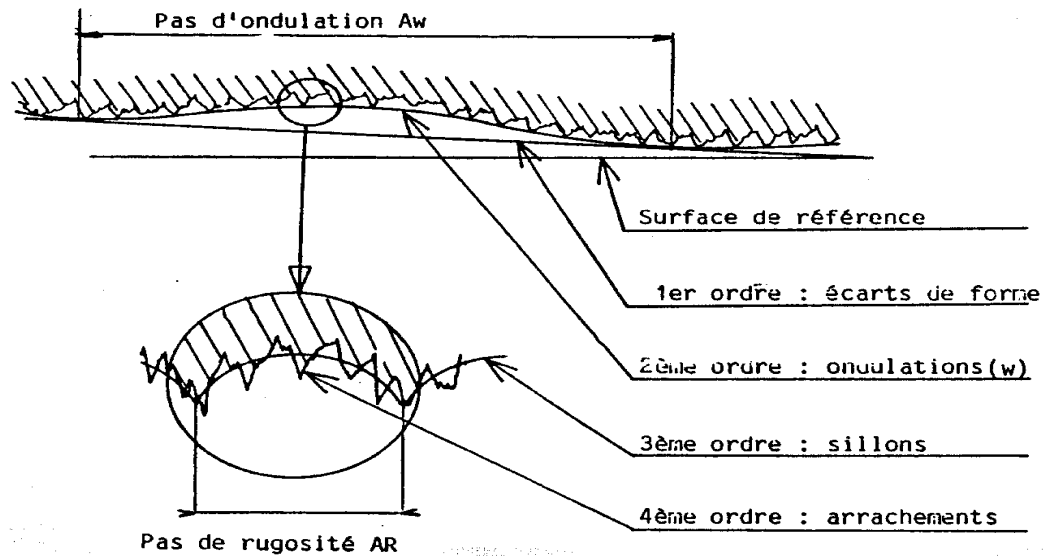
La proportion d'aluminium est plus grande, la surface est plus dure et le revêtement est mieux protégé de l'oxydation car la couche d'alumine qui se forme est plus épaisse. La coupe à haute température et à haute vitesse devient possible.

### **I-4 Rugosité des surfaces usinées**

#### **I-4-1 Principaux défauts de surface**

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ses états de surface. En général les défauts de surface jouent un rôle important pour une pièce à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. On ne s'intéresse ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure I-9) [11].





Figures I-9 : Principaux défauts de surface.

- **Défauts du premier ordre** : Ce sont des défauts de forme (écart de rectitude, écarts de circularité), défaut aperiodique.
- **Défauts du deuxième ordre** : Ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquence de la pièce et de l'outil générateur.
- **Défauts du troisième et quatrième ordre** : Ils caractérisent la rugosité de la surface, les défauts du 3<sup>ème</sup> ordre sont constitués par des stries ou sillons, ce type de défaut à un caractère périodique ou pseudo périodique. Par contre les défauts du quatrième ordre sont constitués par des arrachements, fente, piqûre ... etc. Ce type de défaut a un caractère aperiodique.

#### I-4-2 Principaux critères de rugosité

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure I-10) soit OX la ligne moyenne tel que :

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

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne [12].

- a) **Rugosité totale  $R_t$**  :  $R_t$  représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil.
- b) **Rugosité  $R_z$**  :  $R_z$  représente la distance moyenne entre les cinq sommets les plus élevés et les cinq creux les plus bas.

c) **Rugosité moyenne arithmétique  $R_a$**  :  $R_a$  représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.

$R_a$  est calculée sur une longueur d'évaluation :

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

d) **Rugosité maximum  $R_{max}$**  : C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité  $R_{max}$  étant pris sur une saillie et un creux consécutif.

e) **Rugosité  $R_p$**  : C'est la hauteur maximale de saillie de rugosité.  $R_p$  est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

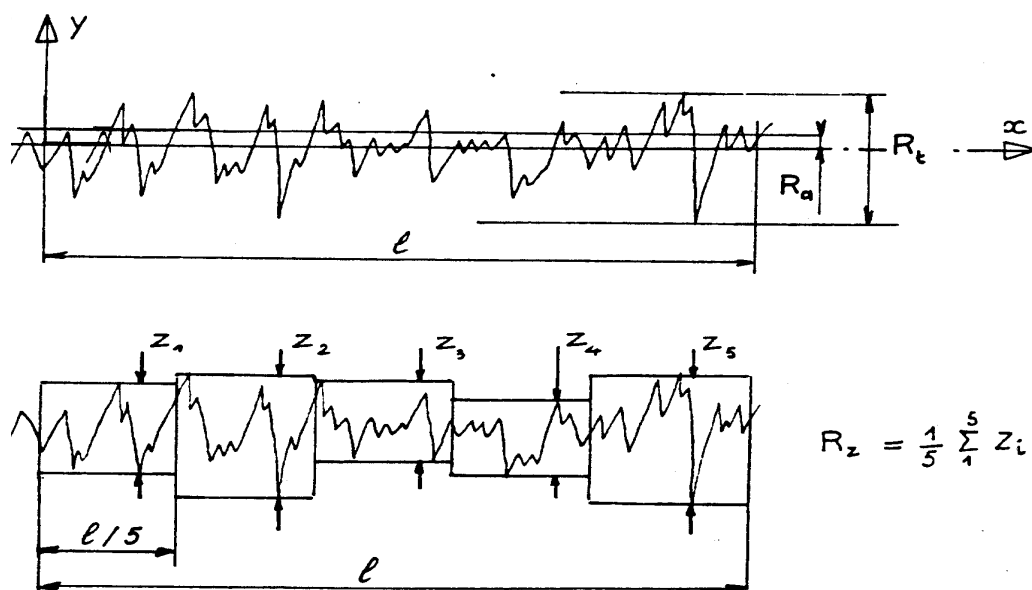


Figure I-10 : Principaux critères de rugosité.

### I-5 Efforts de coupe

En plus des informations concernant les phénomènes régissant le processus de coupe comme l'usure des outils et la rugosité de surface, les efforts de coupe sont également un bon indicateur de l'usinabilité. La connaissance des efforts nous renseigne sur les déformations plastiques et la puissance mécanique fournie nécessaire à l'enlèvement de la matière. De plus, elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts acceptables pour l'outil. La plage de fonctionnement autorisée est établie essentiellement en considérant l'évolution de la pression spécifique de coupe  $K_c$  (tournage) en fonction de la variation de la vitesse de coupe, pour des conditions d'avance et de profondeur de passe correspondant à celles du domaine de validité de l'outil coupant. Cette méthodologie s'inscrit dans la démarche appelée Couple-

Outil-Matière (COM) (norme AFNOR XP E 66-520-5) [13]. Elle permet de définir le domaine de fonctionnement de l'outil de coupe dans une matière donnée en fonction [14] :

- Des paramètres déterminant les limites d'utilisation de l'outil (déterminer les valeurs minimales et maximales de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de passe) indépendamment les uns des autres.
- Des paramètres d'interaction entre les paramètres limites (débit de copeaux, déformation et couple autorisés, exposants et constante du modèle de Taylor).
- Des paramètres auxiliaires qui tiennent compte des caractéristiques des moyens de production et permettant la transposition des conditions de coupe d'un procédé à un autre par simple calcul (de l'effort spécifique de coupe  $K_c$ ).

La pression spécifique de coupe  $K_c$  (exprimé en N/mm<sup>2</sup>) peut être calculée grâce par exemple à des mesures de puissance ou d'efforts de coupe en cours d'usinage en utilisant l'équation I.7

$$K_c = F_c / A$$

(I.7)

Avec :

$F_c$  : Effort de coupe tangentiel [N]

$A = a_p \cdot f$  : Section du copeau non déformé [mm<sup>2</sup>]

$a_p$  : profondeur de passe [mm]

$f$  : avance [mm/tr]

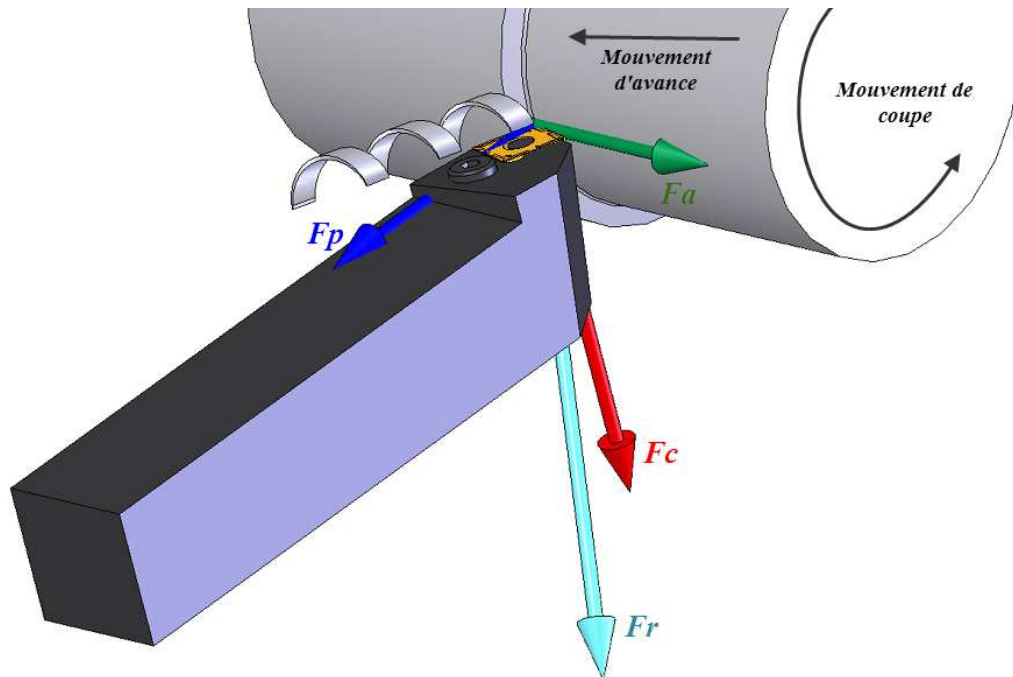
La mesure des efforts de coupe se fait à l'aide d'une table dynamométrique de marque Kistler. Pour se faire, on mesure les déformations imposées par les efforts de coupe sur la table à l'aide de capteurs piézoélectriques précontraints dans les trois directions de l'espace. Les tables dynamométriques présentent des qualités appréciées en usinage à cause de leur sensibilité, leur précision et surtout leur grande rigidité qui leur permet de les utiliser sans perturber l'opération d'usinage [15].

Grâce à la platine Kistler, on peut obtenir les différentes composantes ( $F_a$ ,  $F_r$  et  $F_t$ ) de l'effort global de coupe ( $F_{rés}$ ) :

- L'effort axial ( $F_a$ ) ou effort d'avance : il correspond à la force appliquée sur l'outil parallèlement à l'axe de rotation de la pièce à usiner. Il est pratiquement nul dans la configuration de coupe orthogonale.

- L'effort radial ( $F_r$ ) qui est défini comme étant l'effort parallèle au rayon de la pièce. Il est appelé aussi effort de pénétration.
- L'effort tangentiel ( $F_t$ ) ou l'effort de coupe : c'est l'effort parallèle à la tangente à la surface de la pièce au niveau de la pointe de l'outil.

Les différentes composantes de l'effort de coupe et l'effort résultant de l'interaction outil-pièce lors du tournage sont présentées dans la Figure I-11.



**Figure I-11** : Schéma des composantes de l'effort de coupe en tournage.

## I-6 Duré de vie et endommagement des outils de coupe

### I-6-1 Usure des outils de coupe

Lors de l'usinage et suite à l'action intensive et mutuelle entre les surfaces de contact de la partie active de l'outil et celles de la pièce à usiner, surgissent de grands efforts de coupe, des frottements et de hautes températures, qui provoquent l'apparition de l'usure sur les facettes de l'outil. Celle-ci conduit à l'endommagement de la qualité de l'état de surface et affecte la précision de la pièce usinée. L'usure des outils de coupe est un processus très complexe, durant lequel, sur les surfaces de contact de l'outil avec le copeau et la pièce à usiner, apparaissent des phénomènes physico-chimiques. Autrement dit l'usure est un processus de destruction des couches superficielles de la partie active de l'outil, qui conduit avec le temps à la modification progressive de la forme et de l'état de surface des pièces usinées. Elle affecte également les

paramètres géométriques (angles et rayon du bec) de l'outil, la température, les efforts de coupe, la durée de vie, la précision macro et micro-géométrique de la surface usinée. En fonction des conditions d'usinage, elle peut affecter une, deux ou l'ensemble des surfaces de la partie active de l'outil [3], [16], [17], [18], [20], [19].

Il est à noter que l'usure des outils de coupe, notamment lors de l'usinage des matériaux difficiles à usiner, se manifeste dans des conditions de travail beaucoup plus sévères que celles des pièces de machines. En effet la pression spécifique dans les surfaces de contact des pièces de machines ne dépasse pas quelques MPa et la température d'échauffement est inférieure à 100°C, alors que la pression spécifique dans les surfaces de contact de la partie active d'un outil de coupe est de l'ordre de  $10^3$  à  $2 \times 10^3$  MPa. La température d'échauffement dans ce cas varie de 100°C à 1000°C et même plus [21], [22], [23], [24], [25], [26].

### I-6-2 Mécanismes et formes d'usure

La nature physique du mécanisme d'usure des outils travaillant dans des conditions différentes est élucidée par une série d'hypothèses [18], [20], [27], [28], [29] [30]. Selon ces dernières le mécanisme d'usure s'explique par l'effritement, l'abrasion, l'adhésion, la diffusion, corrosion et la fatigue thermique (figure I-12).

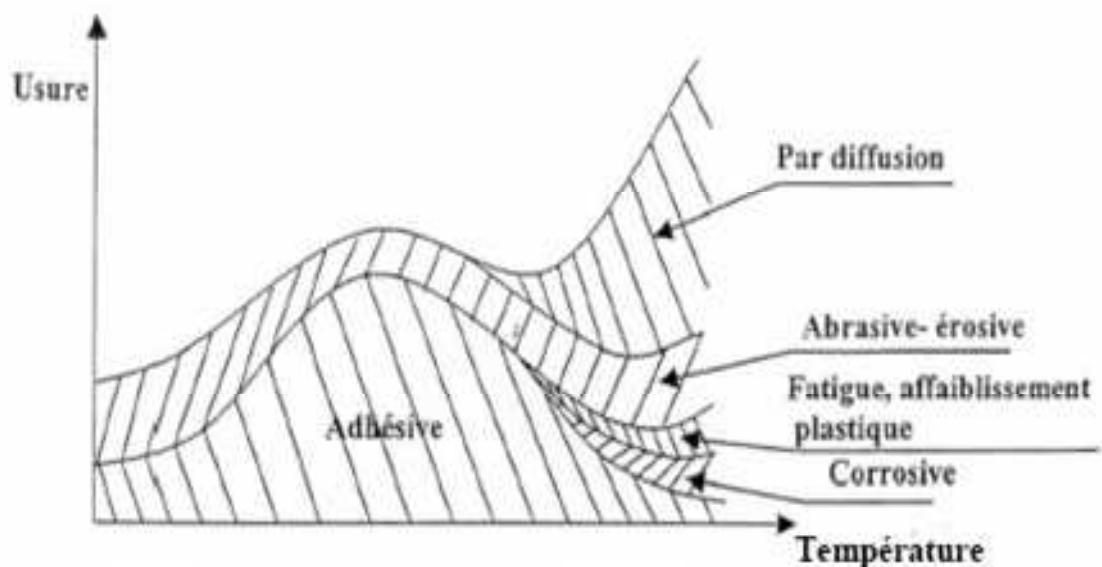


Figure I-12: Mécanismes d'usure [16].

En fonction des conditions de travail (propriétés physico mécaniques de la matière à usiner et celles du matériau de l'outil, éléments du régime de coupe, liquide de lubrification et d'arrosage, rigidité du système usinant...etc.), l'usure des outils de coupe se manifeste d'une manière très variée. En règle générale, l'outil s'use suivant plusieurs surfaces et en particulier la surface d'attaque et ses surfaces de dépouille (figure I-13) suivant 6 modes d'usures (en

dépouille, en cratère, en entaille, par déformation plastique, par écaillage et par rupture de la pointe de l'outil). Néanmoins les conditions de travail peuvent faire dominer tel ou tel type d'usure [17], [3], [18], [23], [19], [31].

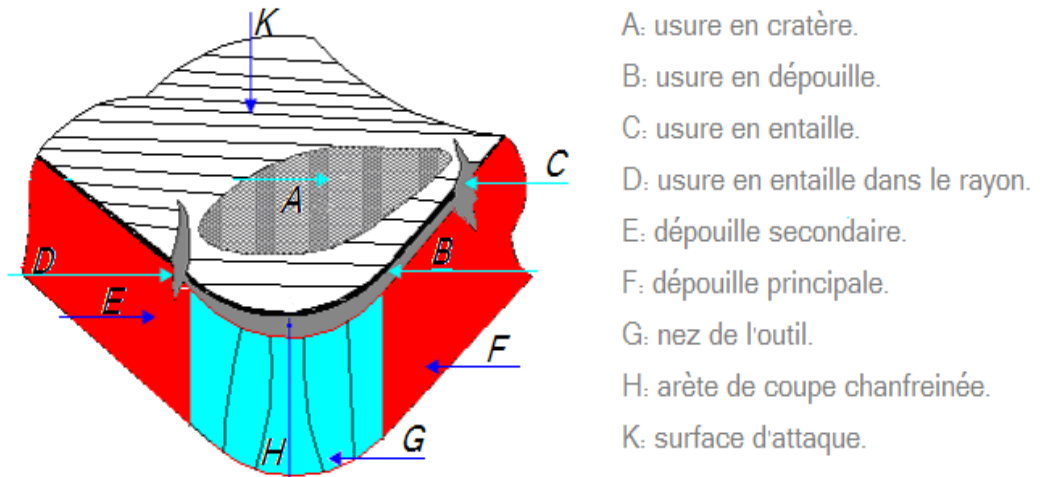


Figure I-13: Différents formes d'usure.

En se basant sur ce bref aperçu traitant la question de l'usure des outils de coupe, on constate que les principaux paramètres technologiques, tels que la précision d'usinage, la qualité de l'état de surface, le prix de revient, la productivité de travail,...etc., sont en relation directe avec l'usure. Par conséquent l'étude approfondie et continue de l'usure est une tâche d'une grande importance économique et technologique en productique mécanique.

### I-6-3 Facteurs influençant l'usure

Les principaux facteurs influençant l'usure des outils de coupe sont :

- Les propriétés physiques et mécaniques du métal en œuvre ;
- Nature du matériau constituant l'outil;
- La géométrie de la partie active de l'outil ;
- Les facteurs mécaniques d'usinage ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) ;
- L'état de l'arête tranchante et des surfaces qui la déterminent ;
- L'état de la machine-outil, la rigidité de l'ensemble porte-pièce/pièce ; porte-outil/outil.

**Vitesse de coupe :** La température de coupe étant croissante avec la vitesse de coupe. Ce paramètre a une très grande influence sur l'usure,

**Avance :** Les grandes avances font augmenter l'intensité des efforts de coupe et diminuent la durée de vie de l'outil, avec l'augmentation de la vitesse de coupe l'usure croit.

**Profondeur de passe :** La variation de la profondeur de passe modifie légèrement l'écoulement de la chaleur de long de l'arête tranchante son influence reste modeste sur l'usure.

**Matériau usiné :** Son influence sur l'usure dépend de ses propriétés physiques (conductibilité thermique), de ses propriétés mécaniques (pression spécifique de coupe) et de ses propriétés chimiques (% de ces certains éléments d'addition).

**Lubrification :** Son influence permet une amélioration de 25% sur la durée de vie.

De nombreux essais ont été effectués pour démontrer l'effet des différents facteurs sur l'usure des outils. Il est bien établi que la vitesse de coupe est une variable importante influant sur l'usure des outils [32].

## I-7 Les aciers inoxydables

### I-7-1 Naissance des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont nés au début du 20e siècle. Leur résistance à la corrosion est due à une teneur en chrome d'au moins 12%. Ces aciers permettent de répondre aux problèmes de corrosion sévère (industrie chimique, eau de mer...) ainsi qu'à la corrosion douce lorsque toute contamination est interdite (industrie agroalimentaire, pharmacie, industrie nucléaire...). Ils permettent aussi de résoudre les problèmes d'aspect de surface en milieu atmosphérique (bâtiment, mobilier...).

A la fin du 19e siècle les chercheurs ont mis en évidence le rôle du chrome sur la résistance à l'oxydation des alliages ferreux. Au tout début du 20e siècle, Goldschmidt développe les premières nuances d'aciers inoxydables à bas carbone. Les grandes familles d'aciers inoxydables se développent progressivement.

Dès 1909, les principales nuances de base d'aciers martensitiques, ferritiques et austénitiques connues actuellement sont élaborées. Il faudra attendre 1931 pour voir apparaître les premières nuances d'aciers austéno-ferritiques [33].

Au contraire des aciers martensitiques qui sont formés par trempe de la phase austénitique, pour les nuances ferritiques, austénitiques et austéno-ferritiques, les transformations de phase ne touchent qu'une partie mineure du matériau. La phase principale reste principale. Leurs propriétés ne peuvent être améliorées par une trempe.

### I-7-2 Nuances des aciers inoxydables

Il existe de nombreux types différents d'aciers inoxydables. Tous ne conviennent pas aux applications de construction, en particulier lorsqu'on envisage le soudage.

On compte cinq groupes fondamentaux d'aciers inoxydables, classés selon leur structure métallurgique : ce sont les groupes austénitique, ferritique, martensitique, duplex et durcis par précipitation [33].

#### **I-7-2-1 Aciers martensitiques**

Ils sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13 % de chrome avec au moins 0,08 % de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel. Exemples : X20Cr13, X46Cr13, X29CrS13.

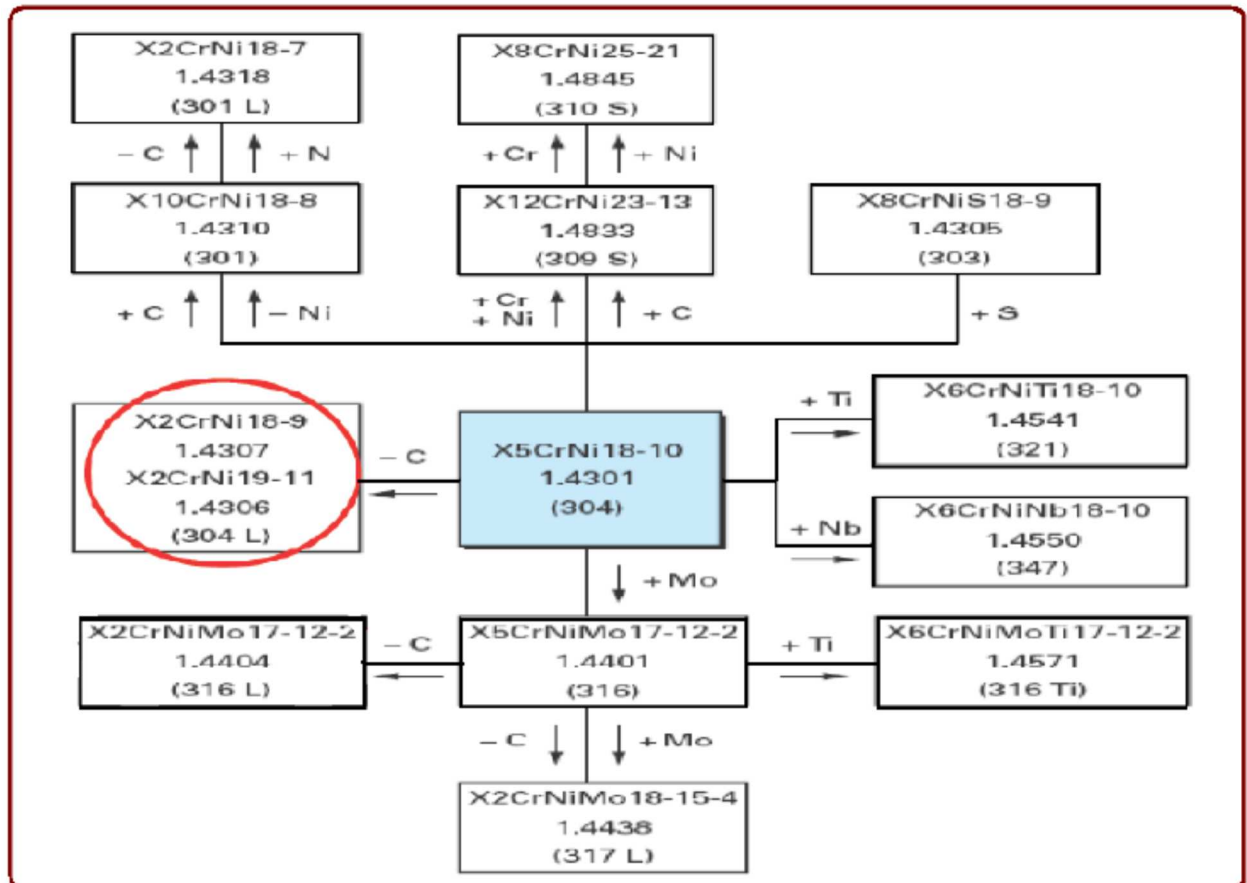
#### **I-7-2-2 Aciers ferritiques**

Ils ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %), particulièrement intéressants en présence de soufre. Les aciers ferritiques sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, tôle revêtues, protégées (dites « claddées ») des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique. Exemples : X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17.

#### **I-7-2-3 Aciers austénitiques**

L'inoxydabilité de certains aciers est due à la formation d'une couche d'oxyde de chrome protectrice à la surface de l'alliage métallique, appelée couche de passivation. La formation de cette couche de passivation nécessite une teneur en chrome de l'alliage au moins égale à 12%. Les aciers inoxydables austénitiques sont des alliages de fer et de carbone qui contiennent, en général, de 0,02% à 0,1% de carbone, 17 à 20% de chrome, 7 à 25% de nickel, 2 à 5% de molybdène et d'autres éléments d'addition comme le cuivre, le silicium, le titane, le niobium ... . Les éléments d'addition permettent d'améliorer la tenue à la corrosion ou les propriétés mécaniques du matériau. Depuis quelques décennies, le nickel coûteux, est progressivement remplacé par l'azote grâce à des procédés d'élaboration qui améliore sa solubilité dans l'acier liquide.





**Figure I-14 :** Aciers inoxydables austénitiques dérivés de la nuance de base 304 [33].

Les nuances les plus couramment utilisées, souvent appelées nuances austénitiques standards, sont les nuances 1.4301 (connue sous l'appellation américaine 304) et 1.4401 (connue sous l'appellation américaine 316). Elles contiennent 17 à 18 % de chrome et 8 à 11 % de nickel. La nuance 1.4301 convient pour des sites ruraux, urbains et légèrement industriels alors que la nuance 1.4401, qui est plus fortement alliée, est bien adaptée à des sites industriels ou en atmosphère marine.

#### I-7-2-4 Aciers dits duplex

Les propriétés des aciers duplex sont dues, pour la plupart, à la structure biphasée de l'alliage. Ils combinent favorablement les propriétés mécaniques et de corrosion des aciers austénitiques et ferritiques. Ceci se traduit par une limite d'élasticité élevée (entre 200 et 600 MPa) alliée à une ductilité satisfaisante (25 à 45%). La résistance à la rupture peut atteindre 850 MPa, pour des aciers duplex contenant 80% de ferrite.

Contrairement aux aciers ferritiques, ils n'ont pas de transition brutale ductile-fragile, ils peuvent donc être utilisés sans précautions particulières jusqu'à  $-50^{\circ}\text{C}$ . Les aciers duplex ont

une grande résistance à la corrosion, en particulier en milieu agressif (acide, chloré ou marin). Ils possèdent, de plus, une excellente coulabilité, c'est pourquoi ils constituent la majorité de la production de pièces moulées en acier inoxydable. La production de tôles fortes ou minces, de produits longs ou de tubes est moins développée en raison des précautions particulières à mettre en oeuvre, car la teneur en ferrite et la taille de grains visés dépendent étroitement des conditions de refroidissement [34].

### I-7-3 Rôle des éléments d'alliage

**Chrome :** Une teneur minimale d'environ 10,5 % est nécessaire pour former un film passif de chrome qui soit stable, suffisant pour protéger l'acier contre une corrosion atmosphérique modérée. La résistance à la corrosion augmente avec la teneur en chrome. Le chrome est alphasène : il favorise la forme ferritique, c'est-à-dire la structure cubique centrée du fer. Des teneurs en chrome élevées nécessitent des quantités accrues de nickel pour former une structure austénitique ou austéno-ferritique (duplex). Elles favorisent également la formation de phases intermétalliques. Les aciers inoxydables austénitiques contiennent habituellement au moins 16 % de Cr et les nuances duplex au moins 20 %. Le chrome augmente également la résistance à l'oxydation aux températures élevées. Cet effet du chrome est important en raison de son incidence sur la formation et la suppression de la calamine et des colorations thermiques résultant du traitement thermique ou du soudage. Les aciers inoxydables duplex sont plus difficilement attaquables à l'acide et la suppression de la coloration thermique est plus difficile que dans le cas des aciers austénitiques [34].

**Molybdène :** Le molybdène renforce l'action du chrome en conférant à l'acier inoxydable une résistance à la corrosion par piqûres. Pour une teneur en chrome d'au moins 18 %, les additions de molybdène sont environ trois fois plus efficaces que les additions de chrome lorsqu'il s'agit de protéger l'acier de la corrosion par piqûres et de la corrosion cavernueuse en milieu chloruré. Le molybdène est alphasène. Il augmente la tendance des aciers inoxydables à former des phases intermétalliques nocives. C'est pourquoi on limite habituellement sa teneur à environ 7,5 % dans les aciers austénitiques et à 4 % dans les aciers duplex [34].

**Azote :** L'azote augmente la résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion cavernueuse des aciers inoxydables austénitiques et duplex. Il augmente également notablement leur résistance mécanique. De fait, il constitue l'élément le plus efficace pour durcir la solution solide et ce, à faible coût. La ténacité améliorée des aciers duplex à l'azote est due à leur teneur accrue en austénite et à la réduction des phases intermétalliques. L'azote n'empêche pas la

précipitation de ces phases mais en retarde suffisamment la formation pour permettre le travail des nuances duplex. Il est ajouté aux aciers inoxydables austénitiques et duplex fortement résistants à la corrosion, avec des teneurs élevées en chrome et en molybdène, afin de compenser leur propension à former une phase sigma. L'azote est un gammagène puissant (il favorise la forme austénitique) et peut remplacer une partie du nickel dans les aciers inoxydables austénitiques. Il réduit l'énergie de défaut d'empilement et augmente le taux d'écrouissage de l'austénite. Il augmente également la résistance de l'austénite par durcissement de la solution solide. Il est usuel d'ajouter de l'azote aux aciers duplex et d'ajuster la quantité de nickel afin de réaliser l'équilibre des phases souhaité. Les éléments alphagènes, le chrome et le molybdène, sont équilibrés par les éléments gammagènes, le nickel et l'azote, avec formation de la structure duplex [34].

**Nickel** : Le nickel est un élément stabilisateur de l'austénite ; il favorise le passage de la structure cubique centrée (ferritique) de l'acier inoxydable à la structure cubique faces centrées (austénitique). Les aciers inoxydables ferritiques contiennent peu ou pas de nickel, les aciers duplex ont une teneur faible ou moyenne – 1,5 % à 7 % –, et les aciers austénitiques de la série AISI 300 en contiennent au moins 6 %. L'addition de nickel retarde la formation des phases intermétalliques néfastes dans les aciers austénitiques mais est beaucoup moins efficace que l'azote dans sa capacité à retarder leur formation dans les aciers duplex. La structure cubique faces centrées explique l'excellente ténacité des aciers austénitiques. Sa présence dans près de la moitié de la microstructure des nuances duplex augmente considérablement la ténacité de ces derniers par rapport aux aciers ferritiques [34].

**Tungstène** : il améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

**Titane** : le titane doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure.

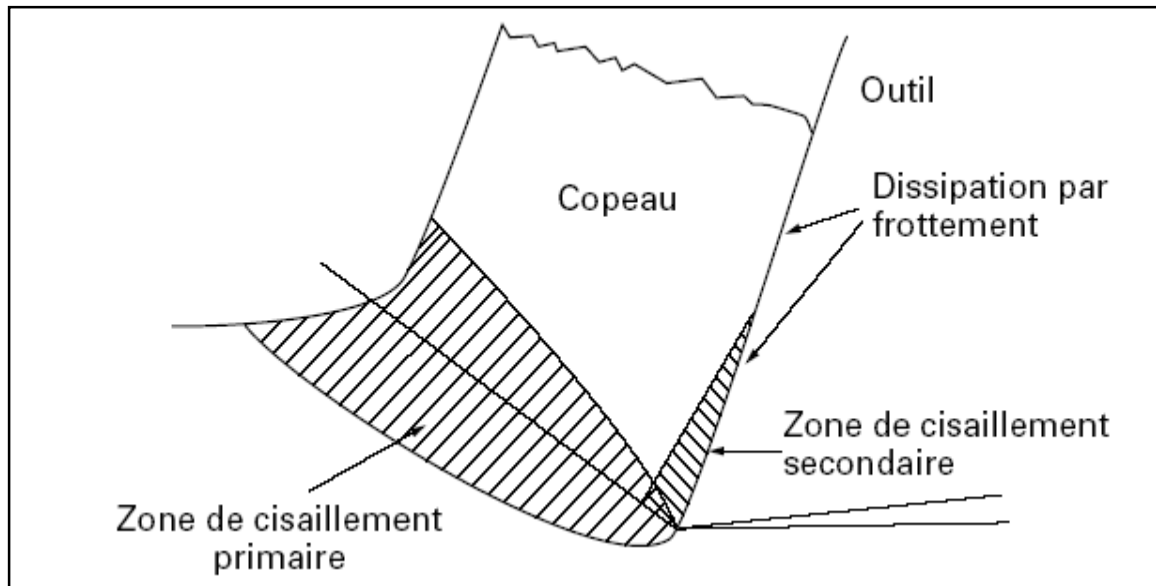
#### **I-7-4 Influence des propriétés physiques**

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

##### **a) Effet de la conductivité thermique**

Nous pouvons retenir que les sources de chaleur lors de la formation du copeau sont localisées dans les zones de cisaillement primaire et cisaillement secondaire (Figure I-15), Une conductivité thermique élevée évite un échauffement trop important dans la zone de coupe

grâce à une bonne évacuation de la chaleur produite à l'interface outil-copeau dans toute l'épaisseur du copeau.



**Figure I-15 :** Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale.

Il s'avère que les aciers inoxydables présentent des conductivités thermiques beaucoup plus faibles que les aciers peu alliés (1.5 à 3 fois plus faibles). Les austénitiques sont de loin les plus défavorisés (figure I-16), même si une augmentation de la température diminue leur handicap. Les martensitiques sont les moins pénalisés, mais leur conductivité reste tout de même environ 1.5 fois plus faibles que les aciers peu alliés. Cette mauvaise conductivité a alors pour conséquences:

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

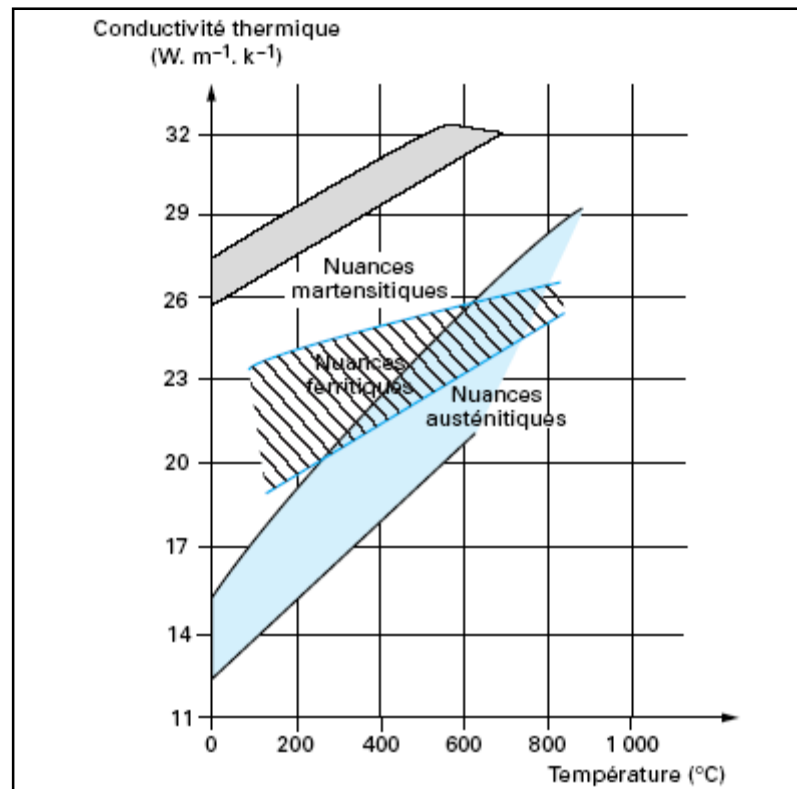


Figure I-16 : Conductivité thermique des aciers inoxydables [35].

### b) Rôle du coefficient de dilatation

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

### c) Influence du coefficient de frottement

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

En conséquence, les aciers inoxydables, et tout particulièrement les austénitiques, ont des propriétés physiques qui les pénalisent lors de l'usinage. Ceci rend l'usinage des aciers inoxydables très particulier et conduit à des solutions bien spécifiques, que ce soit dans l'amélioration des matériaux ou dans le choix des outils [35].

### I-8 Etat de l'art

Pour bien comprendre l'usinabilité des aciers inoxydables et aussi le comportement des outils de coupe, on a analysé les diverses études qui ont été faites par les différents chercheurs.

L'objectif de M. Kaladhar et al. [36] est la détermination des paramètres optimaux pendant le tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en utilisant un cermet à revêtement PVD (TiCN-TiN) à l'aide des méthodes ANOVA et Taguchi. Ils ont noté d'un côté que l'avance et le rayon du bec sont les paramètres les plus significatifs sur l'état de surface, d'un autre côté la profondeur de passe et l'avance affectent significativement sur le taux d'enlèvement de la matière.

M. Kaladhar et al. [37] ont étudié l'influence de différents type revêtements (PVD et CVD) sur la rugosité de la surface durant l'usinage de l'acier inoxydable AISI 304. Ils ont utilisé la méthode de Taguchi pour étudier l'état de surface en fonction de différents paramètres de coupe et pour obtenir le régime optimal. Suivant le type du revêtement, les meilleures valeurs de rugosité ont été obtenues par le revêtement PVD. Les résultats obtenus montrent que le rayon du bec est le facteur le plus prépondérant avec une contribution de 63% et 38% respectivement aux revêtements PVD et CVD. Ils ont noté aussi que la vitesse de coupe (190 m/min), l'avance (0.25 mm/tr), la profondeur de passe de 0.5 mm et 0.4 mm pour le rayon du bec sont les valeurs de régime optimal pendant le tournage par le revêtement CVD, et concernant l'usinage par le revêtement PVD le régime optimal est de 170 m/min, 0.25 mm/tr, 1 mm et 0.4 mm respectivement à  $V_c, f, a_p$  et  $r$ .

R. A. Mahdavijad et S. Saeedy [38] ont fait une recherche sur les paramètres les plus influençant sur l'usinage à sec et lubrifié de l'acier AISI 304 qui sont (vitesse de coupe et l'avance). Ils ont conclu que la vitesse de coupe est le paramètre principal qui influe sur l'usure. D'après les auteurs, l'usure en dépouille diminue quand la vitesse de coupe augmente jusqu'à la vitesse 175 m/min, au-delà de cette vitesse l'usure augmente comme le montre la figure I-17. Dans la figure I-18 les auteurs présentent l'évolution de l'arête rapportée avec la vitesse de coupe. Ils ont indiqué que la taille de l'arête rapportée est plus grande surtout à des faibles vitesses de coupe et cela mène à des mauvaises rugosités de surface.

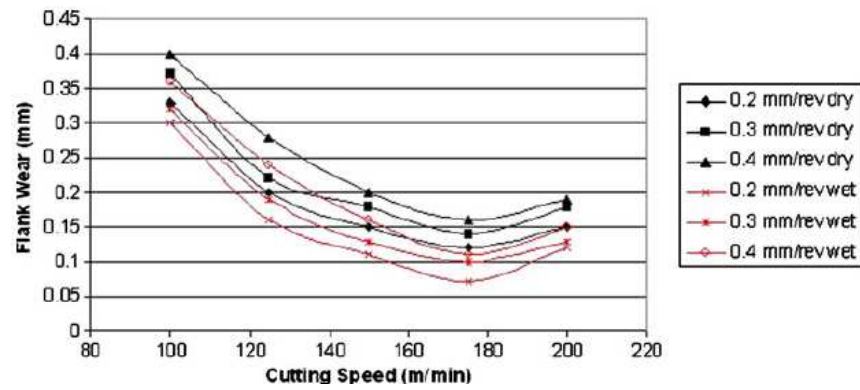


Figure I-17 : L'évolution de l'usure en dépouille en fonction de la vitesse de coupe

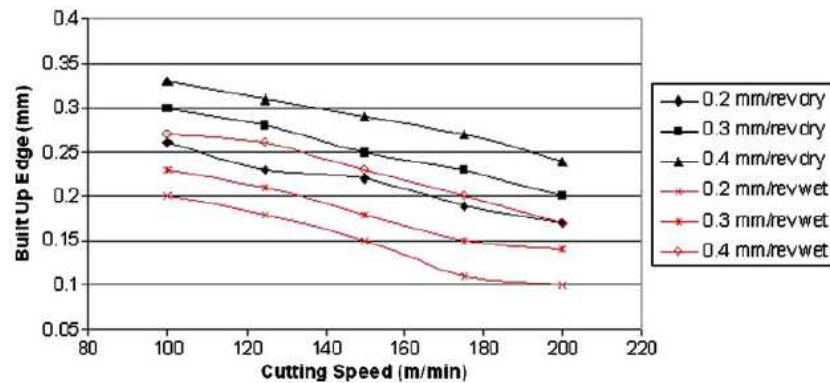


Figure I-18 : L'évolution de l'arête rapportée en fonction de la vitesse de coupe

A. Kumar et al. ont [39] étudié l'évolution de l'usure et la durée de vie d'un outil en céramique mixte à base d'alumine lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC. Les auteurs ont élaboré des modèles de durée de vie de l'outil en fonction de l'usure. Ils ont conclu que l'usure en dépouille affecte la durée de vie de l'outil à des faibles vitesses de coupe, cependant, l'usure en cratère ou l'usure d'entaille affecte la durée de vie aux vitesses élevées, au-dessus de 200 m/min (figure I-19).

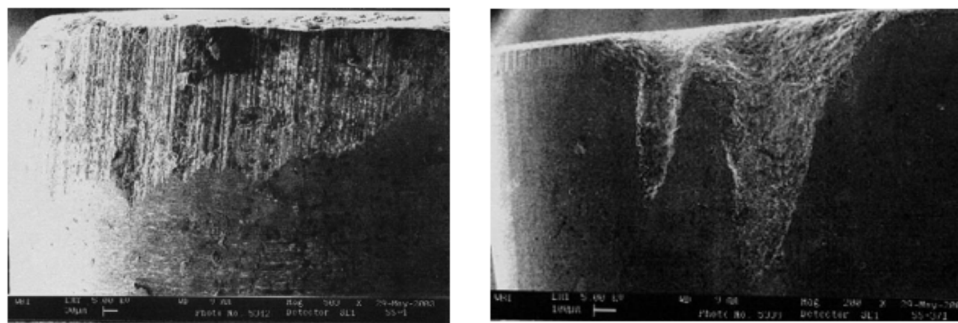
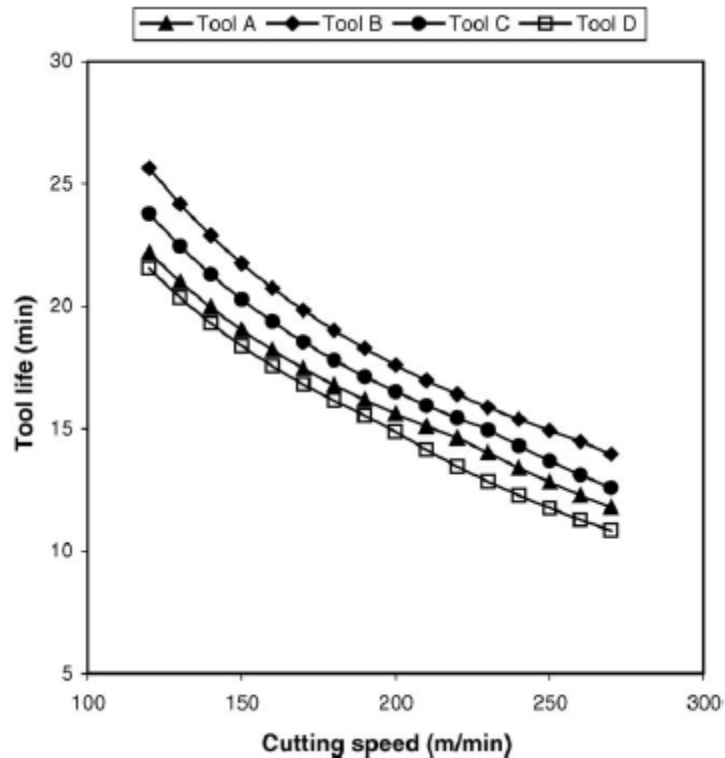


Figure I-19 : L'usure en dépouille d'une céramique mixte à base d'alumine lors l'usinage d'un acier inoxydable martensitique durci à 60HRC.

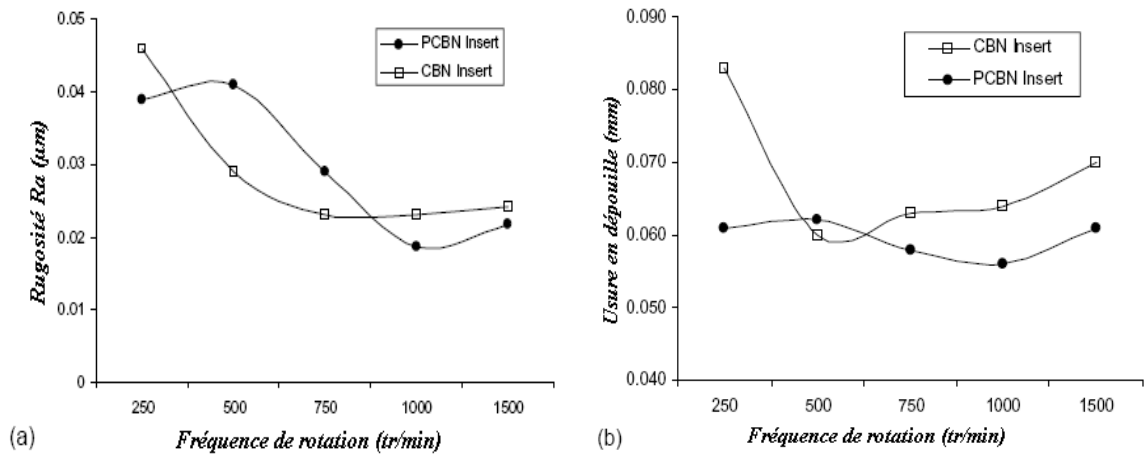
Les auteurs ont trouvé aussi que la durée de vie de la céramique d'alumine mixte Ti[C, N] est plus grande par rapport aux autres nuances de coupe comme présentées dans la figure I-20.



**Figure I-20:** Evolution de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe pour les différentes nuances de coupe

K. S. NEO et al. [40] ont étudié la performance d'un outil en CBN lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique (X38Cr13) par des outils de coupe en PCBN et en CBN conventionnel. Les performances en termes de rugosité de surface et d'usure de l'outil dans différentes conditions d'usinage étaient étudiées et leurs résultats étaient comparés. Sur la base des résultats expérimentaux, les auteurs ont indiqué que le PCBN s'est avéré plus performant en termes de résistance à l'usure comparé à l'outil en CBN conventionnel. Il peut également réaliser un très bon état de surface dont la rugosité  $R_a$  est inférieure à 30nm. Les auteurs ont conclu que, pour atteindre une bonne qualité de surface sur le STAVAX (X38Cr13), la vitesse de coupe élevée est exigée pour les outils en CBN et en PCBN, ce dernier peut réaliser un meilleur état de surface. Ils ont constaté aussi qu'à la gamme élevée de la vitesse de coupe, l'outil en PCBN peut mieux résister à l'usure (figure I-21).



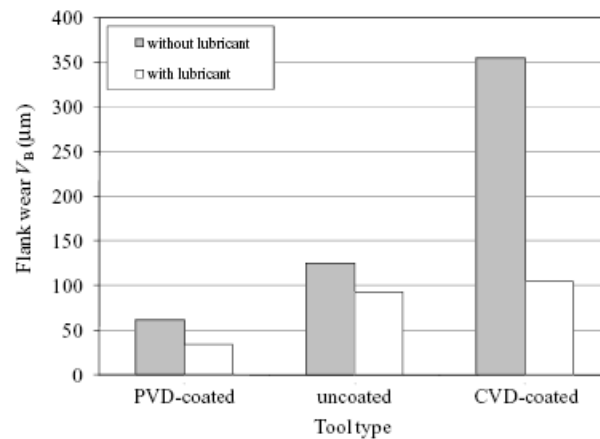


**Figure I-21 :** Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction de la fréquence de rotation.

M. A. Xavier [41] a évalué l'usinabilité de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en termes de l'état de surface engendrée, l'usure de l'outil et la durée de vie de la plaquette de coupe à différents temps de coupe. Il a constaté que la durée de vie maximale obtenue pendant le tournage de cet acier est de 36.2 min à la vitesse de coupe de 100 m/min pour une usure admissible 0.3 mm.

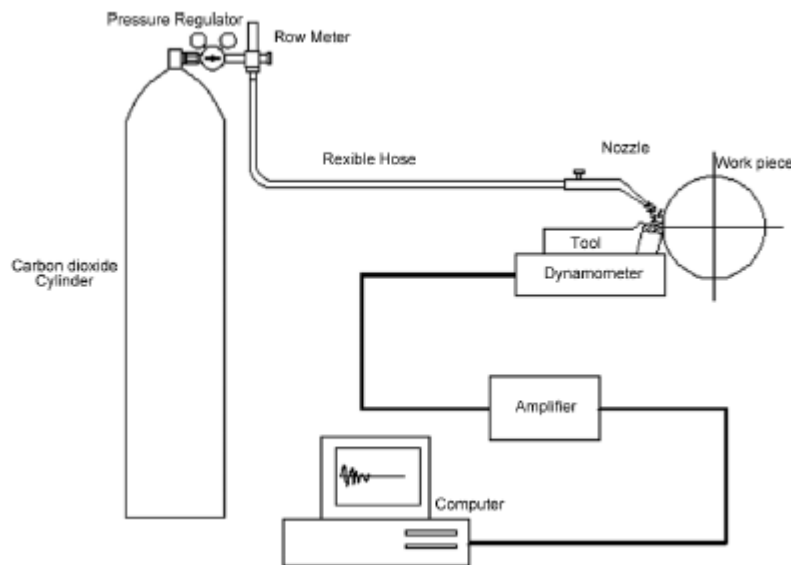
S. K. Nayak et al [42] ont étudié l'effet de différents facteurs de coupe tels que ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur le taux du métal enlevé, les efforts de coupe et aussi l'états de surface pour choisir les paramètres optimaux durant le tournage à sec de l'acier AISI 304. Les auteurs ont abouti que la vitesse de coupe de 45 m/min, l'avance de 0.1 mm/tr et la profondeur de passe égale à 1.25 mm sont les valeurs optimales. En plus des tests de confirmation ont été fait pour valider l'analyse par la méthode de (Grey analysis) et cette dernière donne un coefficient de corrélation de 89 %.

W. Y. H. Liew [43] a comparé les performances de différents types de revêtements pendant l'usinage à sec et lubrifié de l'acier inoxydable martensitique AISI 420. Il a indiqué que pendant un usinage à sec d'environ 450 m l'usure en dépouille de la plaquette à revêtement PVD atteint 0.06  $\mu\text{m}$  et pour la plaquette à revêtement CVD l'usure atteint 0.35  $\mu\text{m}$  comme le représente la figureI-22.



**Figure I-22 :** Usure en dépouille pour différentes plaquettes de coupe

B. D. Jerold et M. P. Kumar [44] ont utilisé le CO<sub>2</sub> comme lubrifiant pendant le tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 316. Dans cet article les auteurs ont cherché la différence entre l'usinage à sec et lubrifié par une huile conventionnelle et le CO<sub>2</sub>. En ce qui concerne l'usinage lubrifié le system présenté dans la figure I-23 a été utilisé, et les deux lubrifiants sont injectés directement sur le bec de l'outil.



**Figure I-23 :** Configuration expérimentale de l'usinage lubrifié.

Ils ont conclu que l'effort de coupe diminué avec la hausse de la vitesse de coupe (figure I-24) à cause du ramollissement de la matière dû à la température élevée dans la zone de coupe. En plus l'utilisation de CO<sub>2</sub> comme lubrifiant a diminuée l'effort de coupe d'environ 35 à 55% comparé à l'huile conventionnelle. La lubrification par le CO<sub>2</sub> engendre une rugosité de surface meilleure par rapport aux autres techniques d'usinage et empêche l'usure de la plaquette comme les montre les figures I-25 et I-26.

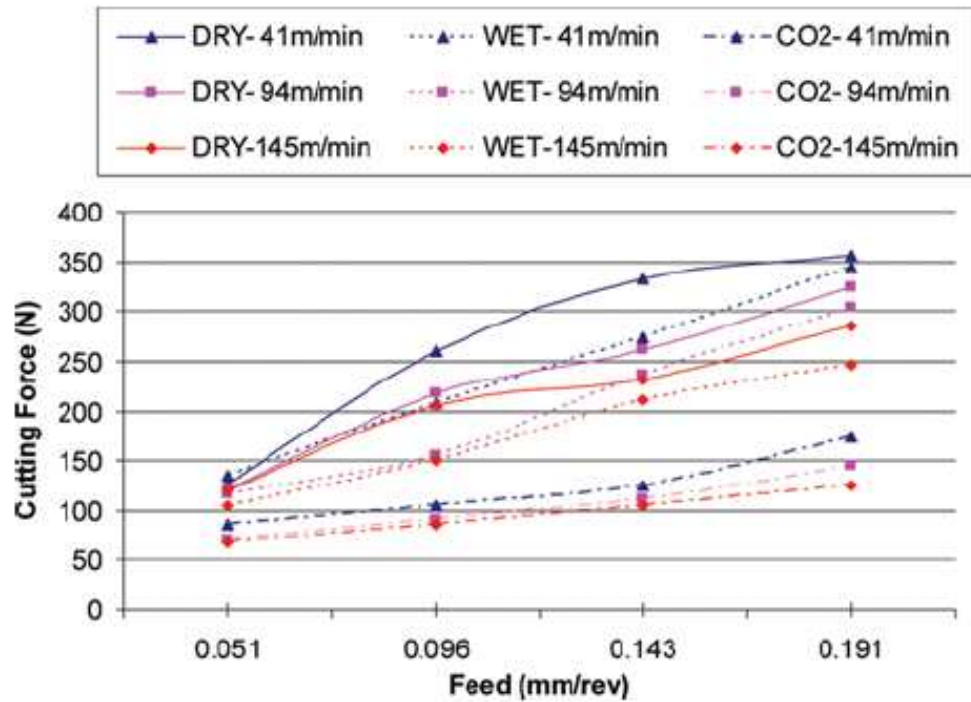


Figure I-24 : Evolution de l'effort de coupe en fonction de l'avance à différentes vitesses de coupe

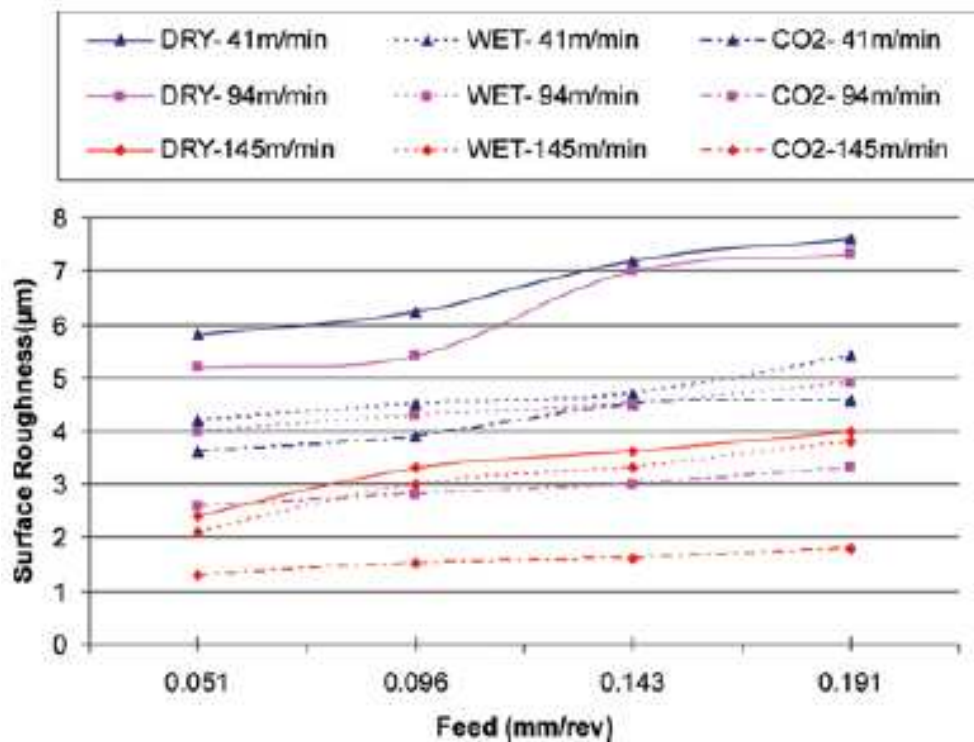
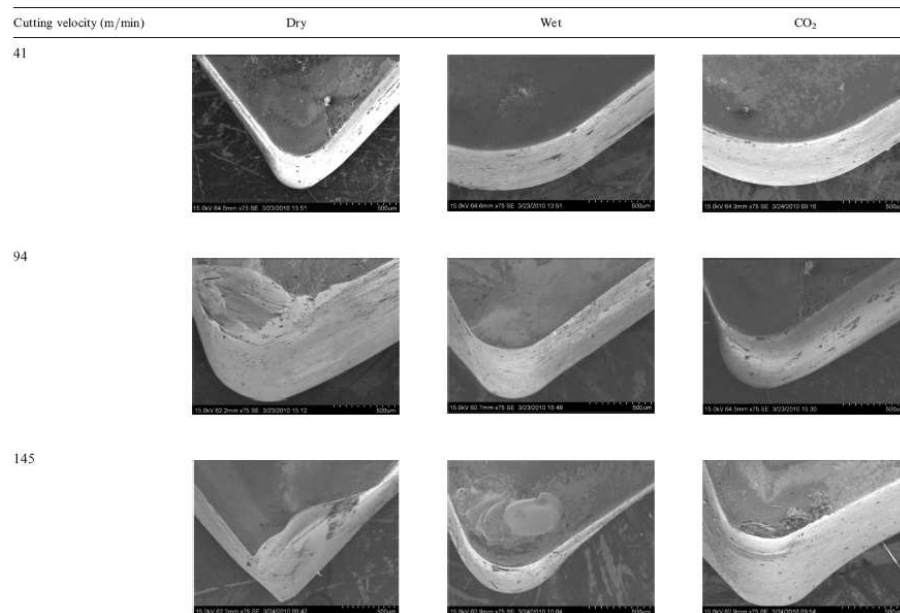


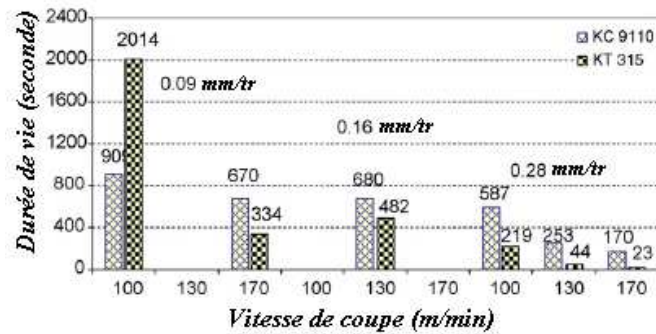
Figure I-25 : Evolution de la rugosité en fonction de l'avance à différentes vitesses de coupe



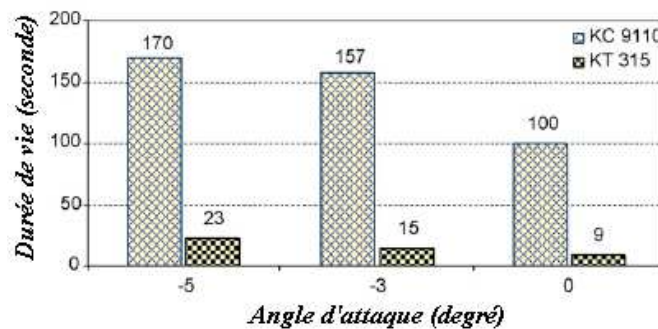
**Figure I-26 :** Images des plaquettes utilisées.

Afin de faire une investigation sur l'effet des paramètres de coupe sur l'état de surface, les efforts de coupe et l'usure de l'outil pour obtenir la configuration de coupe optimale, T. Nithyanandhan et al. [45] ont utilisé l'analyse de la variance et aussi la méthode de Taguchi pour analyser l'influence de ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur  $R_a$ ,  $F$  et  $VB$  durant l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 en utilisant un carbure revêtu. Les résultats obtenus montrent que la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont un effet significatif sur l'effort axial alors que l'avance et profondeur de passe sont des facteurs qui influent significativement sur l'effort tangentiel. En plus l'avance a un effet moins important sur l'usure de l'outil. Dans un autre travail de recherche Nithyanandhan et al. [46] ont cherché les paramètres de coupe optimaux qui influent sur l'usure de l'outil durant l'usinage du même acier AISI 304 par le même outil de coupe. Les valeurs de paramètres de régime de coupe ( $V_c=450$  m/min,  $f=0.07$  mm/tr et  $a_p=1$  mm) ont été choisis comme configuration optimale.

M.Y. Noordin et al. [47] ont étudié le comportement des outils de coupe lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable martensitique X38Cr13 durci à 45 HRC. Deux matériaux de coupe ont été utilisés, le premier un cermet de nuance KT315 à revêtement PVD (TiN/TiNC/TiN) et le second en carbure KC9110 à revêtement MTCVD avec différents angles de coupe (0, -3 et -5). Dans cette étude les auteurs ont indiqué que le matériau de coupe, la vitesse de coupe, l'avance et l'angle d'attaque affectent significativement l'usure de l'outil et la tenue. Les figures I-27 et I-28 illustrent une comparaison de performance entre le cermet KT315 et le carbure KC9110.



**Figure I-27 :** Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différentes vitesses de coupe et avances pour un angle d'attaque  $-5^\circ$ .

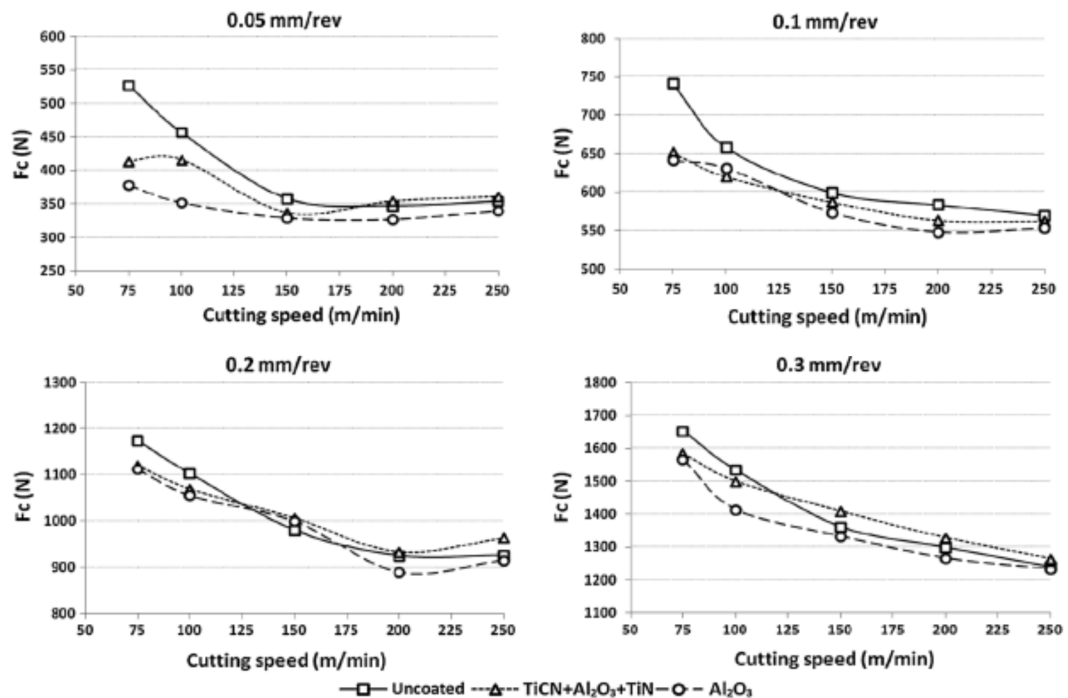


**Figure I-28 :** Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différents angles d'attaque pour  $V_c=170$  m/min.

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

F. Kara et al. [48] ont effectué une étude pour la modélisation des efforts de coupe générés lors du tournage de l'acier inoxydable austénitique AISI 316L. La méthode de réseau de neurones artificiels (ANN) et l'analyse de régression multiple ont été utilisées. Les paramètres d'entrée du modèle étaient la vitesse de coupe, l'avance et le type de revêtement. Les outils de coupe en carbure de tungstène non revêtu et à revêtements ( $TiCN+Al_2O_3+TiN$  et  $Al_2O_3$ ), ont été choisis. Ils ont noté que l'augmentation de l'effort de coupe tangentiel dépende à l'augmentation de l'avance. En plus l'augmentation de la vitesse de coupe mène à la diminution de l'effort tangentiel. Ils ont conclu aussi que le carbure non revêtu donne des efforts de coupe plus grands que les autres nuances de coupe, ceci est très claire surtout pour des vitesses inférieure à 100 m/min comme montré dans la figure I-29. D'après les auteurs, les résultats de

prédiction ont montré que l'ANN a été la méthode la plus souhaitable par rapport à la méthode de régression multiple en termes de précision.

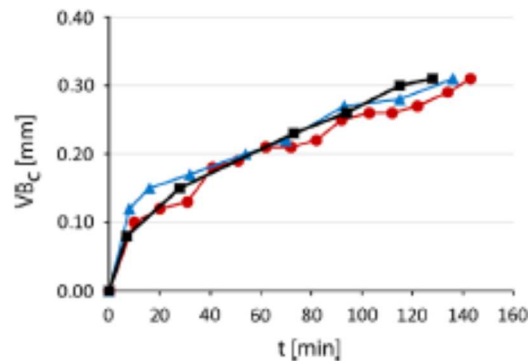


**Figure I-29 :** La variation de l'effort de coupe tangentielle en fonction de la vitesse de coupe pour les différentes nuances de coupe.

S. Ranganathan et al. [49] ont étudié l'usinabilité de l'acier inoxydable 316L pendant le tournage à chaud à différentes températures (200, 400 et 600°C) à l'aide d'un outil en carbure de tungstène. Ils ont utilisé deux méthodes statistiques qui sont la méthode de la surface de réponse et réseau de neurone pour modéliser l'évolution de l'état de surface en fonction de différents conditions de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Les auteurs ont constaté que l'avance est le facteur le plus influant sur la rugosité Ra avec une contribution de 51% à la température de 200°C, 29% à 400°C et 20% à 600°C. En plus, les deux méthodes ANN et RSM ont été comparées de point de vue précision, la première méthode était plus fiable par rapport à la deuxième.

K. Broniszewski et al. [50] ont présenté les résultats de l'étude des propriétés des outils de coupe en céramique lors de l'usinage à sec d'un acier inoxydable trempé. L'usinage à sec de cet acier conduit à l'oxydation des particules de molybdène et la formation d'une structure d'oxyde de molybdène MoO<sub>3</sub> et MoO<sub>2</sub>. l'oxyde MoO<sub>3</sub> est très similaire à celle du graphite et prend la fonction d'un lubrifiant solide, de ce fait le frottement entre l'outil et la matière usinée est

diminué. En plus, les outils de coupe travaillent sans apparition des fissurations et écaillages des arêtes de coupe et pour cela la durée de vie moyenne atteint plus de 2h (figure I-30).



**Figure I-30** : L'usure en dépouille en fonction du temps.

K. Chandrasekaran et al. [51] ont étudié l'usinabilité de l'acier inoxydable AISI 410 lors de l'usinage à sec par trois nuances de coupe en carbure à revêtements différents (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti(C, N, B), (Ti, Al) N). Dans cette recherche la rugosité de la surface a été étudiée, en plus la méthode de Taguchi et ANOVA ont été utilisées pour analyser la rugosité Ra. Les auteurs ont conclu qu'un meilleur état de surface est obtenu à la vitesse de coupe de 160 m/min, l'avance de 0,1 mm/tr et la profondeur de passe de 0,7 mm utilisant les nuances à revêtements (TiCN+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Ti(C, N, B)). Les paramètres optimaux choisis pour la nuance à revêtement ((Ti, Al) N) sont respectivement, (110 m/min, 0,1 mm/tr et 0,7mm). D'après les auteurs l'outil de coupe revêtu par (Ti(C, N, B)) est plus performant en comparant aux autres nuances de coupe.

D. P. Selvaraj et al. [52] ont examiné la rugosité de la surface des aciers AISI 304 DSS grade 4A et 5A pendant le tournage à sec par des outils en carbure de tungstène à revêtement TiC et TiCN. Ils ont trouvé des bonnes rugosités de surface à la vitesse de coupe 100 m/min, l'avance de 0,04 mm/tr pour les deux matières usinées. Le régime ( $V_c = 120$  m/min et  $f = 0,04$  mm/tr) donne des efforts de coupe les plus faibles. L'analyse ANOVA a indiqué que la vitesse de coupe et l'avance ont une contribution de (64%, 31%) et (53%, 45%) respectivement à la rugosité et l'effort de coupe pour la nuance 5A. En ce qui concerne la nuance 4A les contributions de  $V_c$  et  $f$  ont été (63%, 31%) pour l'état de surface et (56%, 42%) pour l'effort de coupe. Les auteurs ont noté aussi que la vitesse de coupe et l'avance affectent l'usure par (92%, 7%) pour l'acier grade 5A et par (91%, 9%) pour l'acier grade 4A.

D. P. Selvaraj et P. Chandramohan [53] ont présenté les résultats de l'étude de l'usinage de deux nuances en acier inoxydables duplex (ASTM A 995) grade 4A et 5A utilisant des outils de coupe en carbure cimenté à revêtements de type TiC et TiCN. L'influence de la vitesse de

coupe et l'avance sur l'état de la surface a été étudiée. Les résultats présentés montrent que la  $V_c$  a un effet significatif sur la rugosité de la surface usinée. En effet, l'augmentation de la vitesse de coupe à 100 m/min conduit à une diminution de  $R_a$ , au delà de cette vitesse les valeurs de  $R_a$  augmentent. Ils ont observé que la nuance 4A donne des états de surfaces meilleures par rapport à celle 5A.

M. Thiyaгу et al. [54] ont utilisé la méthode de la surface de réponse pour étudier l'influence de différents paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $r$ ) sur la rugosité de la surface usinée et l'effort de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable duplex pour l'objectif de minimiser  $R_a$  et  $F_c$ . Les résultats expérimentaux obtenus indiquent que l'avance et la vitesse de coupe sont les facteurs les plus influant sur la rugosité de la surface et l'effort de coupe. L'analyse des résultats montre que la valeur minimale de la rugosité  $R_a$  (1.732  $\mu\text{m}$ ) est obtenue avec le régime ( $V_c=22$  m/min,  $f=0.051$  mm/tr,  $a_p=0.4$  mm et  $r=0.8$  mm), et pour une valeur minimale de l'effort de coupe (136.7 N) les conditions de coupe sont (49 m/min, 0.13 mm/tr, 0.8 mm et 0.8 mm) respectivement à ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $r$ ).

Kulkarni et al. [55] ont focalisé leurs recherches sur le tournage à sec de l'acier AISI 304 utilisant une plaquette de coupe à revêtement AlTiCrN. L'effet des paramètres de coupe sur l'état de la surface usinée, les efforts de coupe, l'usure de l'outil, l'épaisseur du copeau et la durée de vie de l'outil ont été étudiés. Les auteurs ont constaté qu'un bon état de surface et un faible effort de coupe ont été observés à la vitesse de coupe de 320 m/min et l'avance de 0,08 mm/tr. Cependant, une usure optimale de l'outil a été trouvée dans l'intervalle de la vitesse de coupe de (200 à 260) m/min.

Wagha et al. [56] ont étudié l'usinabilité de l'acier inoxydable AISI 304 par des outils en carbure revêtu. Ils ont observé que lorsque l'avance augmente, la rugosité de la surface augmente, et cette dernière diminue avec la hausse de la vitesse de coupe. Les auteurs ont souligné aussi qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la température dans l'interface outil-copeau augmente à cause de la conductivité thermique de l'acier AISI 304 qui est très faible. En plus, les outils de coupe à revêtements AlCrN / TiAlN ont donné des efforts de coupe plus faibles en raison de faible coefficient de frottement du revêtement.

Hasan & Thamizhmanii [57] ont analysé l'usure des outils pendant le tournage de l'acier inoxydable martensitique AISI 440C à l'aide de l'outil de coupe en CBN. Ils ont constaté que l'usure en dépouille et l'usure en cratère ont été causées par des phénomènes d'abrasion sévère et aussi par une forte génération de chaleur pendant l'usinage surtout à basse vitesse de coupe, et faible avance.



Acar et al. [58] ont utilisé la méthode de Taguchi pour aboutir les paramètres de coupe optimaux lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique durci à 48HRC (AISI 420). L'évolution de la rugosité de la surface et l'usure en dépouille en fonction de ( $V_c, f$  et  $a_p$ ) a été étudiée. Les résultats obtenus révèlent que la vitesse de coupe est le paramètre le plus affectant l'usure en dépouille avec une contribution de 80%, en revanche, ( $V_c$ ) a un effet moins important sur l'état de surface avec une contribution de 0.1%. En plus, les auteurs ont trouvé que les conditions de coupe optimales pour minimiser  $R_a$  et  $VB$  sont ( $V_c=50$  m/min,  $f=0.05$  mm/tr et  $a_p=0.1$  mm).

Swapnagandha S. Wagh et al. [66] ont focalisé leur étude sur l'évolution des efforts de coupe, la température de coupe et la rugosité de la surface lors de l'usinage à sec de l'acier inoxydable AISI 304. Ils ont remarqué que l'effort de coupe radial augmente avec l'augmentation de l'avance par tour. La température dans l'interface outil-copeau augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et elle est plus élevée en raison de faible conductivité thermique du revêtement AlCrN/TiAlN ainsi que pour l'acier AISI 304. Les auteurs ont signalé que le revêtement TiAlN/AlCrN a une très bonne stabilité thermique donc il résiste bien l'usinage à une température élevée et donne de meilleures performances notamment en cas de tournage sec.

El-Tamimi & El-Hossainy [67] ont étudié l'évolution de la tenue de l'outil, les composantes de l'effort de coupe et la rugosité de la surface de l'acier inoxydable austénitique AISI 302 en fonction des différents paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe). Ils ont conclu que le principal mécanisme d'usure de l'outil est l'usure d'adhérence causée par soudage entre l'outil et le navire. Ils ont noté que l'avance et la profondeur de passe sont les facteurs les plus influant sur les efforts de coupe.

## **I.9 Conclusion**

Ce premier chapitre consacré à l'étude bibliographique a permis de passer en revue les points clés sur lesquels se sont fondés les travaux de cette thèse. Les matériaux usinés utilisés (X2CrNi18-9 et X20Cr13) font partie de la grande famille des aciers inoxydables. En se basant sur l'étude bibliographique, on a conclu que l'usinabilité de ces aciers s'avère être délicate en raison de leur faible conductivité thermique, leur tendance à la formation d'arête rapportée et leur coefficient de frottement élevé. Pour les études expérimentales de l'usinage à sec des aciers inoxydables menées, on a sélectionné un outil de coupe en carbure de tungstène à triple revêtement [Ti(C, N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN], ce dernier présente une bonne résistance à l'usure et à la

déformation plastique aux températures élevées, un coefficient du frottement réduit, donc il empêche la formation de l'arête rapportée.

Le choix de l'outil de coupe a été fait suite à une recherche de thèse de magister (intitulée : Comportement des matériaux de coupe lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9). On a utilisé cinq nuances de coupe qui sont : le carbure non revêtu H13A, le carbure revêtu GC1025, le carbure revêtu GC2015, un cermet non revêtu CT5015 et le cermet revêtu GC1525.

# **Chapitre II**

## **Procédure expérimentale**

## II-1 Introduction

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

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

## II-2 Matériels utilisés

### II-2-1 Machine-outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40 C de puissance sur la broche égale à 6.6KW (figure II-1). Ce tour est équipé d'une boîte de vitesses qui nous permet d'avoir les fréquences de rotation suivantes : (750, 1000, 1400, 2000) tr/min. Il est équipé aussi d'une boîte d'avance qui permet d'obtenir les avances suivantes : (0.08, 0.12, 0.14, 0.16, 0.20) mm/tr.



**Figure II-1** : Tour parallèle modèle SN 40 C.

### II-2-2 Les matériaux utilisés pour les essais d'usinage

On a fait notre étude sur deux différents aciers inoxydables, le premier est X2CrNi18-9 (AISI304) et le second est X20Cr13 (AISI420).

L'acier X2CrNi18-9 est un acier inoxydable austénitique fortement allié, sa composition chimique est présentée dans le tableau II-1. En plus, ces caractéristiques physico-mécaniques sont présentées dans le tableau II-2. Cette nuance offre une bonne combinaison de résistance à

la corrosion et d'aptitude au formage et à la fabrication, ainsi qu'une résistance à l'usure avec une très bonne résistance à la fissuration par corrosion sous contraintes. Cet acier est utilisé dans d'innombrables domaines: vie quotidienne (coutellerie, outils de couture et ustensiles de cuisine), industrie mécanique (instruments de mesure), agroalimentaire (malaxeurs), chimie, transports, médecine et chirurgie, etc.

**Tableau II-1** : Composition chimique de l'acier X2CrNi18-9.

élément	Pourcentage (%)
Carbone	0.02
Manganèse	1.44
Silicium	0.33
Phosphore	0.02
Soufre	0.016
Titane	0.005
Niobium	0.013
Nickel	7.69
Chrome	16.91
Fer	72.10

**Tableau II-2** : Caractéristiques physico-mécaniques de l'acier X2CrNi18-9.

	Conductivité thermique, $\lambda$	Coefficient de dilatation à 100°C, $\alpha$	Module d'élasticité à 20°C, E	Allongement de rupture	Dureté vickers
	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	[10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> ]	[GPa]	[ %]	[HV]
<b>X2CrNi18-9</b>	15	16	200	45	160-200

Le tableau II-3 présente la composition chimique de l'acier X20Cr13. Ce dernier est un acier inoxydable martensitique, il est utilisé lorsque les caractéristiques mécaniques sont importantes parce que cette nuance accepte la trempe, sa dureté atteint jusqu'à 55HRC après trempe. Ces caractéristiques physico-mécaniques sont présentées dans le tableau II-4. De point de vue usinage cette nuance s'usine pratiquement de la même manière que les aciers de construction classiques de même dureté, il est conseillé cependant de réduire légèrement la vitesse de coupe.

**Tableau II-3** : Composition chimique de l'acier X20Cr13.

élément	Pourcentage (%)
Carbone	0.2
Manganèse	0.9
Silicium	0.8
Phosphore	0.04
Soufre	0.03
Titane	0.005
Niobium	0.013
Nickel	7.69
Chrome	13.0
Fer	72.10

**Tableau II-4** : Caractéristiques physico-mécaniques de l'acier X20Cr13.

	Conductivité thermique, $\lambda$	Coefficient de dilatation à 100°C, $\alpha$	Module d'élasticité à 20°C, E	Allongement de rupture	Dureté vickers
	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	[10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> ]	[GPa]	[ %]	[HV]
<b>X20Cr13</b>	30	10.5	220	15	175-240

**a)** Eprouvette utilisée pour les essais de longue durée



b) Epreuve utilisée pour les essais de courte durée

**Figure II-2** : Epreuves pour différents essais.

Pour les essais de longue durée (évolution de l'usure de l'outil et la rugosité en fonction du temps) on a utilisé des éprouvettes de diamètre  $\Phi=100\text{mm}$  et de longueur  $L=400\text{mm}$  (figure II-2-a), et pour les essais de courte durée (efforts de coupe et rugosité de la surface en fonction des paramètres du régime de coupe :  $V_c, f$  et  $a_p$ ) on a utilisé des éprouvettes qui ont les mêmes dimensions avec des paliers de 20mm de longueur (figure II-2-b).

### II-2-3 Plaquette de coupe

La plaquette est amovible de forme carrée (figure II-3), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent la plaquette de coupe sont regroupées dans le tableau II-5. Cette dernière est en carbure GC2015 à triple revêtement sur un substrat tenace enrichi en cobalt. Excellente adhérence du revêtement au substrat, une bonne résistance à l'usure surtout l'usure par diffusion et à la déformation plastique aux températures élevées, un coefficient de frottement réduit, donc elle empêche la formation de l'arête rapportée [60].

**Tableau II-5** : Informations relatives à la plaquette de coupe.

Matériaux de coupe	Désignation	Type de revêtement	Couches	Géométrie
Carbure revêtu	GC 2015	CVD	Ti(C,N)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN	SNMG 12-04-08-MF



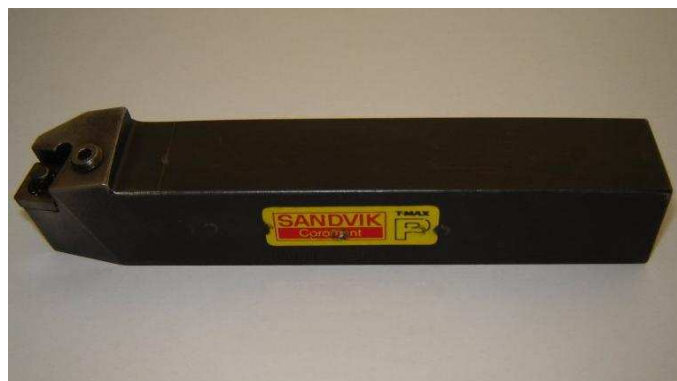
**Figure II-3** : Photo de la plaquette de coupe utilisée.

#### II-2-4 Porte plaquette

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au tableau II-6. La désignation du porte-outil selon la norme ISO est PSBNR2525K12 avec une géométrie de la partie active de l'outil matérialisée par les angles suivants :  $\chi_r = +75^\circ$ ,  $\alpha = +6^\circ$ ,  $\gamma = -6^\circ$  et  $\lambda = -6^\circ$ . La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

**Tableau II-6** : Caractéristiques de porte plaquette utilisé.

Désignation	Marque	$\chi$	$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\chi_r$
PSBNR25x25M12	SANDVIK coramant	$75^\circ$	$6^\circ$	$-6^\circ$	$-6^\circ$	$15^\circ$



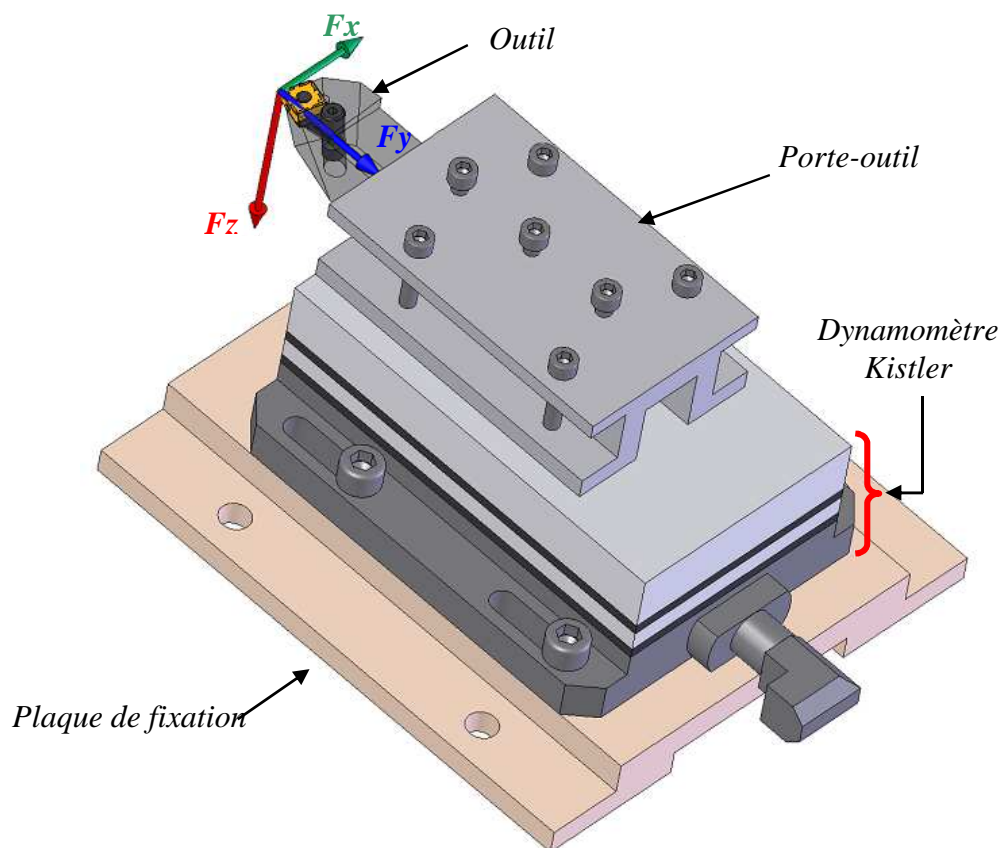
**Figure II-4** : Porte outil utilisé.



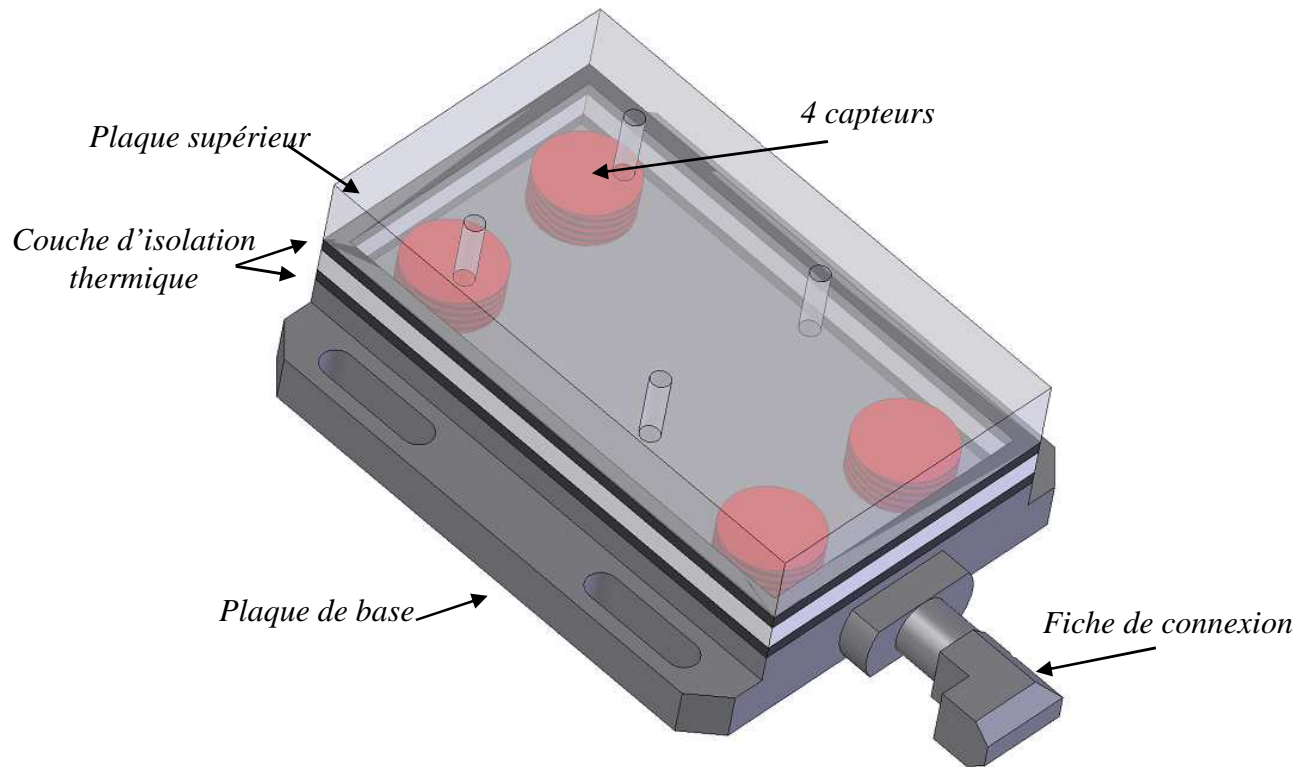
### II-2-5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

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

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (figure II-5). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (figure II-6).

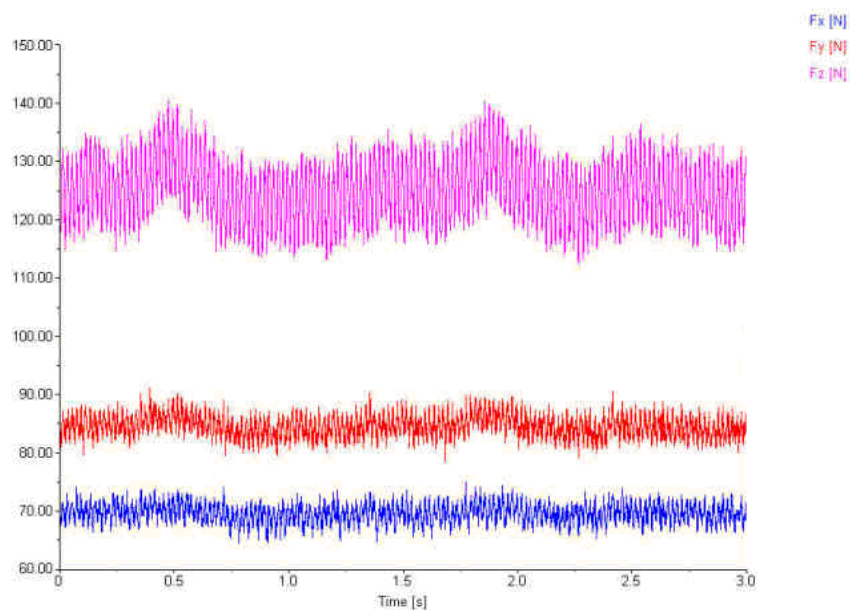


**Figure II-5 :** Montage du dynamomètre sur la table de la machine.



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

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes.

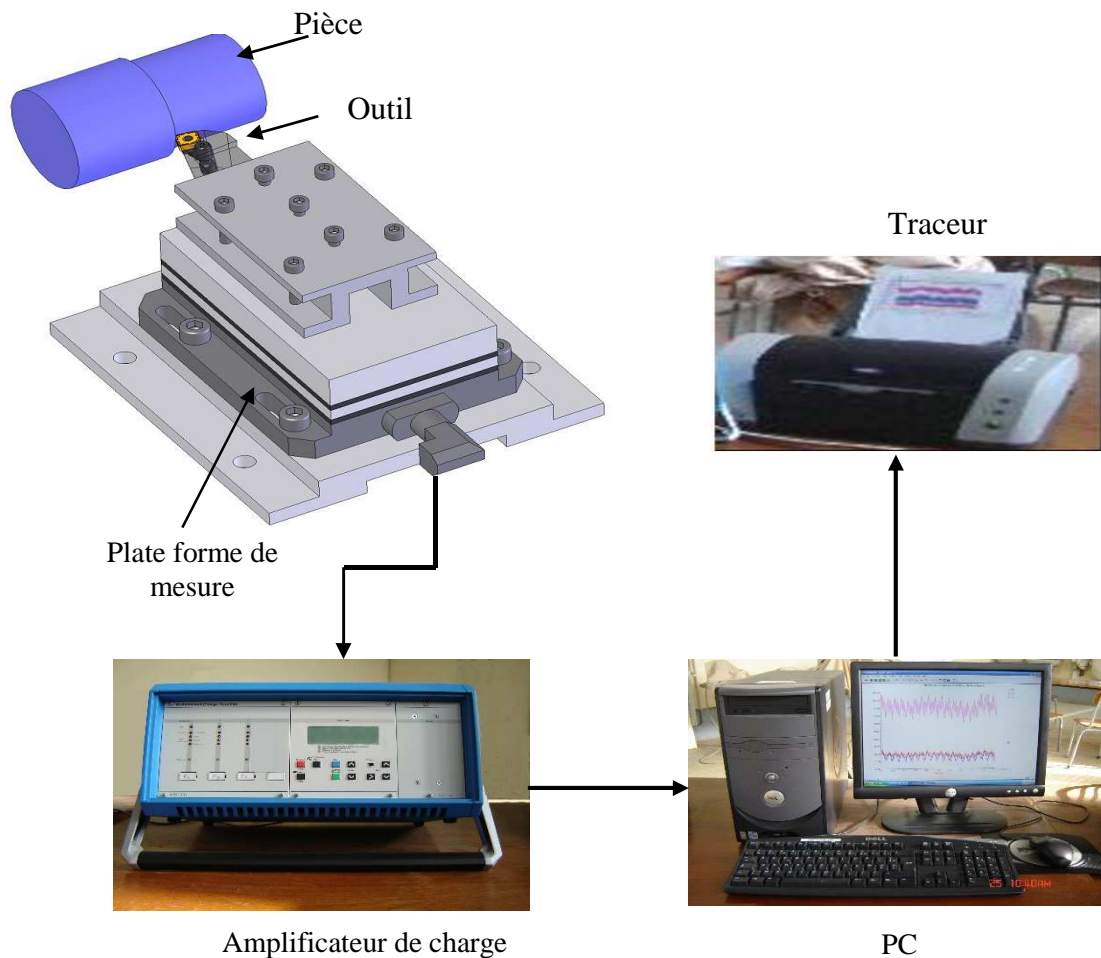


**Figure II-7 :** Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

### Chaîne de mesure et caractéristiques

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

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



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

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

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) et entaille (VN) est un dispositif binoculaire de marque (*Visual Gage 250*), avec un ordinateur équipé d'un logiciel *Visual Gage 2.2.0*. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés. La ligne de référence de mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'interface du logiciel du microscope puis, on déplace la plaquette de coupe à l'aide des mouvements de la table (direction X ou Y) jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure. Après chaque séquence de travail, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, puis nettoyée et enfin placée sur la table du microscope pour mesurer les différentes grandeurs de l'usure (figure II-9).



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

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

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



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

Ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce. Les mesures sont répétées à trois reprises sur la surface de la pièce usinée à trois lignes de référence également positionnées à  $120^\circ$  et le résultat final est une moyenne de ces valeurs.

### II-2-8 Autres équipements

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

### II-3 Conditions de coupe

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer les éléments du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), le temps d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ ), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine...). Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les tableaux II-7 et II-8. Tous les essais ont été réalisés sans lubrification.

**Tableau II-7 :** Conditions de coupe pour les essais des efforts de coupe et de la rugosité (essais courte durée).

Les paramètres constants	Valeurs	Les paramètres variables	Valeurs
$V_c$ (m/min)	115	$f$ (mm/tr)	0.08 ; 0.12 ; 0.16 ; 0.20.
$a_p$ (mm)	0.50		
$V_c$ (m/min)	115	$a_p$ (mm)	0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1.00.
$f$ (mm/tr)	0.12		
$a_p$ (mm)	0.50	$V_c$ (m/min)	80 ; 115 ; 160 ; 230.
$f$ (mm/tr)	0.12		

**Tableau II-8 :** Conditions de coupe pour les essais d'usure et de la rugosité en fonction du temps (essais longue durée).

Les paramètres constants	Les paramètres variables	
$a_p$ (mm)	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)
0.2	280, 330 et 400	0.08, 0.11 et 0.14

#### II-4 Planification des expériences

Les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $t$ ), ainsi que la géométrie de la partie active de l'outil ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\chi$ ,  $\varepsilon_r$ ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, les pressions de coupe, la puissance de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité et l'usure en dépouille de l'outil représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

##### II-4-1 Méthode de planification des expériences

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

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

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de différents facteurs ( $V_c$ ,  $f$  et  $t$ ) sur les diverses fonctions d'optimisation (usure en dépouille, Rugosité de la surface usinée et la tenue de l'outil). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante:

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

Où:

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

Dans notre cas, et pour l'étude de la variation de la rugosité et l'usure e dépouille, nous avons trois facteurs de base ( $k=3$ ) et chaque facteur a trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)).

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

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

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II-9. En ce qui concerne l'étude de l'évolution de la durée de vie de l'outil en fonction de  $V_c$  et  $f$  le nombre d'essais est (9). La matrice de planification est présentée dans le tableau II-10.

**Tableau II-9 : Matrice de planification pour un plan  $3^3$**

N° d'essai	Facteurs		
	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$t$ (min)
	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

Pour étudier l'évolution de la rugosité de la surface usinée, l'effort de coupe tangentiel, l'effort spécifique et la puissance de coupe en fonction de différentes conditions de coupe tels que (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe), et pour l'objectif de minimiser le nombre des essais et d'augmenter les niveaux de chaque facteur (dans notre cas est 04 niveaux) on a choisi un plan de Taguchi  $L_{16}$  qui contient 16 essais. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau II-11.

**Tableau II-10 :** Matrice de planification pour un plan  $3^2$

N° d'essai	Facteurs	
	Vc (m/min)	f (mm/tr)
	Valeurs codifiées des facteurs	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	1
4	0	-1
5	0	0
6	0	1
7	-1	-1
8	-1	0
9	-1	1

**Tableau II-11 :** Matrice de planification pour un plan de Taguchi  $L_{16}$

N° d'essai	Facteurs		
	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1



### II-4-2 Conditions de coupe choisies pour la modélisation

Les différents niveaux choisis pour les paramètres d'entrées tels que ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $t$ ) sont présentés dans les tableaux II-12, II-13 et II-14.

**Tableau II-12 :** Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan 27 essais.

Parameters de coupe	Unité	Symbole	Niveaux		
			Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Vitesse de coupe	m/min	$V_c$	280	330	400
Avance	mm/tr	$f$	0.08	0.11	0.14
Temps de coupe	min	$t$	4	10	16

**Tableau II-13 :** Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan 9 essais.

Parameters de coupe	Unité	Symbole	Niveaux		
			Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Vitesse de coupe	m/min	$V_c$	280	330	400
Avance	mm/tr	$f$	0.08	0.11	0.14

**Tableau II-14 :** Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan 16 essais.

Parameters de coupe	Unité	Symbole	Niveaux			
			Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Vitesse de coupe	m/min	$V_c$	60	90	120	150
Avance	mm/tr	$f$	0.08	0.12	0.16	0.20
Profondeur de passe	mm	$a_p$	0.25	0.50	0.75	1.00

### II-5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. Les compositions chimiques des aciers utilisés et les caractéristiques de la nuance de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous présentons les résultats de l'usinabilité des deux aciers inoxydables (austénitique et martensitique) en termes de rugosité, efforts de coupe, efforts spécifiques, puissance de coupe et usure.

## **Chapitre III**

### **Etude de l'usinabilité des deux aciers inoxydables**

#### **-Martensitique et austénitique-**

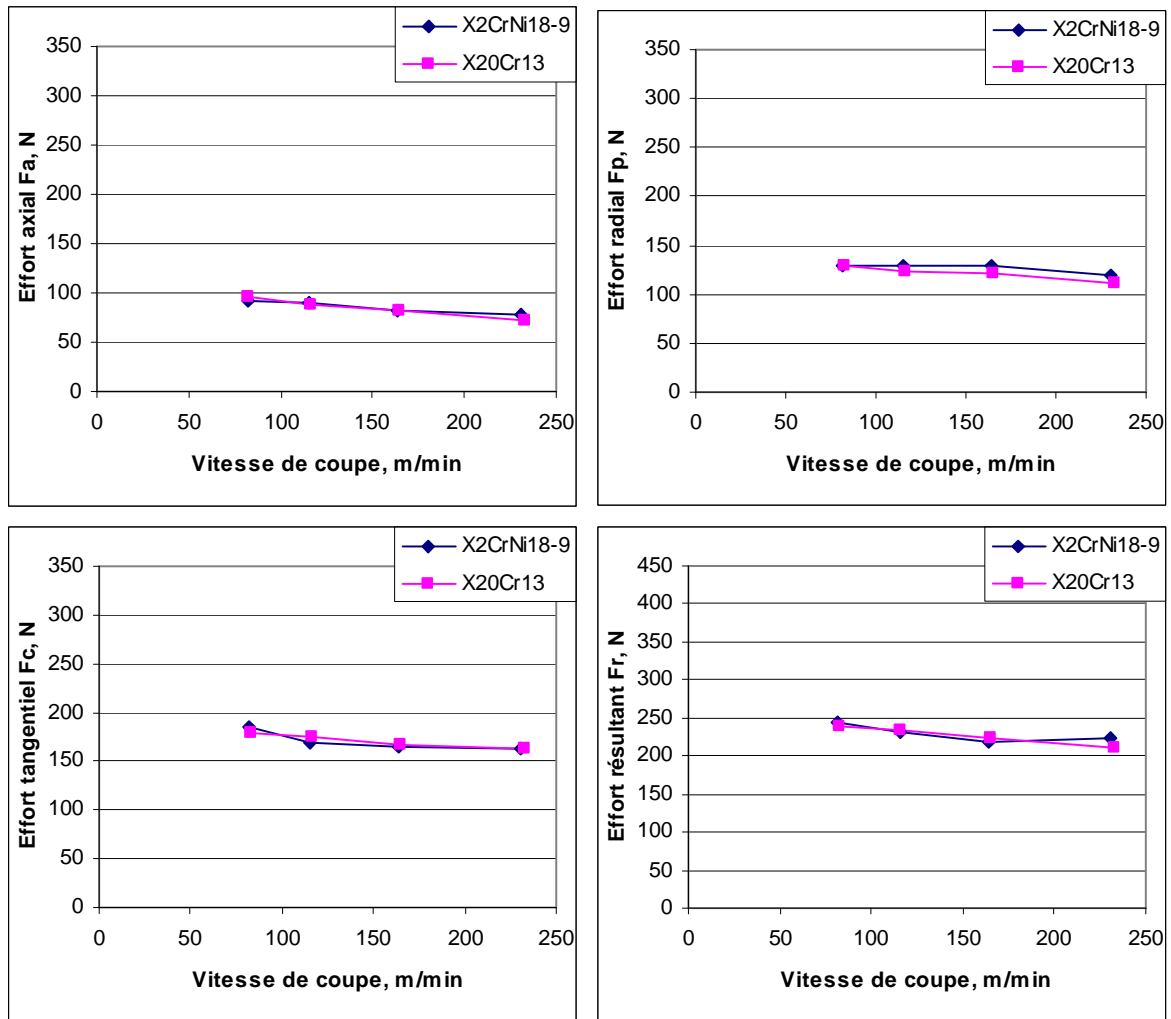
### III-1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'évolution de différents phénomènes de coupe rencontrés tels que les efforts de coupe, les pressions de coupe, la puissance de coupe et les critères de la rugosité de la surface ( $R_a$ ,  $R_z$  et  $R_t$ ) pendant l'usinage à sec de deux aciers inoxydables, l'un est austénitique de nuance X2CrNi18-9 et le second est un acier martensitique de nuance X20Cr13. Dans un premier temps, les résultats expérimentaux de la variation des efforts de coupe, les efforts spécifiques, la puissance de coupe et l'état de la surface en fonction des paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) ont été relevés. Ensuite, une étude comparative entre les deux aciers a été effectuée. Enfin, l'évaluation de l'usure en dépouille et la rugosité en fonction du temps a été attribuée.

### III-2 Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

#### III-2-1 Influence de la vitesse de coupe

La figure III-1 illustre l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les deux aciers inoxydables testés. Cette évolution est presque la même pour les deux matériaux testés, on remarque une légère diminution des trois composantes des efforts de coupe et aussi l'effort résultant. Cette diminution est due à l'augmentation de la température dans la zone de coupe, rendant le métal plus malléable et facile à s'écouler sur la surface d'attaque. Les valeurs maximales enregistrées sont (92N pour  $F_a$ , 130N pour  $F_p$  et 185N pour  $F_c$ ) pour la nuance austénitique, en ce qui concerne la nuance martensitique on a noté les valeurs maximales de (96, 129 et 180) N respectivement pour ( $F_a$ ,  $F_p$  et  $F_c$ ). Pratiquement, l'augmentation de la vitesse de coupe de 80 à 230 m/min, conduit à une diminution des trois composantes de l'effort ( $F_a$ ,  $F_p$  et  $F_c$ ) respectivement de (14.34; 8.43 et 12.26) % pour l'acier X2CrNi18-9, (24.21 ; 13.73 et 9.08) % pour l'acier X20Cr13. L'évolution de l'effort résultant donne la même allure comme les trois composantes des efforts de coupe et de ce fait, la variation de  $V_c$  de 80 à 230 m/min mène à une diminution de ( $F_r$ ) de (7.58 et 11.79) % pour l'acier X2CrNi18-9 et X20Cr13. En comparant les différentes courbes de la figure III-1, nous remarquons que les deux nuances donnent presque les mêmes grandeurs de point de vue efforts de coupe.



**Figure III-1** : Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe

### III-2-2 Influence de l'avance

La figure III-2 présente l'influence de l'avance sur les trois composantes de l'effort de coupe pour les deux aciers testés. Avec l'augmentation de l'avance, la section du copeau cisailé accroît et par conséquent la force demandée pour l'enlèvement de la matière s'accroît. L'allure de cette évolution est la même pour les deux matières usinées et les valeurs maximales mesurées sont (108N pour Fa, 180N pour Fp et 261N pour Fc) pour l'acier X2CrNi18-9 et (105N pour Fa, 148N pour Fp et 250N pour Fc) pour l'acier X20Cr13. Donc, pour une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.20 mm/tr, on enregistre une élévation de (27.02; 48.44 et 79.09) % respectivement pour (Fa, Fp et Fc) pour l'acier X2CrNi18-9, et pour l'acier X20Cr13 on a enregistré une augmentation de (33.35; 40.60 et 96.61) % respectivement pour (Fa, Fp et Fc). Concernant l'effort résultant, ce dernier présente une augmentation de 61% pour la nuance X2CrNi18-9 et 69% pour la nuance X20Cr13 pour une variation de l'avance de 0.08 à 0.20mm/tr.

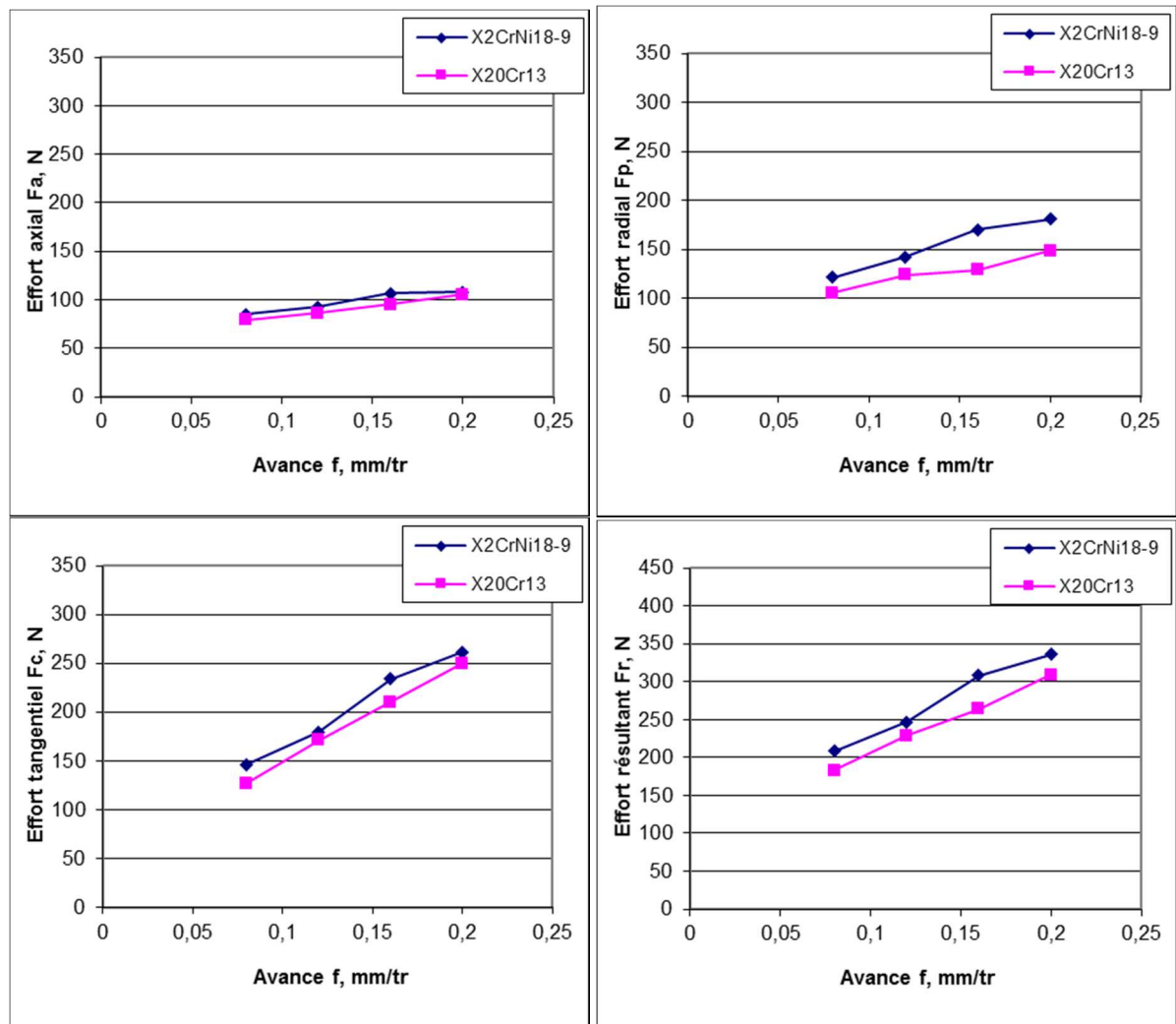


Figure III-2 : Evolution des efforts de coupe en fonction de l'avance

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

Les résultats présentés dans la figure III-3 montrent la variation des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe pour les deux aciers testés. Avec l'augmentation de cette dernière, la section du copeau devient très importante conduisant à une augmentation du volume de métal à déformer et nécessitant ainsi des efforts de coupe importants pour l'enlèvement du copeau. Les valeurs maximales enregistrées sont (188, 180, 333 et 422) N pour la nuance austénitique et de (197, 153, 320 et 405) N pour la nuance martensitique successivement de (Fa, Fp, Fc et Fr). Sur le plan pratique, une augmentation de la profondeur de passe de (0.25 à 1.0) mm, conduit à une élévation des efforts de coupe (Fa, Fp, Fc et Fr) successivement de (246.58; 40.62, 242.61 et 96.75) % pour la nuance X2CrNi18-9 et (520.69; 121.30, 242.35 et 236.61) % pour la nuance X20Cr13.

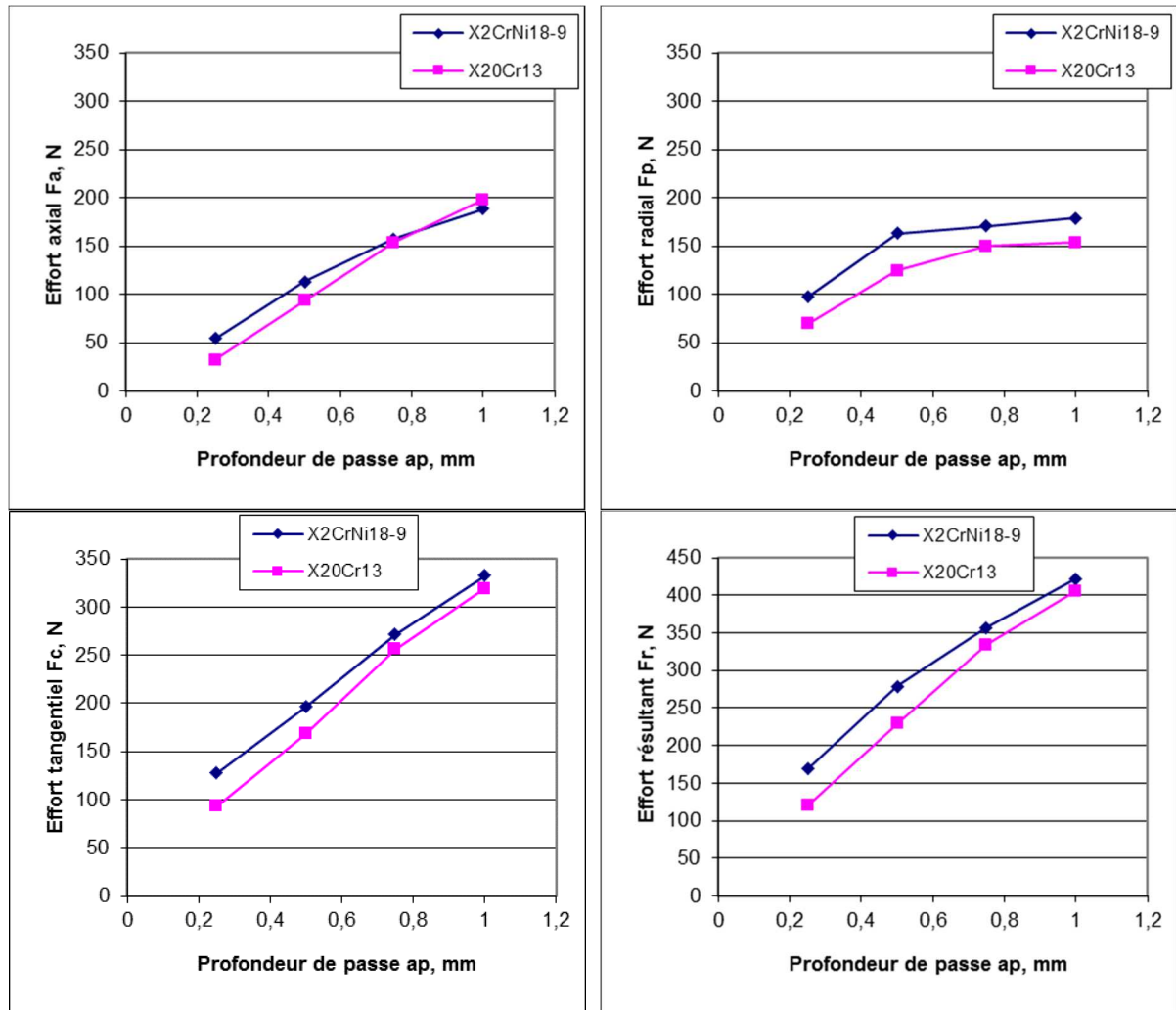


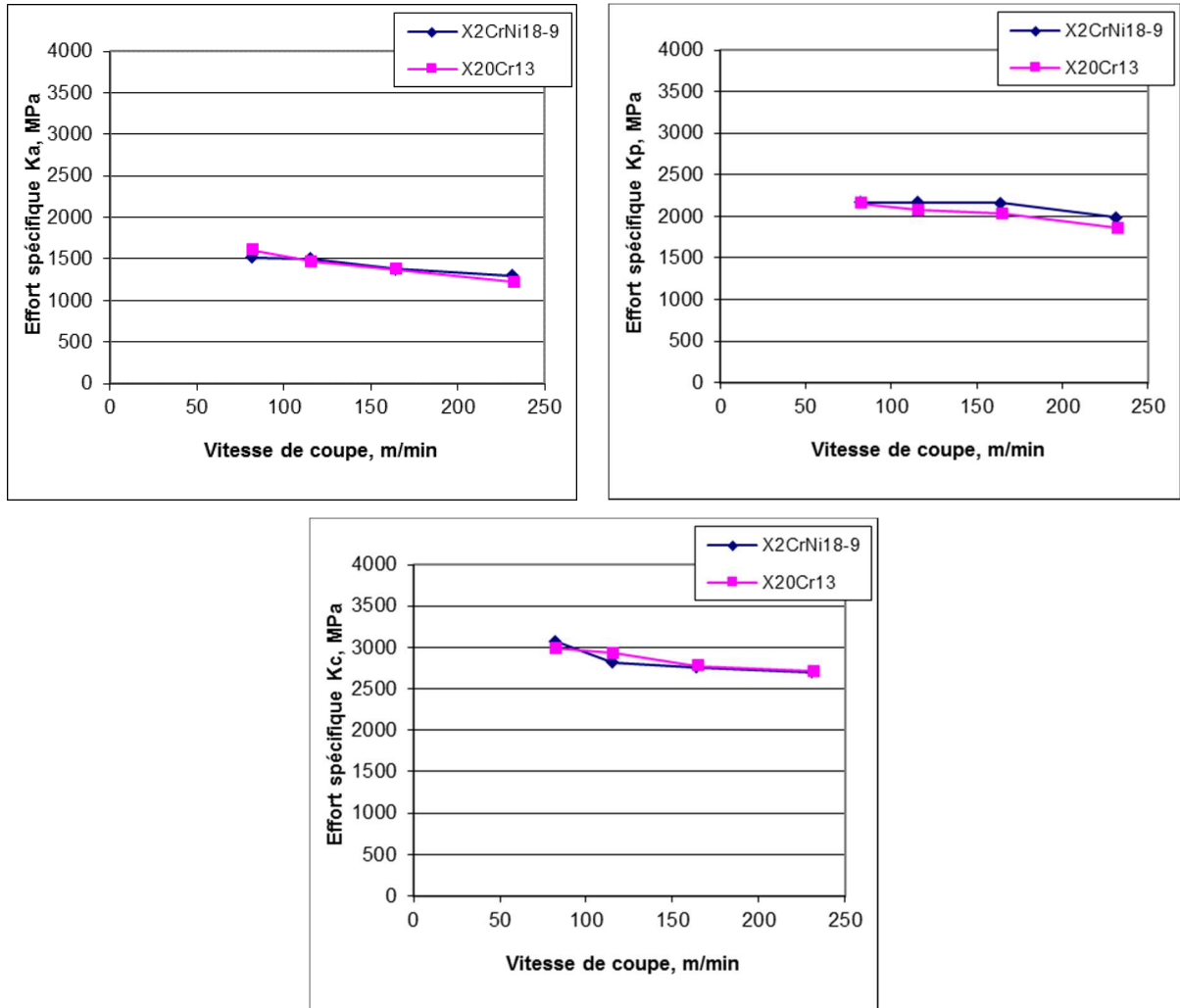
Figure III-3 : Evolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe

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

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

La figure III-4 présente l'évolution des pressions de coupe ( $K_a$ ,  $K_p$  et  $K_c$ ) en fonction de la vitesse de coupe à  $f = 0,12$  mm/tr et  $a_p = 0,5$  mm. La vitesse de coupe est le paramètre qui contrôle majoritairement l'énergie fournie au système et qui endommage l'outil de coupe. Le choix non adéquat de la vitesse de coupe lors de l'usinage aura des conséquences graves sur les résultats escomptés. Le bon contrôle de cette plage de vitesse de coupe permet donc une meilleure maîtrise de processus de coupe. Le graphe qui présente la variation de la pression de coupe axiale ( $K_a$ ) montre que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution le long de la plage des vitesses testées. Pour l'effort spécifique radial ( $K_p$ ) on a remarqué une stabilisation sur toute la plage des vitesses sélectionnée. En ce qui concerne l'effort spécifique tangentiel, la variation de la vitesse de coupe de 80 à 160 m/min conduit à une diminution de cet effort, au-delà de  $V_c=160$  m/min on a remarqué une stabilisation. Donc, pour une

augmentation de la vitesse de coupe de 80 à 160 m/min, les pressions de coupe ( $K_a$ ,  $K_p$  et  $K_c$ ) diminuent successivement de (9.25, 8.02 et 12.26) % pour l'acier X2CrNi18-9 et (14.39, 3.92 et 5.30) % pour l'acier X20Cr13.



**Figure III-4 :** Evolution des efforts spécifiques en fonction de la vitesse de coupe

### III-3-2 Influence de l'avance

La variation des efforts spécifiques en fonction de l'avance est présentée dans la figure III-5. En analysant cette dernière on peut conclure que les pressions de coupe diminuent avec la hausse de l'avance. En plus, les valeurs enregistrées des efforts spécifiques montrent que  $K_c$  est prépondérant par rapport à ( $K_a$  et  $K_p$ ) pour les deux matières testées. L'élévation de l'avance de (0.08 à 0.20) mm/tr conduit à une diminution de (49.19 % pour  $K_a$ , 40.62 % pour  $K_p$  et 28.36 % pour  $K_c$ ) pour la nuance (X2CrNi18-9) et (46.66 % pour  $K_a$ , 43.76 % pour  $K_p$  et 21.35 % pour  $K_c$ ) pour la nuance (X20Cr13).

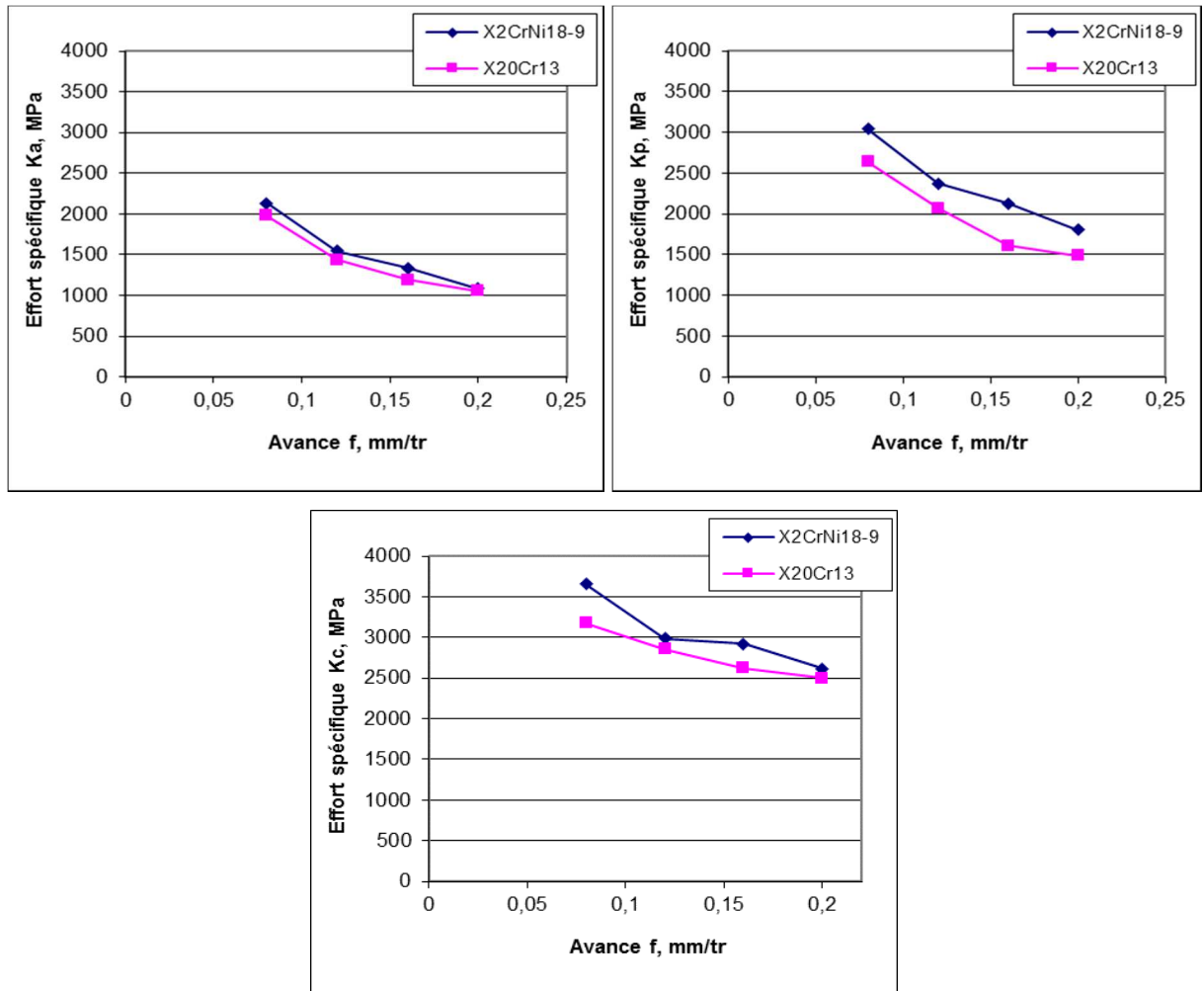


Figure III-5 : Evolution des efforts spécifiques en fonction de l'avance

### III-3-3 Influence de la profondeur de passe

La figure III-6 illustre l'évolution des pressions de coupe en fonction de la profondeur de passe pour les deux aciers inoxydables testés. L'analyse de la courbe qui présente la variation de la pression  $K_a$  montre que pour l'acier X2CrNi18-9 il y a une légère diminution avec la croissance de la profondeur de passe, et pour l'acier X20Cr13 on a remarqué une élévation de  $K_a$  avec la hausse de  $(a_p)$  jusqu'à  $a_p = 0.75$  mm au-delà il y a une stabilisation. Alors, La courbe qui présente l'évolution de la pression  $K_p$  avec  $a_p$  a une allure décroissante le long de la plage des profondeurs de passe sélectionnées pour les deux aciers. En ce qui concerne l'effort spécifique tangentiel, on a remarqué une légère diminution avec l'augmentation de la profondeur de passe. Donc, pour une élévation de  $(a_p)$  de (0.50 à 1.00) mm on a enregistré une diminution de ( $K_a$ ,  $K_p$  et  $K_c$ ) successivement de (16.87, 45.03 et 15.27) % pour l'acier X2CrNi18-9 et (5.42, 38.44 et 5.11) % pour l'acier X20Cr13.



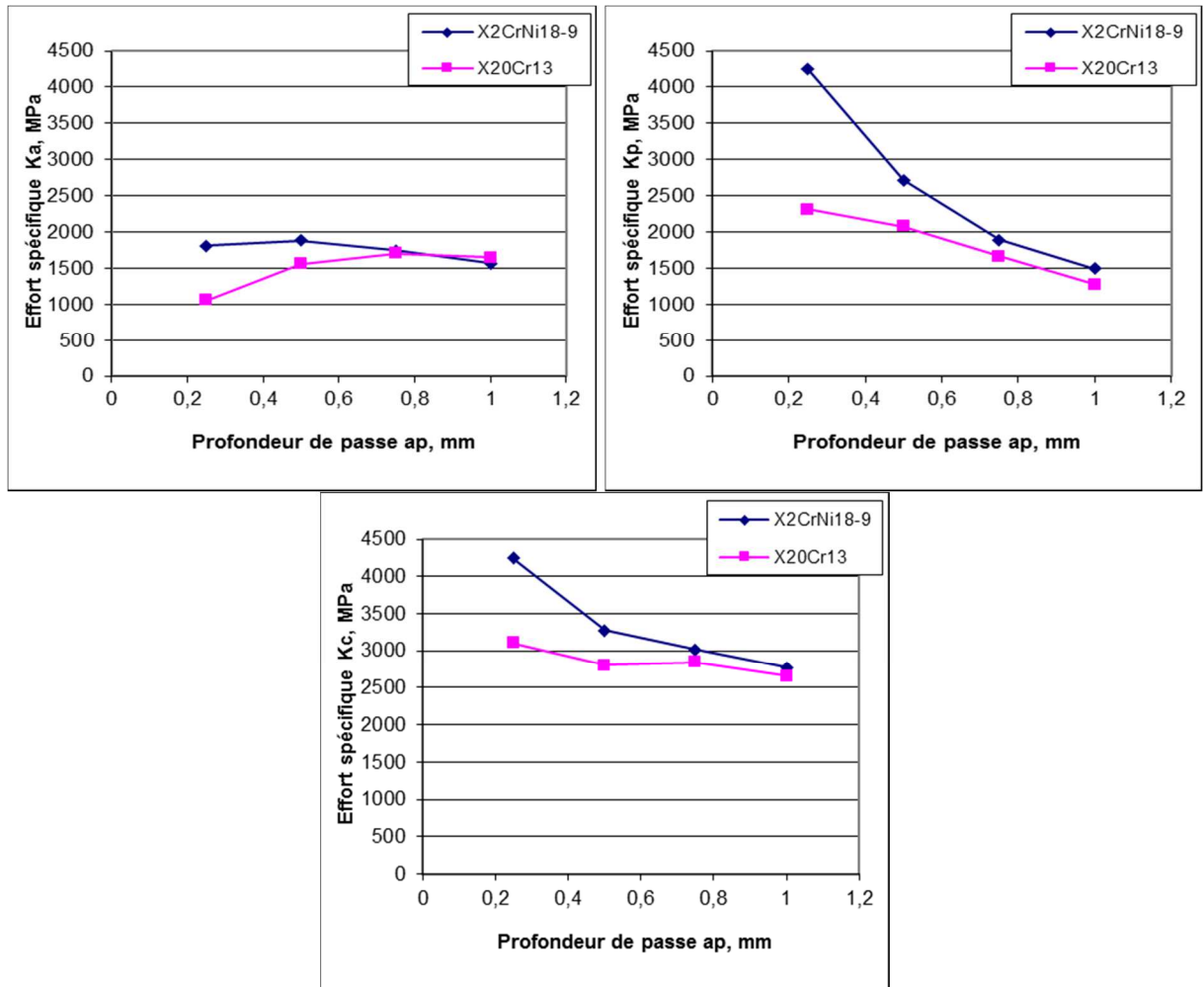


Figure III-6 : Evolution des efforts spécifiques en fonction de la profondeur de passe

### III-4 Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe

L'évaluation de la puissance de coupe fournie pendant l'usinage permet principalement de dimensionner les outils et les éléments de la machine-outil (porte-pièce, etc.) et de faire le choix de la machine-outil. La figure III-7 montre l'évolution de la puissance en fonction des paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) pour les deux matériaux usinés. L'analyse de cette figure montre une nette augmentation de la puissance de coupe avec l'augmentation de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe. Une élévation de la vitesse de coupe de 80 à 230 m/min conduit à une augmentation de la puissance pour les deux aciers (X2CrNi18-9 et X20Cr13) de (153 et 160.84) % successivement. Alors une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.20mm/tr, conduit à une élévation de la puissance de coupe pour les deux aciers (X2CrNi18-9 et X20Cr13) successivement de (79.09 et 96.62) %. Aussi, l'élévation de la profondeur de passe de 0.25 à 1.0mm conduit à une élévation de la puissance de coupe pour les deux matériaux (X2CrNi18-9 et X20Cr13) successivement de (242.62 et 242.36) %.

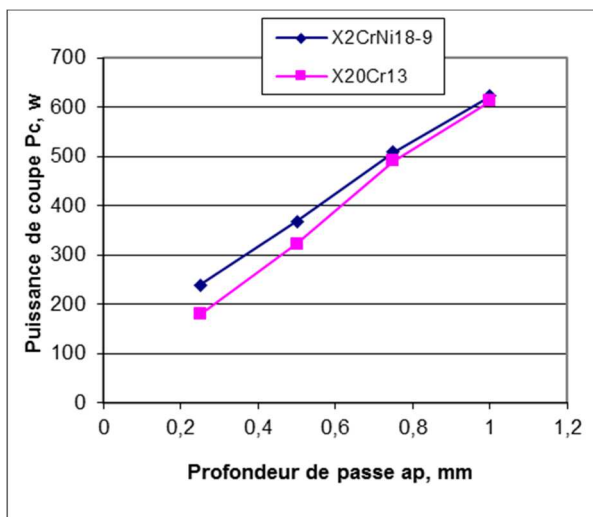
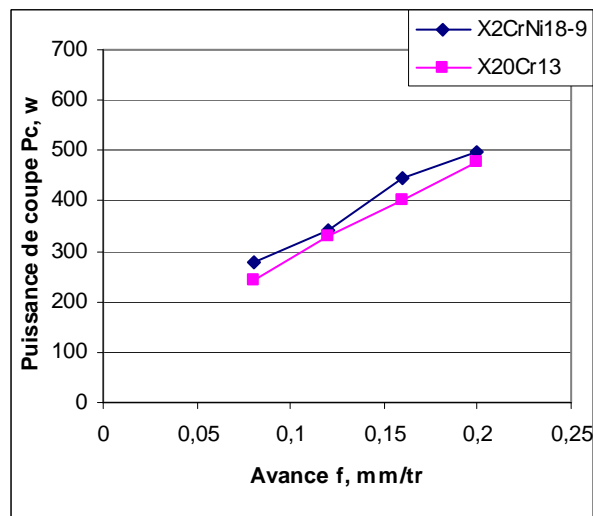
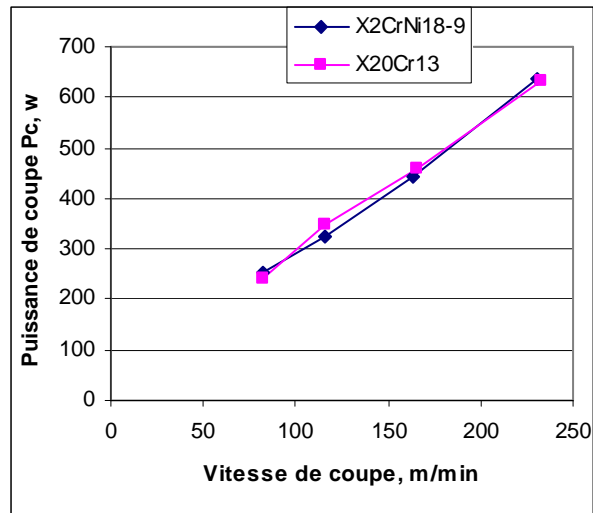


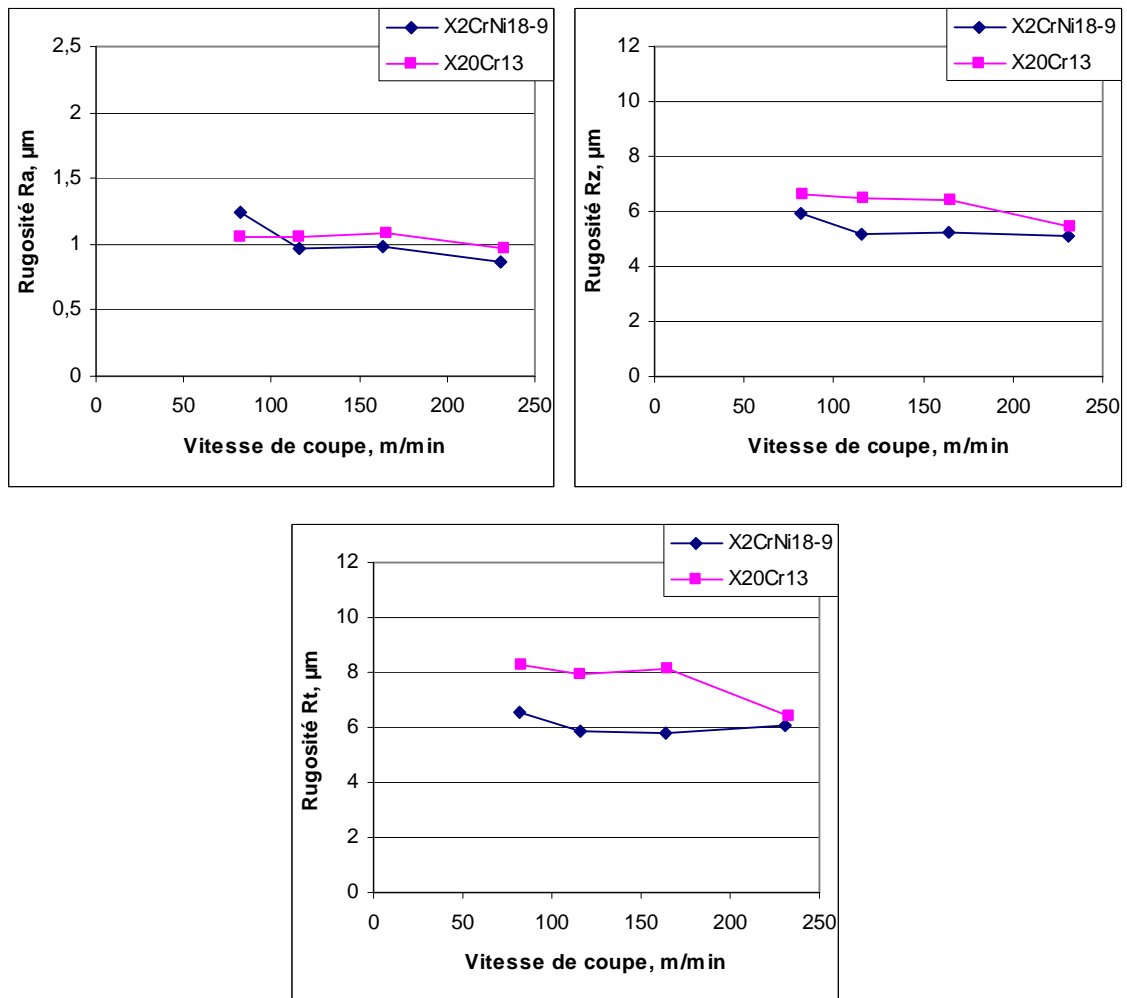
Figure III-7 : Evolution de la puissance de coupe en fonction des paramètres de Régime de coupe.

Les deux courbes de la figure III-7 qui présentent l'évolution de la puissance de coupe en fonction de la profondeur de passe et en fonction de l'avance, montrent que la puissance de coupe nécessaire à l'enlèvement du copeau pour l'acier X2CrNi18-9 est plus grande par rapport à l'acier X20Cr13.

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

#### **III-5-1 Influence de la vitesse de coupe**

On a choisi les critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$  et  $R_t$ ) pour caractériser la qualité de la surface usinée. En analysant les courbes présentées dans la figure III-8 qui présente l'évolution des trois critères de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage à sec des deux aciers inoxydables (X2CrNi18-9 et X20Cr13), on peut remarquer une légère diminution des différents critères avec la hausse de  $V_c$ . Il est à noter que pour une augmentation de la vitesse de coupe de 80 à 230 m/min, cela conduit à une diminution de (30.40% pour  $R_a$ , 13.89% pour  $R_z$  et 7.02% pour  $R_t$ ) pour l'acier X2CrNi18-9 et concernant l'acier X20Cr13 on a enregistré une diminution de (8.49% pour  $R_a$ , 17.74% pour  $R_z$  et 22.94% pour  $R_t$ )



**Figure III-8 :** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe

### III-5-2 Influence de l'avance

La figure III-9 présente la variation de la rugosité en fonction de l'avance. L'analyse de cette dernière montre que ce paramètre ( $f$ ) a une influence très significative, car son augmentation engendre des sillons hélicoïdaux dus à la forme de l'outil et au mouvement hélicoïdal de l'outil par rapport à la pièce. Ces sillons sont autant plus profonds et plus larges que l'avance est élevée. Alors, une augmentation de l'avance de 0.08 à 0.20 mm/tr, conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra, Rt et Rz) successivement de (165.48, 65.45 et 38.08) % pour la matière X2CrNi18-9, (181.43, 148,69 et 123.06) % pour la nuance X20Cr13.

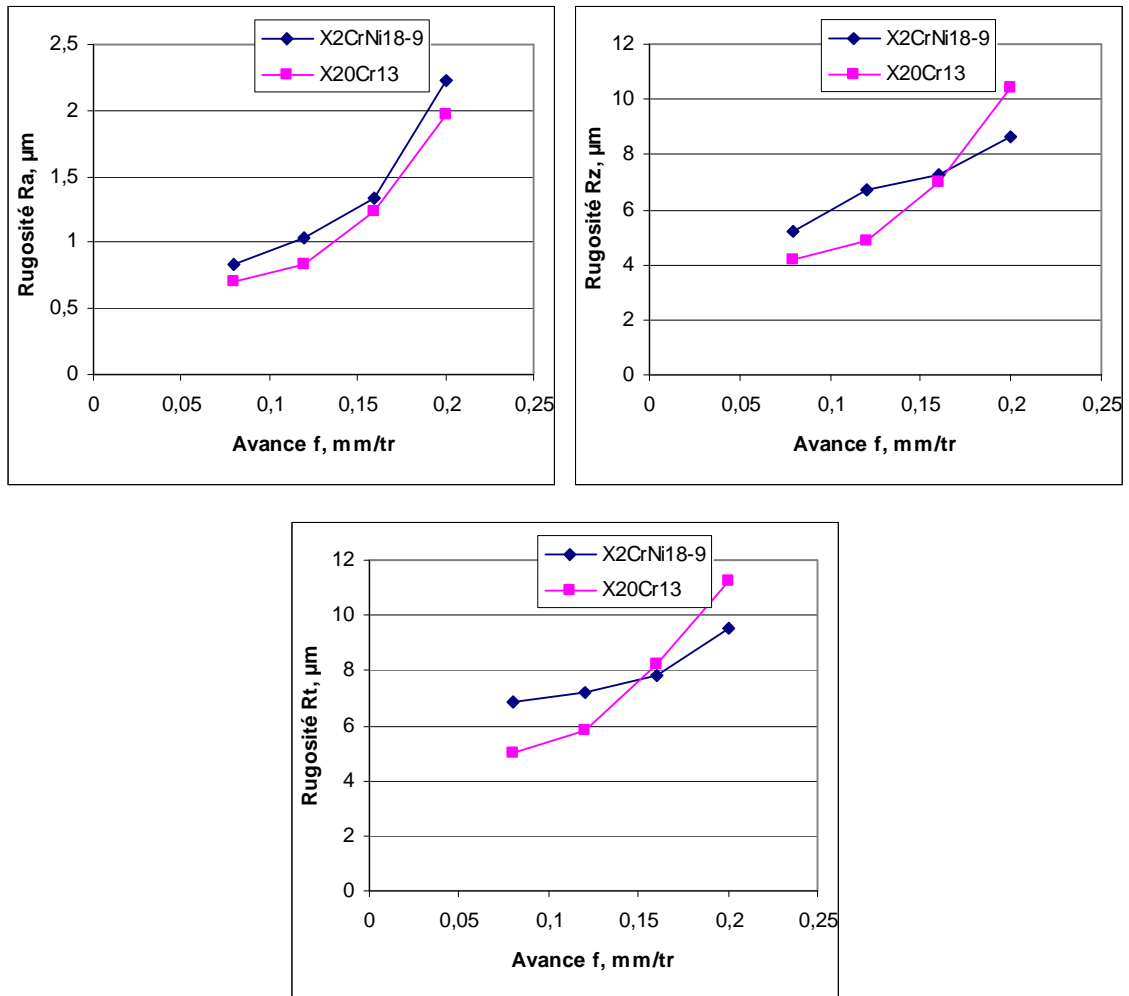
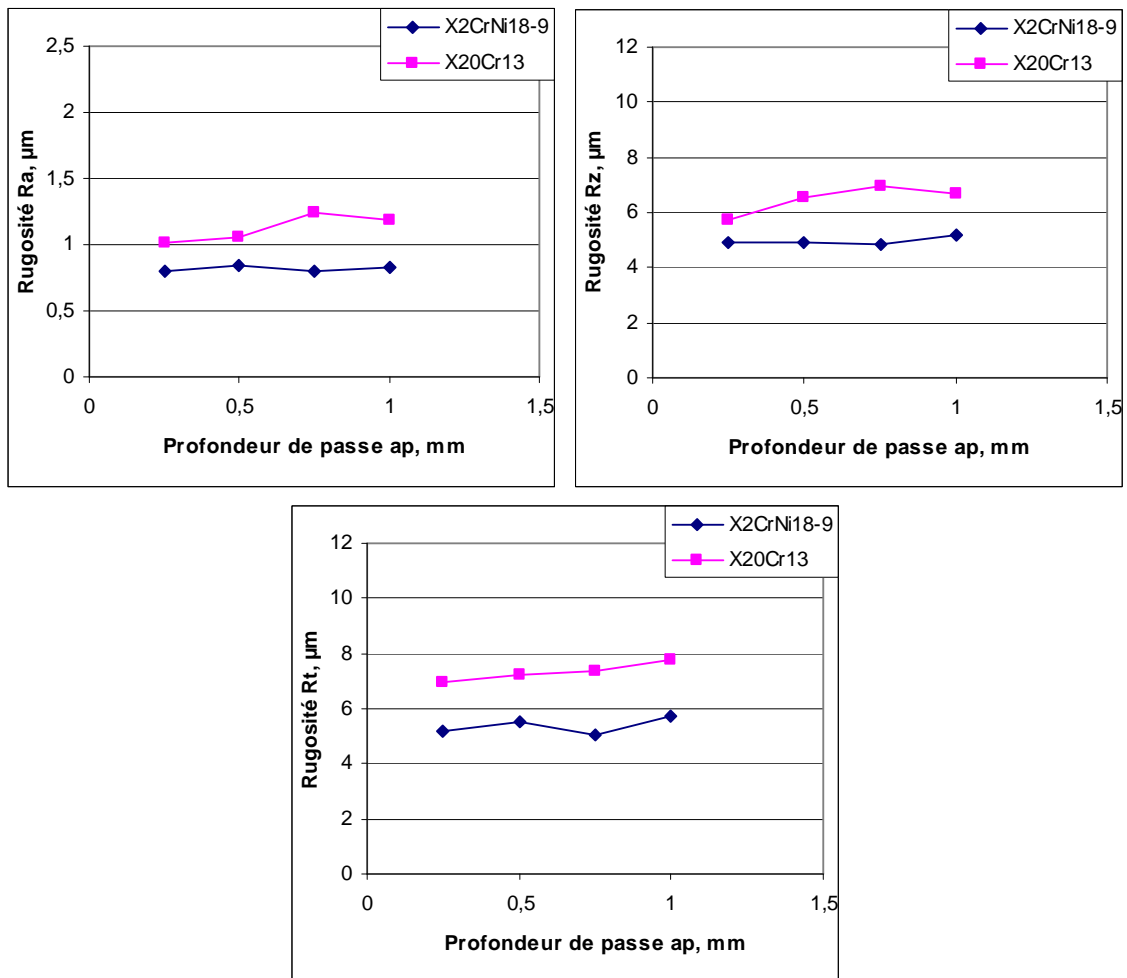


Figure III-9 : Evolution de la rugosité en fonction de l'avance

### III-5-3 Influence de la profondeur de passe

La figure III-10 illustre l'évolution des critères de rugosité en fonction de la profondeur de passe pour les deux matériaux usinés (X2CrNi18-9 et X20Cr13) à  $V_c = 115$  m/min et  $f = 0.12$  mm/tr. L'analyse des résultats montre que l'influence de ce paramètre est moins importante que l'avance. Ceci est dû à l'augmentation de la largeur de contact entre l'outil et la pièce. Ce qui améliore les conditions d'évacuation de la chaleur dans la zone de coupe. L'élévation de la profondeur de passe de 0.25 à 1.00 mm, conduit à une augmentation des critères de rugosité (Ra, Rt et Rz) successivement de (3.75, 5.90 et 10.40) % pour la matière X2CrNi18-9, (16.66, 15.45 et 12.10) % pour la nuance X20Cr13.



**Figure III-10** : Evolution de la rugosité en fonction de la profondeur de passe

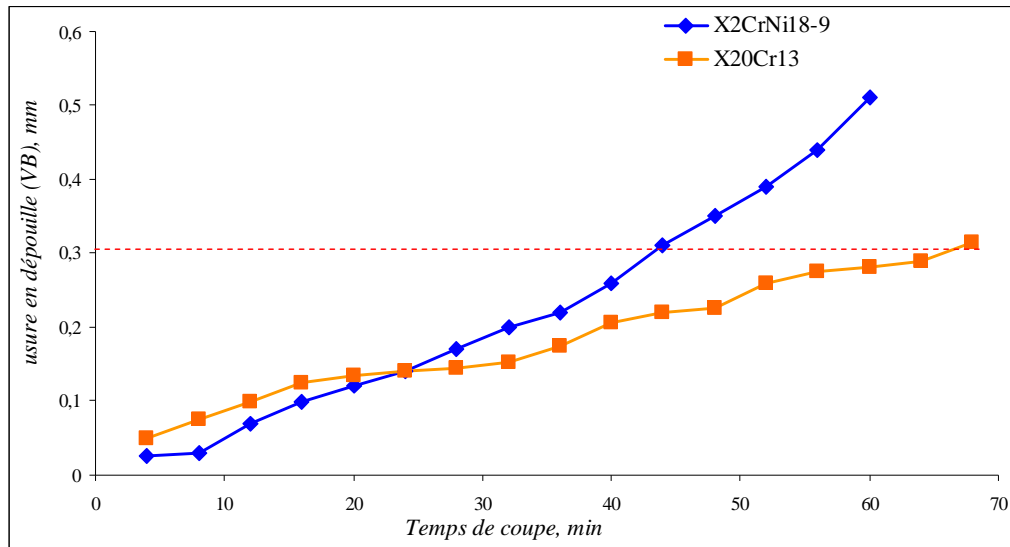
### III-6 Evolution de l'usure en dépouille et la rugosité en fonction du temps

Dans cette partie de chapitre on a étudié l'évolution de l'usure en dépouille et la rugosité de la surface usinée en fonction du temps de coupe pour les deux matériaux testés (X2CrNi18-9 et X20Cr13). On a fait premièrement des essais de comparaison entre les deux aciers inoxydables aux conditions de coupe suivantes : ( $V_c=220$  et  $330\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.2\text{mm}$ ). Finalement, et pour bien comprendre le comportement de l'acier X2CrNi18-9, on a continué les essais par l'ajout d'une autre vitesse de coupe ( $400\text{m/min}$ ) et d'autres avances ( $0.11$  et  $0.14$ ) mm/tr.

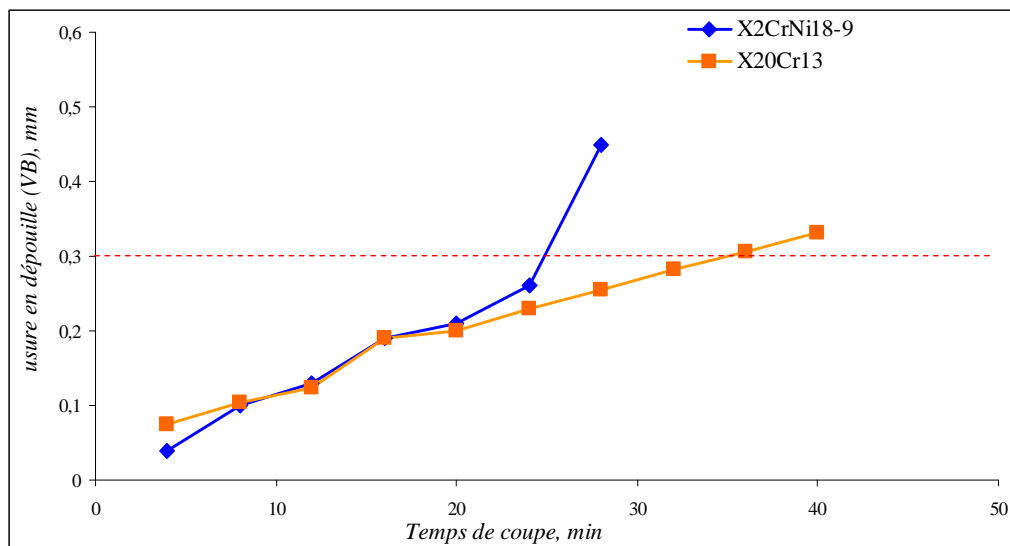
#### III-6-1 Première partie

Les figures III-11 et III-12 illustrent l'évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps d'usinage lors de tournage des deux aciers inoxydables (X2CrNi18-9 et X20Cr13). L'analyse de ces courbes montre que l'usure VB augmente avec l'augmentation du temps jusqu'à la rupture totale de l'arête de coupe. On a remarqué aussi que l'arête de l'outil s'use rapidement

pendant l'usinage de la nuance X20Cr13 et ceci est dû à sa dureté qui est plus grande par rapport à celle de la nuance X2CrNi18-9. Après une longueur usinée supérieure à 5500m (correspond à 24min pour  $V_c=280\text{m/min}$  et 17min pour  $V_c=330\text{m/min}$ ) les valeurs de l'usure en dépouille de la nuance X2CrNi18-9 dépassent les valeurs de l'acier X20Cr13, on peut expliquer ça par le coefficient de conductivité thermique de la l'acier X2CrNi18-9 qui est très faible et ce dernier conduit à une concentration de la chaleur au niveau du bec de l'outil ce qui mène à l'effondrement rapide de l'outil.



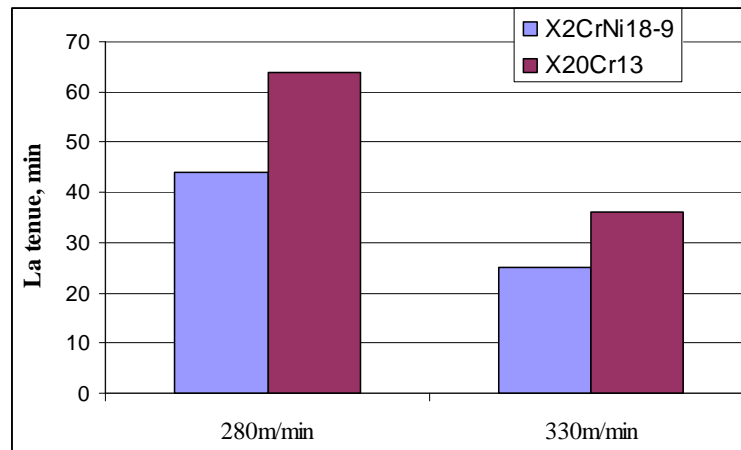
**Figure III-11 :** Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour les deux matériaux pour  $V_c=280\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.2\text{mm}$



**Figure III-12 :** Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour les deux matériaux pour  $V_c=330\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.2\text{mm}$

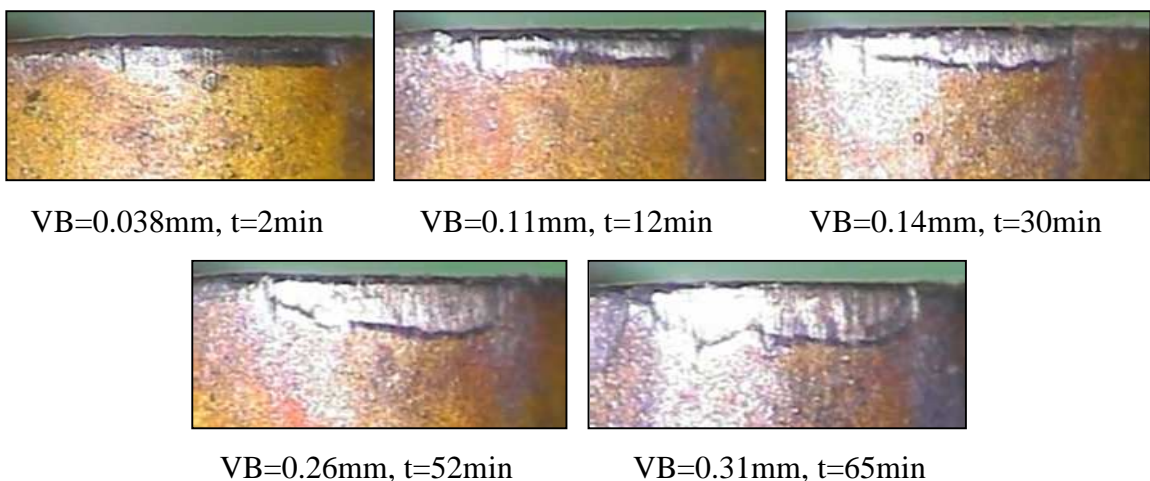
La figure III-13 présente une comparaison de point de vue tenue de l'outil pour les deux nuances des matières usinées. Pour une usure en dépouille admissible égale à 0.3mm les valeurs

de durées de vie de l'outil atteignent 44min pour l'acier X2CrNi18-9 et 64min pour l'acier X20Cr13 à la vitesse de coupe 280m/min. Pour une vitesse de coupe de 330m/min, les tenues sont 25min pour la nuance austénitique et 36min pour la nuance martensitique. L'analyse des résultats de la tenue pour les deux aciers et pour les deux vitesses de coupe montre que le ratio ( $T$  de l'acier X20Cr13 /  $T$  de l'acier X2CrNi18-9) est de 1.45 pour la vitesse  $V_c=280\text{m/min}$  et de 1.44 pour la vitesse  $V_c=330\text{m/min}$ .



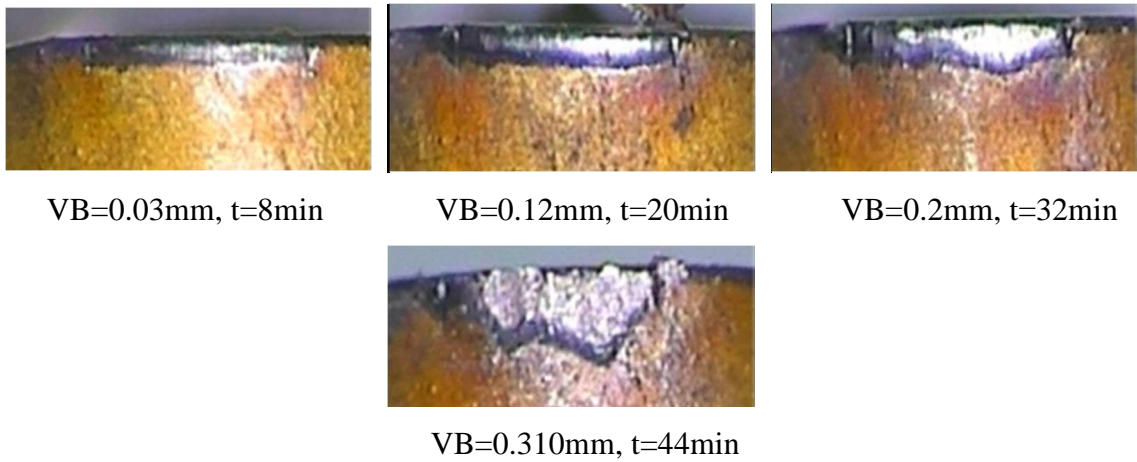
**Figure III-13 :** Comparaison des tenues de l'outil pour les deux aciers inoxydables à  $VB_{\text{admissible}}=0.3\text{mm}$

Les figures III-14 et III-15 illustrent la morphologie de l'usure en dépouille de la plaquette de coupe lors de l'usinage des aciers X20Cr13 et X2CrNi18-9 par le carbure revêtu GC2015 à la vitesse de coupe 280 m/min. Pendant les essais on a remarqué que l'usure évolue sous forme d'une bande régulière qui s'élargit avec le temps jusqu'à l'effondrement total de la plaquette de coupe dû aux sollicitations thermomécaniques au niveau de la pointe de l'outil.



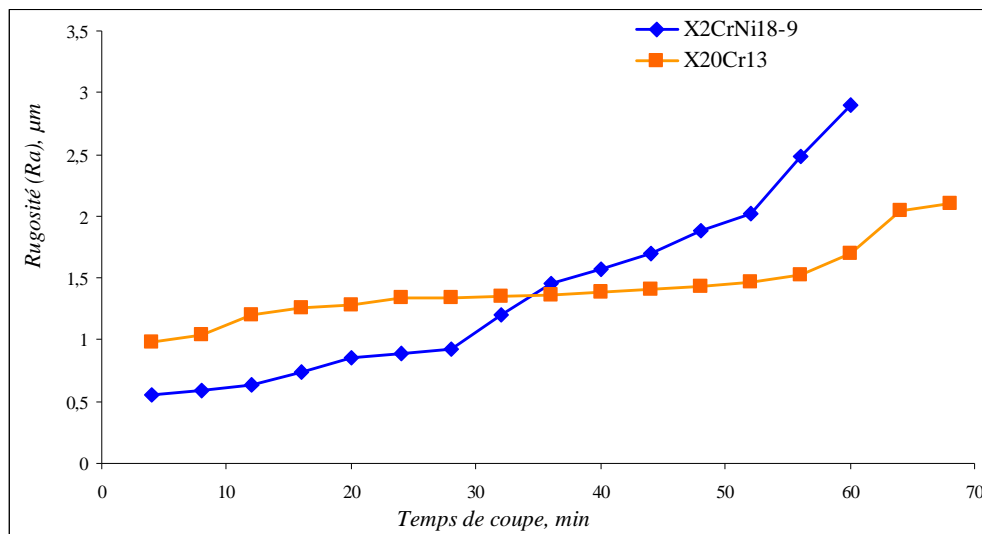
**Figure III.14 :** Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage de l'acier X20Cr13 pour  $V_c = 280 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 0,2 \text{ mm}$



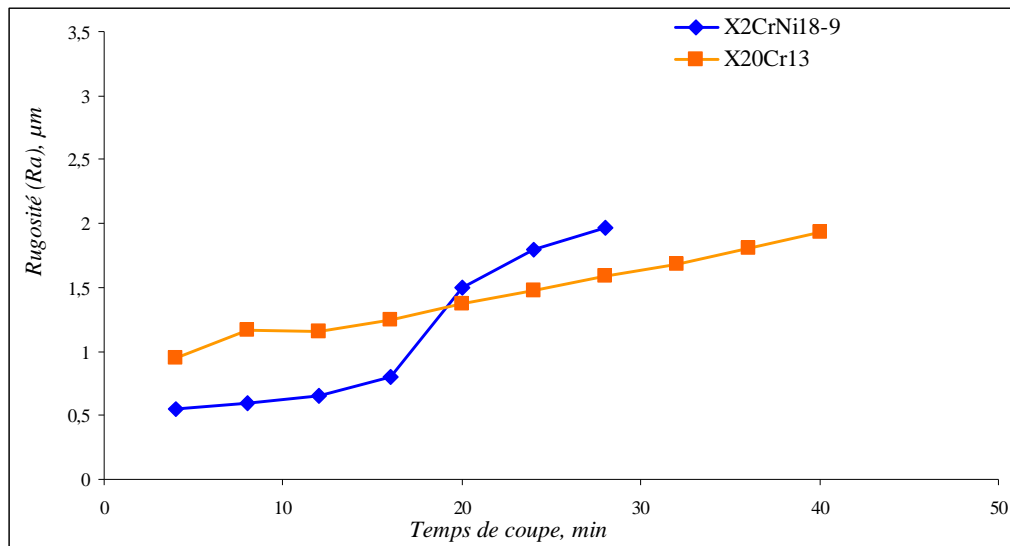


**Figure III.15 :** Valeurs de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage de l'acier X2CrNi18-9 pour  $V_c = 280$  m/min,  $f = 0,08$  mm/tr et  $a_p = 0,2$  mm

Les courbes de l'influence du temps de coupe sur la rugosité de la surface usinée pendant l'usinage des deux aciers inoxydables (X2CrNi18-9 et X20Cr13) sont présentées dans les figures III-16 et III-17. L'analyse de ces courbes montre que l'état de surface se dégrade progressivement avec l'écoulement du temps, cette dégradation est due directement à l'usure de l'outil. On a remarqué aussi que l'usinage de l'acier X2CrNi18-9 donne des valeurs rugosités meilleures par rapport à celle de l'acier X20Cr13 jusqu'à un temps d'usinage égales à 34min pour la vitesse 280m/min et 19min pour la vitesse 330m/min, au delà de ces temps on a enregistré des mauvaises qualités de la surface de la nuance austénitique. Cette dernière présente une conductivité thermique très réduite ce qui conduit à l'élévation de la température dans la zone de coupe qui favorise le détachement de l'arête rapportée et l'adhérence de cette dernière sur la surface usinée sous forme des micro-soudures.



**Figure III-16 :** Evolution de la rugosité en fonction du temps pour les deux matériaux pour  $V_c=280$ m/min,  $f=0.08$ mm/tr et  $a_p=0.2$ mm

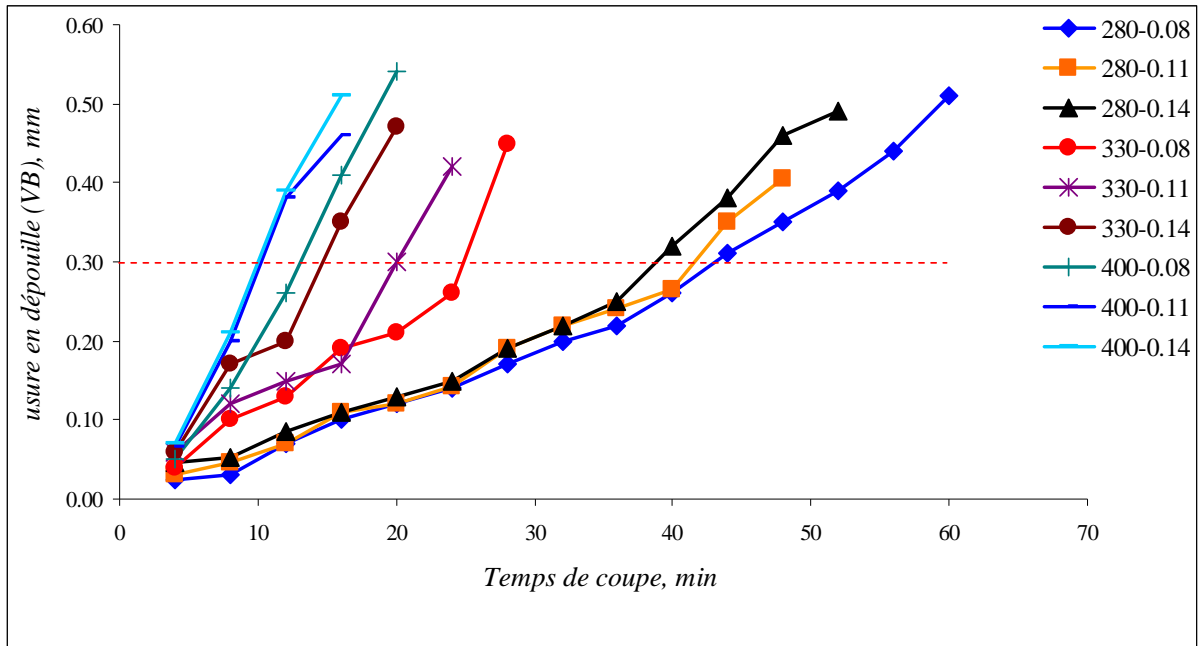


**Figure III-17 :** Evolution de la rugosité en fonction du temps pour les deux matériaux pour  $V_c=330\text{m/min}$ ,  $f=0.08\text{mm/tr}$  et  $a_p=0.2\text{mm}$ .

### III-6-2 Seconde partie

#### III-6-2-1 Evolution de l'usure en dépouille de l'acier X2CrNi18-9

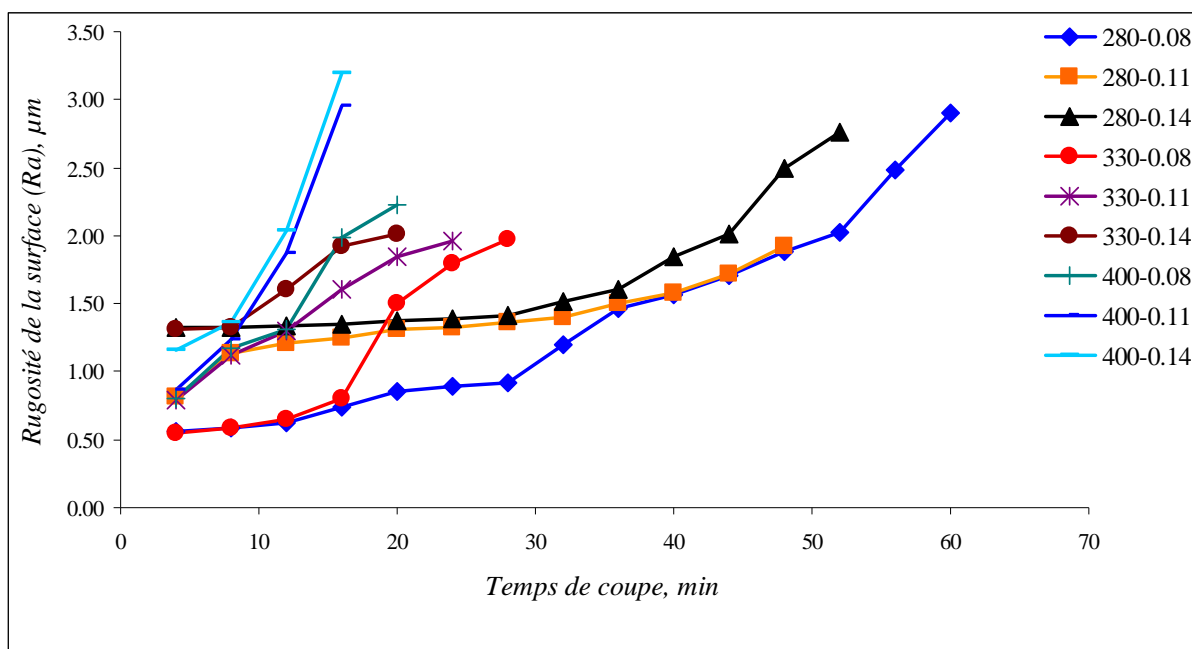
La figure III-18 illustre l'évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour les vitesses de coupe (280, 330 et 400) m/min et les avances par tour (0.08, 0.11 et 0.14) mm/tr pendant l'usinage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 par le carbure revêtu GC2015. L'analyse de la courbe montre que le temps d'usinage a un effet significatif sur l'usure de l'outil par contre l'avance a un effet moins important. Pour une usure en dépouille admissible ( $VB=0.3\text{mm}$ ) et pour une vitesse de coupe de 280 m/min, on a enregistré les tenues de (44, 43 et 38) min pour les avances de (0.08, 0.11 et 0.14) mm/tr. Pour la vitesse  $V_c=330$  m/min et une usure en dépouille admissible  $VB=0.3$  mm on a noté les valeurs des tenues de (25, 20 et 15), min respectivement, pour les avances (0.08, 0.11 et 0.4) mm/tr pour les avances. Pour la vitesse de 400 m/min, on a remarqué une accélération rapide de l'usure en dépouille à cause de la température élevée dans la zone de coupe et au coefficient de frottement élevé de l'acier X2CrNi18-9 et on a enregistré les tenues suivantes (13 min pour  $f=0.08$  mm/tr, 10 min pour  $f=0.11$  et 9 min pour  $f=0.14\text{mm/tr}$ ).



**Figure III-18 :** Evolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour les différentes vitesses de coupe et avances à  $a_p=0.2\text{mm}$

### III-6-2-2 Evolution de la rugosité de la surface $R_a$

La figure III-19 présente l'évolution de la rugosité en fonction du temps pour les trois vitesses de coupe (280, 330 et 400) m/min et les trois avances (0.08, 0.11 et 0.14) mm/tr. Dans un premier temps et pour des durées inférieures à 10 min, on remarque que les rugosités sont meilleures pour une valeur petite de l'avance (0.08 mm/tr) à cause d'une usure négligeable de l'outil. Pour des durées supérieures à 10 min l'usure en dépouille se développe et l'effet de la vitesse de coupe apparaît clairement comme le montre le tableau III-1. Ce dernier tableau expose aussi le taux de la variation de la rugosité  $R_a$  en fonction de la vitesse de coupe et l'avance par tour pour deux temps de coupe (4 et 12) min.



**Figure III-19** : Evolution de la rugosité Ra en fonction du temps pour les différentes vitesses de coupe et avances à  $a_p=0.2\text{mm}$

**Tableau III-1** : Valeurs de la rugosité pour différentes conditions de coupe

Conditions de coupe $V_c-f$	Rugosité Ra ( $\mu\text{m}$ )		%
	T = 4 min	T = 12 min	
<b>280-0.08</b>	0.56	0.63	12,50
<b>280-0.11</b>	0.81	1.21	49,38
<b>280-0.14</b>	1.32	1.34	1,52
<b>330-0.08</b>	0.55	0.65	18,18
<b>330-0.11</b>	0.79	1.3	64,56
<b>330-0.14</b>	1.31	1.61	22,90

### III-7 Conclusion

Cette étude expérimentale de l'évolution de différents paramètres technologiques (efforts de coupe, efforts spécifiques, puissance de coupe, rugosité de la surface usinée et l'usure en dépouille de l'outil) en fonction des conditions de coupe s'est déroulée en deux parties. Dans un premier temps, il y a eu des études paramétriques de la vitesse de coupe, de l'avance par tour et de la profondeur de passe. Elles ont été réalisées à sec, avec un outil de coupe en carbure à revêtement multi couches GC2015 (TiN-TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Cette étude nous a permis d'analyser l'effet de ces paramètres ( $V_c, f$  et  $a_p$ ) sur les efforts spécifiques de coupe, les pressions de coupe,

la puissance de coupe et la rugosité. De point de vue puissance de coupe nécessaire à l'enlèvement du copeau, la nuance X2CrNi18-9 demande une puissance plus grande par rapport à celle de l'acier X20Cr13.

La seconde partie des essais de tournage à sec a porté sur l'étude de l'évolution de la rugosité et l'usure en dépouille avec les paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $t$ ). En plus, l'influence de la vitesse de coupe et l'avance par tour sur la durée de vie de l'outil. Donc cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'évolution des différentes composantes de l'effort de coupe et l'effort résultant en fonction des paramètres de régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) est presque la même pour les deux matériaux testés, on a remarqué une légère diminution des trois composantes des efforts de coupe et aussi l'effort résultant avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La hausse de l'avance conduit à une augmentation des efforts de coupe. Cependant, l'augmentation de la profondeur de passe mène à une élévation de ( $F_a$ ,  $F_p$ ,  $F_c$  et  $F_r$ ) ;
- L'étude a montré que l'augmentation de la vitesse de coupe, conduit à une diminution de  $K_a$ , et on a remarqué une stabilisation de  $K_p$  sur toute la plage des vitesses sélectionnée. En plus, la variation de la vitesse de coupe de 80 à 160 m/min conduit à une diminution de  $K_c$  et au-delà de  $V_c=160$  m/min on a remarqué une stabilisation ;
- Les efforts spécifiques ( $K_a$ ,  $K_p$  et  $K_c$ ) diminuent avec l'augmentation de l'avance pour les deux matériaux testés ;
- L'augmentation de la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe mène à l'élévation de la puissance de coupe avec une influence majeure de  $V_c$  ;
- On a remarqué une légère diminution des différents critères de la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$  et  $R_t$ ) avec la hausse de  $V_c$ , par contre l'élévation de  $f$  engendre des mauvais états de surface. On a noté aussi que l'influence de la profondeur de passe est moins importante ;
- L'étude a montré que l'arête de l'outil s'use rapidement pendant l'usinage de la nuance X20Cr13 et ceci est dû à sa dureté qui est plus grande par rapport à celle de la nuance X2CrNi18-9. En plus, le coefficient de conductivité thermique de la nuance austénitique qui est très faible a conduit à une concentration de la chaleur au niveau du bec de l'outil ce qui mène à l'accélération de l'usure ;

**Chapitre IV**  
**Optimisation mathématique de Fc, Kc, Pc et Ra**  
**par RSM**

## IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) et les paramètres étudiés (rugosité, efforts de coupe, effort spécifique et puissance de coupe). On a choisi un plan orthogonal L16 de Taguchi et à l'aide de la méthode de la surface de la réponse, l'analyse de la variance et la détermination des constantes des modèles mathématiques et le coefficient de corrélation de chaque modèle ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface ont été fait, nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « **MINITAB** ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur  $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  et  $P_c$ .

La méthodologie de surface de réponse (RSM) est une procédure qui comprend six étapes:

- 1) définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- 2) adopter un plan de conception expérimentale ;
- 3) effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de RSM ;
- 4) analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- 5) déterminer la situation du modèle quadratique de RSM et de décider si le modèle de RSM à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- 6) optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédite.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante  $Y$ , dite variable de réponse (rugosité de la surface, effort de coupe tangentiel, effort spécifique tangentiel et puissance de coupe), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs),  $X_1, X_2, \dots, X_k$  (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée ( $Y$ ) sous la forme suivante:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j \quad (\text{IV-1})$$

- $Y$  est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;

- $X_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$ . C'est la valeur de la coordonnée du facteur  $i$  retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;

- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (IV-2).

$$R^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{Y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{IV-2})$$

Avec  $Y_i$  : valeur de la réponse calculée à la  $i^{\text{e}}$  expérience ;

$\bar{Y}_i$  : valeur mesurée à la  $i^{\text{e}}$  expérience ;

$\bar{Y}$  : valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse des variances (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. ANOVA permet de tracer les surfaces de réponse, d'estimer l'influence et l'interaction simultanées des paramètres de coupe sur les phénomènes étudiés (Ra, Fc, Kc et Pc).

#### IV-2 TESTE DE VALIDITÉ DES MODÈLES

Afin de tester la validité du modèle, on utilise :

- L'analyse de la variance (ANOVA) : est utilisée pour estimer l'influence des effets et des interactions simultanées des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et les efforts de coupe. Comme les facteurs sont en général exprimés dans des unités différentes, leurs effets ne soient comparables que s'ils sont codés.

- Coefficients d'ajustement des modèles : Le coefficient de détermination  $R^2$  est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression. Le coefficient  $R^2$  peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, d'où  $R^2$  varie entre 0 et 1. Une valeur de  $R^2$  proche de 1 correspond à un modèle avec un très bon pouvoir prédictif. Le coefficient de détermination de la régression  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (IV-3).



$$R^2 = 1 - \frac{SSErreur}{SStotal} \quad (IV-3)$$

• Graphiques des valeurs résiduelles : Les graphiques des valeurs résiduelles utiles pour vérifier les hypothèses des modèles et peuvent être affichés pour tous les plans et ils sont déterminées par l'évaluation de l'équation (IV.4).

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad (IV-4)$$

Où :

$y_{ij}$  : l'observation correspondante des valeurs non ajustées.

$\hat{y}_{ij}$  : l'observation des valeurs ajustées.

- Graphique des valeurs ajustées en fonction des valeurs résiduelles

- Test de normalité d'Anderson Darling : le test d'Anderson Darling est utilisé pour tester si un échantillon de données est issu d'une population ayant une distribution spécifique. Ce test est une alternative au test de chi carré ou de Kolmogorov-Smirnov. Il est basé sur ce dernier mais il est plus puissant. Le test Anderson Darling est défini comme suit :

- L'hypothèse nulle  $H_0$  : Les données proviennent d'une population distribuée normalement.
- L'hypothèse alternative  $H_1$  : Les données ne proviennent pas d'une population distribuée normalement.

La statistique du test d'Anderson Darling est donnée par :

$$A^2 = -N - S \quad (IV-5)$$

Où :  $N$  est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad (IV-6)$$

Où :  $F$  est la fonction de répartition de la distribution spécifiée.

Les valeurs critiques dépendent des distributions (normale, log-normale, exponentielle...). Les valeurs de  $P$  sont souvent utilisées dans les tests d'hypothèses dans lesquels on peut ou non rejeter une hypothèse nulle. La valeur de  $P$  représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. Plus la valeur de  $P$  est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. Une valeur limite de 0.05 est utilisée. Autrement dit, rejetez l'hypothèse nulle si la valeur de  $P$  est inférieure à 0.05.

Pour prendre une décision, on choisit le niveau de signification,  $\alpha$  (alpha), avant le test :

- Si  $P$  est inférieur ou égal à  $\alpha$ , on rejette  $H_0$ .
- Si  $P$  est supérieur à  $\alpha$ , on ne rejette pas  $H_0$ .

### IV-3 OPTIMISATION

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (RSM) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (RSM) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface ( $R_a$ ) et l'effort tangentiel ( $F_c$ ) souhaitées avec les paramètres de coupe optimaux. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface ( $R_a$ ), l'effort tangentiel ( $F_c$ ), l'effort spécifique ( $K_c$ ) et la puissance de coupe ( $P_c$ ) pour le carbure revêtu. Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective,  $F(x)$ , est définie comme suit:

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right) \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (IV-7)$$

$$F(x) = -DF$$

Où :  $d_i$  est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et  $w_i$  est la fonction de pondération de  $d_i$ . Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité  $d_i$  est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de  $T_i$ , la désirabilité  $d_i$  est :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \left[ \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \right] \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (IV-8)$$

$$di = \left[ \frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} \right] \quad \text{Si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i$$

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est montrée comme suite :

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[ \frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (\text{IV-9})$$

$$di = 1 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

Pour un objectif de chercher un minimum, la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$di = 1 \quad \text{Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[ \frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (\text{IV-10})$$

$$di = 0 \quad \text{Si } Y_i \geq Sup_i$$

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé Ra, Fc, Kc et Pc.

#### IV-4 Analyse par la méthode de la surface de réponse pour l'acier X2CrNi18-9

L'influence des paramètres de régime de coupe sur la rugosité, l'effort de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe obtenus pendant le tournage de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9 est présentée dans le tableau IV-1.

Tableau IV-1 : Plan orthogonal pour les différentes réponses pour un plan de Taguchi L16.

N° Test	Paramètres de coupe			Caractéristiques de l'usinabilité			
	Vc, (m/min)	f, (mm/tr)	ap, (mm)	Ra, (µm)	Fc, (N)	Kc, (MPa)	Pc, (w)
1	60	0.08	0.25	1.05	94.93	4746.50	94.93
2	60	0.12	0.50	1.17	208.21	3470.17	208.21
3	60	0.16	0.75	1.50	346.12	2884.33	346.12

4	60	0.20	1.00	2.35	540.18	2700.90	540.18
5	90	0.08	0.50	0.54	132.57	3314.25	198.86
6	90	0.12	0.25	0.66	86.01	2867.00	129.02
7	90	0.16	1.00	1.04	390.61	2441.31	585.92
8	90	0.20	0.75	1.62	381.56	2543.73	572.34
9	120	0.08	0.75	0.60	168.13	2802.17	336.26
10	120	0.12	1.00	1.03	320.80	2673.33	641.60
11	120	0.16	0.25	1.40	99.71	2492.75	199.42
12	120	0.20	0.50	1.80	248.19	2481.90	496.38
13	150	0.08	1.00	0.70	199.55	2494.38	498.88
14	150	0.12	0.75	0.95	213.09	2367.67	532.73
15	150	0.16	0.50	1.99	191.24	2390.50	478.10
16	150	0.20	0.25	2.86	109.13	2182.60	272.83

#### IV-4-1 Analyse de la variance

Les Tableaux IV-2 à IV-5 présentent les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'état de la surface, l'effort de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe. En plus les mêmes tableaux présentent le degré de liberté, somme des carrés F-value et P-value qui sont des indices statistiques utilisés pour l'analyse de la variance. On dit qu'un terme a une signification statistique si la valeur P-value de ce terme est inférieure à 0.05. La signification de tous les paramètres de coupe a été prouvée alors que les P-value de tous les paramètres étaient inférieures à 0,05. Par conséquent, il semble être important d'étudier les effets de chaque condition de coupe sur les caractéristiques d'usinage. La contribution des différents facteurs et leurs interactions ont également été présentées.

D'après les résultats de l'analyse ANOVA présentés dans le tableau IV-2, il est à noter que l'avance a un effet significatif sur la rugosité de la surface, sa contribution est d'environ 71% suivie par la profondeur de passe par une contribution de 2.17% et une petite contribution de 0.97% pour la vitesse de coupe. En plus le terme  $V_c^2$  a une contribution de 14.30% sur la réponse  $R_a$ .

Tableau IV-2 : ANOVA pour  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
$V_c$	1	0.06384	0.55328	15.95	0.007	0.97
$f$	1	4.67545	0.11889	3.43	0.114	71.04

<b>ap</b>	1	0.14281	0.01779	0.51	0.501	2.17
<b>Vc<sup>2</sup></b>	1	0.9409	0.9409	27.13	0.002	14.30
<b>f<sup>2</sup></b>	1	0.19802	0.19803	5.71	0.054	3.01
<b>ap<sup>2</sup></b>	1	0.0529	0.0529	1.53	0.263	0.80
<b>Vc*f</b>	1	0.12149	0.12149	3.5	0.11	1.85
<b>Vc*ap</b>	1	0.17529	0.17529	5.05	0.066	2.66
<b>f*ap</b>	1	0.00216	0.00216	0.06	0.811	0.03
<b>Error</b>	6	0.2081	0.03468			3.16
<b>Total</b>	15	6.58098				100.00

Le tableau IV-3 présente les résultats de l'influence des paramètres de régime de coupe sur l'effort tangentiel. On peut remarquer que la vitesse de coupe influe légèrement sur  $F_c$  comparativement à l'avance et la profondeur de passe. L'analyse de la variance montre que  $ap$  et  $f$  ont des contributions de 60.74% et 24.95%, mais la vitesse de coupe présente seulement une contribution de 12.34%.

Table IV-3 : ANOVA pour  $F_c$ 

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
<b>Vc</b>	1	31332	444	188.40	<0.001	12.34
<b>f</b>	1	63349	1	380.93	<0.001	24.95
<b>Ap</b>	1	154244	355	927.50	<0.001	60.74
<b>Vc*f</b>	1	350	350	2.11	0.197	0.14
<b>Vc*ap</b>	1	21	21	0.13	0.733	0.01
<b>f*ap</b>	1	145	145	0.87	0.386	0.06
<b>Vc<sup>2</sup></b>	1	1	1	0.00	0.951	0.00
<b>f<sup>2</sup></b>	1	34	34	0.20	0.668	0.01
<b>ap<sup>2</sup></b>	1	3479	3479	20.92	0.004	1.37
<b>Erreur</b>	6	998	166			0.39
<b>Total</b>	15	253953				100.00

Les résultats de l'analyse ANOVA de l'effort spécifique et la puissance de coupe sont présentés dans le tableau IV-4 et IV-5. Il est clair d'après les résultats de l'analyse de la variance présentés dans le tableau IV-4 que la vitesse de coupe affecte significativement l'effort spécifique avec une contribution d'environ 41%. Le deuxième paramètre affectant  $K_c$  est l'avance et sa contribution est de 28.77%, et en dernier lieu la profondeur de passe qui ne présente qu'une contribution de 10.62%.

Il est à noter que la profondeur de passe est le paramètre le plus prépondérant qui influe sur la puissance de coupe avec une contribution de 67%. Le deuxième paramètre qui affecte  $P_c$  est l'avance avec une contribution de 14.23%. Alors que la vitesse de coupe a un effet moins important et sa contribution est de 9.91%.

Tableau IV-4 : ANOVA pour  $K_c$

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
Vc	1	2386169	722643	81.83	<0.001	41.43
f	1	1657079	612362	56.83	<0.001	28.77
ap	1	611748	224022	20.98	0.04	10.62
Vc*f	1	164146	164146	5.63	0.055	2.85
Vc*ap	1	176266	176266	6.04	0.049	3.06
f*ap	1	7398	7398	0.25	0.632	0.13
Vc <sup>2</sup>	1	294009	294009	10.08	0.019	5.11
f <sup>2</sup>	1	184023	184023	6.31	0.046	3.20
ap <sup>2</sup>	1	103045	103045	3.53	0.109	1.79
Erreur	6	174958	29160			3.04
Total	15	5758842				100.00

Tableau IV-5 : ANOVA pour Pc

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
Vc	1	48353	342	114.66	<0.001	9.91
f	1	69409	515	164.59	<0.001	14.23
ap	1	327301	613	776.11	<0.001	67.11
Vc*f	1	2205	2205	5.23	0.062	0.45
Vc*ap	1	763	763	1.81	0.227	0.16
f*ap	1	2658	2658	6.30	0.046	0.55
Vc <sup>2</sup>	1	7863	7863	18.65	0.005	1.61
f <sup>2</sup>	1	14751	14751	34.98	0.001	3.02
ap <sup>2</sup>	1	11852	11852	28.10	0.002	2.43
Erreur	6	2530	422			0.52
Total	15	487685				100.00

#### IV-4-2 Equations de la régression pour différentes réponses

La relation fonctionnelle entre les variables dépendantes ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  et  $P_c$ ) et les variables indépendantes étudiées ( $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ ) ont été exprimées avec un coefficient de corrélation  $R^2$  correspondant à la précision de régression. Les différents modèles quadratiques obtenus à partir de l'analyse statistique peuvent être utilisés pour prédire la rugosité de la surface, l'effort de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe selon les facteurs étudiés. Les modèles obtenus présentant l'évolution de l'état de la surface, l'effort de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe en fonction de ( $V_c$ ,  $f$ , et  $ap$ ) sont présentés respectivement par les équations (IV.1, IV.2, IV.3 et IV.4).

$$R_a = 4.13 - 0.06V_c - 19.86f - 1.13ap + 0.0003V_c^2 + 69.53f^2 + 0.92ap^2 + 0.1V_c.f - 0.01V_c.ap - 1.56f.ap$$

$$R^2 = 96.84 \quad (IV-1)$$

$$F_c = 101 - 1.62V_c - 57.19f + 159ap + 0.01V_c^2 + 720f^2 + 48.19ap^2 - 0.23V_c.f - 0.26V_c.ap + 1988f.ap$$

$$R^2 = 99.61 \quad (IV-2)$$

$$K_c = 11076 - 65.3V_c - 45067f - 4011ap + 0.1V_c^2 + 65600f^2 + 344ap^2 + 152V_c.f + 19V_c.ap + 10821f.ap$$

$$R^2 = 96.96 \tag{IV-3}$$

$$P_c = 149 - 1.42V_c - 1307f - 209ap - 0.01V_c^2 - 4314f^2 - 206ap^2 + 24.9V_c.f + 5.46V_c.ap + 3669f.ap$$

$$R^2 = 99.48 \tag{IV-4}$$

La comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites est présentée dans les figures (IV-1, IV-2, IV-3 et IV-4). L'analyse de résultats montre que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales sont très proches, cela montre la précision et la robustesse des modèles trouvés.

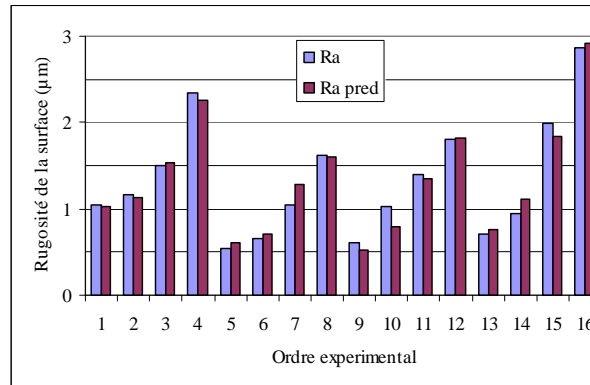


Figure IV-1 : Les valeurs expérimentales et prédites de la rugosité de surface.

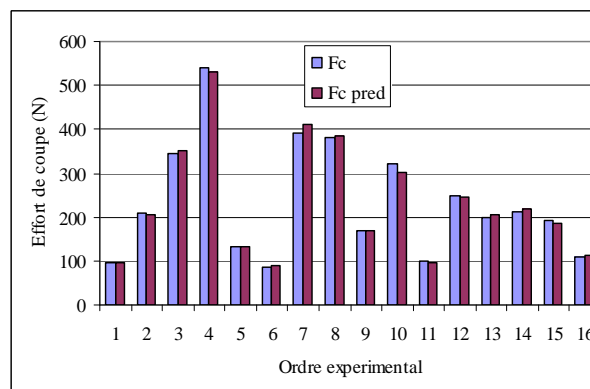


Figure IV-2 : Les valeurs expérimentales et prédites de l'effort de coupe

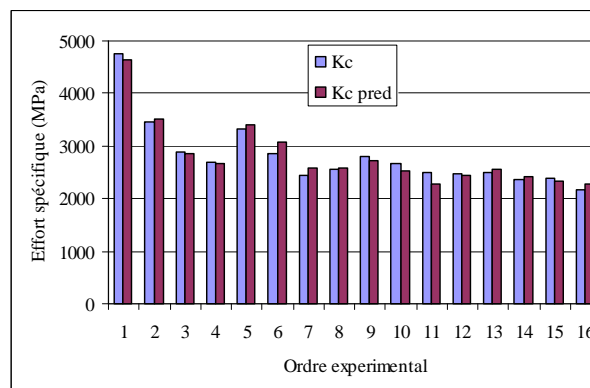


Figure IV-3 : Les valeurs expérimentales et prédites de l'effort spécifique

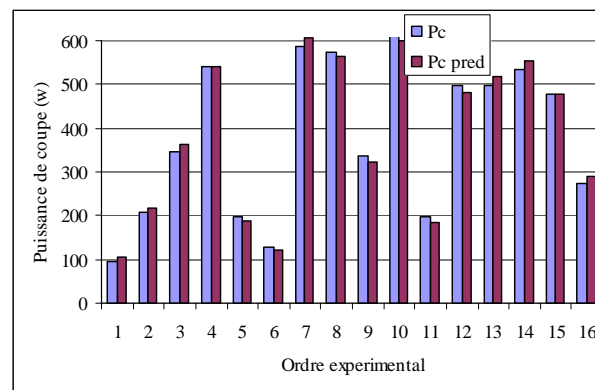


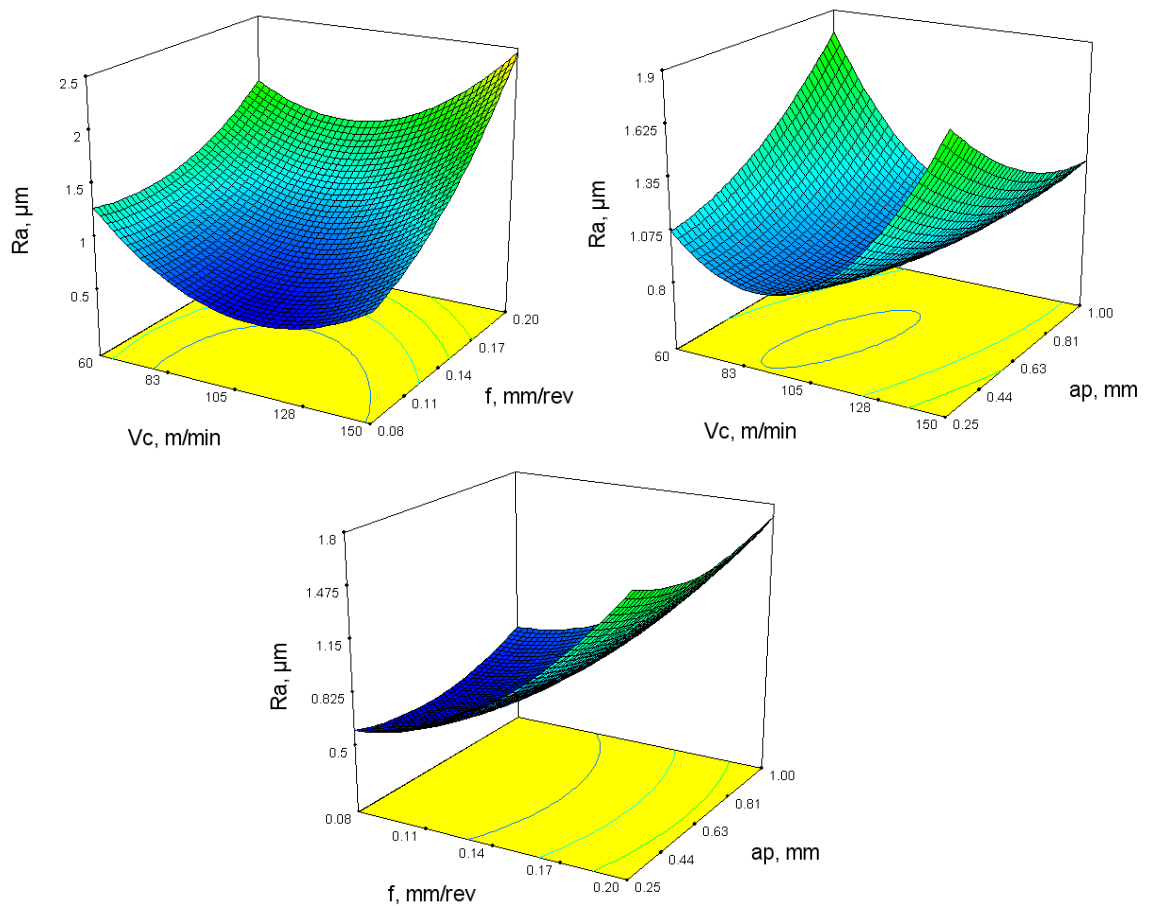
Figure IV-4 : Les valeurs expérimentales et prédites de la puissance de coupe

### IV-4-3 Analyse de la surface de réponse

#### IV-4-3-1 Rugosité de surface

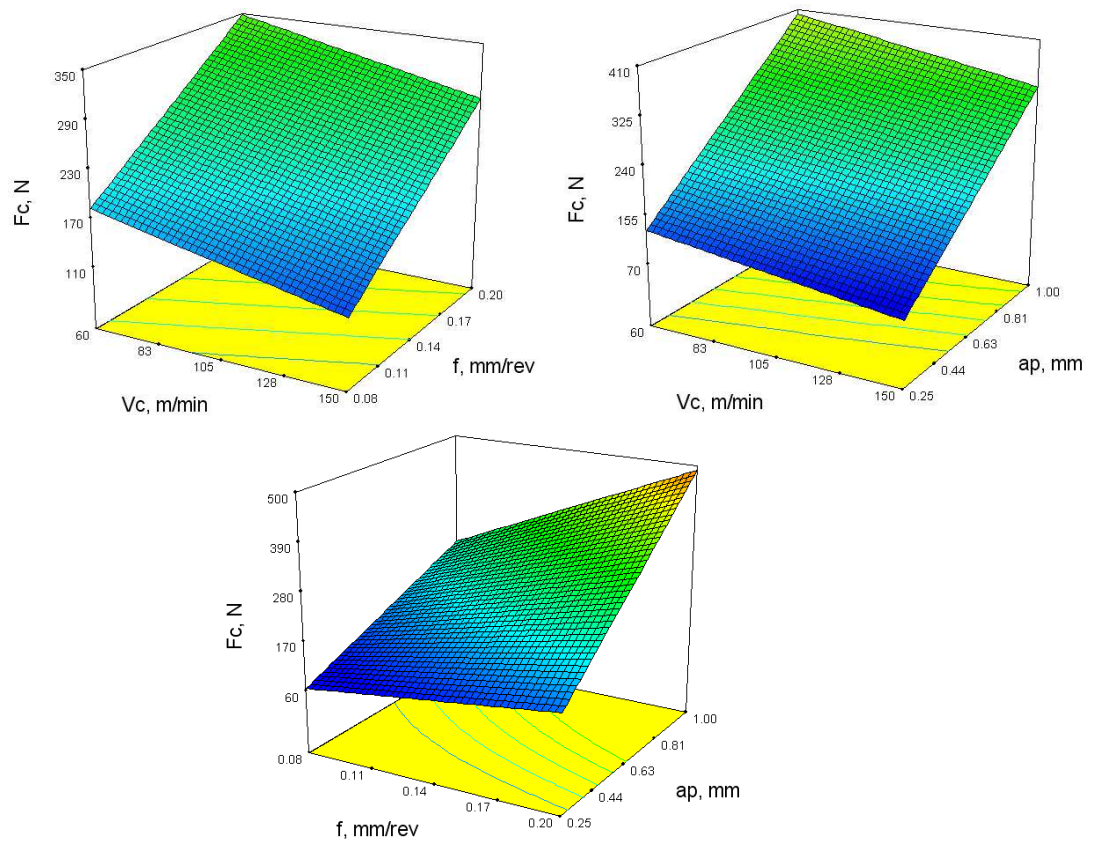
L'évolution de la rugosité de la surface en relation avec les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $p$ ) est présentée sous forme d'une surface 3D dans la figure IV-5. Cette dernière montre que la vitesse de coupe a une influence sur la rugosité de la surface usinée. Des valeurs élevées de la rugosité de surface sont indiquées dans des faibles valeurs de la vitesse de coupe. Ceci peut être expliqué par la présence de l'arête rapportée sur la surface usinée due à la grande ductilité de l'acier inoxydable austénitique X2CrNi18-9. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les valeurs de rugosité de surface diminuent jusqu'à une valeur minimale atteinte au-delà de laquelle elles augmentent. Les vitesses de coupe supérieures à 100 m/min conduisent à des mauvais états de surface, cela peut être expliqué par la présence des micro-soudures sur la surface usinée due à une élévation des températures dans la zone de coupe qui provoque le décollage de l'arête rapportée et l'accrochement de cette dernière sur la surface usinée. En outre, l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation de la rugosité de surface. Cela est dû à l'augmentation de l'usure au niveau du bec de l'outil produisant un mauvais état de surface [65].



Figure IV-5 : Surface de réponse pour  $R_a$ 

#### IV-4-3-2 Effort de coupe tangentiel

La surface en 3D affichée dans la figure IV-6 illustre l'effet des paramètres de coupe sur la l'effort de coupe tangentiel  $F_c$ . La variation de  $F_c$  en fonction des conditions de coupe est linéaire et se sont avérés augmenter avec l'avance et la profondeur de passe. Ce comportement est dû à l'augmentation de la section de copeau. On peut observer aussi que l'avance a une influence moins importante sur  $F_c$  par rapport à la profondeur de passe et cela est confirmé précédemment par analyse de variance. En outre, la vitesse de coupe affecte légèrement l'effort de tangentielle, on a remarqué qu'avec l'augmentation de ( $V_c$ ) de l'effort de coupe  $F_c$  diminue. Ceci est expliqué par l'augmentation de la température dans la zone de coupe qui mène à l'adoucissement de la matière usinée ce qui permet de réduire la puissance nécessaire à la coupe. Une observation similaire a été rapportée par [66] et [67]. On a enregistré un haut effort de coupe à des faibles vitesses de coupe parce que le copeau reste pour longtemps en contact avec la face de coupe de l'outil cédant à une augmentation dans l'outil puce longueur de contact. Cela implique une augmentation de la friction entre l'outil et la puce qui a donné lieu à des forces plus élevées.

Figure IV-6 : Surface de réponse pour  $F_c$ 

#### IV-4-3-3 Effort spécifique et puissance de coupe

L'influence des paramètres de coupe étudiés ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sur l'effort spécifique est présentée dans la figure IV-7. On peut remarquer que la vitesse de coupe affecte considérablement ( $K_c$ ) quand l'avance est supérieure à 0.15 mm/tr  $K_c$  diminue. Ensuite, l'effort spécifique présente une tendance à la hausse. Il ressort clairement de l'analyse que la vitesse de coupe plus élevée avec une basse avance est bénéfique pour réduire l'effort de coupe et par conséquent la diminution de l'effort spécifique.

La variation de la puissance de coupe en fonction de différentes conditions de coupe présentée dans la figure IV-8 montre que  $P_c$  augmente avec les différents paramètres de coupe. Selon la figure, il est clair que la profondeur de passe est le paramètre le plus prépondérant qui affecte la puissance de coupe.

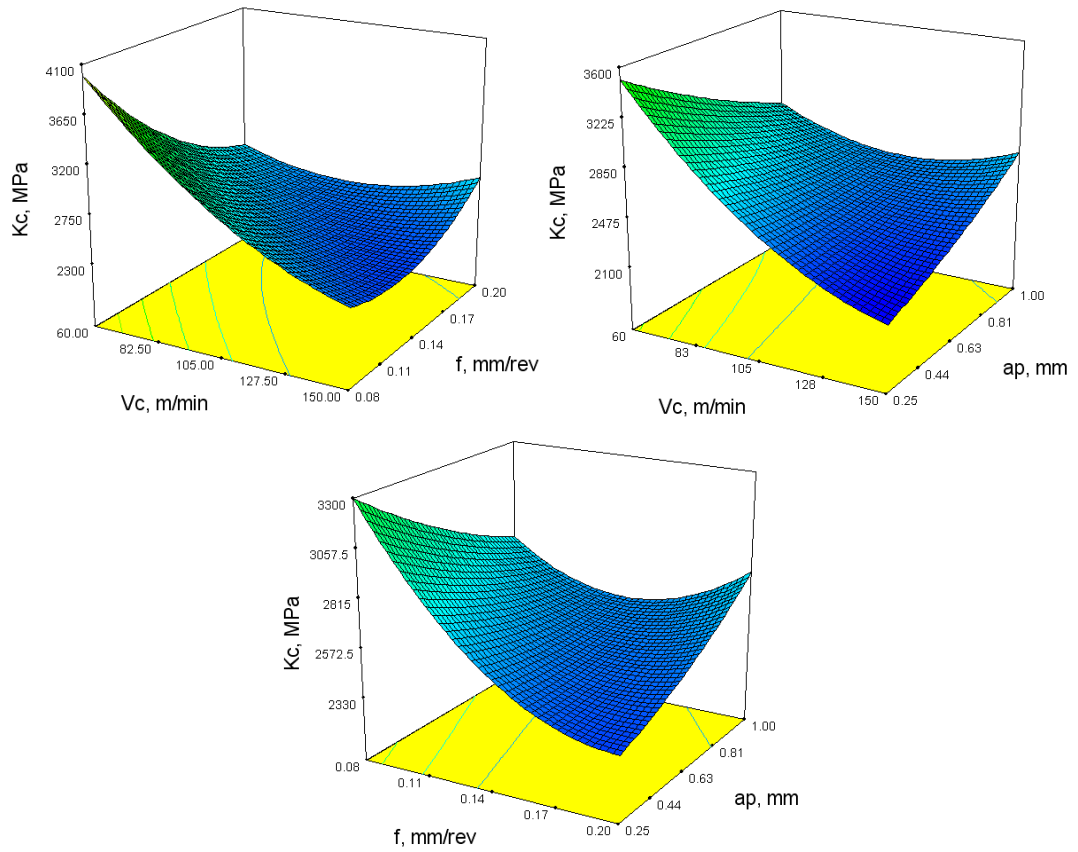


Figure IV-7 : Surface de réponse pour  $K_c$

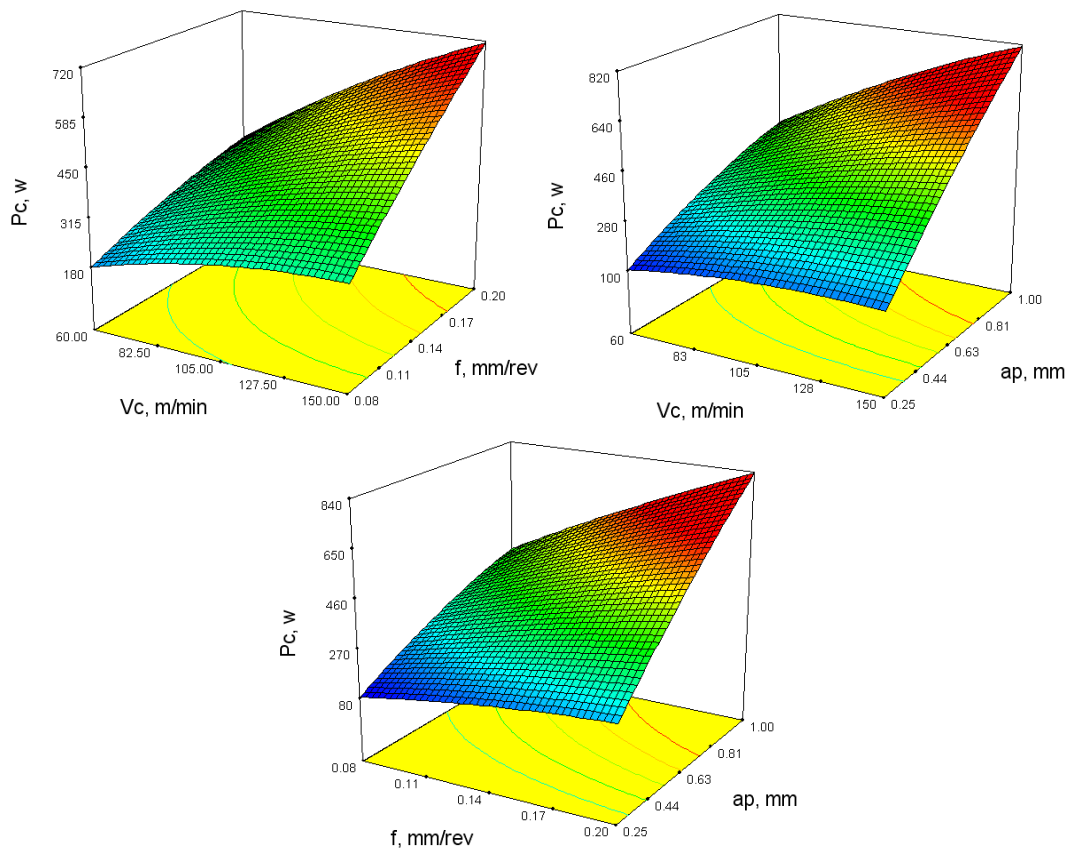


Figure IV-8 : Surface de réponse pour  $P_c$

### IV-4-4 Optimisation multi-objective des réponses

L'un des objectifs les plus importants de la procédure expérimentale est d'identifier les paramètres de coupe optimaux. Pour atteindre ce but, l'optimisation par la méthode de la surface de réponse est une technique idéale pour la détermination de la combinaison des paramètres de coupe en tournage. Dans l'étude actuelle, l'objectif est de minimiser les différents paramètres de sorties (rugosité de la surface, effort de coupe, effort spécifique et la puissance de coupe). Les résultats de l'optimisation par RSM pour les différents phénomènes de la coupe ont été présentés dans la figure IV-9. Les paramètres de coupe optimaux obtenus sont la vitesse de coupe (104,5 m/min), avance (0,08 mm/tr) et la profondeur de passe (0.295 mm) tableau IV-6. Les valeurs optimisées de ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  et  $P_c$ ) sont (0,57  $\mu$ m, 69.35 N, 3267.20 MPa et 95.13w), respectivement.

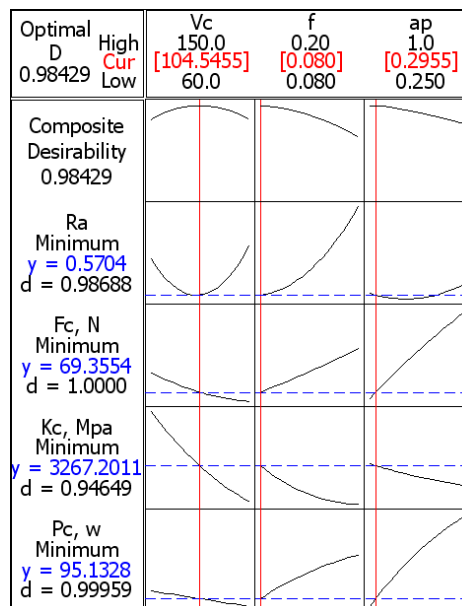


Figure IV-9 : Graphe d'optimisation pour ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  and  $P_c$ )

Tableau IV-6 : Optimisation de réponses

paramètres	objectif	Conditions optimales			Valeurs			Désirabilité
		Vc, m/min	f, mm/tr	ap, mm	Mini	Maxi	Prédites	
$R_a$ , $\mu$ m	Minimum				0.54	2.86	0.57	0.98
$F_c$ , N	Minimum				86.01	540.18	69.36	1.00
$K_c$ , MPa	Minimum	104.54	0.08	0.295	2182.60	4746.50	3267.20	0.94
$P_c$ , w	Minimum				94.93	585.92	95.13	0.99

### IV-4-5 Tests de confirmation

Les tests de confirmation ont été effectués pour la rugosité de la surface et l'effort de coupe afin de vérifier l'adéquation des modèles mathématiques obtenus qui sont donnés par les équations (IV-1) et (IV-2). Les paramètres de coupe utilisés dans les tests de confirmation ont

été présentés dans le tableau IV-7. Le tableau IV-8 montre la comparaison entre les valeurs prédites par le modèle développé dans la présente étude (équations. (IV-1) et (IV-2)) avec les valeurs expérimentales. A partir de l'analyse du tableau IV-8, on peut noter que l'erreur de calcul de la rugosité de surface  $R_a$  a une valeur maximale de 8,20% et une valeur minimale de 5.42%. Pour l'effort de coupe  $F_c$  la valeur maximale est d'environ 11,02% et la valeur minimale est d'environ 0,16%.

Tableau IV-7 : Conditions de coupe utilisées pour les tests de confirmation

Test N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
T1	70	0.08	0.40
T2	70	0.11	0.60
T3	70	0.18	0.40
T4	138	0.09	0.85
T5	68	0.14	0.55

Tableau IV-8 : Tests de confirmation pour la rugosité et l'effort de coupe

Test N°	Rugosité de la surface			Effort de coupe		
	Expérimentale	Prédit	Erreur (%)	Expérimentale	Prédit	Erreur (%)
T1	1.30	1.23	5.69	108.56	122.01	11.02
T2	1.45	1.34	8.20	209.46	209.12	0.16
T3	2.14	2.29	6.55	201.83	217.96	7.40
T4	1.80	1.96	8.16	211.55	195.98	7.95
T5	1.57	1.66	5.42	241.49	233.71	3.33

#### IV-5 Analyse par la méthode de la surface de réponse pour l'acier X20Cr13

L'évolution de différents paramètres technologiques de sortie ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  et  $P_c$ ) en fonction de paramètres de sortie tels que, vitesse de coupe, avance et profondeur de passe lors de l'usinage de l'acier X20Cr13 est présentée dans le tableau IV-9.

Tableau IV-9 : Plan orthogonal de Taguchi L16 pour les différentes réponses.

N° Test	Paramètres de coupe			Caractéristiques de l'usinabilité			
	Vc, (m/min)	f, (mm/tr)	ap, (mm)	Ra, ( $\mu\text{m}$ )	Fc, (N)	Kc, (MPa)	Pc, (w)
1	60	0.08	0.25	0.85	77.44	3872.00	77.44
2	60	0.12	0.50	1.23	194.75	3245.83	194.75
3	60	0.16	0.75	1.63	336.64	2805.33	336.64
4	60	0.20	1.00	2.72	476.47	2382.35	476.47
5	90	0.08	0.50	0.96	144.89	3622.25	217.34
6	90	0.12	0.25	1.07	97.55	3251.67	146.33
7	90	0.16	1.00	1.65	412.59	2578.69	618.89
8	90	0.20	0.75	2.05	414.73	2764.87	622.10
9	120	0.08	0.75	0.77	176.63	2943.83	353.26
10	120	0.12	1.00	1.10	312.14	2601.17	624.28
11	120	0.16	0.25	1.38	113.45	2836.25	226.90
12	120	0.20	0.50	2.06	246.77	2467.70	493.54
13	150	0.08	1.00	1.02	238.53	2981.63	596.33
14	150	0.12	0.75	1.95	246.59	2739.89	616.48
15	150	0.16	0.50	1.58	223.83	2797.88	559.58
16	150	0.20	0.25	2.16	130.21	2604.20	325.53

**IV-5-1 Analyse de la variance**

Le tableau IV-10 présente l'analyse de la variance de l'effet de chaque condition de coupe sur la rugosité  $R_a$ . On peut noter que l'avance présente la majorité de la contribution qui est 77.47% suivie par la profondeur de passe par une contribution de 3.57%. La vitesse de coupe affecte  $R_a$  par une contribution de 0.05%. Les termes  $V_c*f$  et  $ap^2$  influent sur la réponse par des contributions de 5.87% et 3.57%.

Tableau IV-10 : ANOVA pour  $R_a$ 

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
$V_c$	1	0.002	0.044	0.790	0.408	0.05
$f$	1	3.638	0.007	0.130	0.733	77.47
$ap$	1	0.167	0.010	0.180	0.686	3.57
$V_c^2$	1	0.028	0.028	0.500	0.504	0.60
$f^2$	1	0.015	0.015	0.260	0.628	0.31
$ap^2$	1	0.167	0.167	3.000	0.134	3.57
$V_c*f$	1	0.276	0.276	4.940	0.068	5.87
$V_c*ap$	1	0.063	0.063	1.120	0.331	1.33
$f*ap$	1	0.005	0.005	0.090	0.777	0.10
Erreur	6	0.335	0.056			7.13
Total	15	4.696				100.00

Le tableau IV-11 illustre les résultats de l'analyse ANOVA de l'effort de coupe. L'analyse des résultats montre que la profondeur de passe est le facteur le plus influant sur l'effort de coupe tangentiel avec une contribution de 66.44%. La vitesse de coupe et l'avance influent sur  $F_c$  par une contribution de 5.20% et 25.60% respectivement.

Tableau IV-11 : ANOVA pour  $F_c$ 

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
$V_c$	1	11501	83	0.29	0.61	5.20
$f$	1	56581	114	0.40	0.55	25.60
$ap$	1	146855	404	1.42	0.28	66.44
$V_c^2$	1	0	0	0.00	0.99	0.00
$f^2$	1	198	198	0.70	0.44	0.09
$ap^2$	1	3124	3124	11.00	0.02	1.41
$V_c*f$	1	2	2	0.01	0.94	0.00
$V_c*ap$	1	63	63	0.22	0.65	0.03
$f*ap$	1	999	999	3.52	0.11	0.45
Erreur	6	1704	284			0.77
Total	15	221027				100.00

Les résultats de l'analyse de la variance de l'effort spécifique et la puissance de coupe sont enregistrés dans les tableaux IV-12 et IV-13. L'analyse ANOVA montre que l'avance est le facteur le plus prépondérant qui affecte  $K_c$ , sa contribution est de 53.88%. Le deuxième

paramètre qui influe sur Kc est la profondeur de passe avec une contribution d'environ 24%. Enfin, on trouve que Vc affecte la réponse par une contribution d'environ 12%. Le premier facteur qui influe sur la puissance de coupe est la profondeur de passe, sa contribution est 57.85% suivie par la vitesse de coupe avec une contribution de 22% et en dernier lieu, l'avance par une contribution de 10.64%.

Tableau IV-12 : ANOVA pour Kc

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
Vc	1	301874	42009	1.66	0.245	11.98
F	1	1357773	117208	4.63	0.075	53.88
Ap	1	602146	39246	1.55	0.260	23.90
Vc <sup>2</sup>	1	8044	8044	0.32	0.594	0.32
f <sup>2</sup>	1	24007	24007	0.95	0.368	0.95
ap <sup>2</sup>	1	22756	22756	0.90	0.380	0.90
Vc*f	1	8221	8221	0.32	0.590	0.33
Vc*ap	1	38232	38232	1.51	0.265	1.52
f*ap	1	4887	4887	0.19	0.676	0.19
Erreur	6	152006	25334			6.03
Total	15	2519946				100.00

Tableau IV-13 : ANOVA pour Pc

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
Vc	1	122554	350	0.49	0.51	21.96
F	1	59404	43	0.06	0.82	10.64
Ap	1	322908	1072	1.50	0.27	57.85
Vc <sup>2</sup>	1	5258	5258	7.36	0.04	0.94
f <sup>2</sup>	1	21610	21610	30.26	0.00	3.87
ap <sup>2</sup>	1	13919	13919	19.49	0.00	2.49
Vc*f	1	891	891	1.25	0.31	0.16
Vc*ap	1	1637	1637	2.29	0.18	0.29
f*ap	1	5682	5682	7.96	0.03	1.02
Erreur	6	4285	714			0.77
Total	15	558148				100.00

#### IV-5-2 Equations de la régression pour différentes réponse

La méthode de la surface de réponse nous a permis de déterminer les différents modèles mathématiques de l'évolution de (Ra, Fc, Kc et Pc) en fonction de différents facteurs de coupe qui sont (Vc, f et ap), ces modèles sont présentés par les équations (IV-5, IV-6, IV-7 et IV-8), Les modèles trouvés nous permettent de faire des prédictions de tous les paramètres technologiques.

$$Ra = 1.77 - 0.02Vc - 4.86f - 0.84ap + 0.000Vc^2 + 39.06f^2 - 0.2ap^2 - 0.05Vc.f - 0.005Vc.ap + 13.79f.ap$$

$$R^2 = 92.87 \quad (IV-5)$$

$$Fc = -2.63 - 0.70Vc + 6.15f + 17.0ap + 0.000Vc^2 - 12.44f^2 - 12.6ap^2 - 0.08Vc.f + 0.63Vc.ap + 18.84f.ap$$

$$R^2=99.23 \tag{IV-6}$$

$$K_c=6260-15.7V_c-1971f-1678ap+0.03V_c^2+3055f^2-279ap^2+25V_c f+7V_c ap+5085f.ap$$

$$R^2=93.97 \tag{IV-7}$$

$$P_c=80-1.43V_c-376f-277ap-0.008V_c^2-632f^2-301ap^2+20.3V_c f+6.60V_c ap+3977f.ap$$

$$R^2=99.23 \tag{IV-8}$$

En utilisant les équations (IV-5, IV-6, IV-7 et IV-8) on a tracé des graphes présentent la comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites, ces graphes sont présentés dans les figures (IV-10, IV-11, IV-12 et IV-13).

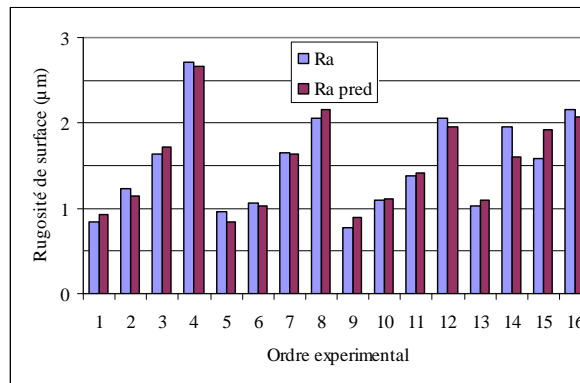


Figure IV-10 : Les valeurs expérimentales et prédites de la rugosité de surface.

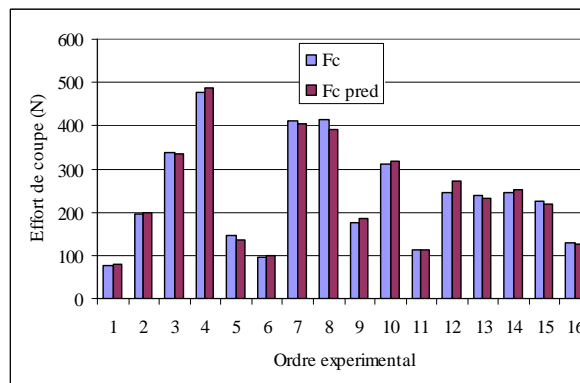


Figure IV-11 : Les valeurs expérimentales et prédites de l'effort de coupe.

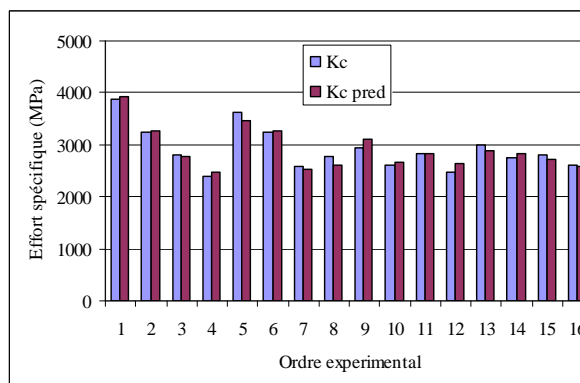


Figure IV-12 : Les valeurs expérimentales et prédites de l'effort spécifique.



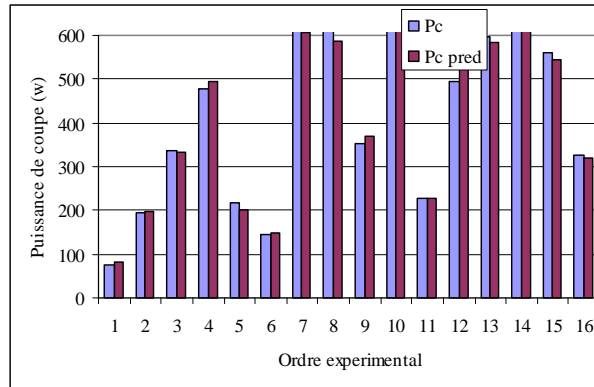
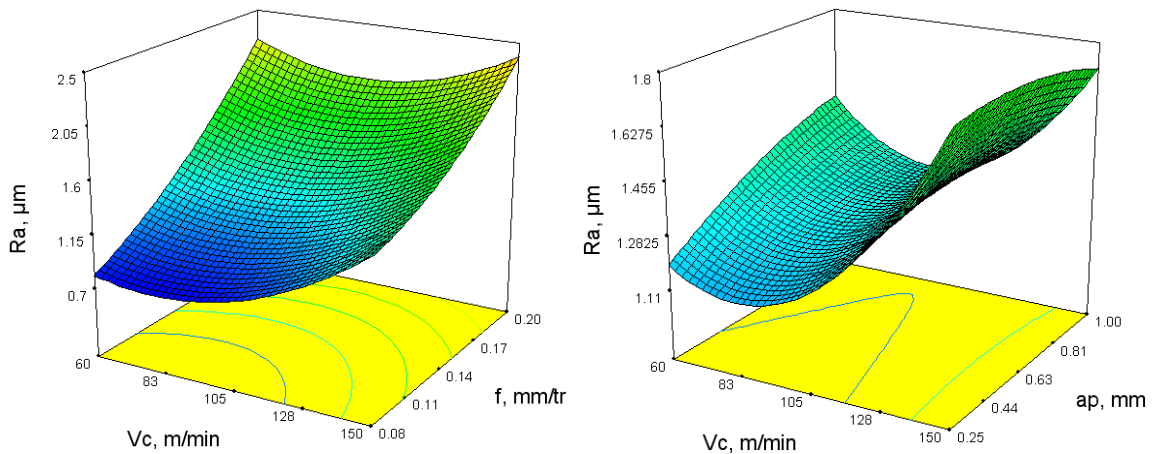


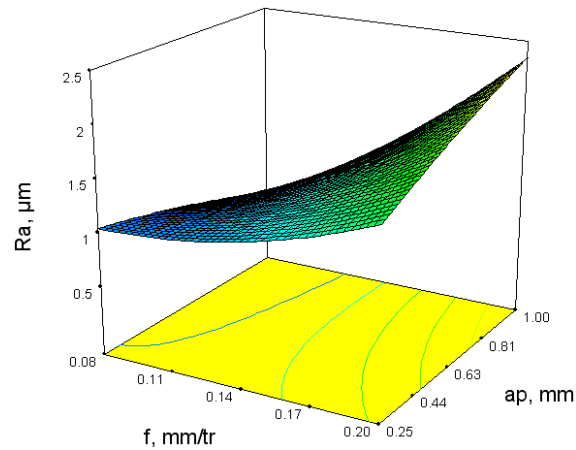
Figure IV-13 : Les valeurs expérimentales et prédites de la puissance de coupe.

### IV-5-3 Analyse de la surface de réponse

#### IV-5-3-1 Rugosité de surface

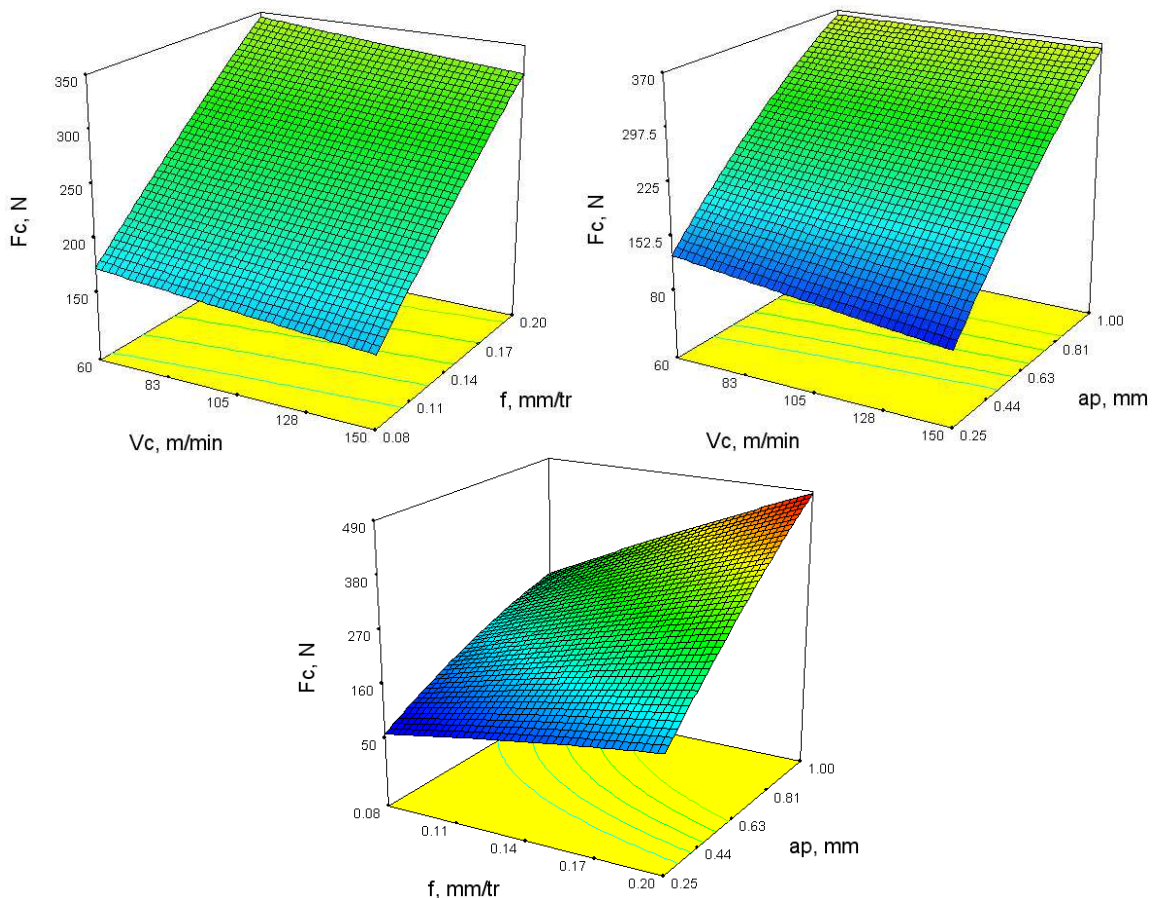
Les graphes en 3D qui montrent la variation de la rugosité de la surface avec les différents paramètres de coupe sont présentés dans la figure IV-14. On peut remarquer que l'évolution de  $R_a$  avec l'avance et la profondeur de passe est presque linéaire. Donc, avec l'augmentation de  $f$  et  $a_p$  la rugosité augmente. On peut conclure du graphe qui présente le changement de  $R_a$  avec la vitesse de coupe que l'augmentation de la vitesse de coupe (à  $V_c=100$  m/min) provoque une diminution de  $R_a$ , à des vitesses de coupe supérieures à 100 m/min on a remarqué une augmentation des valeurs de la rugosité de la surface usinée ceci peut être dû au phénomène du copeau adhérent sur la surface usinée de la pièce.



Figure IV-14 : Surface de réponse pour  $R_a$ 

#### IV-5-3-2 Effort de coupe

L'impact de différents paramètres de régime de coupe sur l'effort de coupe tangentiel est présenté sur la figure IV-15. La première remarque qui nous pouvons tirer est que l'évolution de  $F_c$  est presque linéaire avec toutes les conditions de coupe. D'abord, la vitesse de coupe a un effet inverse sur l'effort de coupe sur toute la plage étudiée. Ensuite, l'augmentation de  $f$  et  $a_p$  conduit à l'augmentation de l'effort de coupe. Enfin, la figure montre que la profondeur de passe affect considérablement  $F_c$ , car sa pente est la plus grande.

Figure IV-15 : Surface de réponse pour  $F_c$

### IV-5-3-3 Effort spécifique et puissance de coupe

Les tracés des réponses en 3D par la méthode de la surface de réponse qui illustrent l'évolution de l'effort spécifique et la puissance de coupe en fonction de différents paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sont présentés dans les figure IV-16 et IV-17. On remarque que  $K_c$  est inversement proportionnel aux différents paramètres de régime de coupe par contre la puissance de coupe augmente avec l'augmentation des différents facteurs de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ). L'analyse des graphes montre aussi que les pentes de l'avance et la profondeur de passe sont les plus grandes comparativement à la vitesse de coupe.

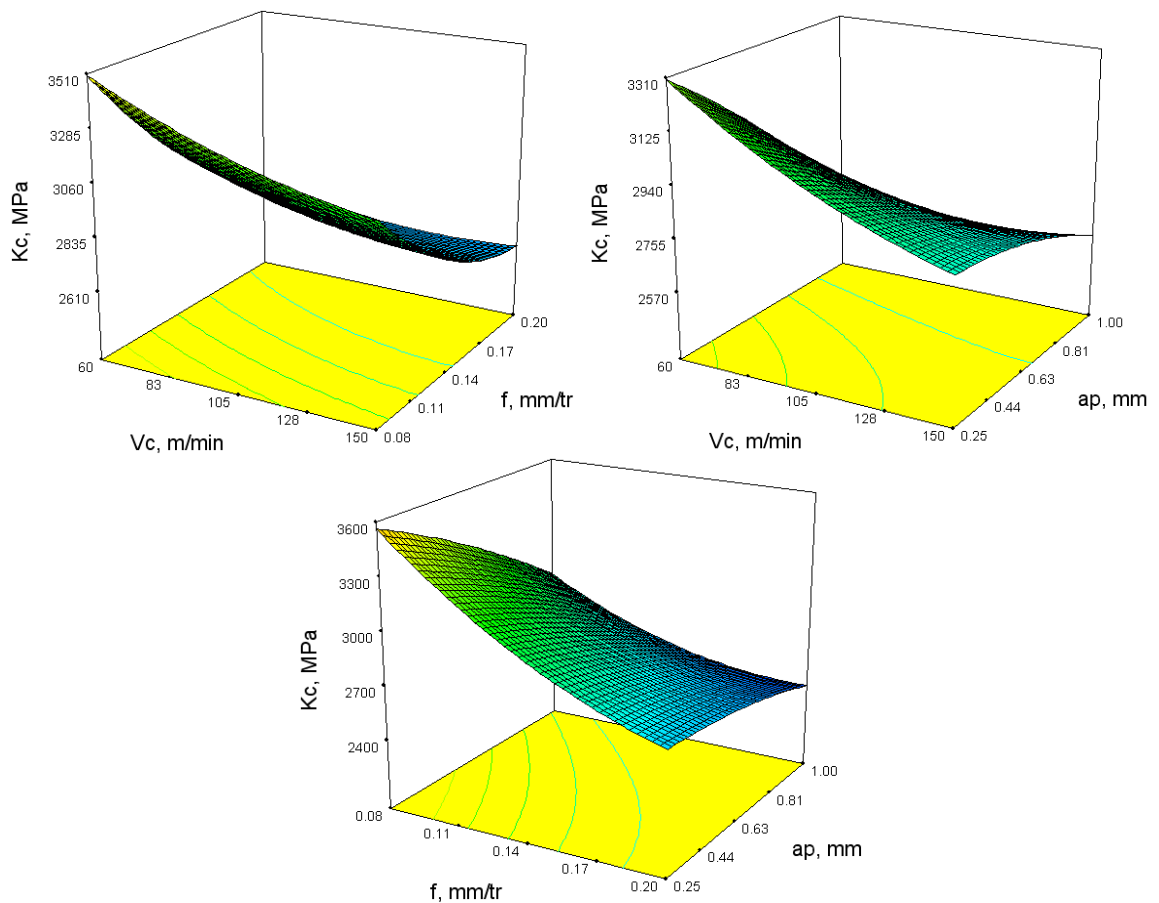
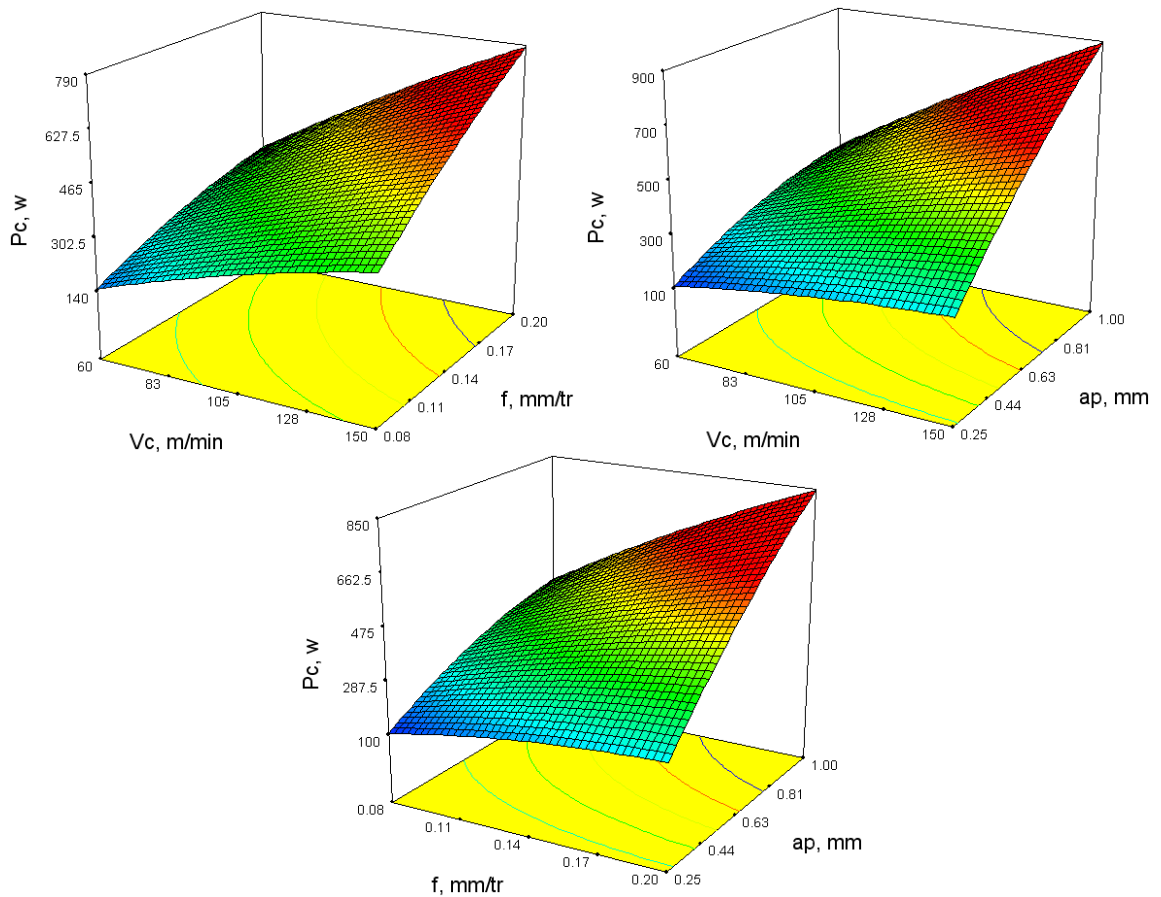


Figure IV-16 : Surface de réponse pour  $K_c$

Figure IV-17 : Surface de réponse pour  $P_c$ 

#### IV-5-4 Optimisation multi-objective des réponses

Dans cette étude, on a utilisé la méthode de la surface de réponse pour choisir les conditions de coupe optimales. En minimisant les différents paramètres de sortie (rugosité de la surface, effort de coupe, effort spécifique et la puissance de coupe). La méthode RSM nous a permis d'obtenir les paramètres de coupe optimaux qui sont la vitesse de coupe (60 m/min), l'avance (0,08 mm/tr) et la profondeur de passe (1 mm) tableau IV-14. Les valeurs optimisées de ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  et  $P_c$ ) sont (0,61  $\mu\text{m}$ , 230 N, 3012.63 MPa et 126.79w). Les résultats de l'optimisation pour les différents paramètres de sortie ont été présentés dans la figure IV-18.

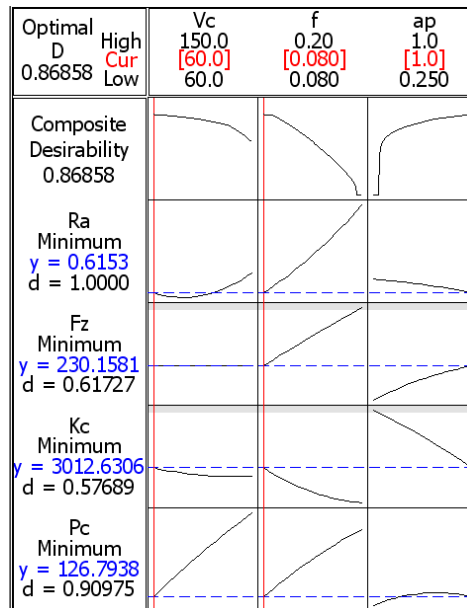
Figure IV-18 : Graphe d'optimisation pour ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  et  $P_c$ )

Tableau IV-14 : Optimisation de réponses

paramètres	Objectif	Conditions optimales			Valeurs		Désirabilité
		Vc, m/min	f, mm/tr	ap, mm	Mini	Maxi	
Ra, $\mu\text{m}$	Minimum				0.77	2.72	0.61
Fc, N	Minimum	60	0.08	1.00	77.44	476.47	230.16
Kc, MPa	Minimum				2382.35	3872	3012.63
Pc, w	Minimum				77.44	624.28	126.79

#### IV-5-5 Tests de confirmation

Pour effectuer les tests de confirmation pour la rugosité de la surface et l'effort de coupe afin de vérifier l'adéquation des modèles mathématiques obtenus qui sont donnés par les équations (IV-5) et (IV-6). Les paramètres de coupe utilisés dans les tests de confirmation ont été présentés dans le tableau IV-15. Le tableau IV-16 montre la comparaison entre les valeurs prédites par le modèle développé dans la présente étude (équations. (IV-5) et (IV-6)) avec les valeurs expérimentales.

Tableau IV-15 : Conditions de coupe utilisées pour les tests de confirmation

Test N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
T1	82.52	0.12	0.50
T2	116.23	0.12	0.50
T3	115	0.20	0.50
T4	115	0.12	0.75
T5	115	0.12	0.25

A partir de l'analyse du tableau IV-16, on peut noter que l'erreur de calcul de la rugosité de surface  $R_a$  a une valeur maximale de 15,00% et une valeur minimale de 0,95%. Pour l'effort de coupe  $F_c$  la valeur maximale est d'environ 8,23% et la valeur minimale est d'environ 0,16%.

Tableau IV-16 : Tests de confirmation pour la rugosité et l'effort de coupe

Test N°	Rugosité de la surface			Effort de coupe		
	Expérimentale	Prédit	Erreur (%)	Expérimentale	Prédit	Erreur (%)
T1	1.06	1.05	0.95	175.84	190.03	7.46
T2	1.05	1.20	12.5	179.08	179.38	0.16
T3	1.97	1.92	2.60	250.02	271.77	8.00
T4	1.24	1.15	7.82	256.28	257.51	0.47
T5	1.02	1.20	15.00	93.28	86.18	8.23

#### IV-6 Conclusion

En ce basant sur les résultats expérimentaux et l'analyse paramétrique, les points suivant peut être conclus :

Pour l'acier X2CrNi18-9,

- La vitesse de coupe a une influence significative sur l'état de la surface usinée. Il est a noté que pour des faibles vitesses de coupe nous remarquons un mauvais état de surface à cause de la présence de l'arête rapportée et ceci peut être expliqué par la ductilité élevée de l'acier inoxydable austénitique ;
- L'analyse a montré que l'avance est le facteur le plus influant sur la rugosité de la surface ;
- L'effort de coupe tangentiel est fortement affecté par la profondeur de passe ;
- L'optimisation de la réponse a déduit que les valeurs de (104.54m/min, 0.08mm/tr et 0.295mm) successivement de ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sont les paramètres optimums ;
- Les tests de confirmation ont indiqué que l'analyse présente une erreur maximale de 8.57% pour  $R_a$  et 11.02% pour  $F_c$ .

## **Chapitre V**

# **Modélisation mathématique de l'usure VB, la rugosité Ra et la tenue de l'outil par RSM**

### **V-1 Introduction**

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, et temps d'usinage) et les paramètres étudiés (la rugosité (Ra), l'usure en dépouille (VB) et la tenue de l'outil (T)). Pour faire une analyse de variance et pour déterminer les constantes des modèles mathématiques et le coefficient de corrélation de chaque modèle ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB » et aussi le logiciel « Design Expert ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité de surface, l'usure en dépouille et la tenue de l'outil. La détermination des modèles mathématiques est suivie par une optimisation des conditions de coupe. Une optimisation multi-objective de la rugosité et l'usure et une optimisation mono-objective de la tenue (T).

### **V-2 Modélisation de l'usure en dépouille et de la rugosité de la surface en fonction des paramètres d'usinage**

Le tableau V-1 présente les conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage), et les résultats expérimentaux correspondants à l'usure en dépouille (VB) et à la rugosité de surface (Ra). Ces résultats sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe (matrice de planification des expériences pour un plan  $N = 3^3$ ), lors du tournage de l'acier X2CrNi18-9 par un outil en Carbure revêtu [Ti(C, N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN]. L'analyse des résultats de ce tableau montre que la valeur minimale de l'usure en dépouille VB a été trouvée suivant les conditions de l'essai N° 1 c.-à-d. pour les conditions de coupe suivantes (280 m/min ; 0,08 mm/tr et 4 minutes). Mais la valeur minimale de la rugosité de surface (Ra) a été observée dans l'essai N° 10 c.-à-d. (330 m/min ; 0,08 mm/tr et 4 minutes). Les valeurs maximales de l'usure en dépouille (VB) et de la rugosité de surface (Ra) ont été observées aux essais N° 27 pour les conditions de coupe suivantes (400 m/min ; 0.14 mm/tr et 16 minutes).



**Tableau V-1** : Résultats de l'usure en dépouille (VB) et de la rugosité (Ra) en fonction des paramètres du régime de coupe et du temps d'usinage (plan complet  $N=3^3$ ).

N°	Facteurs			Réponses	
	Vc, m/min	f, mm/tr	t, min	Ra, $\mu\text{m}$	VB, mm
1	280	0.08	4	0.56	0.025
2	280	0.08	10	0.61	0.050
3	280	0.08	16	0.74	0.100
4	280	0.11	4	0.81	0.030
5	280	0.11	10	1.17	0.074
6	280	0.11	16	1.25	0.110
7	280	0.14	4	1.32	0.045
8	280	0.14	10	1.34	0.069
9	280	0.14	16	1.35	0.110
10	330	0.08	4	0.55	0.040
11	330	0.08	10	0.62	0.115
12	330	0.08	16	0.80	0.190
13	330	0.11	4	0.79	0.060
14	330	0.11	10	1.21	0.135
15	330	0.11	16	1.60	0.170
16	330	0.14	4	1.31	0.06
17	330	0.14	10	1.47	0.185
18	330	0.14	16	1.92	0.350
19	400	0.08	4	0.80	0.050
20	400	0.08	10	1.24	0.200
21	400	0.08	16	1.99	0.410
22	400	0.11	4	0.87	0.065
23	400	0.11	10	1.55	0.290
24	400	0.11	16	2.95	0.460
25	400	0.14	4	1.16	0.070
26	400	0.14	10	1.70	0.300
27	400	0.14	16	3.20	0.510

### V-2-1 Modélisation de la rugosité de surface Ra en fonction des paramètres d'usinage

#### V-2-1-1 Analyse de la variance

Les résultats de l'analyse de variance présentés dans le tableau V-2 montre que le temps d'usinage (t) a un impact important sur l'évolution de la rugosité Ra car son pourcentage de contribution est de 31,96%, il est suivi par l'avance avec une contribution de 23,25% et en dernier lieu par la vitesse de coupe avec une contribution de 19,84%. L'interaction (Vc  $\times$  t) et le produit (Vc<sup>2</sup>) ont aussi un effet significatif sur Ra avec des contributions de 17.15% et 1.53% successivement. Les autres termes de modèles peuvent être considérés comme non significatifs.

**Tableau V-2 : Résultats de l'analyse de variance pour Ra**

Source	df	SS	Ms	F-Value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	9	10,51	1,17	31,75	< 0,0001		Significatif
Vc	1	2,21	2,21	60,14	< 0,0001	19,84	Significatif
f	1	2,59	2,59	70,52	< 0,0001	23,25	Significatif
t	1	3,56	3,56	96,88	< 0,0001	31,96	Significatif
Vc×f	1	1,71E-03	1,71E-03	0,046	0,8319	0,02	Non significatif
Vc×t	1	1,91	1,91	51,85	< 0,0001	17,15	Significatif
f×t	1	0,094	0,094	2,55	0,129	0,84	Non significatif
Vc <sup>2</sup>	1	0,17	0,17	4,55	0,0479	1,53	Significatif
f <sup>2</sup>	1	0,055	0,055	1,49	0,2389	0,49	Non significatif
t <sup>2</sup>	1	0,086	0,086	2,33	0,1455	0,77	Non significatif
Residual	17	0,63	0,037			5,65	
Total	26	11,14				100,00	

### V-2-1-2 Equation de régression et surface de réponse

L'analyse de régression de Ra en fonction de Vc, f et t donne l'équation du modèle complet (V-1) avec un coefficient de corrélation ( $R^2 = 94.39 \%$ ).

$$Ra = 5.68 - 0.03Vc + 33f - 0.4t - 0.06Vc \times f + 0.001Vc \times t + 0.49f \times t + 4E-5Vc^2 - 106f^2 + 0.003t^2$$

(V-1)

La surface de réponse estimée pour la rugosité de surface par rapport aux paramètres de coupe (Vc, f et t) présentées dans la figure V-1 montre que la vitesse de coupe a une influence sur la rugosité de la surface usinée. On a enregistré des mauvais états de surface à des faibles vitesses de coupe qui peut être expliqué par la présence de l'arête rapportée (Figure V-2) dû à la ductilité élevée de l'acier inoxydable austénitique. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe les valeurs de rugosité diminuent jusqu'à une valeur minimale au-delà elles augmentent. L'augmentation de la rugosité de surface à des vitesses de coupe supérieures à 340 m/min peut être expliqué par la présence des micro-soudures sur la surface usinée en raison de la forte chaleur à la zone de coupe qui conduit au détachement de l'arête rapportée et adhère sur la surface usinée comme le montre la Figure V-2. En plus, l'augmentation de la vitesse de coupe mène à une augmentation de l'usure en dépouille de l'outil provoquant un mauvais état de surface. En revanche, la rugosité (Ra) tend à augmenter considérablement avec l'augmentation de l'avance (f) et le temps de coupe (t). La surface en 3D qui illustre l'évolution de Ra en fonction de l'interaction (Vcxt) montre que pour un court temps de coupe égal à (4min) la variation de Ra est presque stable, et pour un temps de coupe égal à (16min), on a remarqué une progression sévère de la qualité de surface.

Nous concluons aussi que le temps de coupe est le paramètre le plus prépondérant, suivi par l'avance et en dernier de la vitesse de coupe.

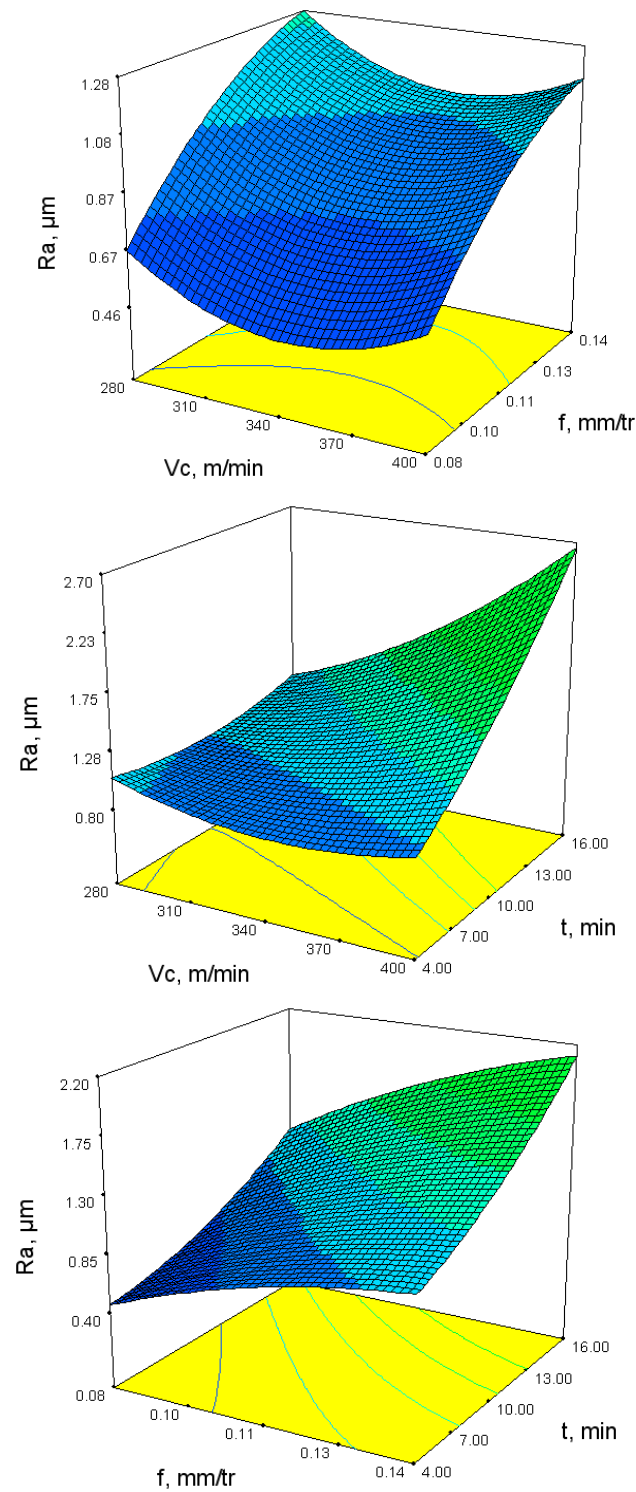
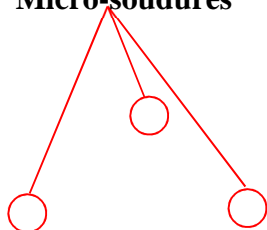
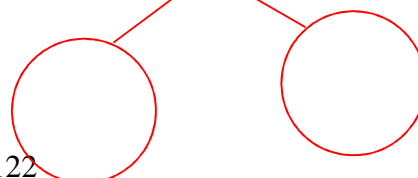


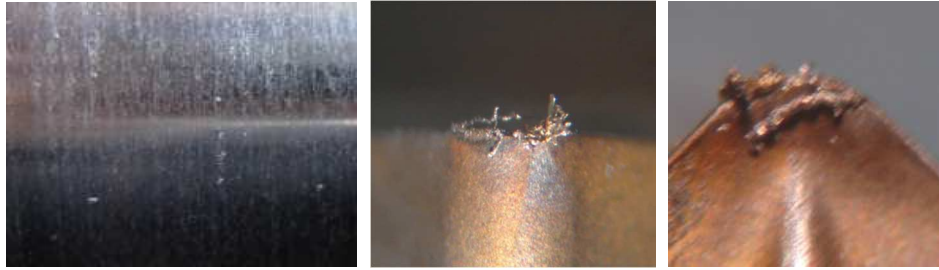
Figure V-1 :  $R_a$  en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $t$

**Micro-soudures**



**Arête rapportée**

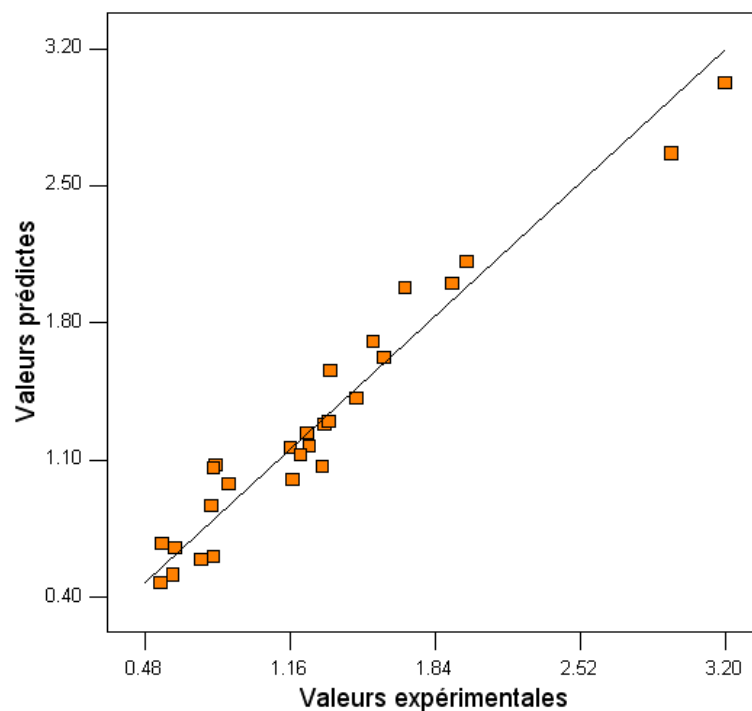




**Figure V-2 :** Micro-soudures adhérentes sur la surface usinée et arête rapportée collée sur la plaquette de coupe

### V-2-1-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la rugosité Ra et celles estimées par les modèles mathématiques obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la figure (V-3). D'après cette figure, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.



**Figure V-3 :** Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées pour la rugosité Ra

## V-2-2 Modélisation de l'usure en dépouille VB en fonction des paramètres de coupe

### V-2-2-1 Analyse de la variance

En analysant les résultats de la variance de l'usure en dépouille présentés dans le tableau V-4, on peut dire que le temps d'usinage est le facteur le plus influant sur VB par une contribution

de (46,18%), suivi par la vitesse de coupe qui présente une contribution de 33,60% et en dernier lieu l'avance avec une contribution de 3.12%. L'analyse de la variance montre aussi que le terme  $V_c \times t$  a un effet significatif sur l'usure VB, il présente une contribution de 16.21%.

**Tableau V-3 : Résultats de l'analyse de variance pour l'usure VB**

Source	DL	SS	Ms	F-value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	9	0,487673	0,054186	65,45893	< 0.0001		Significatif
$V_c$	1	0,168587	0,168587	203,6604	< 0.0001	33,60	Significatif
$f$	1	0,015655	0,015655	18,91225	0.0004	3,12	Significatif
$t$	1	0,231715	0,231715	279,9219	< 0.0001	46,18	Significatif
$V_c \times f$	1	0,002066	0,002066	2,495334	0.1326	0,41	Non significatif
$V_c \times t$	1	0,081335	0,081335	98,25617	< 0.0001	16,21	Significatif
$f \times t$	1	0,003675	0,003675	4,439562	0.0503	0,73	Significatif
$V_c^2$	1	8,4E-05	8,4E-05	0,101493	0.7539	0,02	Non significatif
$f^2$	1	0,000153	0,000153	0,185256	0.6723	0,03	Non significatif
$t^2$	1	6,69E-06	6,69E-06	0,008076	0.9294	0,00	Non significatif
Residual	17	0,014072	0,000828				
Total	26	0,501745					

### V-2-2-2 Equation de régression et surface de réponse

L'analyse de régression de VB en fonction de  $V_c$ ,  $f$  et  $t$  donne l'équation du modèle complet (équation V-2) avec un coefficient de corrélation ( $R^2= 97.20\%$ ).

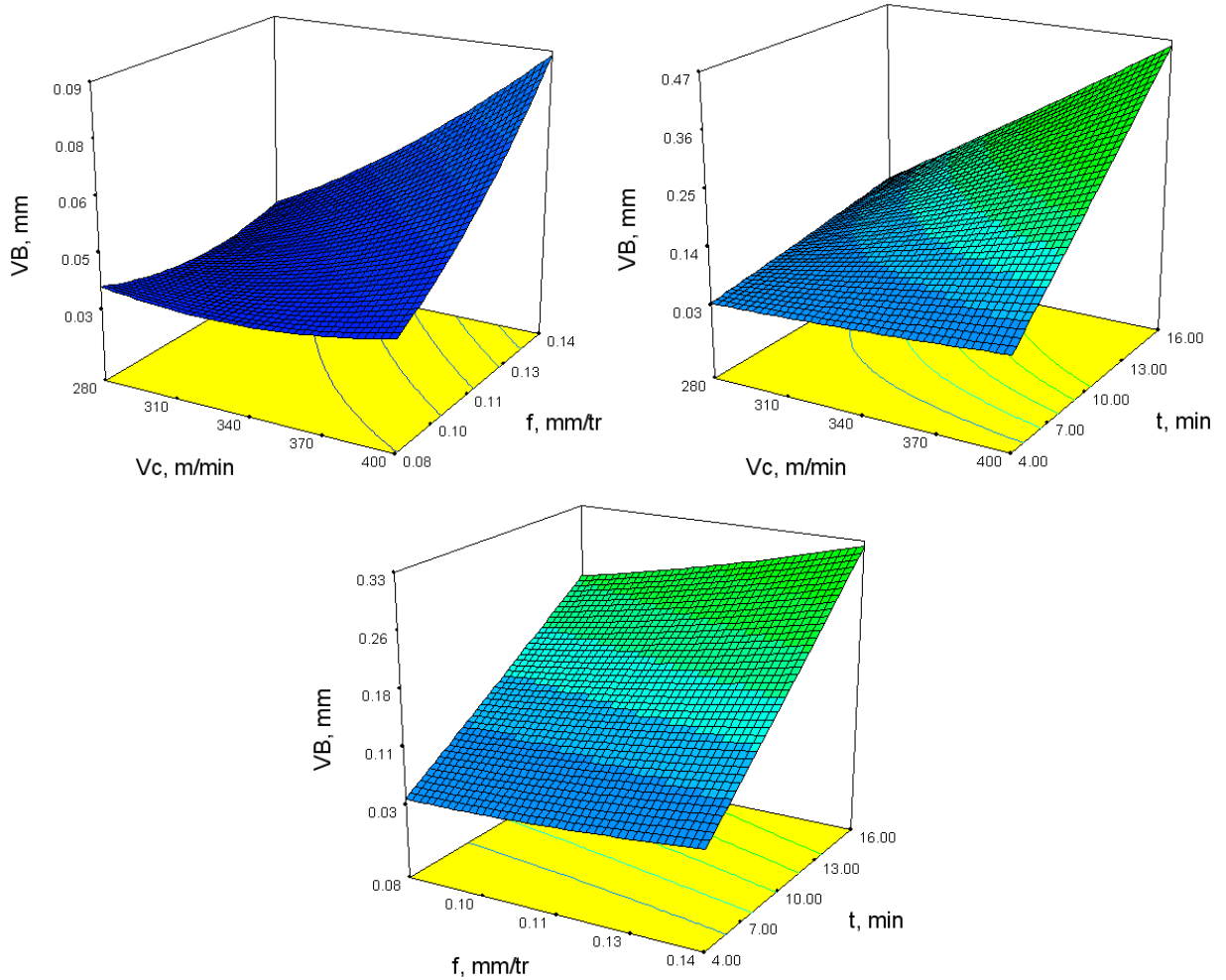
$$VB = 0.65 - 0.002V_c - 3.6f - 0.06t + 1.07 \cdot 10^{-6} V_c^2 + 0.007 V_c \times f + 0.0002 V_c \times t + 5.61f \times f + 0.09 f \times t + 2 \times 10^{-5} t^2 \quad (V-2)$$

2)

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et le temps d'usinage) sur l'usure en dépouille (VB) on a tracé des graphes sous forme d'une surface 3D (figure V-4). L'analyse des courbes montre que pour des basses valeurs de temps d'usinage l'évolution de l'usure en dépouille avec la vitesse de coupe est presque stable. En revanche, on a remarqué une augmentation brusque des valeurs de l'usure VB avec l'augmentation de la vitesse de coupe. L'augmentation de la vitesse de coupe conduit généralement à une augmentation de l'usure en dépouille ceci est dû à l'élévation de la température dans la zone de coupe due au coefficient élevé du frottement et à la faible conductivité thermique de l'acier X2CrNi18-9.

Il est clair que l'augmentation de l'usure en dépouille (VB) est liée directement à l'augmentation du temps d'usinage (t) ce qui résulte une augmentation de la durée de contact de l'outil avec la pièce et le copeau et à cause de coefficient de frottement très élevé de l'acier X2CrNi18-9 il y a une élévation sévère de la chaleur dans la zone de coupe qui conduit à la défaillance rapide du bec de l'outil.

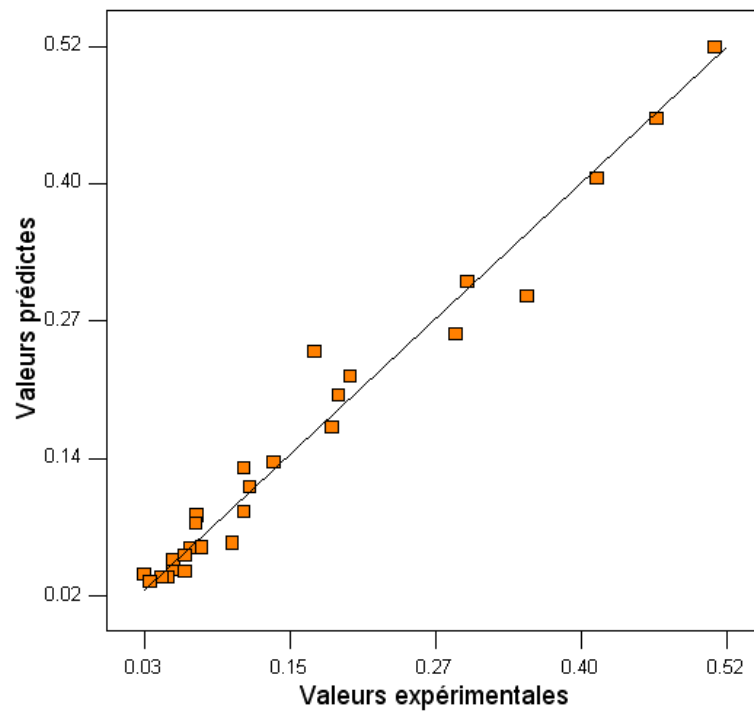
Les résultats de ANOVA montrent que l'avance par tour n'affecte pas considérablement l'usure en dépouille et cette remarque est bien illustrée sur la figure V-4.



**Figure V-4 :** VB en fonction de Vc, f et t

### V-2-2-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de l'usure en dépouille (VB) et celles estimées par les modèles mathématiques obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la figure (V-5). D'après cette figure, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.



**Figure V-5 :** Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées pour l'usure VB

### V-3 Optimisation multi-objective des conditions de coupe pour VB et Ra

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (RSM) a été étudié à trois niveaux différents. Le choix de trois niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- minimiser la rugosité de la surface Ra.
- minimiser l'usure en dépouille VB.

Le tableau V-4 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de l'acier X2CrNi18-9 avec un carbure revêtu, pour l'usure en dépouille (VB) et pour la rugosité (Ra). Pour l'usure VB, la valeur supérieure a été limitée à VB=0.3mm, donc les valeurs supérieures à 0.3mm ne sont pas pris en considération durant l'optimisation.

**Tableau V-4 : Conditions d'optimisation**

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, (m/min)	Gamme	280	400
Avance, (mm/tr)	Gamme	0,08	0,14
Temps d'usinage, (min)	Gamme	4.00	16.00
Usure VB (mm)	Mini	0.025	0.30
Rugosité Ra ( $\mu\text{m}$ )	Mini	0.55	3.20

Le tableau V-5 présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface (RSM) de la rugosité (Ra) et de l'usure en dépouille (VB). Les paramètres de coupe optimaux obtenus sont : la plage des vitesses de coupe est (317-325) m/min, l'avance = 0,08 mm/tr et le temps d'usinage = 4minutes.

**Tableau V-5 : Optimisation par RSM de la rugosité et de l'usure**

Solution N°	Vc, m/min	f, mm/tr	t, min	Ra, $\mu\text{m}$	VB, mm	Désirabilité individuelle	Remarks
1	319.28	0.08	4.00	0.549918	0.0369099	0.978	<u>Selected</u>
2	317.80	0.08	4.00	0.549864	0.0369145	0.978	
3	318.61	0.08	4.00	0.549912	0.036917	0.978	
4	320.43	0.08	4.00	0.540874	0.0369382	0.978	
5	321.18	0.08	4.00	0.533516	0.0369609	0.978	
6	324.46	0.08	4.00	0.535949	0.0369873	0.978	
7	318.94	0.08	4.00	0.526607	0.0369981	0.978	
8	325.51	0.08	4.00	0.548811	0.0370093	0.978	

#### V-4 Modélisation de la tenue (T) en fonction des paramètres d'usinage

Le tableau V-6 présente les conditions de coupe (la vitesse de coupe et l'avance par tour), et les résultats expérimentaux correspondants à la tenue (T) pour un plan factoriel complet  $N=3^2$ .

**Tableau V-6 : Résultats de la tenue (T) en fonction des paramètres du régime de coupe (plan complet  $N=3^2$ ).**

Essai N°	Facteurs		Réponse
	Vc, m/min	f, mm/tr	T, min
1	280	0.08	44



2	280	0.11	42
3	280	0.14	39
4	330	0.08	27
5	330	0.11	20
6	330	0.14	15
7	400	0.08	15
8	400	0.11	11
9	400	0.14	10

#### V-4-1 Analyse de la variance pour la tenue (T)

Le tableau V-7 présente l'analyse de variance pour le critère (T). On remarque que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a un impact important sur l'évolution de la tenue (T) car son pourcentage de contribution est de 88,27%, suivi par l'avance par une contribution de 5.34% et le terme  $V_c^2$  présente une contribution de 9.89%. Par contre les termes ( $V_c \times f$  et  $f^2$ ) n'ont pas un effet significatif. Il est a noté aussi que la vitesse de coupe est le facteur le plus prépondérant car sa contribution est 88,27%.

**Tableau V-7** : Analyse de la variance (ANOVA) pour la tenue (T)

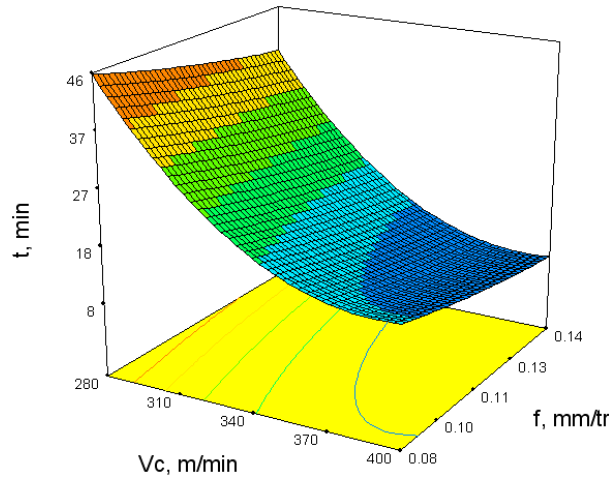
Source	ddl	SCE	CM	F-value	P-value	Cont. %	Remarque
Model	5	1477,928	295,5855	50,30407	0.0043		Significatif
$V_c$	1	1320,167	1320,167	224,6719	0.0006	88,27	Significatif
$f$	1	79,83021	79,83021	13,58586	0.0346	5,34	Significatif
$V_c \times f$	1	0,149847	0,149847	0,025502	0.8833	0,01	Non Significatif
$V_c^2$	1	147,8914	147,8914	25,16883	0.0153	9,89	Significatif
$f^2$	1	0,888889	0,888889	0,151275	0.7233	0,06	Not Significatif
Residual	3	17,62793	5,875977			1.17	
Total	8	1495,556				100.00	

#### V-4-2 Equation de régression et surface de réponse de la tenue (T)

L'analyse de régression de (T) en fonction de  $V_c$  et  $f$  donne l'équation du modèle complet (équation V-3) avec un coefficient de corrélation ( $R^2 = 98.82\%$ ).

$$T = 413,26 - 1,94V_c - 321,22 f + 0,0024V_c^2 + 0,11V_c \times f + 740,741f^2 \quad (\text{V-3})$$

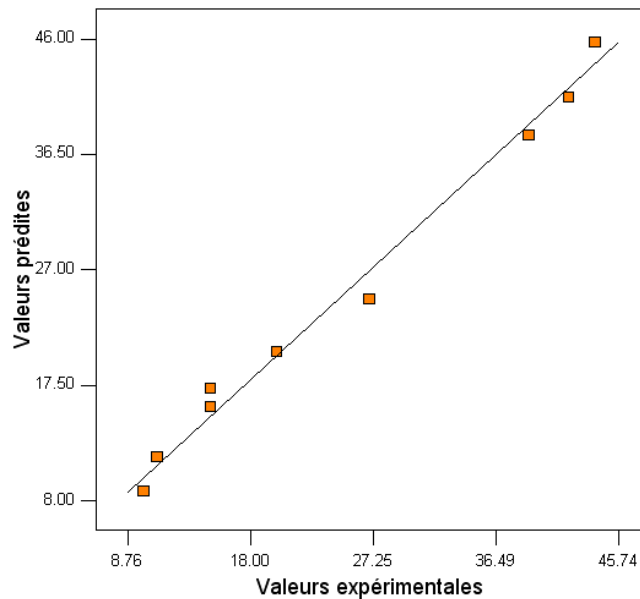
La figure V-6 présente la surface de réponse en (3D) qui montre l'évolution de la tenue (T) en fonction de la vitesse de coupe et l'avance par tour. Les résultats présentés sur cette figure montrent que la tenue (T) tend à diminuer considérablement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. En plus l'augmentation de l'avance conduit à une légère diminution de la tenue.



**Figure V-6 :** La tenue en fonction de  $V_c, f$

#### V-4-3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la tenue (T) et celles estimées par les modèles mathématiques réduits (quadratique) obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR), est présentée graphiquement sur la figure (V-7). D'après cette figure, les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.



**Figure V-7 :** Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées pour la tenue (T)

#### V-5 Optimisation des conditions de coupe pour la tenue (T)

L'optimisation des réponses par (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait le objectif de maximiser la tenue de l'outil.

Le tableau V-8 présente les conditions d'optimisation des paramètres de coupe lors de tournage de l'acier AISI 340 avec Carbure revêtu Ti(C, N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN, sur la tenue de l'outil

**Tableau V-8 :** conditions d'optimisation

Conditions	Objectifs	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe, (m/min)	Gamme	280	400
Avance, $f$ (mm/tr)	Gamme	0,08	0,14
la tenue $T$ (min)	Max	10	44

Les paramètres de coupe optimaux obtenus en utilisant le logiciel «Design Expert 8» sont présentés dans le tableau (V-9).

Le tableau V-9 présente les résultats de l'optimisation de la tenue ( $T$ ) par la méthodologie de surface de réponse. Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe d'environ 280 m/min, l'avance de (0.08 à 0.09) mm/tr et un temps de coupe d'environ 45 min.

**Tableau V-9:** Optimisation par MSR de la tenue (T)

<i>Solution</i>	<i>V<sub>c</sub></i>	<i>f</i>	<i>T</i>	Désirabilité individuelle	Remarques
<i>N°</i>	(m/min)	(mm/tr)	(min)		
1	280.66	0.09	44.5209	1.000	<u>Selected</u>
2	280.52	0.09	44.2427	1.000	
3	280.33	0.09	44.204	1.000	
4	280.00	0.08	45.7375	1.000	
5	280.15	0.08	45.2762	1.000	
6	281.28	0.08	44.8579	1.000	
7	280.22	0.08	45.3091	1.000	
8	280.11	0.09	44.0664	1.000	

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale. Il est à noter que la désirabilité globale correspond aux désirabilités de paramètres de critères d'optimisation (T).

## V-6 Conclusions

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

- La hausse du temps d'usinage et la vitesse de coupe conduisent à l'augmentation de l'usure en dépouille ;
- On a noté que la rugosité est influencée considérablement par le temps de coupe, son pourcentage de contribution est de 31,96%. Suivie par l'avance avec une contribution de 23,25% ;
- L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à l'endommagement du bec de l'outil à cause de l'usure en dépouille. Ce qui mène à l'élévation des valeurs de la rugosité ;
- Le temps d'usinage est le plus important paramètre intervenant dans le processus de la coupe. Il favorise l'augmentation de l'usure en dépouille de l'outil ce qui induit la dégradation de la surface usinée ;
- la vitesse de coupe a une influence plus significative que l'avance, sur la tenue (T) de l'outil en GC2015 ;
- Les plages des conditions de coupe optimales adoptées sont:  $V_c=(317-325)$  m/min,  $f=0,08$ mm/tr et  $t=4$ minutes pour la rugosité de la surface et l'usure en dépouille, et  $V_c=280,66$ m/min,  $f=(de\ 0,8\ à\ 0,9)$  mm/tr pour la tenue (T).

## **Chapitre VI**

# **Utilisation de l'approche ANN pour la modélisation des paramètres technologiques d'usinage**

## **VI-1 Introduction**

Aujourd'hui, on retrouve les réseaux de neurones solidement implantés dans diverses industries : dans les milieux financiers pour la prédiction des fluctuations de marché ; dans le domaine bancaire pour la détection de fraudes sur les cartes de crédit et le calcul de cotes de crédit ; en aéronautique pour la programmation de pilotes automatiques ; etc. Les applications sont nombreuses et partagent toutes un point commun essentiel à l'utilité des réseaux de neurones : les processus pour lesquels on désire émettre des prédictions comportent de nombreuses variables explicatives et surtout, il existe possiblement des dépendances non-linéaires de haut niveau entre ces variables qui, si elles sont découvertes et exploitées, peuvent servir à l'amélioration de la prédiction du processus. L'avantage fondamental des réseaux de neurones par rapport aux modèles statistiques traditionnels réside dans le fait qu'ils permettent d'automatiser la découverte des dépendances les plus importantes du point de vue de la prédiction du processus.

Ce chapitre est subdivisé en deux parties. La première partie consiste à l'utilisation des réseaux de neurones artificiels (ANN) pour aboutir aux modèles qui traduisent l'influence de la vitesse de coupe, l'avance et le temps de coupe sur les différents phénomènes étudiés tels que (VB et Ra) et en même temps connaître l'efficacité de cette méthode en la comparant avec la méthode de la surface de réponse (RSM). La seconde partie traite la modélisation de l'effort de coupe tangentiel et la rugosité de surface des deux aciers utilisés par la méthode des ANN en se basant sur un plan d'expérience de Taguchi de 16 essais.

## **VI-2 Réseau de neurones artificiels**

Un réseau de neurones artificiels (figure VI-1) est un outil d'analyse statistique permettant de construire un modèle de comportement à partir de données qui sont des exemples de ce comportement. Un réseau de neurones est constitué d'un graphe pondéré orienté dont les noeuds symbolisent les neurones. Ces neurones possèdent une fonction d'activation qui permet d'influencer les autres neurones du réseau. Les connexions entre les neurones, que l'on nomme liens synaptiques, propagent l'activité des neurones avec une pondération caractéristique de la connexion. On appelle poids synaptique la pondération des liens synaptiques.

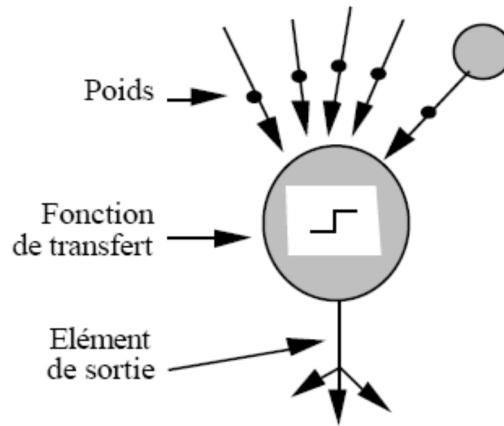


Figure VI-1 : Réseau de neurones artificiels

### VI-2-1 Calcul de la valeur prédite

Le calcul de la valeur prédite par un réseau de neurones se compose de quelques étapes simples. Premièrement, on calcule une série de combinaisons linéaires des variables explicatives :

$$v_i = \alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \quad \text{VI-1}$$

Où  $x_j$  est la  $j^{\text{ème}}$  de  $n$  variables explicatives et  $\alpha_{i,0}$  et  $\alpha_{i,j}$  sont les coefficients de la  $i^{\text{ème}}$  combinaison linéaire. Le résultat de la combinaison linéaire,  $v_i$ , représente une projection dans une direction de l'espace des variables explicatives. Chacune de ces projections combine de l'information provenant potentiellement de plusieurs variables.

La seconde étape consiste à appliquer une transformation nonlinéaire à chacune des combinaisons linéaires afin d'obtenir les valeurs de ce que l'on appelle les unités cachées ou neurones qui forment ensemble la couche cachée. Typiquement, on utilise la tangente hyperbolique pour effectuer la transformation non-linéaire :

$$h_i = \tanh(v_i) = \frac{e^{v_i} - e^{-v_i}}{e^{v_i} + e^{-v_i}} \quad \text{VI-2}$$

Où  $h_i$  est la  $i^{\text{ème}}$  unité cachée. L'utilisation d'une telle fonction de transfert avec une expansion infinie dans ses termes joue un rôle fondamental dans la capacité d'un réseau de neurones de capter les dépendances de haut niveau entre les variables explicatives.

Finalement, les unités cachées sont recombinaisonnées linéairement afin de calculer la valeur prédite par le réseau de neurones :

$$p(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i h_i \quad \text{VI-3}$$

où  $\vec{p}(x)$  est la valeur prédite par le réseau de neurones,  $n_h$  est le nombre d'unités cachées du réseau et  $\beta_0$  et  $\beta_i$  sont les coefficients de la combinaison linéaire. Les  $n$  variables explicatives sont représentées sous forme vectorielle par  $\vec{x}$ . On peut résumer les étapes du calcul en une seule équation :

$$\vec{p}(x) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i \tanh \left( \alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \right) \quad \text{VI-4}$$

Donc, la visualisation de la structure d'un réseau de neurones est illustrée dans la Figure VI-2.

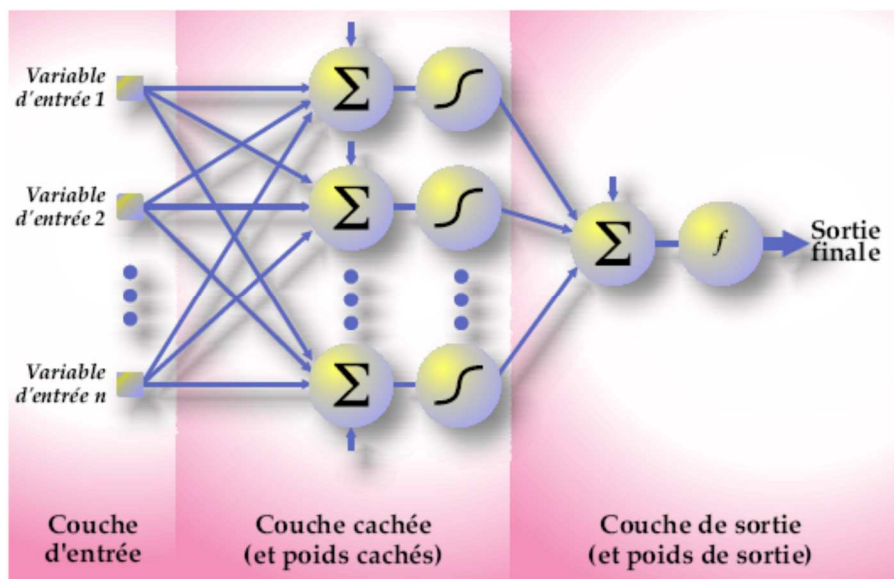


Figure VI-2 : Topologie d'un réseau de neurones

### VI-2-2 Les neurones formels

Un "neurone formel" (ou simplement "neurone") est une fonction algébrique non linéaire et bornée, dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Les variables de cette fonction sont habituellement appelées "entrées" du neurone, et la valeur de la fonction est appelée sa "sortie" [61].

Un neurone est donc avant tout un opérateur mathématique, dont on peut calculer la valeur numérique par quelques lignes de logiciel. On a pris l'habitude de représenter graphiquement un neurone comme indiqué sur la figure VI-3.



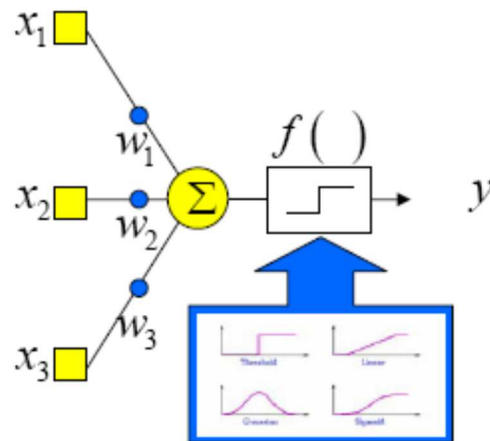


Figure VI-3 : Représentation d'un neurone formel [61].

### VI-2-3 Différentes fonctions de transfert

Les différents types de neurones se distinguent donc par la nature  $f$  de leur fonction de transfert (Figure VI.4). Les principaux types sont :

- seuil  $f(x) = 1_{[0, +\infty[}(x)$ ,
- linéaire  $f$  est la fonction identité,
- sigmoïde  $f(x) = 1 / (1 + e^x)$ ,
- tangente hyperbolique (sigmoïde)  $f(x) = (2 / (1 + e^{-2x})) - 1$ ,
- stochastiques  $f(x) = 1$  avec la probabilité  $1 / (1 + e^{-x/H})$ , 0 sinon (H intervient comme une température dans un algorithme de recuit simulé),

Les modèles linéaires et sigmoïdaux sont bien adaptés aux algorithmes d'apprentissage impliquant une rétro-propagation du gradient car leur fonction d'activation est différentiable ; ce sont les plus utilisés [63].

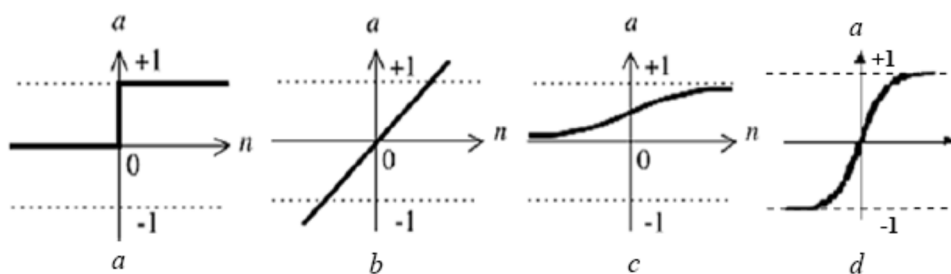


Figure VI-4: Différentes fonction de transfert de réseau de neurones [63].

### VI-2-4 Perceptron simple

Le perceptron simple est le réseau le plus simple qui existe puisqu'il se compose d'un seul neurone. On peut, par exemple, utiliser un tel réseau pour une tâche de classification d'un seul caractère. Pour classifier les 26 caractères de l'alphabet, on devrait alors combiner 26 perceptrons simples. Parce que nous considérons un seul neurone à la fois, nous n'utiliserons pas d'index pour le neurone de sortie [64].

### VI-2-5 Perceptron multicouches

Les perceptrons multicouches sont organisés en couche de neurones. Les couches situées entre les nœuds d'entrée et les nœuds de sortie sont appelées « couches cachées ». Les perceptrons multicouches sont plus flexibles que les perceptrons simples et peuvent résoudre des problèmes qui ne sont pas linéairement séparables. La règle d'apprentissage la plus importante pour ces réseaux est l'algorithme de rétro-propagation [64].

### VI-2-6 Algorithme de rétro-propagation

L'algorithme de rétro-propagation est une descente de gradient appliquée à des perceptrons multicouches. Le but reste donc le même : minimiser la fonction d'erreur [64].

### VI-2-7 Apprentissage

Une fois que les poids et les biais du réseau sont aléatoirement initialisés, le réseau est prêt pour l'apprentissage. Ce processus exige un ensemble de données approprié au réseau qui sont les entrées P et les cibles C de sorties. Pendant l'apprentissage les poids et les biais du réseau sont itérativement ajustés pour minimiser la fonction de performance (Figure VI.5). En général, la fonction de performance utilisée dans l'apprentissage des modèles à réseau de neurone est la moyenne des carrés des erreurs entre les valeurs cibles et les valeurs obtenues par le réseau.

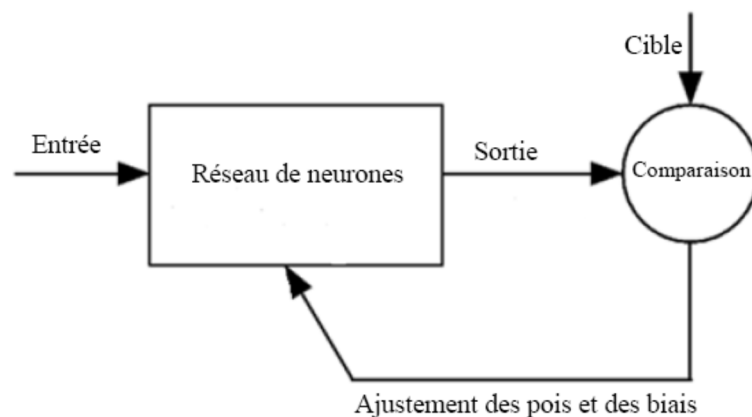


Figure VI-5 : Processus d'apprentissage du réseau de neurones

## VI-3 Modélisation de l'usure en dépouille et la rugosité de la surface par ANN

### VI-3-1 Modélisation de l'usure en dépouille VB

Pour la modélisation par la méthode ANN de l'usure en dépouille lors de l'usinage à sec de l'acier X2CrNi18-9, on a utilisé un perceptron multicouche. Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau VI.1 sont utilisés pour faire l'analyse. Le plan expérimental est composé de 27 essais, dont 24 essais sont employés pour l'apprentissage du réseau et 3 essais sont choisis arbitrairement pour tester la validité du réseau. L'apprentissage du réseau de neurones est fait par l'algorithme de rétro-propagation qui est basé sur le gradient descendant.

Plusieurs structures de réseau ont été testées, nous nous limitons à présenter seulement la structure qui a donnée de meilleurs résultats qui est 3-5-1 (Figure VI.6). Cette dernière est composée d'une couche d'entrée à 3 noeuds qui corresponde au nombre de paramètres de coupe, une couche cachée à 5 noeuds ayant une fonction de transfert tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 noeud ayant une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 10 est utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau et l'enregistrement de différents résultats obtenus de l'ANN tels que le modèle mathématique et les coefficients de corrélation.

Tableau VI-1 : Résultats expérimentaux de VB

N°	Facteurs			VB, mm
	Vc, m/min	f, mm/tr	t, min	
1	280	0.08	4	0.025
2	280	0.08	10	0.050
3	280	0.08	16	0.100
4	280	0.11	4	0.030
5	280	0.11	10	0.074
6	280	0.11	16	0.110
7	280	0.14	4	0.045
8	280	0.14	10	0.069
9	280	0.14	16	0.110
10	330	0.08	4	0.040
11	330	0.08	10	0.115
12	330	0.08	16	0.190
13	330	0.11	4	0.060
14	330	0.11	10	0.135
15	330	0.11	16	0.170
16	330	0.14	4	0.06
17	330	0.14	10	0.185
18	330	0.14	16	0.350
19	400	0.08	4	0.050
20	400	0.08	10	0.200
21	400	0.08	16	0.410
22	400	0.11	4	0.065
23	400	0.11	10	0.290
24	400	0.11	16	0.460
25	400	0.14	4	0.070
26	400	0.14	10	0.300
27	400	0.14	16	0.510

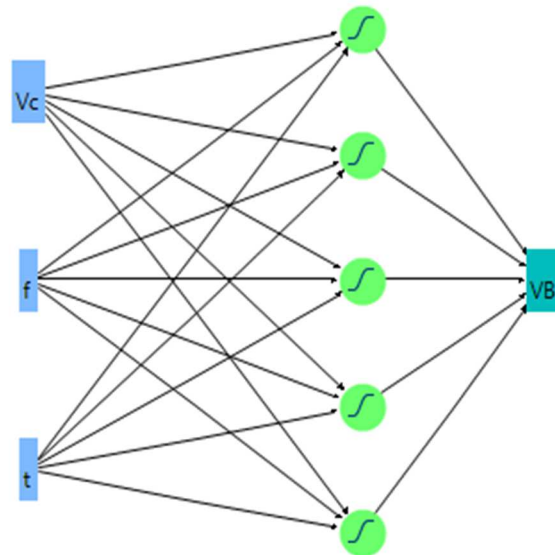


Figure V-6 : Architecture choisie pour l'usure en dépouille

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronal de l'usure en dépouille (VB) sont les suivant :

Pour la couche cachée

$$H1 = \tanh (0.5*(-0.025*Vc - 30.876*f - 0.087*t + 14.152));$$

$$H2 = \tanh (0.5*(-0.029*Vc - 24.070*f + 0.076*t + 15.132));$$

$$H3 = \tanh (0.5*(-0.015*Vc + 186.94*f - 0.366*t - 9.299));$$

$$H4 = \tanh (0.5*(-0.076*Vc - 115.51*f - 0.346*t + 41.748));$$

$$H5 = \tanh (0.5*(-0.004*Vc + 61.838*f - 0.111*t - 2.599));$$

Pour la couche de sortie

$$VB = -0.525*H1 + 0.562*H2 + 0.068*H3 + 0.064*H4 - 0.165*H5 - 0.027; \quad (VI-5)$$

Le modèle proposé donne un coefficient de corrélation de 99.83 % pour l'apprentissage et pour la validation le  $R^2$  est de 99.94 % (tableau VI-2).

Tableau VI-2 : Valeurs statistiques de l'analyse ANN de VB

	Apprentissage	Validation
R carré	0,9983	0,9994
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0051	0,0039
Écart absolu moyen	0,0042	0,0023
Nombre d'essais	24	3

La figure VI-7 présente une comparaison entre les résultats expérimentaux et celles prédites à l'aide du modèle trouvé par l'analyse ANN. En analysant cette figure, nous pouvons remarquer que les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et estimées sont très proche à la ligne moyenne ce qui prouve l'efficacité du modèle soit pour les valeur destinées à l'apprentissage ou celles destinées pour la validation du modèle.

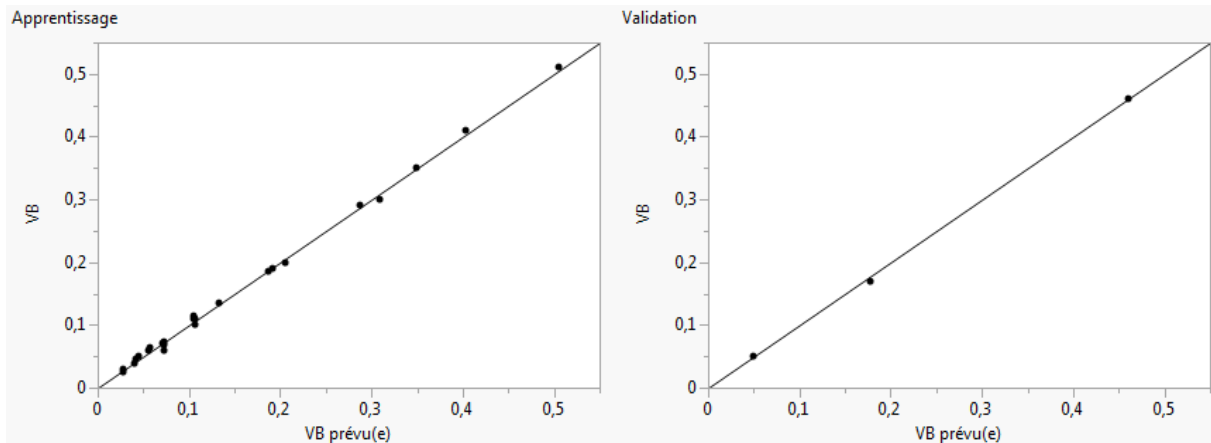


Figure VI-7 : Comparaison entre valeurs expérimentales et pridites pour l'usure en dépouille

VB

L'évolution de l'usure en dépouille en fonction de différentes conditions de coupe est illustrée dans la figure VI-8. Cette dernière est tracée à partir du modèle et on peut conclure que l'usure VB augmente avec l'augmentation de toutes les variables de coupe ( $V_c$ ,  $f$  et  $t$ ).

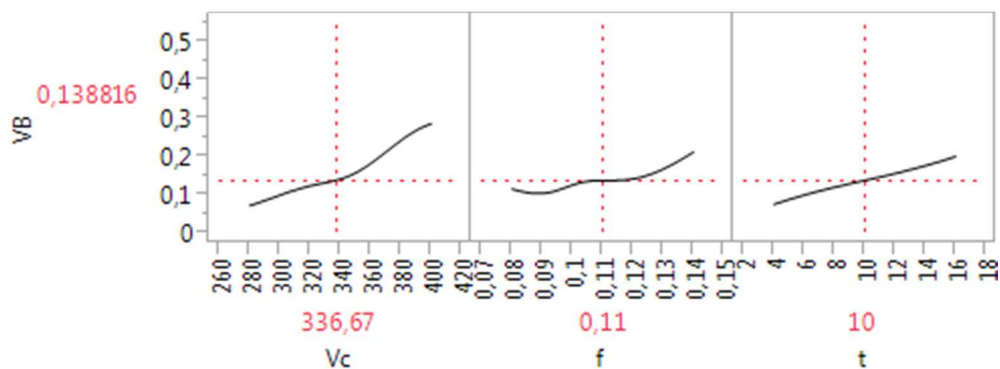


Figure VI-8 : L'évolution de l'usure en dépouille en fonction de paramètres de coupe

### VI-3-2 Modélisation de la rugosité de la surface $R_a$

Les mêmes étapes sont réalisées pour analyser l'évolution de la rugosité  $R_a$  en fonction de ( $V_c$ ,  $f$  et  $t$ ) pendant l'usinage de l'acier X2CrNi18-9 par la méthode de réseau de neurones artificiels. Les conditions de coupe utilisées et les résultats expérimentaux sont présentés dans le tableau VI-3. L'architecture choisie pour l'analyse ANN est illustrée dans la figure VI-9.

Tableau VI-3 : Résultats expérimentaux de Ra

N°	Facteurs			Ra μm
	Vc m/min	f, mm/tr	t, min	
1	280	0.08	4	0.56
2	280	0.08	10	0.61
3	280	0.08	16	0.74
4	280	0.11	4	0.81
5	280	0.11	10	1.17
6	280	0.11	16	1.25
7	280	0.14	4	1.32
8	280	0.14	10	1.34
9	280	0.14	16	1.35
10	330	0.08	4	0.55
11	330	0.08	10	0.62
12	330	0.08	16	0.80
13	330	0.11	4	0.79
14	330	0.11	10	1.21
15	330	0.11	16	1.60
16	330	0.14	4	1.31
17	330	0.14	10	1.47
18	330	0.14	16	1.92
19	400	0.08	4	0.80
20	400	0.08	10	1.24
21	400	0.08	16	1.99
22	400	0.11	4	0.87
23	400	0.11	10	1.55
24	400	0.11	16	2.95
25	400	0.14	4	1.16
26	400	0.14	10	1.70
27	400	0.14	16	3.20

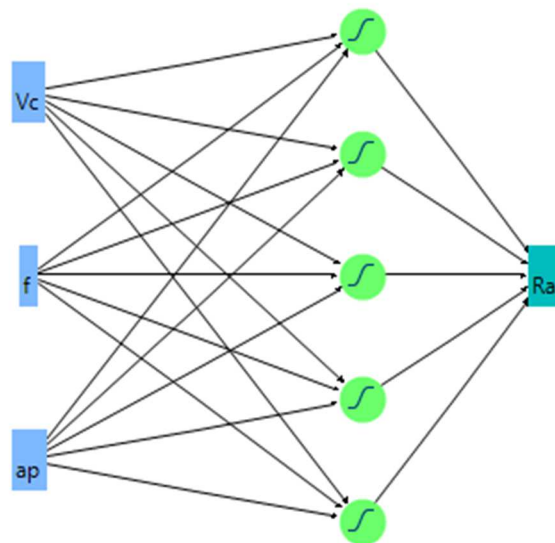


Figure V-9 : Architecture choisie pour la rugosité Ra

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronal de la rugosité de surface ( $Ra$ ) sont les suivant :

$$H1 = \tanh (0.5*(-0.003*Vc + 40.328*f + 0.125*ap - 4.119));$$

$$H2 = \tanh (0.5*(-0.006*Vc - 10.943*f - 0.508*ap + 7.588));$$

$$H3 = \tanh (0.5*(0.032*Vc + 14.575*f - 0.123*ap - 12.271));$$

$$H4 = \tanh (0.5*(0.022*Vc + 14.528*f - 0.175*ap - 8.590));$$

$$H5 = \tanh (0.5*(-0.005*Vc + 25.935*f - 0.016*ap - 1.364));$$

Pour la couche de sortie

$$Ra = 2.290*H1 + 1.079*H2 + 3.257*H3 - 4.113*H4 + -1.588*H5 + 0.077; \quad (VI-6)$$

Les coefficients de corrélation pour le modèle proposé est de (99.86 et 99.22) % respectivement pour l'apprentissage et la validation.

Tableau VI-4 : Valeurs statistiques de l'analyse ANN de Ra

	Apprentissage	Validation
R carré	0,9986	0,9922
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0203	0,0764
Écart absolu moyen	0,0178	0,0698
Nombre d'essais	21	6

La figure VI-10 illustre les courbes de l'évolution de la rugosité de la surface en fonction de paramètres de coupe ( $Vc$ ,  $f$  et  $t$ ) à partir du modèle proposé (équation VI-6).

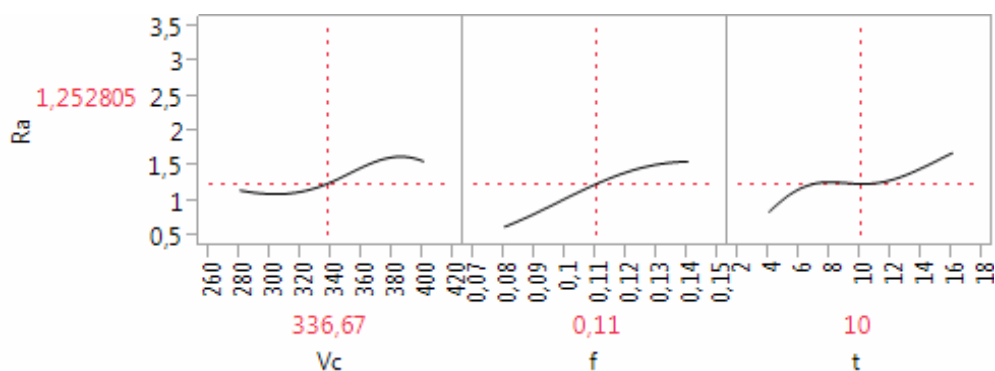


Figure VI-10 : Rugosité de la surface en fonction de paramètres de coupe

Le tracé qui présente la comparaison entre les valeurs expérimentales et celles estimés est présenté dans la figure VI-11. En analysant cette dernière on peut remarquer que tous les points sont très proches à la ligne moyenne, ce qui confirme l'efficacité du modèle et la robustesse de la méthode des ANN.

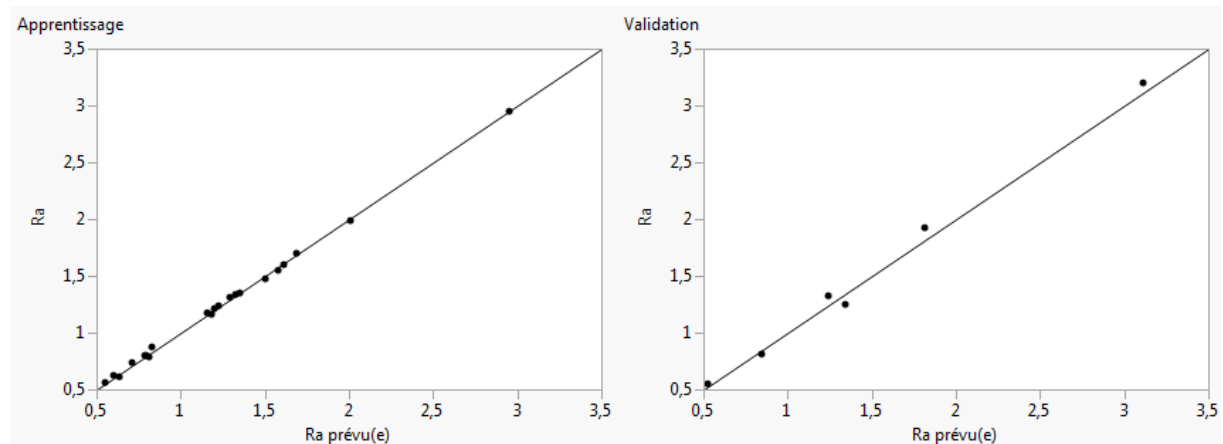


Figure VI-11 : Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité de la surface Ra

#### VI-4 Comparaison entre les modèles ANN et RMS

Le tableau VI-5 expose les coefficients de détermination des deux méthodes utilisées pour la modélisation de VB et Ra qui sont la méthode de la surface de réponse et les réseaux de neurones artificiels. L'analyse des valeurs de ce tableau montre que les  $R^2$  de la méthode ANN sont plus grands que la méthode RSM ce qui prouve la robustesse et la fiabilité de la méthode ANN. Pour mieux visionner ça, on a tracé des courbes de comparaison (figure VI-12 et VI-13) des valeurs expérimentales et estimées par RSM et ANN. L'analyse de ces figures nous permet de dire que les valeurs estimées par ANN sont complètement confondues avec les résultats expérimentaux, contrairement aux valeurs estimées par RSM où il y a des valeurs qui sont éloignées aux valeurs expérimentales.

Tableau VI-5 : Coefficients de corrélation pour RSM et ANN

	Coefficient de détermination %	
	<i>RSM</i>	<i>ANN</i>
Usure VB	97.20	99.83
Rugosité Ra	94.39	99.86



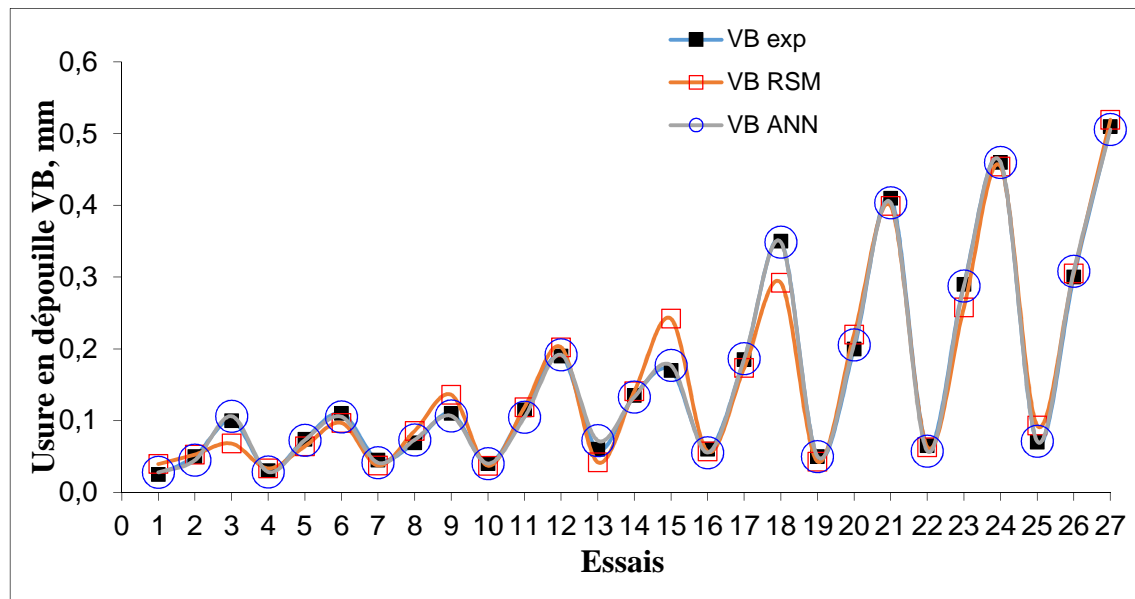


Figure VI-12 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour l'usure VB

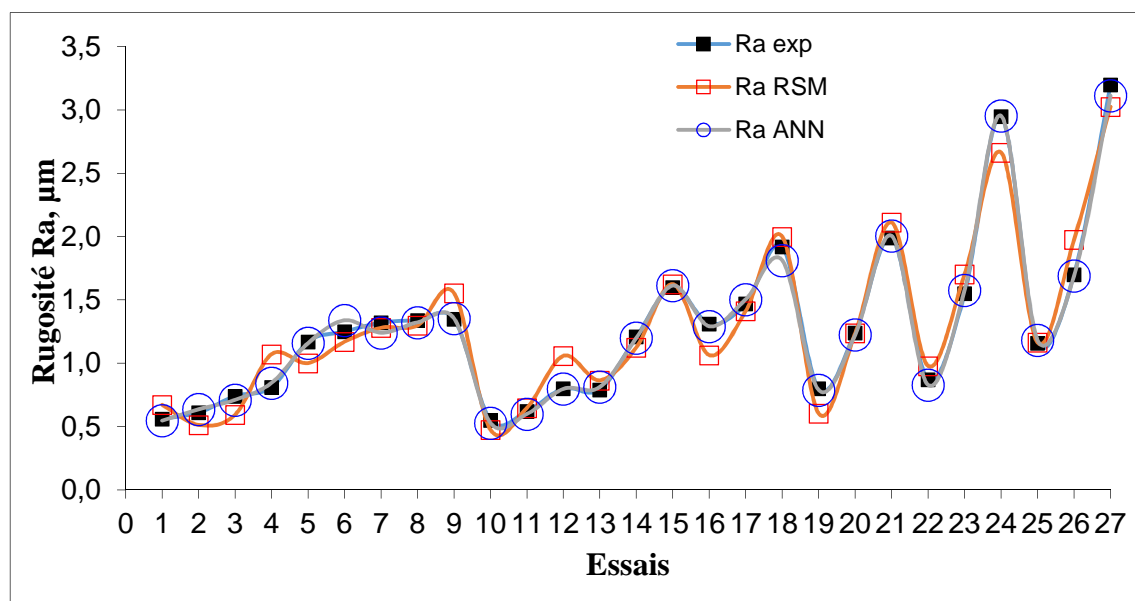


Figure VI-13 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats prédits par RSM et ANN pour la rugosité Ra

### VI-5 Modélisation de Ra et Fc par ANN pour l'acier X2CrNi18-9

Le tableau VI-6 présente le plan de Taguchi  $L_{16}$  qui contient les résultats expérimentaux de la rugosité de la surface et l'effort de coupe tangentiel. Ces derniers sont obtenus lors de l'usinage à sec de l'acier X2CrNi18-9. L'architecture illustrée dans la figure VI-14 est choisie pour la modélisation de l'évolution de Ra et Fc en fonction de ( $V_c, f$  et  $a_p$ ) par la méthode de réseau de neurones artificiels.

Tableau VI-6 : Résultats expérimentaux de Ra et Fc pour l'acier X2CrNi18-9

N° Test	Paramètres de coupe			Paramètres de sorties	
	Vc, (m/min)	f, (mm/tr)	ap, (mm)	Ra, (µm)	Fc, (N)
1	60	0.08	0.25	1.05	94.93
2	60	0.12	0.50	1.17	208.21
3	60	0.16	0.75	1.50	346.12
4	60	0.20	1.00	2.35	540.18
5	90	0.08	0.50	0.54	132.57
6	90	0.12	0.25	0.66	86.01
7	90	0.16	1.00	1.04	390.61
8	90	0.20	0.75	1.62	381.56
9	120	0.08	0.75	0.60	168.13
10	120	0.12	1.00	1.03	320.80
11	120	0.16	0.25	1.40	99.71
12	120	0.20	0.50	1.80	248.19
13	150	0.08	1.00	0.70	199.55
14	150	0.12	0.75	0.95	213.09
15	150	0.16	0.50	1.99	191.24
16	150	0.20	0.25	2.86	109.13

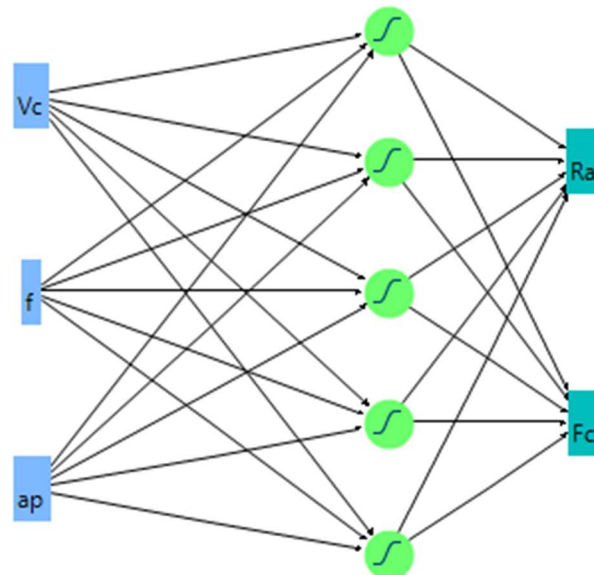


Figure VI-14 : Architecture choisie pour Ra et Fc

Les valeurs des poids et des biais du modèle neuronal de la rugosité de surface (Ra) et l'effort tangentiel (Fc) pour l'acier X2CrNi18-9 sont les suivants :

$$H1 = \tanh (0.5*(-0.013*Vc - 17.847*f - 0.663*ap + 4.627));$$

$$H2 = \tanh (0.5*(0.033*Vc - 7.802*f + 0.200*ap - 2.850));$$

$$H3 = \tanh (0.5*(-0.010*Vc + 3.462*f + 0.142*ap + 0.514));$$

$$H4 = \tanh (0.5*(-0.001*Vc + 10.922*f - 1.686*ap - 0.755));$$

$$H5 = \tanh (0.5*(0.019*Vc + 4.833*f - 0.592*ap - 1.969));$$

Pour la couche de sortie

$$Ra = -2.611*H1 + 4.011*H2 - 0.730*H3 + 4.340*H4 - 8.109*H5 + 4.276; \quad (VI-7)$$

$$F_c = -242.214 \cdot H_1 + 70.735 \cdot H_2 + 730.917 \cdot H_3 - 319.431 \cdot H_4 + 25.233 \cdot H_5 + 220.953; \quad (\text{VI-8})$$

Ces derniers modèles présentent un coefficient de corrélation de 99.35% pour la rugosité et 99.22% pour l'effort de coupe comme le présente le tableau VI-7. Le traçage des modèles qui présentent l'évolution de Ra et Fc en fonction de différents paramètres de coupe est illustré dans la figure VI-15.

Nous avons présenté aussi la comparaison entre les valeurs prédites à partir des modèles et les résultats expérimentaux dans la figure VI-16. En analysant cette dernière, nous remarquons que les points d'intersection sont très proches à la ligne de 45° ce qui prouve la précision des modèles mathématiques choisis.

Tableau VI-7 : Valeurs statistiques de l'analyse ANN de Ra et Fc

	Ra		Fc	
	Apprentissage	Validation	Apprentissage	Validation
R carré	0,9935	0,9984	0,9922	0,9813
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0488	0,0301	8,2718	22,9838
Écart absolu moyen	0,0408	0,0256	6,0169	19,7059
Nombre d'essais	13	3	13	3

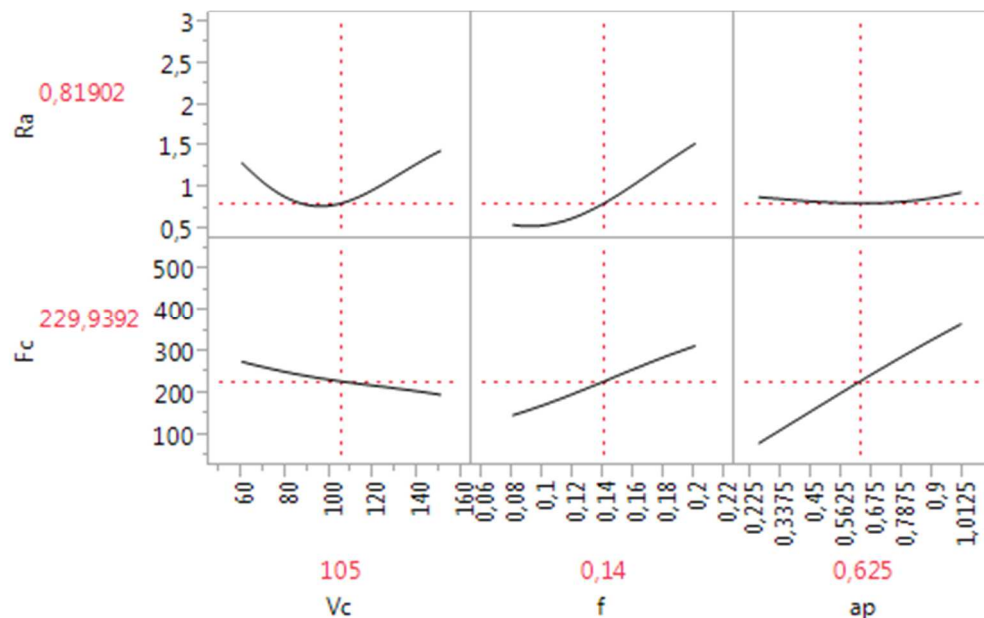


Figure VI-15 : Ra et Fc en fonction de paramètres de coupe.

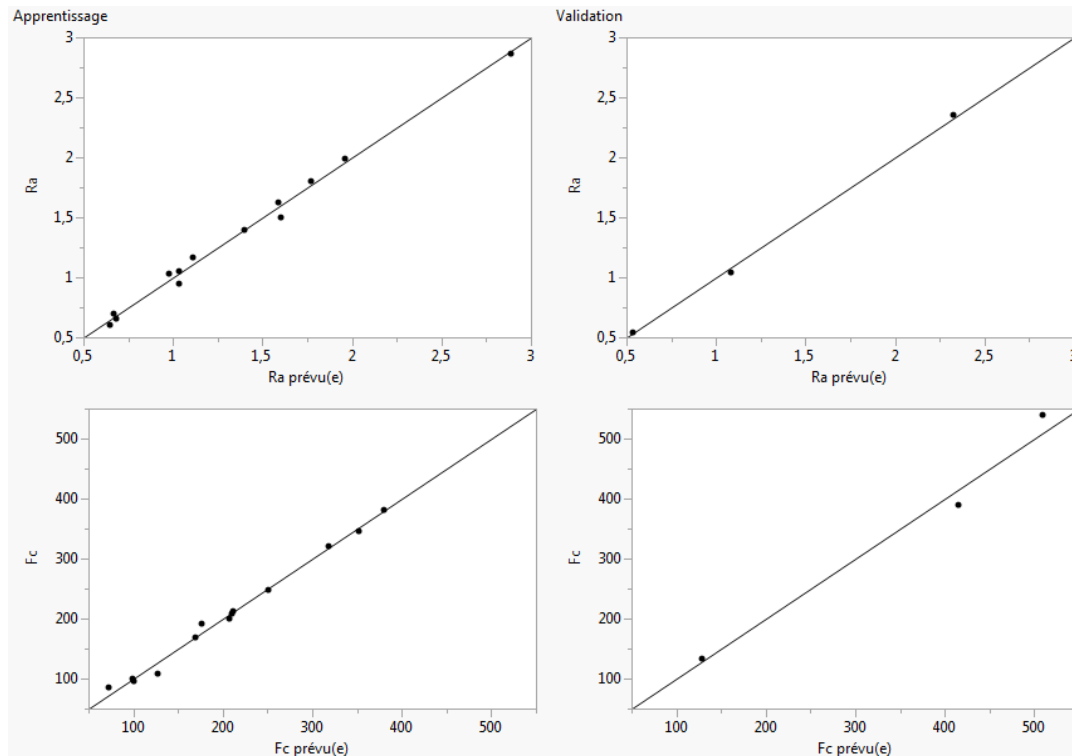


Figure VI-16 : Comparaison entre valeurs expérimentales et prédites pour Ra et Fc

### VI-6 Modélisation de Ra et Fc par ANN pour l'acier X20Cr13

Les conditions de coupe choisies ainsi que les résultats expérimentaux obtenus lors de l'usinage de l'acier X20Cr13 sont enregistrés dans le tableau VI-8.

L'architecture utilisée lors de la modélisation de la rugosité de la surface usinée et l'effort de coupe tangentiel est présentée dans la figure VI-17.

Tableau VI-8 : Résultats expérimentaux de Ra et Fc pour l'acier X20Cr13

N° Test	Paramètres de coupe			Paramètres de sorties	
	Vc, (m/min)	f, (mm/tr)	ap, (mm)	Ra, (µm)	Fc, (N)
1	60	0.08	0.25	0.85	77.44
2	60	0.12	0.50	1.23	194.75
3	60	0.16	0.75	1.63	336.64
4	60	0.20	1.00	2.72	476.47
5	90	0.08	0.50	0.96	144.89
6	90	0.12	0.25	1.07	97.55
7	90	0.16	1.00	1.65	412.59
8	90	0.20	0.75	2.05	414.73
9	120	0.08	0.75	0.77	176.63
10	120	0.12	1.00	1.10	312.14
11	120	0.16	0.25	1.38	113.45
12	120	0.20	0.50	2.06	246.77
13	150	0.08	1.00	1.02	238.53
14	150	0.12	0.75	1.95	246.59
15	150	0.16	0.50	1.58	223.83
16	150	0.20	0.25	2.16	130.21

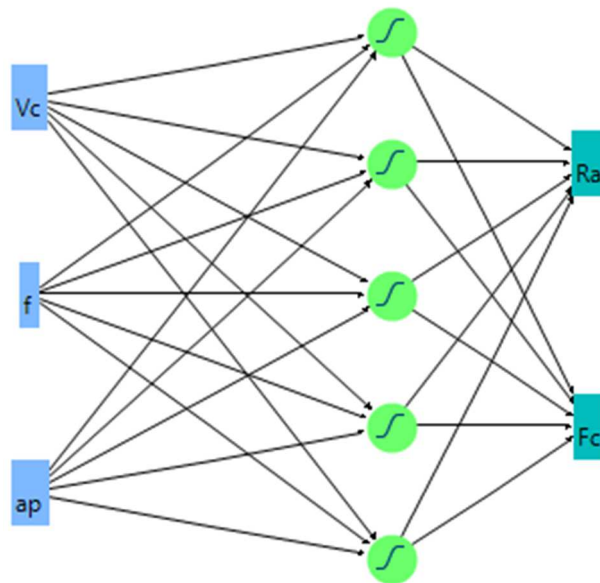


Figure VI-17 : Architecture choisie pour Ra et Fc

Les coefficients de détermination pour l'apprentissage et la validation sont présentés dans le tableau VI-9. En plus, les valeurs des poids et des biais du modèle neuronal obtenu de la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe tangentiel (Fc) pour l'acier X20Cr13 sont les suivants :

$$H1 = \tanh (0.5*(0.034*Vc + 60.684*f - 8.513*ap - 7.882));$$

$$H2 = \tanh (0.5*(0.012*Vc + 23.161*f - 3.267*ap - 2.128));$$

$$H3 = \tanh (0.5*(0.005*Vc - 6.311*f + 4.144*ap - 1.992));$$

$$H4 = \tanh (0.5*(-0.004*Vc - 50.894*f + 1.529*ap + 8.812));$$

$$H5 = \tanh (0.5*(-0.051*Vc + 1.078*f + 2.073*ap + 3.712));$$

Pour la couche de sortie

$$Ra = -0.989*H1 + 1.874*H2 + 0.645*H3 - 0.597*H4 - 0.110*H5 + 1.256; \quad (VI-9)$$

$$Fc = 24.249*H1 + 132.048*H2 + 278.619*H3 - 32.555*H4 + 112.457*H5 + 231.227; \quad (VI-10)$$

Tableau VI-9 : Valeurs statistiques de l'analyse ANN de Ra et Fc

	Ra		Fc	
	Apprentissage	Validation	Apprentissage	Validation
R carré	0,9581	0,9839	0,9995	0,9998
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,0960	0,0834	2,2353	1,5179
Écart absolu moyen	0,0816	0,0080	1,6576	1,0210
Nombre d'essais	12	4	12	4

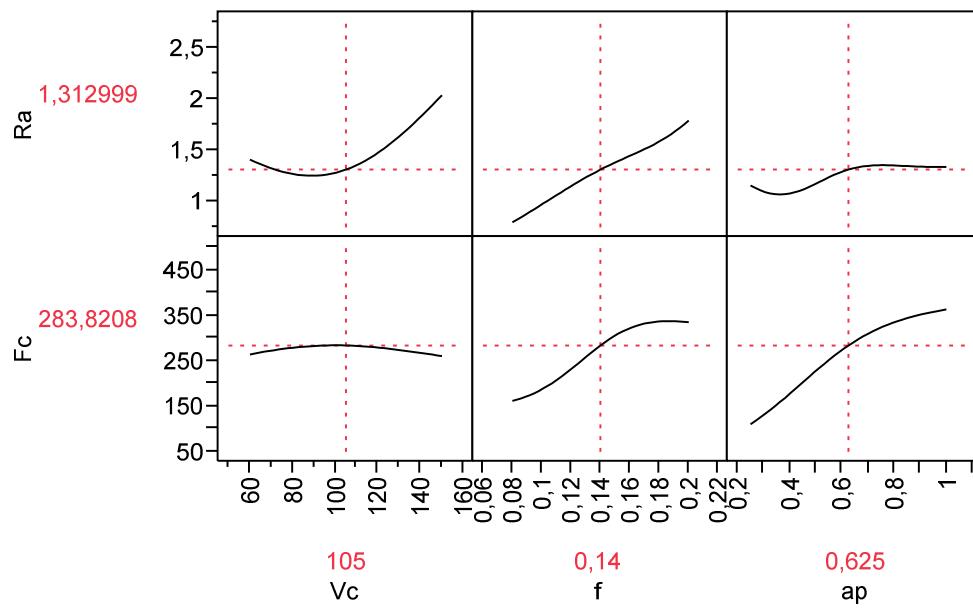


Figure VI-18 : Ra et Fc en fonction des paramètres de coupe.

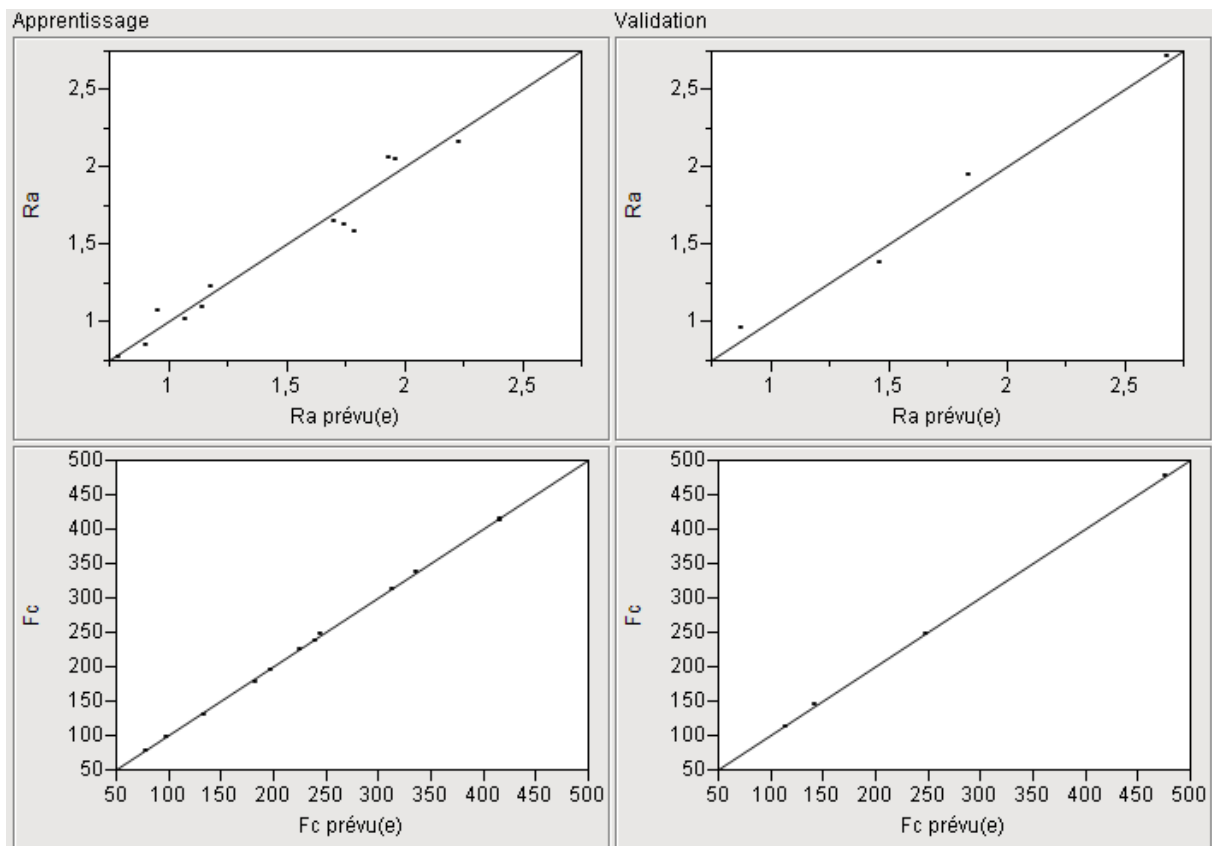


Figure VI-19 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Ra et Fc

### VI-7 Comparaison entre les modèles ANN et RMS pour X2CrNi18-9 et X20Cr13

La comparaison entre les méthodes RSM et ANN a conduit à dire que la méthode de réseau de neurones artificiel est plus robuste par rapport à la méthodologie de la surface de réponse pour la plupart des modèles générés, cela est très claire dans le tableau VI-10 qui présente les coefficients de corrélation pour les deux méthodes et aussi dans les figures (VI-20 ; VI-21, VI-22 et VI-23).

Tableau VI-10 : Coefficients de corrélation pour RSM et ANN

	X2CrNi18-9		X20Cr13	
	RSM	ANN	RSM	ANN
Rugosité Ra	96.84	99.35	92.87	95.81
Effort Fc	99.61	99.22	99.23	99.95

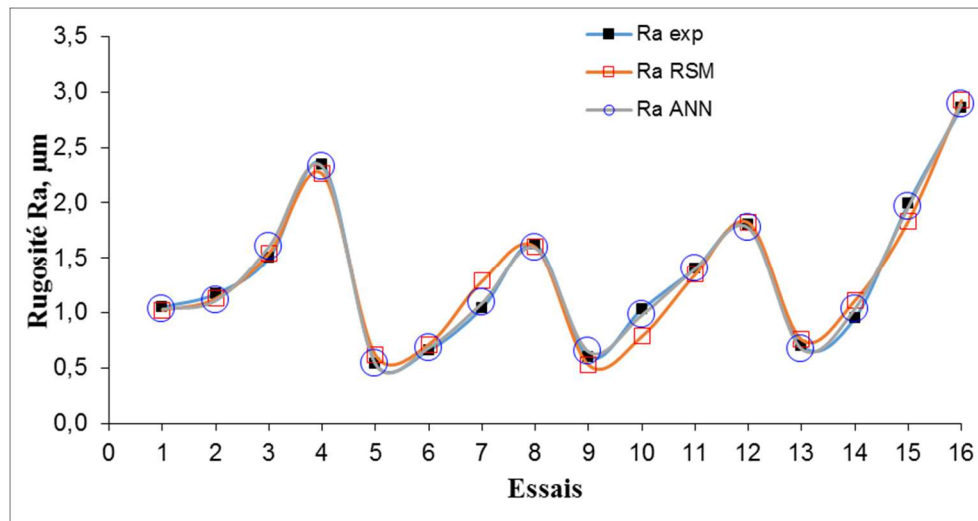


Figure VI-20 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour Ra (X2CrNi18-9).

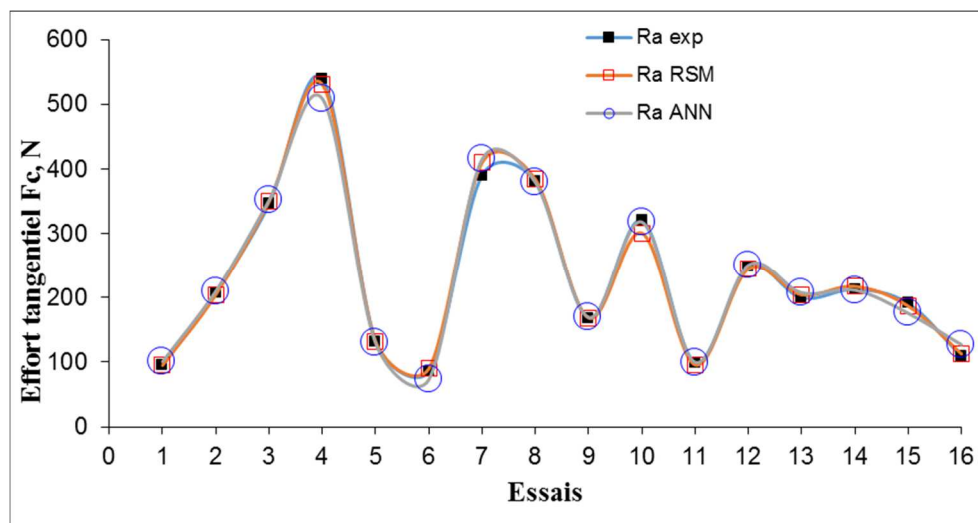


Figure VI-21 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour Fc (X2CrNi18-9).

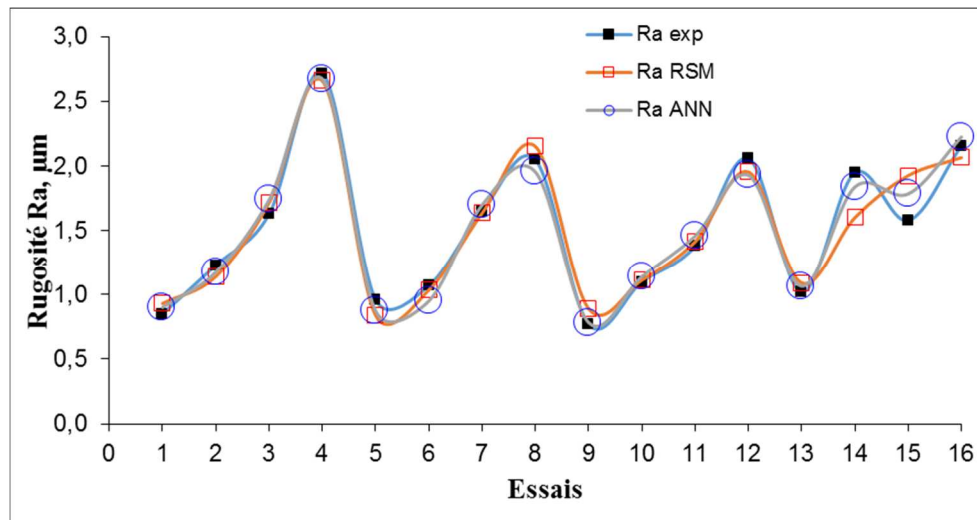


Figure VI-22 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour Ra (X20Cr13).

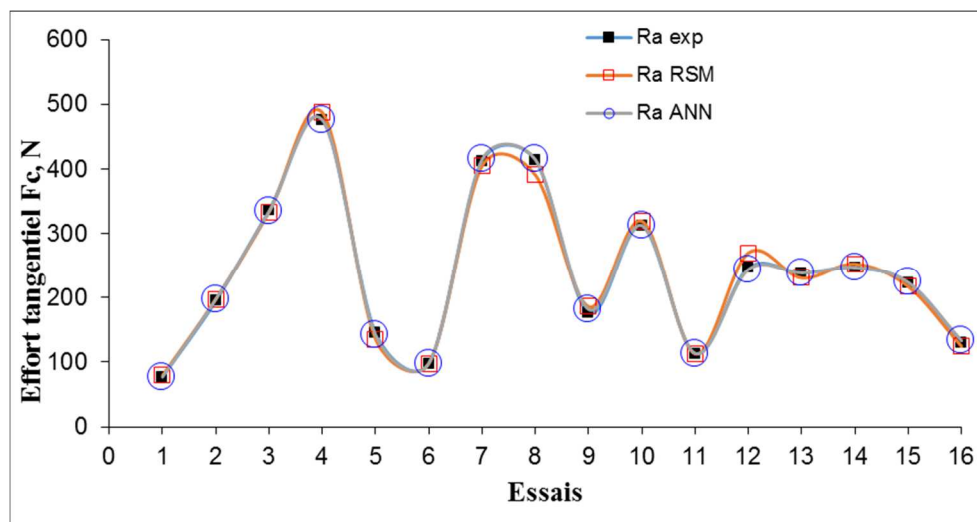


Figure VI-23 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et résultats prédits par RSM et ANN pour Fc (X20Cr13).

### VI-8 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a utilisé la méthode de réseau de neurones artificiels pour modéliser l'usure en dépouille et la rugosité de la surface usinée pour un plan complet L27 et aussi l'effort de coupe tangentiel et la rugosité de surface pour les deux aciers inoxydables avec un plan de Taguchi L16. On a conclu que cette méthode donne un coefficient de corrélation très proche à (1). La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par RSM et ANN nous a conduit à conclure que la méthode ANN est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.



## Conclusions générales et perspectives

L'objectif de ces travaux a été d'étudier l'influence des différents paramètres de régimes de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  et  $t$ ) sur les différents phénomènes rencontrés lors de la coupe tels que les efforts de coupe, les efforts spécifiques, la puissance de coupe, la rugosité de la surface usinée et l'usure en dépouille de l'outil. Notre étude a porté en particulier sur l'usinage à sec de deux aciers inoxydables par un outil en carbure à revêtement [Ti(C, N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN], le premier est de la famille austénitique qui est le X2CrNi18-9 et le second est un acier inoxydable martensitique X20Cr13.

En se basant sur les résultats obtenus dans tous les chapitres, les conclusions suivantes ont été tirées :

- De point de vue puissance de coupe nécessaire à l'enlèvement du copeau, la nuance X2CrNi18-9 demande une puissance plus grande par rapport à celle de l'acier X20Cr13 ;
- L'augmentation de la vitesse de coupe conduit à l'endommagement du bec de l'outil à cause de l'usure en dépouille. Ce qui mène à l'élévation des différents critères de la rugosité ;
- Le temps d'usinage est le plus important paramètre intervenant dans le processus de la coupe. Il favorise l'augmentation de l'usure en dépouille de l'outil ce qui induit la dégradation de la surface usinée et l'accroissement des efforts de coupe ;
- L'étude a montré que l'arête de l'outil s'use rapidement pendant l'usinage de la nuance X20Cr13 et ceci est dû à sa dureté qui est plus grande par rapport à celle de la nuance X2CrNi18-9. En plus, le coefficient de conductivité thermique de la nuance austénitique qui est très faible a conduit à une concentration de la chaleur au niveau du bec de l'outil ce qui mène à l'accélération de l'usure ;
- Les modèles de la rugosité en fonction du temps indiquent que l'avance est le paramètre qui influe en premier ordre avec une contribution de  $2/3 \approx 60\%$  suivi par le temps de coupe avec une contribution de  $1/3$  de la contribution de l'avance.
- La vitesse de coupe a une influence significative sur l'état de la surface usinée. Il est à noter que pour des faibles vitesses de coupe nous remarquons un mauvais état de surface à cause de la présence de l'arête rapportée et ceci peut être expliqué par la ductilité élevée de l'acier inoxydable austénitique ;

- L'analyse a montré que l'avance est le facteur le plus influant sur la rugosité de la surface ;
- L'effort de coupe tangentiel est fortement affecté par la profondeur de passe ;
- L'optimisation de la réponse a déduit que les valeurs de (104.54m/min, 0.08mm/tr et 0.295mm) successivement de ( $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ) sont les paramètres optimums ;
- Les tests de confirmation ont indiqué que l'analyse présente une erreur maximale de 8.57% pour  $R_a$  et 11.02% pour  $F_c$  ;
- La hausse du temps d'usinage et la vitesse de coupe conduite à l'augmentation de l'usure en dépouille ;
- L'analyse de la variance de la rugosité indiquent que le temps de coupe est le paramètre qui affect considérablement  $R_a$ , sa contribution est de 31,96%. suivi par l'avance avec une contribution de 23,25% ;
- Les plages des conditions de coupe optimales adoptées sont:  $V_c = (317-325)$  m/min,  $f = (0,08)$  mm/tr et  $t = (4)$  minutes pour la rugosité de la surface et l'usure en dépouille, et  $V_c = 280,66$  m/min,  $f = (de 0,8 à 0,9)$  mm/tr pour la tenue (T) ;
- La méthode de réseau de neurones artificiel donne un coefficient de corrélation très proche à (1). La comparaison entre les résultats expérimentaux et les valeurs prédites par RSM et ANN nous a conduit à conclure que la méthode ANN est plus robuste et plus fiable par rapport à la méthodologie de la surface de réponse.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- ✓ L'utilisation d'autres outils de coupe, et autres géométrie d'outils en particulier des angles de coupe positifs pour l'usinage de l'acier X2CrNi18-9.
- ✓ L'étude de l'usinabilité de l'acier X20Cr13 quand il subit à traitement thermique (trempe).
- ✓ L'étude de l'usinabilité d'autres nuances des aciers inoxydables.
- ✓ L'utilisation d'autres méthodes de modélisation et d'optimisation tels que (méthode de taguchi, ...).

## Références Bibliographiques :

- [1] **CZAPLICKI A.**, L'usinabilité et la coupe des métaux. Revue de la société royale Belge des ingénieurs et des industries, 1962, N°12. pp. 708 – 736.
- [2] **GRUBER B.**, Outillage et mesure, Dunod 2<sup>ème</sup> Edition, Lausanne 1981, pp. 51-63.
- [3] **POULACHON G.**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage CBN des aciers durcis, application: usinabilité de l'acier 100 Cr6, Thèse de Doctorat, ENSAM de Cluny, Décembre 1999, pp. 10 -11.
- [4] **SANJIP K. H.**, Machinability Study of AISI 316 Grade Austenitic Stainless Steel Using P 30 Grade Cemented Carbide Insert
- [5] **MATHON P.**, Usinabilité et lois générales de l'usinage des aciers et des fontes, Mécanique, Matériaux, Électricité (F), 1970, N° 246-247, pp. 23-36.
- [6] **F. BAGUR.** Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'ingénieur, Traité de génie mécanique. BM 7080, 1990.
- [7] **DOCUMENTATIONS GARANT-TOOLS**, Manuel d'usinage GARANT, Principes de base, 2007, pp. 142-152.
- [8] **TONSHOFF H.K., MOHLFELD A., SPENGLER C.**, Pre-treatment of coated tools for cutting applications, Actes de la Conference Internationale, The coatings in Manufacturing Engineering, Hannover 2001.
- [9] **TONSHOFF H.K., MOHLFELD A., SPENGLER C.**, PVD coated tools for metal cutting applications, Actes de la conference internationale, The coatings in Manufacturing Engineering, Grèce, Thessalonique, Octobre 1999, pp. 1-20.
- [10] **RECH J.**, Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse, PhD Thesis en Procédés de fabrication, ENSAM, Paris, Décembre 2002, pp. 198-199.
- [11] **Bedrin.C; Roumesy.B.**, Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon 1989.
- [12] **CETIM.** Etude de l'usinage à grande vitesse, Décision d'aide N°: 72-7-0669. 1979.
- [13] Couple Outil-Matière : Domaine de Fonctionnement des Outils Coupants.
- [14] **M. Habek**, étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100cr6, l'école nationale supérieure d'arts et métiers, spécialité “ mécanique - matériaux - procédés ”, le 11 décembre, 2006.

- [15] **S. Bissey**, Développement d'un modèle d'effort de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités. Thèse en procédé de fabrication. ENSAM, N° d'ordre : 2005-04 2005.
- [16] **Dawson.T.G**; Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools Gorgia institute of technology 2002.
- [17] **Roumesy B.**, Determination des lois d'usure, Machines- outils, N° 301,1975.
- [18] **Weil R.**, Techniques d'usinage, Dunod, Paris 1971.
- [19] **Remadna. M, J-F Rigal**, Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts, Journal of processing Technology 178, 2006, pp. 67-75.
- [20] **Luo, S.Y.; Liao,Y.S.,Tsai, Y.Y.**, wear characteristics turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools; Journal of Materiels processing technology, vol.(88),1999,pp.114-121.
- [21] **Hug J. L.**, Tournage des métaux durs, Machine de production, 110, 1995, pp.17-19.
- [22] **G. Poulachon**, Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis.
- [23] **Yaltese.M.A, Boulanouar.L et Chaoui.K**, Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique, Revue Mécanique et industries, Vol 5, 4, 2004, pp.355-368.
- [24] **Notter A.T, Heath J.P.**, usinage des métaux ferreux de grande dureté à l'aide de l'amborite, Matériaux et Techniques, N°386, 1981, pp.301-308.
- [25] **KÖning W et al.**, "Machining of hard materiels", Annals of the CIRP, 1984, pp. 417-427.
- [26] **Zimmerman, M., Lahres, M., Viens, D.V., Loube, B.L.**, " investigation of the wear of cubic boron nitride cutting tools using Auger electron spectroscopy and X-ray analysis by EPMA", wear, vol. 207, 1997, pp.241-249.
- [27] **Kevin Y. Chou C., Evans J. and Barash M.M**, Experimental investigation on cubic boron nitride turning of hardened AISI 52100 steel, J. Mater Process Technology. V (134), 2003, pp. 1-9,
- [28] **K. Liu, X.P. Li, M. Rahman, X.D. Liu**, CBN tool wear in ductile cutting of tungsten carbide, Wear 255,2003, pp.1344–1351.
- [29] **Slavko Dolinšek, Borivoj Šuštarši, Janez Kopa**, Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes, Wear 250, 2001, pp. 349–356.
- [30] **Friederike Deuerler, Heiko Gruner, Michael Pohl, Ladji Tikana**,Wear mechanisms of diamond-coated tools, Surface and Coatings Technology 142-144, 2001, pp.674-680.

- [31] **J. Wang., C.Z. Huang1, W.G. Song.** The effect of tool flank wear on the orthogonal cutting process and its practical implications, *Journal of Materials Processing Technology* 142 2003, pp. 338–346
- [32] **A. Mosan** « Optimisation économique des opérations de tournage » *Ingénieurs et techniciens* 12,1975, pp.43-48.
- [33] **Cunat P.**, « Aciers inoxydables, critères de choix et structures », traité «Matériaux métalliques », *Techniques de l'ingénieur*, mars 2000, M4540.
- [34] Guide pratique pour le travail des aciers inoxydables duplex Première édition 2011
- [35] **TROMBERT C.**; Usinabilité des aciers inoxydables, *Techniques de l'ingénieur* M726.
- [36] **Kaladhar, M., Subbaiah, K. V., & Rao, C. S.** (2012). Determination of optimum process parameters during turning of AISI 304 Austenitic Stainless steels using Taguchi method and ANOVA. *International Journal of Lean and Thinking*, 3, 1-19.
- [37] **Kaladhar, M., Subbaiah, K. V., & Rao, C. S.** (2011). Performance evaluation of coating materials and process parameters optimization for surface quality during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(4), 89-102.
- [38] **Mahdavejad, R. A., & Saeedy, S.** (2011). Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. *Sadhana*, 36(6), 963-970.
- [39] **Kumar, A. S., Durai, A. R., & Sornakumar, T.** (2006). The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(2), 151-156.
- [40] **Neo, K. S., Rahman, M., Li, X. P., Khoo, H. H., Sawa, M., & Maeda, Y.** (2003). Performance evaluation of pure CBN tools for machining of steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1), 326-331.
- [41] **Xavior, M. A.** (2012). Evaluating the machinability of AISI 304 stainless steel using alumina inserts. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 841-847.
- [42] **Nayak, S. K., Patro, J. K., Dewangan, S., & Gangopadhyay, S.** (2014). Multi-objective Optimization of Machining Parameters During Dry Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel Using Grey Relational Analysis. *Procedia Materials Science*, 6, 701-708.
- [43] **Liew, W. Y. H.** (2009). Experimental study on the performance of coated carbide tools in the ultra-precision machining of stainless steel. *Tribology Transactions*, 52(3), 293-302.

- [44] **Jerold, B. D., & Kumar, M. P.** (2012). Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-di-oxide cooling. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(10), 1059-1065.
- [45] **Nithyanandhan, T., Manickaraj, K., & Kannakumar, R.** (2014). Optimisation of Cutting Forces, Tool Wear and Surface finish in Machining of AISI 304 Stainless Steel Material Using Taguchi's Method. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 1(4), 488-493.
- [46] **Nithyanandhan, T., Kannakumar, R., Suresh Kumar, P. & Vijayakumar, N.S.** (2014). Optimizing The Process Parameters on Tool Wear of Tungsten Carbide Insert When Machining of AISI 304 Stainless Steel Material. *International Journal of Science Research & Education*, 2(11), 2463-2477.
- [47] **Noordin, M. Y., Venkatesh, V. C., & Sharif, S.** (2007). Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools. *Journal of materials processing technology*, 185(1), 83-90.
- [48] **Kara, F., Aslantas, K., & Çiçek, A.** (2015). ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel. *Neural Computing and Applications*, 26(1), 237-250.
- [49] **Ranganathan, S., Senthilvelan, T., & Sriram, G.** (2010). Evaluation of machining parameters of hot turning of stainless steel (Type 316) by applying ANN and RSM. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(10), 1131-1141.
- [50] **Broniszewski, K., Wozniak, J., Czechowski, K., Jaworska, L., & Olszyna, A.** (2013). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mo cutting tools for machining hardened stainless steel. *Wear*, 303(1), 87-91.
- [51] **Chandrasekaran, K., Marimuthu, P., Raja, K., & Manimaran, A.** (2013). Machinability study on AISI410 with different layered inserts in CNC turning during dry conditions. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 20, 398-404.
- [52] **Selvaraj, D. P., Chandramohan, P., & Mohanraj, M.** (2014). Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. *Measurement*, 49, 205-215.
- [53] **Selvaraj, D. P., & Chandramohan, P.** (2010). Influence of cutting speed, feed rate and bulk texture on the surface finish of nitrogen alloyed duplex stainless steels during dry turning. *Engineering*, 2(06), 453.
- [54] **Thiyagu, M., Karunamoorthy, L., & Arunkumar, N.** (2014). Experimental Studies in Machining Duplex Stainless Steel using Response Surface Methodology. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 14(3).

- [55] **Kulkarni, A. P., Joshi, G. G., & Sargade, V. G.** (2013). Dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using AlTiCrN coated insert produced by HPPMS technique. *Procedia Engineering*, 64, 737-746.
- [56] **Wagh, S. S., Kulkarni, A. P., & Sargade, V. G.** (2013). Machinability Studies of Austenitic Stainless Steel (AISI 304) Using PVD Cathodic Arc Evaporation (CAE) System Deposited AlCrN/TiAlN Coated Carbide Inserts. *Procedia Engineering*, 64, 907-914.
- [57] **Hasan, S., & Thamizhmanii, S.** (2010). Tool flank wear analyses on AISI 440 C martensitic stainless steel by turning. *International Journal of Material Forming*, 3(1), 427-430.
- [58] **Acar, E., Camuşcu, N., Er, A. O., & Aslan, E.** (2011). Experimental robust optimal machining of hardened AISI 420 stainless steel with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ TiCN mixed ceramic tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(7), 1033-1039.
- [59] **Norme AFNOR NF E 66-520**, 1994, pp.1 à 6.
- [60] **SANDVIK Coromant 2007 Catalogue Général: Tournage-Fraisage-Perçage-Alésage-attachements.**
- [61] **G. Dreyfus** (1998). Les réseaux de neurones. *Mécanique industrielle et matériaux*, n°51.
- [62] **P. Wira** (2009). Réseau de neurones artificiels : architectures et applications. Université de Haute Alsace Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes).
- [63] **A. Dipanda.** Cours réseaux de neurones.
- [64] **W. Gerstner, B. L. Beaulieu, S. Souksavanh et J. L. Beuchat** (2006). Réseaux de neurone artificiels, une introduction à l'apprentissage automatique. Laboratory of computational neuroscience.
- [65] **I. Ciftci** (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 39(6), 565-569.
- [66] **Swapnagandha S. Wagh, Atul P. Kulkarnib, Vikas G. Sargade** (2013). Machinability studies of austenitic stainless steel (AISI 304) using PVD cathodic arc evaporation (CAE) system deposited AlCrN/TiAlN coated carbide inserts. *Procedia Engineering*, 64, 907-914.

- [67] **El-Tamimi, A. M., & El-Hossainy, T. M.** (2008). Investigating the tool life, cutting force components, and surface roughness of AISI 302 stainless steel material under oblique machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(4), 427-438.



## Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN CVD coated carbide tool

**Sofiane Berkani<sup>a</sup>, Mohamed Athmane Yaltese<sup>a</sup>, Lakhdar Boulanouar<sup>b</sup> and Tarek Mabrouki<sup>c,d</sup>**

<sup>a</sup> Mechanics and Structures Research Laboratory (LMS), May 8th 1945, University of Guelma, Guelma, Algeria,  
E-Mail: berkanis246@yahoo.fr

<sup>b</sup> Advanced Technologies in Mechanical Production Research Laboratory (LRTAPM), Mechanical Engineering  
Department, Badji Mokhtar University of Annaba, P.O Box 12, Annaba 23000, Algeria.

<sup>c</sup> LaMCoS, CNRS, INSA-Lyon UMRS259, Lyon University, Lyon, France

<sup>d</sup> Université de Tunis El-Manar, ENIT, BP-37, Le Belvédère 1002, Tunis, Tunisie

### Abstract

The present research work investigates the machining of AISI304 austenitic stainless steel in terms of machining force evolution, power consumption, specific cutting force and surface roughness. A factorial experiment design and analysis of variance technique were used. Several factors are evaluated for their effects on each level. The case of dry turning process was studied based on design of experiments in order to obtain empirical equations characterising material machinability according to cutting conditions such as cutting speed, feed rate and depth of cut. The latter were put in relationship with the machining output variables ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  and  $P_c$ ) through the response surface methodology (RSM). Results revealed that feed rate is the most preponderant factor affecting surface roughness (71.04%). However, the depth of cut affects considerably cutting force and cutting power by (60.74% and 67.11%), respectively. In addition, the specific cutting force was found affected significantly by cutting speed with a contribution of 41.43%. The quadratic model of RSM associated with response optimization technique and composite desirability was used to find optimum values of machining parameters (104.54 m/min, 0.08 mm/rev and 0.295 mm).

**Keywords:** Machinability, AISI304, stainless steel, CVD coated carbide tool, ANOVA analysis, regression models, RSM method.

#### Nomenclature

$V_c$	cutting speed (m/min)	ASS	austenitic stainless steel
$f$	feed rate (mm/rev)	ANOVA	analysis of variance
$a_p$	depth of cut (mm)	RSM	response surface methodology
$R_a$	arithmetic mean roughness ( $\mu\text{m}$ )	DF	degrees of freedom
$F_c$	tangential force (N)	Seq SS	sequential sum of squares
$K_c$	specific cutting force (MPa)	Adj MS	adjusted mean squares
$P_c$	cutting power (w)	Cont %	contribution ratio (%)
		$R^2$	coefficient of determination (%)

## 1. Introduction

Stainless Steels are Fe-C alloys with more than 11% of Cr. Within this family, austenitic alloys are the most resistant to corrosion. Among the austenitic steels, the AISI 304 grade (EN1.4307) is commonly used in industries thanks to its low corrosion and high mechanical properties (ultimate tensile strength is approximately 590 MPa). This alloy contains 18% Cr and 8% Ni, with maximum carbon composition of 0.08%. Austenitic stainless steels have FCC atomic structure and are considered as non magnetic alloys. For these reasons, AISI 304 grade is used in large number of specific applications. It is also exploited in chemical equipment, cooking equipment, cryogenic vessels, evaporators, food processing equipment, hospital surgical equipment, kitchen sinks, marine equipment, pressure vessels, valves and shipping drums. This steel presents very severe physico-chemical properties as high temperature strength, low thermal conductivity, high ductility and rapid work-hardening during machining.

In order to improve machinability of AISI 304, many research works of investigation was employed .Indeed, Korkut et al. (2004) have made a parametric study during the machining of AISI 304 austenitic stainless steel. Their aim was to determine optimum cutting speed leading to the lowest tool flank wear. Authors have mentioned that poor performance of the tool at lower cutting speeds can be explained by the influence of the t temperature increase in the cutting tool. This is due to the generation of heat during the machining of AISI 304 stainless steel, which is not dissipated rapidly because of the low thermal conductivity of this material.

Akasawa et al. (2003) have underlined that additive elements have a significant influence on the machinability of austenitic stainless steels. During dry and wet turning using K10 carbide tools, pre-cited authors found that dry cutting process produces the rougher surface compared to the wet one. The resulfurization and copper addition were the origin of the decreasing in the cutting force. Also, it can be noticed that resulfurization deteriorates the surface texture in dry cutting, particularly at lower cutting speeds.

Paro et al. (2004) investigated the machining of conventional cast stainless steel with a HIPed (meanshot isostatic pressing) NiTi coating. They concluded that an increased supply of cutting fluid has an advantageous effect on the surface properties. Authors remarked also that the amount of stainless steel adhering to the NiTi walls is decreased when cutting fluid is injected through the spindle. They also underlined that an increase in feed rate will decrease the surface quality.

Paro et al. (2001) studied the tool wear and machinability of stainless steels. It was found that in turning tests of AISI 304 trial materials, wear mechanisms induce catastrophic failure of tool nose due to high cutting forces and sharp edge chipping. The presence of Built-up Edge (BUE) decreases the machinability of AISI 304 trial materials, and the higher the cutting speed, the lower the tool life.

Noordin et al. (2007) conducted dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools. They concluded that side cutting edge angle influenced the tool life when it increases from 0 to 5 degrees. They stated that the flank wear and catastrophic failure are the two main types of tool failure modes when machining hardened StavaxESR steel with KT 315 at the various cutting conditions.

Xingzhong et al. (1999) studied the wear behaviour of Si3N4 ceramic cutting tool material against stainless steel in dry and water-lubricated conditions. They have remarked that higher load brings about more severe adhesive wear and micro-fracture wear of the ceramic. They concluded that the higher the cutting speed, the higher is the friction generated by heat of the rubbing surfaces. This will accelerate adhesion between the rubbing surfaces, increasing adhesion wear and micro-fracture.

Tekiner & Yesilyurt (2004) have made an investigation of the cutting parameters depending on process sound emission during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. This study was carried out to determine the optimal cutting parameters according to the cutting process sound, generated during machining. The feed rate and cutting speed were determined according to the chip form, surface roughness, flank wear, built-up-edge of the machined samples and machine tool power consumption. They found that optimal cutting parameter are cutting speed of 165 m/min and feed rate of 0.25 mm/rev give. Their experiment showed that with the change of cutting parameters, cutting sound pressure change also. E.g. if there is a negative event in cutting process, the cutting sound pressure level will suddenly increase or decrease.

El-Tamimi & El-Hossainy (2008) have investigated the evolutions of tool life, cutting force components and surface roughness of AISI 302 stainless steel according cutting parameters. They concluded that the main tool wear mechanism is adhesion wear caused by welding between tool and ship. They noted that feed rate and depth of cut are the most effective factors on the cutting forces.

Ciftci (2006) studied the machinability of two austenitic stainless steels. He has carried out turning tests on AISI 304 and AISI 316 austenitic stainless steels using TiC/TiCN/TiN and TiCN/TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated cemented carbides. He concluded that cutting speed affects the machined surface roughness value, significantly. . Also, he has remarked that, until a minimum value of 180 m/min, higher the cutting speed, lower the roughness values. This behaviour can be explained by the decrease of built-up edge formation. When cutting speeds are higher than 180 m/min, this causes an increase in surface roughness attributed to the increasing of cutting tool nose wear. Ciftci (2006) noted that TiC/TiCN/TiN coated cutting tools gave lower cutting forces than TiCN/TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated tools because TiN top coating layer generates lower friction coefficient.

Lin & Shyu (2000) used different coated drills (TiN, TiCN, CrN and TiALN) to investigate tool life and exit Burr using variable feeds when drilling stainless steel. They concluded that TiN and TiCN coated drills were more suitable than the CrN and TiALN coated drills when machining AISI 304 austenitic stainless steel.

Selvaraj & Chandramohan (2010) examined surface roughness during machining of AISI 304 ASS in dry turning operation using TiC and TiCN coated tungsten carbide cutting tool. It was noted that feed rate, cutting speed and depth of cut affect surface roughness evolution with a contribution of 51.84%, 41.99% and 1.66%, respectively.

Kaladhar et al. (2012) applied Taguchi method to determine the optimum process parameters for turning of AISI 304 using CVD coated cutting tool. The methodology of ANOVA was used to analyse the influence of cutting conditions. It was concluded that cutting speed affected the machined surface roughness significantly (46.05%) followed by nose radius (23.7%). The depth of cut has a large significance on material removal rate (61.31%) followed by cutting speed (20.40%).

Kulkarni et al. (2013) have focused their research on dry turning of AISI 304 ASS using AlTiCrN coated insert. The effect of cutting parameters on surface finish, cutting force, tool wear, chip thickness and tool life have been studied. It was found that superior surface finish and minimum cutting force were observed at cutting speed of 320 m/min and feed rate of 0.08 mm/rev whereas optimum tool wear was found in the range of (200 to 260) m/min cutting speed.

Wagha et al. (2013) studied the machinability of AISI 304 using coated carbide tools. They observed that when feed rate increases, surface roughness increases where as it decreases with cutting speed. Also, it was underlined that, the higher the cutting speed the higher tool-chip interface temperature. This is due to low thermal conductivity of the coating as well as AISI 304 work material. Further, AlCrN/TiAlN coated cutting tools gave lower cutting forces due to the lower friction coefficient of the coating.

Mahdavinejad & Saeedy (2011) tried to investigate the influence of cutting conditions on machining of austenitic stainless steel with cutting fluid and in dry conditions. Authors have noted that cutting speed is the main parameter which affect flank wear and as cutting speed increases to 175 m/min, the flank wear decreases.

Hasan & Thamizhmanii (2010) analysed tool wear during turning of AISI 440C martensitic stainless steel using CBN cutting tool. They found that flank and crater wears were caused by severe abrasion phenomenon and also by high generation of heat during machining especially at low cutting speed, and low feed rate.

In the present contribution, the investigation of machinability of AISI 304 austenitic stainless steel with Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN CVD coated carbide inserts is presented. Evolutions of cutting force (Fc), cutting power (Pc), specific cutting force (Kc) and surface roughness (Ra) has been studied according to cutting parameters during a turning operation. . To analyze the effects of cutting speed (Vc), feed rate (f) and depth of cut (ap) on the performance of machining, the response surface methodology (RSM) based mathematical models were developed. Quadratic models were developed for deferent cutting cases and the adequacy of such models was tested through the analysis of variance (ANOVA).

## 2. Experimental procedure

### 2.1. Response surface methodology (RSM)

In order to investigate the influence of machining parameters on the evolutions of surface roughness (Ra), cutting force (Fc), specific cutting force (Kc) and cutting power (Pc). Only, three machining parameters were considered in the work, which are the cutting speed (Vc), the feed rate (f) and the depth of cut (ap). These machining parameters should be chosen as independent input variables. The desired responses were Ra, Fc, Kc and Pc which are assumed to be affected by the pre-cited cutting parameters.

RSM is recognized as a statistical technique based on simple multiple regressions. Using this technique, the effect of two or more factors on quality criteria can be investigated and optimum values could be obtained. The RSM was employed for modeling and analysis of the machining parameters during turning process in order to analyse machinability performances regarding surface roughness and cutting force. In the RSM design adopted, there should be at least three levels for each factor. Therefore the factor values that are not actually tested using fewer experimental combinations and combinations themselves can be estimated. The results are expressed in 3D series or counter map. In the procedure of analysis, the approximation of response (Y) was proposed using the fitted second-order polynomial regression model which is commonly called the quadratic model of Y. The latter can be written as follow (eq. 1):

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

Where  $a_0$  is constant,  $a_i$ ,  $a_{ii}$  and  $a_{ij}$  represent the coefficients of linear, quadratic and cross product terms, respectively.  $X_i$  reveals the coded variables that correspond to the studied machining parameters such as cutting speed (Vc), feed rate (f) and depth of cut, and  $\varepsilon$  is a random experimental error.

## 2.2. Experimental design

In order to develop the mathematical model based on RSM and to minimize the number of tests, a L16 Taguchi standard orthogonal array is adopted as the experimental design method. In the current study, cutting speed, feed rate and depth of cut are identified as the factors, which affect the responses such as machining force, power, specific cutting force and surface roughness. Four levels are defined for each factor and the ranges of the selected factors were based on the preliminary tests. In the present investigation, factors and their levels are presented in Table 1. The experimental parameters used and the corresponding responses are given in Table 2. The first column of the Table 2 is assigned to cutting speed ( $V_c$ ), the second to feed rate ( $f$ ) and the third one to depth of cut ( $a_p$ ). The measurement results of the surface roughness ( $R_a$ ) and of the cutting force ( $F_c$ ) are given in the fourth and fifth columns. The sixth and seventh columns are assigned to specific cutting force ( $K_c$ ) and power ( $P_c$ ).

Table 1. Attribution levels of cutting factors

Control parameters	Unit	Symbol	Levels			
			Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Cutting speed	m/min	$V_c$	60	90	120	150
Feed rate	mm/rev	$f$	0.08	0.12	0.16	0.20
Depth of cut	mm	$a_p$	0.25	0.50	0.75	1.00

Table 2. Orthogonal array for responses

N° Test	Process parameter settings			Machinability characteristics			
	$V_c$ , (m/min)	$f$ , (mm/rev)	$a_p$ , (mm)	$R_a$ , ( $\mu\text{m}$ )	$F_c$ , (N)	$K_c$ , (MPa)	$P_c$ , (w)
1	60	0.08	0.25	1.05	94.93	4746.50	94.93
2	60	0.12	0.50	1.17	208.21	3470.17	208.21
3	60	0.16	0.75	1.50	346.12	2884.33	346.12
4	60	0.20	1.00	2.35	540.18	2700.90	540.18
5	90	0.08	0.50	0.54	132.57	3314.25	198.86
6	90	0.12	0.25	0.66	86.01	2867.00	129.02
7	90	0.16	1.00	1.04	390.61	2441.31	585.92
8	90	0.20	0.75	1.62	381.56	2543.73	572.34
9	120	0.08	0.75	0.60	168.13	2802.17	336.26
10	120	0.12	1.00	1.03	320.80	2673.33	641.60
11	120	0.16	0.25	1.40	99.71	2492.75	199.42
12	120	0.20	0.50	1.80	248.19	2481.90	496.38
13	150	0.08	1.00	0.70	199.55	2494.38	498.88
14	150	0.12	0.75	0.95	213.09	2367.67	532.73
15	150	0.16	0.50	1.99	191.24	2390.50	478.10
16	150	0.20	0.25	2.86	109.13	2182.60	272.83

## 2.3. Means and materials

The experiments were carried out on the workpiece AISI 304 stainless steel with chemical composition shown in Table 3. The dimensions are 100mm for diameter and 400mm for length.

The machine used in the current work is the lathe 'TOS TRENCIN; model SN40C'. It is equipped with 6.6 kW spindle power and a maximum spindle speed of 2000 rpm. The cutting insert used is SANDVIK "Ti(C,N)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN" CVD coated carbide referenced as GC2015 (SNMG 12-04-08-MF). The cutting insert were clamped on a right-hand tool holder with designation PSB NR25x25M12.

Table 3. Chemical composition of AISI 304

Composition	(Wt. %)
C	0.02
Cr	16.91
Ni	7.69
Si	0.33
Mn	1.44
Mo	0.41
Fe	72.10
Other components	1.1

Three different components of forces, commonly called, cutting force ( $F_c$ ), feed force ( $F_f$ ) and depth force ( $F_d$ ) were measured through the Kistler piezoelectric dynamometer (model 9121) (fig.1). The values were monitored continuously and recorded through a three-channel charge amplifier (model 5019) with data acquisition system (fig.2). A roughness meter (2d) Surftest 201 Mitutoyo was employed to measure surface roughness  $R_a$ , The length examined is 4 mm with a cut-off of 0.8 mm and the measured values of  $R_a$  are within the range 0.05 – 40  $\mu\text{m}$ . In order to reduce uncertainties due to resumption operations, roughness values were obtained without disassembling the workpiece.

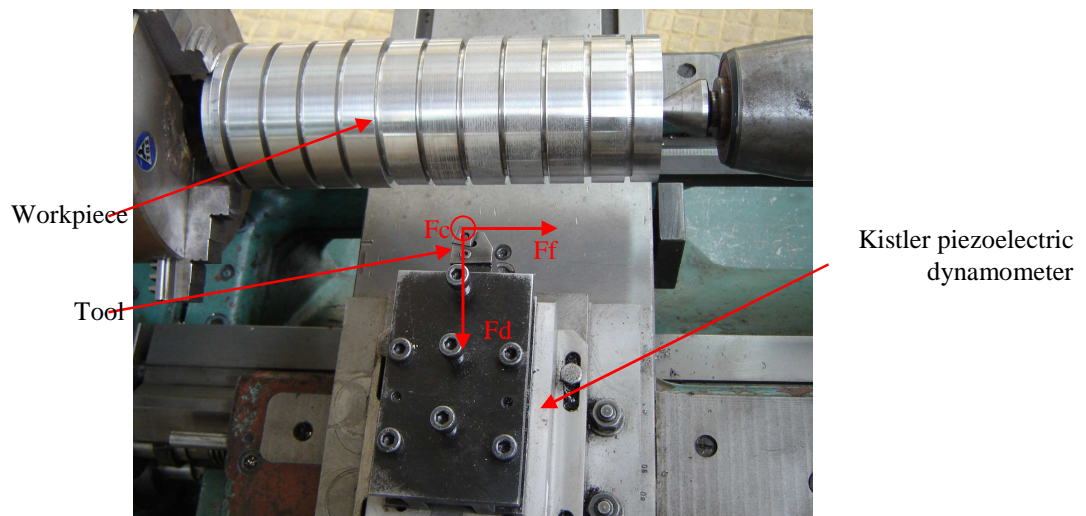


Fig.1. Experimental configuration for measuring cutting force

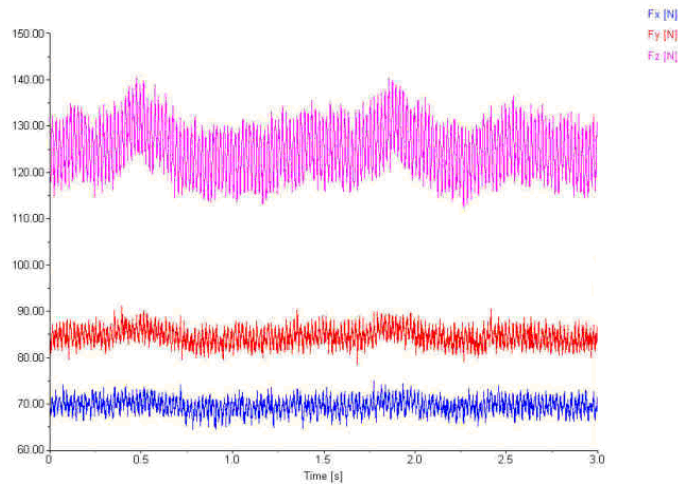


Fig. 2. Sample of acquisition from “Dynoware” software

The other aspects of machinability such as specific cutting force ( $K_c$  (N/mm<sup>2</sup>)) and cutting power ( $P_c$  (N)) are calculated based on the acquisition of  $F_c$ , as following:

$$K_c = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{f \times a_p} \quad (2)$$

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60} \quad (3)$$

$S$  is the shear plane area (mm<sup>2</sup>).

### 3. Results and discussion

The effect of cutting conditions on surface roughness, cutting force, specific cutting force and power obtained from the turning of austenitic AISI 304 stainless steel workpiece material is presented in Table 2. In the next discussion is focused on the variance analysis, the regression equation for various responses and the analysis of response surfaces.

#### 3.1. Analyse of variance

Tables 4-7 show the results of analysis of variance for surface roughness, tangential force, specific cutting force and cutting power. In addition, the same tables show the degrees of freedom, sum of square, mean of square, F-value and the P-value which is a statistical index used in the analysis of variance. . In the statistical significance, the lower P-value means that the tested parameter is more significant. Often the analysed parameter is considered as significant when the P-value is less than 0.05. In this study, the significance of all cutting parameters was proved while the P-values of all parameters were less than 0.05. Therefore, it seems to be important to study the effects of each cutting condition on the machining characteristics. The ratio of contribution of different factors and their interactions were also presented. The purpose is to analyse the influence of cutting parameters ( $V_c$ ,  $f$  and  $a_p$ ) on the different cutting responses ( $R_a$ ,  $F_c$ ,  $K_c$  and  $P_c$ ).

It can be observed from ANOVA results (for  $R_a$  presented in Table 4) that the feed rate affects  $R_a$  in a significant way. Its contribution is 71.04% followed by depth of cut with a contribution of 2.17% and small contribution with 0.97% for cutting speed. In addition, the term ( $V_c^2$ ) has a contribution of about 14.30%.

Table 4. ANOVA table for  $R_a$

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
$V_c$	1	0.06384	0.55328	15.95	0.007	0.97
$f$	1	4.67545	0.11889	3.43	0.114	71.04
$ap$	1	0.14281	0.01779	0.51	0.501	2.17
$V_c^2$	1	0.9409	0.9409	27.13	0.002	14.30
$f^2$	1	0.19802	0.19803	5.71	0.054	3.01
$ap^2$	1	0.0529	0.0529	1.53	0.263	0.80
$V_c*f$	1	0.12149	0.12149	3.5	0.11	1.85
$V_c*ap$	1	0.17529	0.17529	5.05	0.066	2.66
$f*ap$	1	0.00216	0.00216	0.06	0.811	0.03
<b>Error</b>	6	0.2081	0.03468			3.16
<b>Total</b>	15	6.58098				100

Nevertheless, the influence of cutting conditions on cutting force evolutions shows that the cutting speed has a small effect compared with that of the feed rate and the depth of cut and this can be noted in ANOVA analysis presented in Table 5. The depth of cut has a contribution ratio of 60% and 25% for the feed rate, but the cutting speed presents only a 12%.

Table 5. ANOVA table for  $F_c$

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
$V_c$	1	31332	444	188.40	<0.001	12.34
$f$	1	63349	1	380.93	<0.001	24.95
$ap$	1	154244	355	927.50	<0.001	60.74
$V_c^2$	1	350	350	2.11	0.197	0.14
$f^2$	1	21	21	0.13	0.733	0.01
$ap^2$	1	145	145	0.87	0.386	0.06
$V_c*f$	1	1	1	0.00	0.951	0.00
$V_c*ap$	1	34	34	0.20	0.668	0.01
$f*ap$	1	3479	3479	20.92	0.004	1.37
<b>Error</b>	6	998	166			0.39
<b>Total</b>	15	253953				100.00

The ANOVA results of the specific cutting force and the cutting power are presented in the Tables 6 and 7, respectively. It can be noted that the depth of cut is the most preponderant parameter which affect the power with the contribution of about 67%. The second factor influencing  $P_c$  is the feed rate with a contribution of about 14%. Although, the cutting speed, its effect is less important and its contribution is 9.91%.



It is clear from the results of ANOVA shown in Table 6 that the cutting speed affect significantly specific cutting force and its contribution is 41.43%. The second parameter influencing specific cutting force is feed rate and its contribution is 28.77%. Hence; the influence of depth of cut is less important and its contribution is just 10.62%.

Table 6. ANOVA table for Kc

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
<b>Vc</b>	1	2386169	722643	81.83	<0.001	41.43
<b>f</b>	1	1657079	612362	56.83	<0.001	28.77
<b>ap</b>	1	611748	224022	20.98	0.04	10.62
<b>Vc<sup>2</sup></b>	1	164146	164146	5.63	0.055	2.85
<b>f<sup>2</sup></b>	1	176266	176266	6.04	0.049	3.06
<b>ap<sup>2</sup></b>	1	7398	7398	0.25	0.632	0.13
<b>Vc*f</b>	1	294009	294009	10.08	0.019	5.11
<b>Vc*ap</b>	1	184023	184023	6.31	0.046	3.20
<b>f*ap</b>	1	103045	103045	3.53	0.109	1.79
<b>Error</b>	6	174958	29160			3.04
<b>Total</b>	15	5758842				100.00

Table 7. ANOVA table for Pc

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F-value	P-value	Cont %
<b>Vc</b>	1	48353	342	114.66	<0.001	9.91
<b>f</b>	1	69409	515	164.59	<0.001	14.23
<b>ap</b>	1	327301	613	776.11	<0.001	67.11
<b>Vc<sup>2</sup></b>	1	2205	2205	5.23	0.062	0.45
<b>f<sup>2</sup></b>	1	763	763	1.81	0.227	0.16
<b>ap<sup>2</sup></b>	1	2658	2658	6.30	0.046	0.55
<b>Vc*f</b>	1	7863	7863	18.65	0.005	1.61
<b>Vc*ap</b>	1	14751	14751	34.98	0.001	3.02
<b>f*ap</b>	1	11852	11852	28.10	0.002	2.43
<b>Error</b>	6	2530	422			0.52
<b>Total</b>	15	487685				100.00

### 3.2. Regression equation for the various responses

The functional relationship between the dependent variables (Ra, Fc, Kc and Pc) and the investigated independent variables ( Vc, f and ap) were expressed with correlation coefficient R<sup>2</sup> corresponding to the regression accuracy. The different quadratic models obtained from statistical analysis can be used to predict the surface roughness, cutting force, specific cutting force and cutting power according to the studied factors.

The comparison between experimental and predicted values is presented in (fig.3, fig.4, fig.5 and fig.6). The obtained models presenting the evolution of surface roughness, cutting force, specific cutting force and cutting power regarding (Vc, f, and ap) are presented by eqtions4, 5, 6 and7), respectively).

The Anderson–Darling test and normal probability plots of predicted responses for the surface roughness, cutting force, specific cutting force and machining power are plotted respectively in (figs. 7, 8, 9 and 10). The data follows the straight line, closely. The null hypothesis is that the data distribution law is normal and the alternative

hypothesis corresponds to non-normal distribution. Using the P-value which is greater than alpha of 0.05 (level of significance), the null hypothesis cannot be rejected (i.e., the data follow a normal distribution). This implies that the models proposed are adequate.

$$Ra = 4.13 - 0.06Vc - 19.86f - 1.13ap + 0.0003Vc^2 + 69.53f^2 + 0.92ap^2 + 0.1Vc.f - 0.01Vc.ap - 1.56f.ap$$

$$R^2=96.84 \tag{4}$$

$$Fc = 101 - 1.62Vc - 57.19f + 159ap + 0.01Vc^2 + 720f^2 + 48.19ap^2 - 0.23Vc.f - 0.26Vc.ap + 1988f.ap$$

$$R^2=99.61 \tag{5}$$

$$Kc = 11076 - 65.3Vc - 45067f - 4011ap + 0.1Vc^2 + 65600f^2 + 344ap^2 + 152Vc.f + 19Vc.ap + 10821f.ap$$

$$R^2=96.96 \tag{6}$$

$$Pc = 149 - 1.42Vc - 1307f - 209ap - 0.01Vc^2 - 4314f^2 - 206ap^2 + 24.9Vc.f + 5.46Vc.ap + 3669f.ap$$

$$R^2=99.48 \tag{7}$$

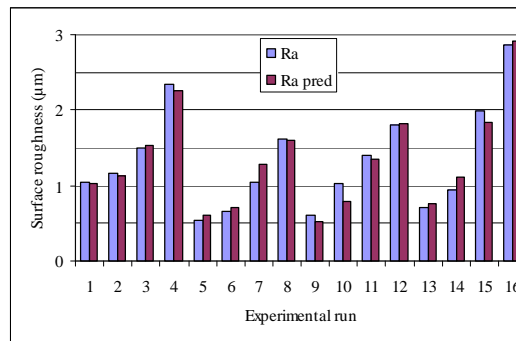


Fig. 3. Experimental and predicted RSM values of surface roughness.

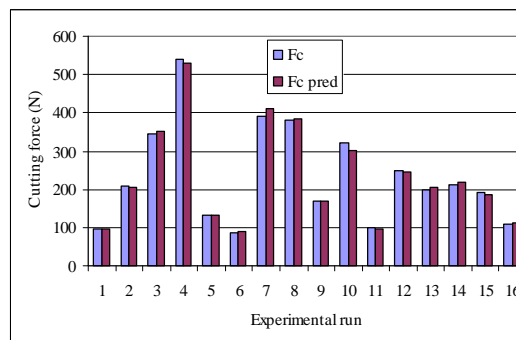


Fig. 4. Experimental and predicted RSM values of cutting force

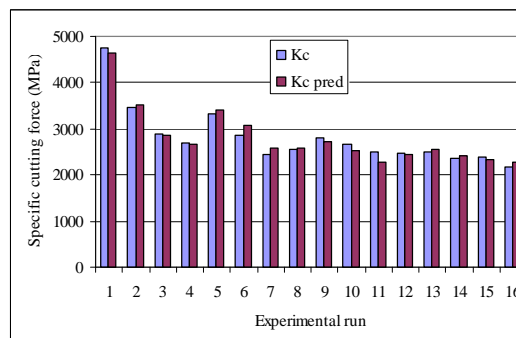


Fig. 5. Experimental and predicted RSM values of specific cutting force

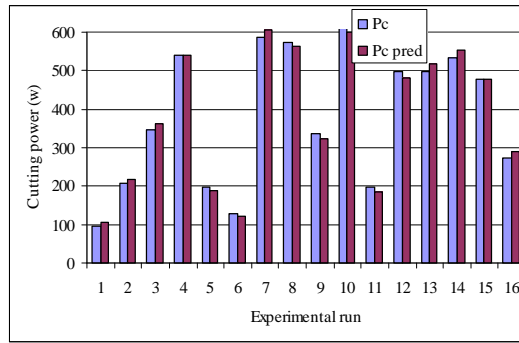


Fig. 6. Experimental and predicted RSM values of cutting power

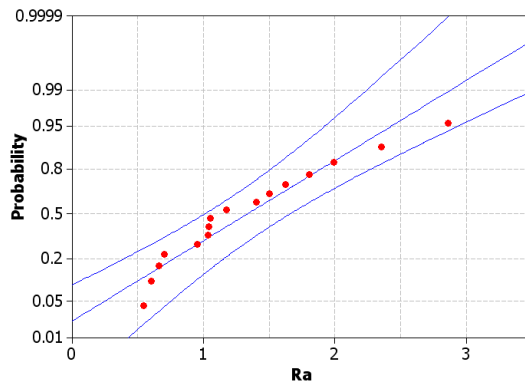


Fig. 7. Normal probability plot for Ra

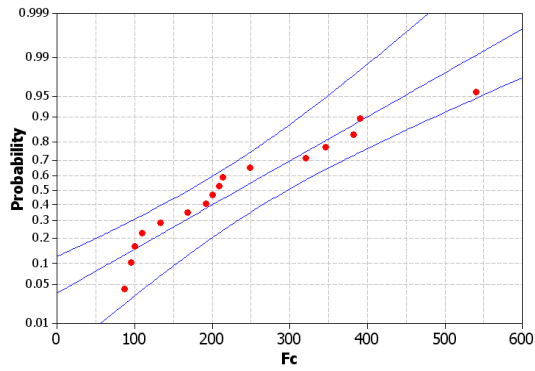


Fig. 8. Normal probability plot for Fc

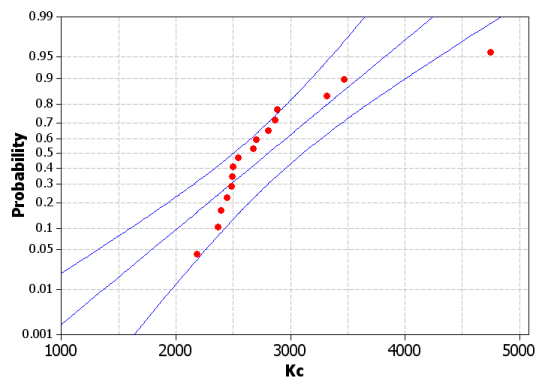


Fig. 9. Normal probability plot for Kc

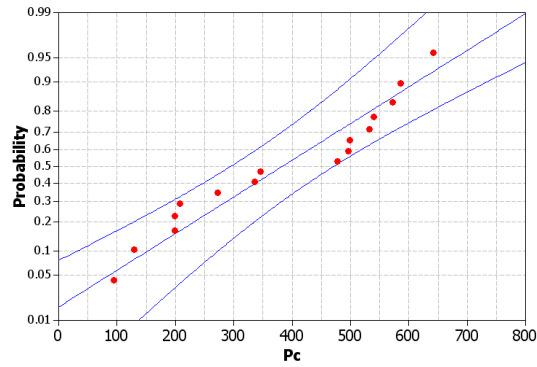
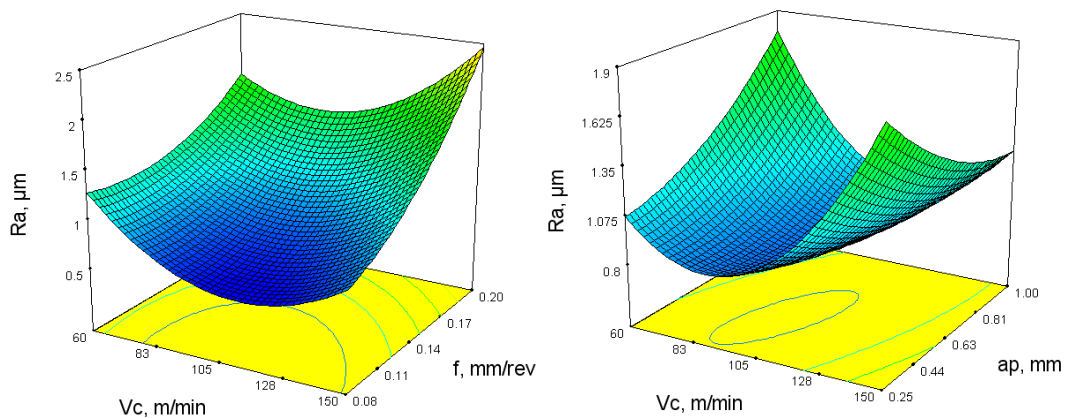


Fig. 10. Normal probability plot for  $P_c$

### 3.3. Responses surface analysis

#### a. Surface roughness

The evolution of the estimated roughness response surface in relationship with cutting parameters ( $V_c$ ,  $f$  and  $a_p$ ) is presented in (fig. 11). It can be shown that the cutting speed has a significant influence on the machined surface roughness. High values of surface roughness are noted in lower values of cutting speed. This can be explained by the presence of built up edge (BUE) (fig. 12.) on the surface due to the high ductility of austenitic stainless steel. With the increasing of cutting speed, the surface roughness values decrease until a minimum value reached beyond which they increase. The decrease in surface roughness when increasing cutting speed to 100m/min can be explained by the presence of micro-welds on machined surface due to high level heat at cutting zone. At a given height, the built-up edge can be broken and carried away on the machined surface as seen in (fig.12). Further, increasing the cutting speed causes an increase in surface roughness. This is due to the tool nose wear increase causing the poor surface finish Ciftci (2005).



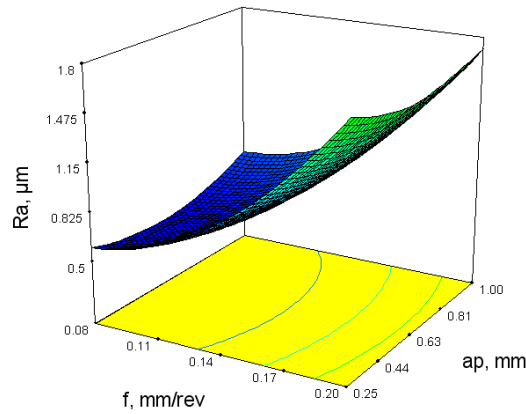


Fig. 11. Surface and contour plots for Ra

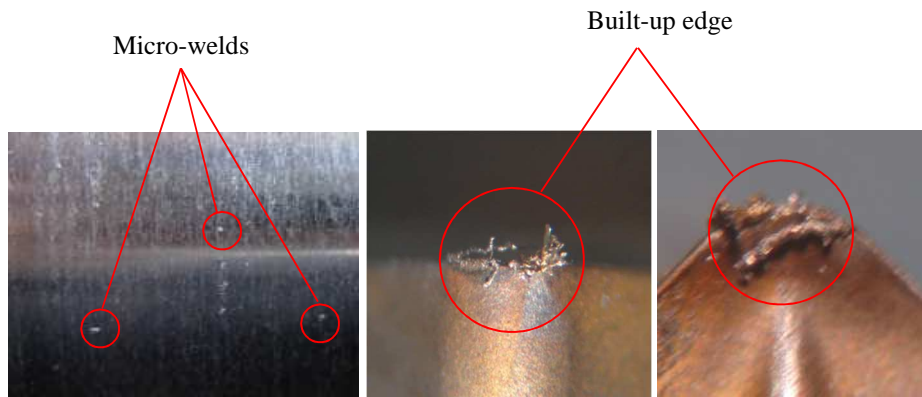


Fig. 12. Micro-weld on machined surface and Built-up edge on cutting insert

### b. Tangential cutting force

The 3D surface plot displayed in (fig. 13) illustrates the effect of cutting parameters on cutting force,  $F_c$ . The variation of  $F_c$  as a function of the cutting conditions is linear and found to be increase with feed rate and of depth of cut. This behaviour is due to the increase of chip section. According to the surface plot, it can be observed that the feed rate has a smaller influence on  $F_c$  compared with depth of cut and that's confirmed in ANOVA, previously. Furthermore, the cutting speed affects slightly the tangential force, with increasing of ( $V_c$ ) the cutting force  $F_c$  decrease. This is explained by the increasing of the cutting temperature in the cutting area which leads to the softening of the machined material. This allows removing the material at lower cutting force. Similar observation has been reported by El-Tamimi et al (2010) and Swapnagandha et al (2013), recording a high forces at lower cutting speed because the chip remains, for long time, in contact with the tool rake face yielding to an increase in the tool-chip contact length. This implies an increase in the friction between the tool and chip that resulted in higher forces.

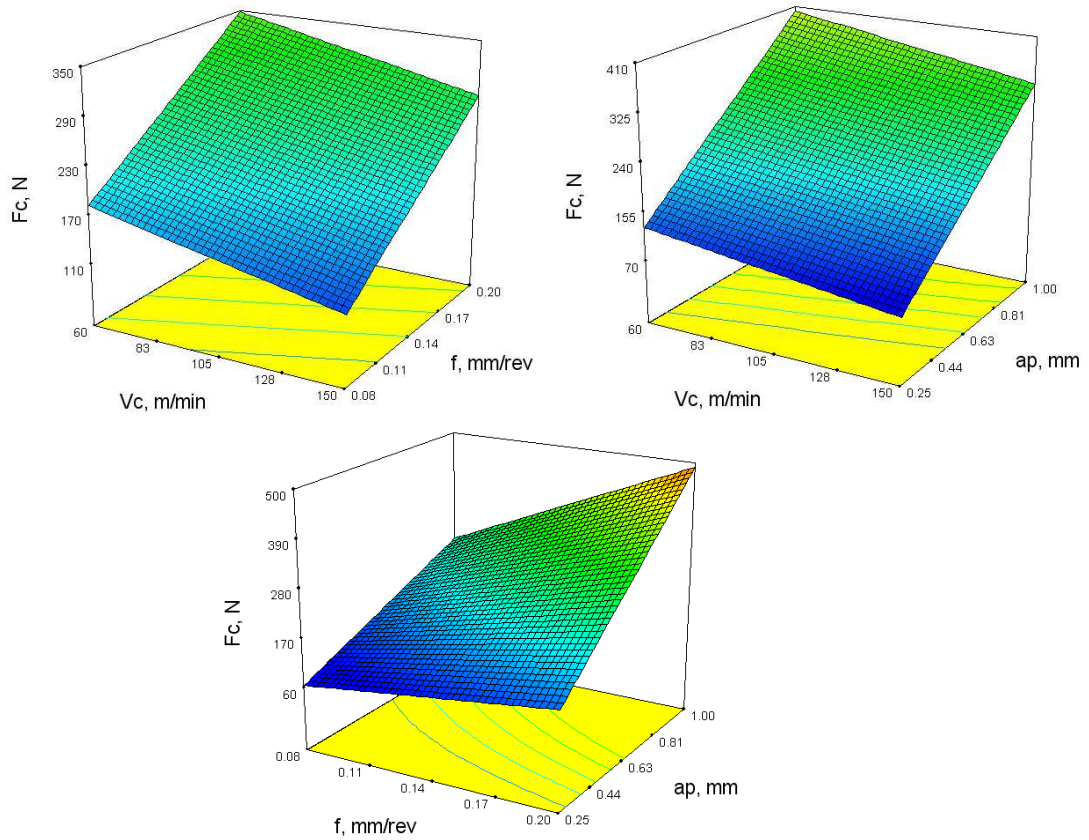


Fig. 13. Surface and contour plots for  $F_c$

### c. Power and specific cutting force

The variation of power with different cutting parameters presented in (fig. 15) shows that power increases with different cutting parameters. It was clear from surface plot that the depth of cut ( $a_p$ ) is the most preponderant parameter affecting the cutting power. When the depth of cut ( $a_p$ ) increases, the tangential force increases. The influence of studied cutting parameters ( $V_c, f, a_p$ ) on specific cutting force is illustrated in (fig. 14). It can be remarked that the cutting speed affects considerably  $K_c$  when the feed rate increases (up to 0.15mm/rev), the  $K_c$  decreases. Thereafter the specific cutting force exhibits an increasing trend. It is clear from analysis that higher cutting speed with lower feed rate is beneficial to reduce the cutting force and consequently decreasing the specific cutting force.

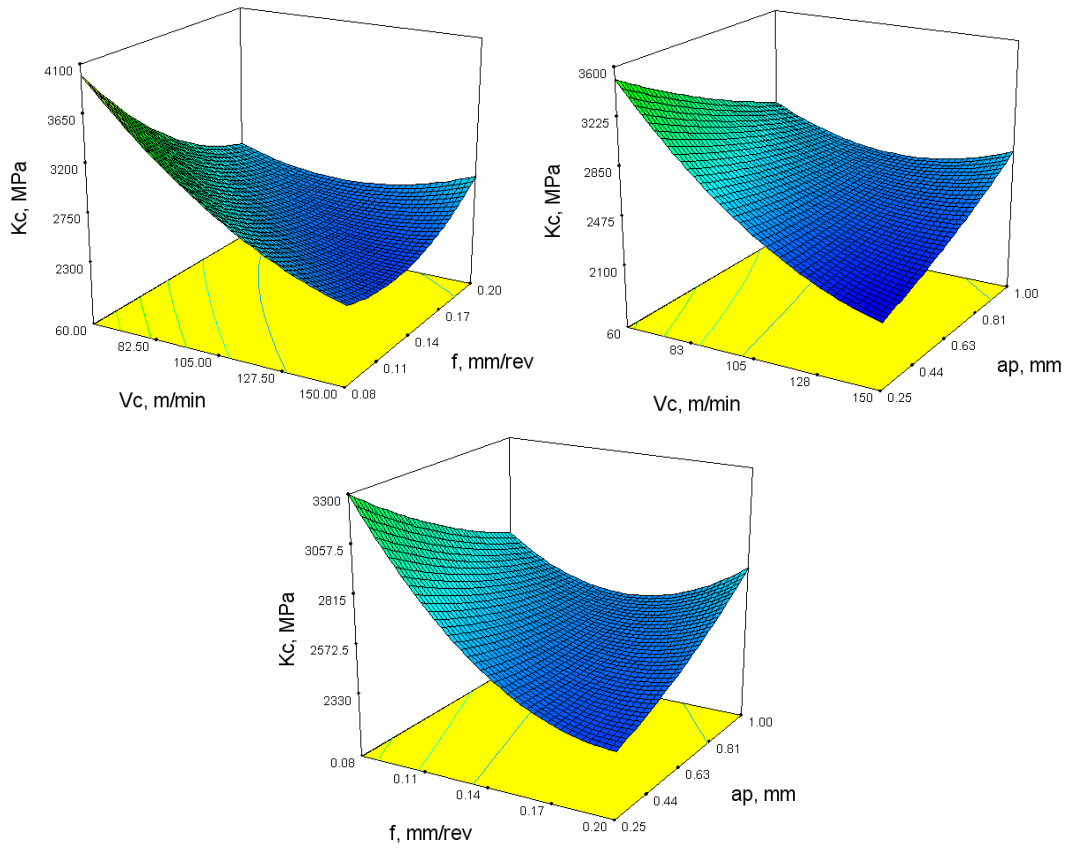


Fig. 14. Surface and contour plots for  $K_c$

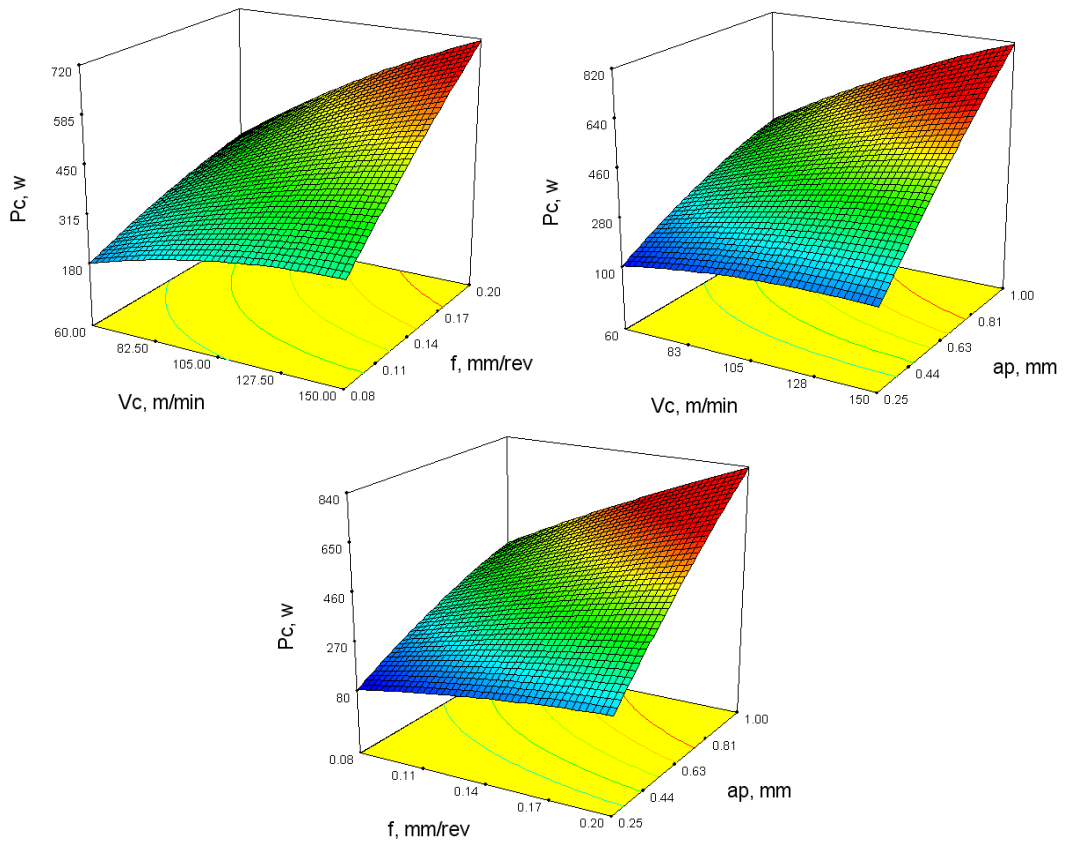


Fig. 15. Surface and contour plots for  $P_c$

#### 4. Multiple responses optimisation

One of the most important aims of experimental manufacturing is to identify the desired response values of the optimal cutting parameters. To reach this end, the response surface optimization is an ideal technique for determination of the cutting parameters combination in turning. In the current study, the goal is to minimize the deferent cutting outputs (surface roughness, cutting force, specific cutting force and cutting power). RSM optimization results for cutting phenomenon were shown in (fig. 16). Optimum cutting parameters obtained in Table 8 were found to be cutting speed of 104.5 m/min, feed rate of 0.08 mm/rev and depth of cut of 0.295 mm. The optimized values of (Ra, Fc, Kc and Pc) are (0.57  $\mu\text{m}$ , 69.35 N, 3267.20.93 MPa and 95.13w), respectively.

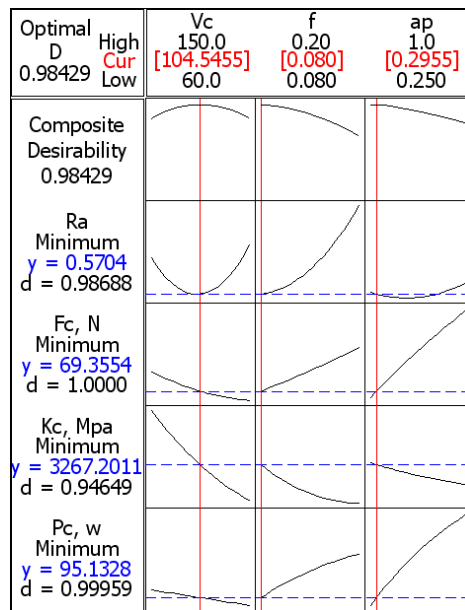


Fig 16. Response optimization plots for (Ra, Fc, Kc and Pc)

Table 8. Response optimisation for

parameters	Goal	Optimum condition			Predicted		Deserability	
		Vc, m/min	f, mm/rev	ap, mm	Lower	Upper		response
Ra, $\mu\text{m}$	Minimum				0.54	2.86	0.57	0.98
Fc, N	Minimum	104.54	0.08	0.295	86.01	540.18	69.36	1.00
Kc, MPa	Minimum				2182.60	4746.50	3267.20	0.94
Pc, w	Minimum				94.93	585.92	95.13	0.99

#### 5. Confirmation tests

The confirmation tests were performed for surface roughness and cutting force in order to verify the adequacy of obtained mathematical models which are Eqs. (4) and (5). The cutting parameters used in the turning confirmation tests were presented in Table 9. The Table 10 shows a comparison between the predicted values from the model developed in the present work (Eqs. (4) and (5)), with the experimental data. From the analysis of Table 10, it can be noted that the calculator error for surface roughness Ra has a maximum value of 8.57% and a minimum one of 5.81%. For the cutting force Fc the maximum magnitude is about 11.02% and the minimum one



is about 0.16%). As a conclusion, it can be considered that eqs. (4) and (5) correlate the evolution of both surface roughness and cutting force with cutting parameters according a reasonable degree of approximation.

Table 9. Cutting conditions used in turning confirmation tests

Test N°	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)
T1	70	0.08	0.40
T2	70	0.11	0.60
T3	70	0.18	0.40
T4	138	0.09	0.85
T5	68	0.14	0.55

Table 10. Confirmation tests for surface roughness and cutting force

Test N°	Surface roughness			Cutting force		
	Actual	Predicted	Error (%)	Actual	Predicted	Error (%)
T1	1.30	1.22859	5.81	108.56	122.008	11.02
T2	1.45	1.33551	8.57	209.46	209.117	0.16
T3	2.14	2.29837	6.89	201.83	217.965	7.40
T4	1.80	1.96319	8.31	211.55	195.976	7.95
T5	1.57	1.66979	5.98	241.49	233.709	3.33

## 5. Conclusion

Based on the experimental results and parametric analysis concerning the machining of AISI304 austenitic stainless steel, the following points can be concluded.

1. Cutting speed has a significant influence on the evolution of the machined surface roughness. For small values, it can be noted that cutting speed implies a bad surface finish. This can be explained by the presence of built-up edge and the high ductility of austenitic stainless steels.
2. The feed rate is the most significant factor affecting the surface roughness with 71.04 % contribution in the model total variability followed by depth of cut with 2.17 % and contribution of 0.97 % for cutting speed.
3. Cutting force is highly affected by depth of cut. Its contribution was 60.74 %, followed by feed rate with contribution of 24.95 %. Cutting speed has a small contribution with 12.34%. Cutting force initially increases with the increase of both depth of cut and feed rate. Also, the lower the cutting force, the lower the cutting speed. This reduction is probably caused by increase in the temperature at the cutting zone which leads to the workpiece softening.
4. Cutting speed has the highest influence on specific cutting force with a contribution of 41.43% followed by feed rate (28.77%) and the contribution of 10.62% for depth of cut. At higher cutting speed and lower feed rate, cutting force is smaller. The latter decreases the specific cutting force.
5. The analysis shows that the depth of cut has a significant effect on the power consumption with a contribution of 67.11% followed by feed rate (14.23%) and cutting speed (9.91%). When studied cutting parameters (Vc, f and ap) increase the cutting power increases.

6. The response optimization shows that the optimal combination of machining parameters are (cutting speed of 104.54 m/min, feed rate of 0.080 mm/rev and depth of cut of 0.295 mm) with estimated values of (0.57 $\mu$ m for Ra, 69.36N for Fc, 3267.20MPa for Kc and 95.13 watt for Pc).
7. The confirmation tests indicate that the error related to surface roughness Ra has a maximum value of 8.57% and a minimum one of 5.81%) and for the cutting force Fc has a maximum value of 11.02% and a minimum one 0.16%).

### Acknowledgements

This work was achieved in the laboratory LMS (Guelma University, Algeria) and in collaboration with Université de Tunis El-Manar, ENIT, BP-37, Le Belvédère 1002, Tunis, Tunisie. The authors would like to thank the Algerian Ministry of Higher Education and Scientific Research (MESRS) and the Delegated Ministry for Scientific Research (MDRS) for granting financial support for CNEPRU Research Project, CODE: J0301520140021 (Guelma University).

### References

- Akasawa, T., Sakurai, H., Nakamura, M., Tanaka, T., & Takano, K. (2003). Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 66-71.
- Ciftci, I. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 39(6), 565-569.
- El-Tamimi, A. M., & El-Hossainy, T. M. (2008). Investigating the tool life, cutting force components, and surface roughness of AISI 302 stainless steel material under oblique machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(4), 427-438.
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Faustino, M., & Davim, J. P. (2010). Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(2), 221-227.
- Hasan, S., & Thamizhmanii, S. (2010). Tool flank wear analyses on AISI 440 C martensitic stainless steel by turning. *International Journal of Material Forming*, 3(1), 427-430.
- Kaladhar, M., Subbaiah, K., & Rao, C. (2012). Parametric optimization during machining of AISI 304 Austenitic Stainless Steel using CVD coated DURATOMIC cutting insert. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3(4), 577-586.
- Korkut, I., Kasap, M., Ciftci, I., & Seker, U. (2004). Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 25(4), 303-305.
- Kulkarni, A. P., Joshi, G. G., & Sargade, V. G. (2013). Dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using AlTiCrN coated insert produced by HPPMS technique. *Procedia Engineering*, 64, 737-746.
- Lin, T. R., & Shyu, R. F. (2000). Improvement of tool life and exit burr using variable feeds when drilling stainless steel with coated drills. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16(5), 308-313.
- Mahdavejad, R. A., & Saeedy, S. (2011). Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. *Sadhana*, 36(6), 963-970.
- Noordin, M. Y., Venkatesh, V. C., & Sharif, S. (2007). Dry turning of tempered martensitic stainless tool steel using coated cermet and coated carbide tools. *Journal of materials processing technology*, 185(1), 83-90.

- Paro, J. A., Gustafsson, T. E., & Koskinen, J. (2004). Drilling of conventional cast stainless steel with HIPed NiTi coating. *Journal of materials processing technology*, 153, 622-629.
- Paro, J., Hänninen, H., & Kauppinen, V. (2001). Tool wear and machinability of X5 CrMnN 18 18 stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1), 14-20.
- Selvaraj, D. P., & Chandramohan, P. (2010). Optimization of surface roughness of AISI 304 austenitic stainless steel in dry turning operation using Taguchi design method. *Journal of Engineering Science and Technology*, 5(3), 293-301.
- Tekiner, Z., & Yeşilyurt, S. (2004). Investigation of the cutting parameters depending on process sound during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 25(6), 507-513.
- Thamizhmanii, S., & Hasan, S. (2009). Effect of tool wear and forces by turning process on hard AISI 440 C and SCM 440 materials. *International Journal of Material Forming*, 2(1), 531-534.
- Wagh, S. S., Kulkarni, A. P., & Sargade, V. G. (2013). Machinability Studies of Austenitic Stainless Steel (AISI 304) Using PVD Cathodic Arc Evaporation (CAE) System Deposited AlCrN/TiAlN Coated Carbide Inserts. *Procedia Engineering*, 64, 907-914.
- Xingzhong, Z., Jiajun, L., Baoliang, Z., Hezhou, M., & Zhenbi, L. (1999). Wear behavior of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tool material against stainless steel in dry and water-lubricated conditions. *Ceramics international*, 25(4), 309-315.