

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté : Sciences et technologies
Département : Génie Mécanique

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN SCIENCE

Filière : Génie Mécanique

Présentée par

ABDERRHMEN ZERTI

Intitulée

**Modélisation des efforts et de la rugosité de surface de l'acier
inoxydable Martensitique basé sur les méthodes statistiques et
les A.N.N**

Soutenue le :

Devant le Jury composé de :

Mr Lakhdar Boulanouar	Professeur	Univ. Badji mokhtar Annaba	Président
Mr Mohamed Athmane Yaltese	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Rapporteur
Mr Abderrezak Djebala	Professeur	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
Mr Mohieddine Bengersallah	M C A	Univ. Badji mokhtar Annaba	Examineur
Mr Salim Belhadi	M C B	Univ. 8 Mai 1945 Guelma	Invité

Année Universitaire :

Dédicaces

Je tiens à dédier cette thèse :

A mon maître de passion, de patience et de persévérance . . . Mon père, A ma source d'inspiration, de motivation et de bénédiction . . . Ma mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

A ma femme qui m'a tellement soutenu ;

A mes cher enfants YANIS et ANAIS ;

Mes sœurs et mes frères ;

Toute ma famille ;

Mes chers amis

A La mémoire de mes grands-pères et mes grands-mères

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de mécanique et structures (LMS) de l'université de Guelma sous la direction de Monsieur le professeur YALLESE Mohamed Athmane, qui a fait preuve d'une grande disponibilité à mon égard tout au long de la période que j'ai passé au labo, pour m'avoir intégré rapidement au sein du laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordé dès mon arrivée, pour son esprit scientifique qui restera une grande source d'inspiration.

Je tiens à remercier Mr., BOULANOVAR Lakhdar, Professeur à l'Université d'Annaba, de l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de thèse.

Je remercie vivement Messieurs : DJEBALA Abdelrezak Professeur à l'Université de Guelma, et BENGHERSALLAH Mohieddine, Maître de conférences à l'Université d'Annaba pour avoir accepté la tâche d'examineurs, et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux de thèse.

Mes sincères remerciements à Messieurs : BELHADI Salim, Maître de conférences au département de Génie Mécanique, Université 08 Mai 1945 de Guelma.

Rien n'aurait été possible sans la présence et le soutien indéfectible de ma famille trouve en cet aboutissement le fruit de la confiance qu'ils m'ont toujours accordée, et des sacrifices qu'ils ont faits pour moi durant ces années.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail et particulièrement MM: M^{ed} AIB, A/Aziz MADI et à tous les membres, les thésards et l'ingénieur du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS) Mr. OUFELLA Rabeh.

Résumé

Les aciers inoxydables martensitiques sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion, leur dureté, et leur résistance à l'usure. Mais ces types d'aciers sont spécifiés comme matériaux difficiles à usiner en raison de leur résistance élevée, de leur faible conductivité thermique et peu d'informations concernant son comportement dans les processus d'usinage, en particulier après traitement thermique. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de cette thèse de doctorat. Le travail est divisé en deux parties. La première concerne une investigation sur l'usinage de l'acier (AISI 420) à l'état trempé par une céramique revêtue en utilisant un plan de Taguchi (L_{25}) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiés. La méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'analyse de la variance ANOVA ont été utilisées afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f , et ap) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Le traitement statistique des résultats a permis de proposer des modèles mathématiques des paramètres de sortie. Ces modèles sont exploités dans le but d'optimiser les conditions de coupe en utilisant deux approches, à savoir ; l'optimisation mono-objective en se basant sur l'approche de Taguchi et l'optimisation multi-objective utilisant la fonction de désirabilité (DF) et cela quatre cas objectifs différents.

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons utilisé une deuxième méthode de modélisation qui concerne les réseaux de neurones artificiels (RNA). Cette dernière est appliquée pour la modélisation non linéaire du processus de coupe en tournage. Elle est suivie par une étude comparative comparaison entre la modélisation par (MSR) et (RNA) et cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes.

Mots clés : Usinage ; Acier inoxydable martensitique ; céramique revêtu ; ANOVA ; MSR ; Optimisation ; rugosité de surface ; efforts de coupe ; *MRR*.

Abstract

Martensitic stainless steels are widely used in various fields, because of their corrosion resistance, hardness, and wear resistance. However, these types of steels are specified as materials difficult to machine because of their high strength, low thermal conductivity and little information about their behavior in machining processes, especially after heat treatment. It is within this framework that the research work of this doctoral thesis falls. The work is divided into two parts. The first concerns an investigation into the machining of steel (AISI 420) in the hardened state by a coated ceramic using a Taguchi plane (L_{25}) in order to determine the mathematical models of the different answers studied. The response surface methodology (MSR) and ANOVA variance analysis were used to calculate the contribution of the different factors (V_c , f , and ap) and their interactions on the technological parameters. The statistical processing of the results made it possible to propose mathematical models of the output parameters. These models are exploited for optimizing cutting conditions using two approaches, namely; mono-objective optimization based on Taguchi's approach and multi-objective optimization using the Desirability Function (DF) and that four different objective cases.

In the second part of this work, we used a second modelling method that concerns artificial neural networks (ANN). The latter is applied for non-linear modelling of the cutting process during turning. It is followed by a comparative study between (RSM) and (ANN) modelling in order to verify the effectiveness and robustness of the two methods.

Key words: Machining; Martensitic stainless steel; coated ceramic; ANOVA; RSM; Optimization; surface roughness; cutting forces; *MRR*.

ملخص

Martensitique الفولاذ المقاوم للصدأ, تستخدم على نطاق واسع في مجالات مختلفة بسبب مقاومتها للتآكل ، الصلابة ، ومقاومة التآكل . لكن هذه الأنواع من الفولاذ محددة كمعاد يصعب صنعها، بسبب قوتها العالية، والموصلية الحرارية المنخفضة ومعلومات قليلة عن سلوكها في عمليات المعالجة، خاصة بعد المعالجة الحرارية. في هذا السياق، تم تسجيل العمل البحثي لأطروحة الدكتوراه هذه. ينقسم العمل إلى قسمين . يتعلق الأمر الأول بالتحقيق، حول معالجة الصلب (AISI 420) في حالة التصلب باستخدام السيراميك المطلي باستعمال خريطة Taguchi (L_{25}) وهذا من أجل تحديد النماذج الرياضية للردود المختلفة التي تمت دراستها. تم استخدام أسلوب الاستجابة السطحي (RSM) وتحليل التباين ANOVA لحساب مساهمة العوامل المختلفة (Vc و f و ap) وتفاعلاتها على المعلمات التكنولوجية. جعلت نتائج المعالجة الإحصائية إمكانية اقتراح نماذج رياضية لمعلمات الخروج. يتم استغلال هذه النماذج لغرض تحسين شروط القطع باستخدام أسلوبين، وهما : تحسين أحادي الهدف على أساس نهج Taguchi والتحسين متعدد الأهداف باستخدام وظيفة الرغبة (DF) وأربعة حالات موضوعية مختلفة. في الجزء الثاني من هذا العمل، استخدمنا طريقة التصميم الثانية التي تتعلق الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). يتم تطبيق هذا الأخير على التصميم غير الخطية لعملية القطع أثناء الخراطة. وتليها دراسة مقارنة بين التصميم بواسطة (RSM) و (ANN) وهذا من أجل التحقق من فعالية ومثانة الطريقتين.

الكلمات المفتاحية: القطع ; الفولاذ المقاوم للصدأ ; Martensitique ; السيراميك المطلي ; ANOVA ; RSM ; الأمثل ; خشونة السطح ; قوات القطع ; MRR .

INDEX DES FIGURES

CHAPITRE I

Etude bibliographique

Figure I.1 :	<i>Échantillon d'oxyde de chrome [8] .</i>	6
Figure I.2 :	<i>Alésage à sec d'une pièce en acier traité à (62 HRC) avec une céramique mixte.</i>	9
Figure I.3 :	<i>Comparatif de coûts entre tournage dur et rectification</i>	10
Figure I.4 :	<i>Recommandations en tournage dur [17]</i>	12
Figure I.5 :	<i>Plaquettes de céramique : alumine (blanche), alumine et Si_3N_4 (grise), alumine et TiC (noire).</i>	14
Figure I.6 :	<i>Revêtement multicouche d'un substrat carbure. [31]</i>	15
Figure I.7 :	<i>Caractéristiques du profil.</i>	17
Figure I.8 :	<i>Profil de surface tournée</i>	18
Figure I.9 :	<i>Les critères de la rugosité</i>	19
Figure I.10 :	<i>Composantes des efforts de coupe</i>	20
Figure I.11 :	<i>Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites des efforts de coupe</i>	21
Figure I.12 :	<i>Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de R_a .</i>	22
Figure I.13 :	<i>: Evolution d'usure d'outil (VB) en fonction du temps de coupe sous les conditions : Sec, Lubrifié et Quantité Minimum de Lubrifiant (MQL) à $V_c=120$ et 180 m/min</i>	22
Figure I.14 :	<i>Rugosité de surface en fonction du temps de coupe sous conditions :a) lubrifié, b) sec et c) quantité minimum de lubrifiant (MQL) à des $V_c= 120, 150$ et 180 m/min</i>	23
Figure I.15 :	<i>Comparaison entre les valeurs expérimentales de R_a avec les deux modèles RMS et ANN, Pour $V_c = 150$ m/min avec lubrification</i>	24
Figure I.16 :	<i>changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure non revêtu</i>	25
Figure I.17 :	<i>changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure revêtu</i>	25
Figure I.18 :	<i>Effet de la vitesse de coupe sur l'énergie spécifique de coupe à des différents angles de coupe</i>	26
Figure I.19 :	<i>Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction de la fréquence de rotation.</i>	27
Figure I.20 :	<i>Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différentes vitesses de coupe et avances pour un angle d'attaque -5°</i>	27
Figure I.21 :	<i>Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différents angles d'attaque pour $V_c=170$ m/min</i>	28
Figure I.22 :	<i>Variation de l'usure initiale de l'outil et des conditions de coupe (fraisage pendant 40 secondes).</i>	30
Figure I.23 :	<i>Variation de la rugosité de la surface en fonction des conditions de coupe.</i>	30
Figure I.24 :	<i>Vue agrandie de l'outil et de la pièce du montage expérimental.</i>	31

Figure I.25 :	<i>Durée de vie de l'outil revêtu d'essuie-glace à différentes vitesses de coupe et avances.</i>	32
Figure I.26 :	<i>Contour et graphiques en 3D de la consommation d'énergie par rapport aux paramètres.</i>	33
Figure I.27 :	<i>Schéma de coupe pour la simulation : (a)2D et (b) 3D.</i>	34
Figure I.28 :	<i>Usure en dépouille (VB) par rapport au temps de coupe pour les conditions testées : (a) $f=0.08\text{mm/tr}$, (b) $f=0.10\text{mm/tr}$ and (c) $f=0.12\text{mm/tr}$.</i>	35
Figure I.29 :	<i>Variation de la rugosité de surface avec l'usure de l'outil : (a) $f=0.08\text{mm/tr}$, (b) $f=0.10\text{mm/tr}$ and (c) $f=0.12\text{mm/tr}$.</i>	35
Figure I.30 :	<i>Configurations d'optimisation pour Ra et MRR.</i>	36

CHAPITRE II

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Figure II.1 :	<i>Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.</i>	37
Figure II.2 :	<i>Éprouvettes utilisées</i>	38
Figure II.3 :	<i>Diagramme CCT (Température d'austénitisation 1030°C, séjour de 30 minutes).</i>	40
Figure II.4 :	<i>Diagramme TTT (Température d'austénitisation 1030°C, séjour de 30 minutes).</i>	40
Figure II.5 :	<i>Diagramme de revenu. [60]</i>	41
Figure II.6 :	<i>Trempe à l'huile de la pièce chauffée.</i>	42
Figure II.7 :	<i>Duromètre digital type DM2-D 390</i>	43
Figure II.8 :	<i>Porte outil utilisé</i>	43
Figure II.9 :	<i>Plaquettes CC6050 utilisée.</i>	44
Figure II.10 :	<i>Plateforme d'effort de coupe KISTLER</i>	45
Figure II.11 :	<i>Chaîne de mesure des efforts de coupe</i>	46
Figure II.12 :	<i>Rugosimètre 2D (Surftest 201, Mitutoyo)</i>	47
Figure II.13 :	<i>Rugosimètre 3D (AltiSurf® 500)</i>	48
Figure II.14 :	<i>Le diagramme d'une approche statistique.</i>	49
Figure II.15 :	<i>Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.</i>	50
Figure II.16 :	<i>Définition du domaine expérimental.</i>	50
Figure II.17 :	<i>Définition de la surface de réponse.</i>	51

CHAPITRE III
MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN
UTILISANT L'APPROCHE RSM

Figure III.1 :	<i>Etapas de la méthodologie de surface de réponse [66].</i>	56
Figure III.2 :	<i>Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) Ra ; (b) Rz et (c) Rt</i>	65
Figure III.3 :	<i>Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface : (a) Ra ; (b) Rz et (c) Rt.</i>	66
Figure III.4 :	<i>Comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour Ra, Rz et Rt.</i>	68
Figure III.5 :	<i>Graphique des valeurs résiduelle pour l'ajustement des modèles pour les critères de rugosités (Ra, Rz, Rt)</i>	69
Figure III.6 :	<i>Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) Fx ; (b) Fy et (c) Fz</i>	73
Figure III.7 :	<i>Effet des paramètres de régime de coupe sur les efforts de coupe : (a) Fx ; (b) Fy et (c) Fz.</i>	75
Figure III.8 :	<i>Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées des efforts de coupe</i>	76
Figure III.9 :	<i>Probabilités normales des résidus pour (a) Fx, (b) Fy et (c) Fz.</i>	78
Figure III.10 :	<i>Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) Pc ; (b) MRR.</i>	81
Figure III.11 :	<i>Effet des paramètres de régime de coupe sur : (a) Pc ; (b) MRR</i>	82
Figure III.12 :	<i>Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées de Pc et MRR</i>	83
Figure III.13 :	<i>Probabilités normales des résidus pour (a) Pc et (b) MRR</i>	84
Figure III.14 :	<i>Résultats des diagrammes de Pareto.</i>	87
Figure III.15 :	<i>Histogrammes comparatifs entre les valeurs expérimentales et les valeurs prévues pour Ra (μm)</i>	88
Figure III.16 :	<i>Histogrammes comparatifs entre les valeurs expérimentales et les valeurs prévues pour Fz (N)</i>	88
Figure III.17 :	<i>Topographie 3D pour la rugosité de surface Ra.</i>	89
Figure III.18 :	<i>Procédure de la planification de Taguchi.</i>	91
Figure III.19 :	<i>Effets principaux de S/N pour : (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) puissance de coupe (d) volume de copeau enlevé.</i>	96
Figure III.20 :	<i>Graphiques de désirabilité de quatre cas d'optimisation, (Diagramme de surface 3D et graphique de contour).</i>	100
Figure III.21 :	<i>Diagrammes de rampe de désirabilité pour les quatre cas d'optimisation</i>	101
Figure III.22 :	<i>Graphe de bar de désirabilité pour les quatre cas d'optimisation</i>	101

CHAPITRE IV
MODÉLISATION DES PARAMÈTRES EN UTILISANT L'APPROCHE ANN ET
COMPARAISON

Figure IV.1 :	<i>Réseau de neurones artificiels</i>	104
Figure IV.2 :	<i>Topologie d'un réseau de neurones</i>	105
Figure IV.3 :	<i>Représentation d'un neurone formel. [106]</i>	106
Figure IV.4 :	<i>Différentes fonction de transfert de réseau de neurones. [108]</i>	106
Figure IV.5 :	<i>Processus d'apprentissage du réseau de neurones</i>	107
Figure IV.6 :	<i>Structure ANN (3-13-2) pour (Ra) et (Fz) simultanément</i>	108
Figure IV.7 :	<i>Valeurs expérimentales par rapport aux valeurs prévues pour (Ra) et (Fz) simultanément.</i>	110
Figure IV.8 :	<i>Structure ANN (3-9-1) pour (Ra).</i>	111
Figure IV.9 :	<i>Valeurs expérimentales par rapport aux valeurs prévues pour (Ra).</i>	113
Figure IV.10 :	<i>Structure ANN (3-10-1) pour (Fz).</i>	114
Figure IV.11 :	<i>Valeurs expérimentales par rapport aux valeurs prévues pour (Fz).</i>	115
Figure IV.12 :	<i>Surface de réponse 3D des modèles ANN-RSM pour (Ra)</i>	117
Figure IV.13 :	<i>Surface de réponse 3D des modèles ANN-RSM pour (Fz)</i>	117

INDEX DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Etude bibliographique

Tableau I.1 :	Valeurs approximatives de la conductivité thermique pour une série de matériaux	5
Tableau I.2 :	Équivalences des désignations. [9]	8
Tableau I.3 :	Résultat de la durée de vie des outils de coupe en carbure revêtus dans des conditions MQL.	32

CHAPITRE II

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Tableau II.1 :	Composition chimique de l'acier inoxydable X20Cr13	38
Tableau II.2 :	Équivalence de X20Cr13 en fonction des normes et des pays. [59]	39
Tableau II.3 :	Temps de maintien et dureté avant revenu.	39
Tableau II.4 :	Informations relatives aux plaquettes utilisées	44
Tableau II.5 :	Niveaux de différents paramètres.	53
Tableau II.6 :	Matrice de planification pour un plan de Taguchi 25 essais.	53

CHAPITRE III

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN UTILISANT L'APPROCHE RSM

Tableau III.1 :	Niveaux de différents paramètres	61
Tableau III.2 :	Résultats des rugosités de surface (R_a , R_z , R_t), les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z), la puissance de coupe (P_c) et le volume de copeau enlevé (MRR) en fonction des différentes combinaisons des conditions de coupe.	61
Tableau III.3 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité (R_a)	62
Tableau III.4 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_z	63
Tableau III.5 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_t	63
Tableau III.6 :	Résultats expérimentaux des efforts de coupe	69
Tableau III.7 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial F_x	70
Tableau III.8 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial F_y	71
Tableau III.9 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel F_z	71
Tableau III.10 :	Résultats expérimentaux de P_c et MRR	78

Tableau III.11 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour Pc	79
Tableau III.12 :	Analyse de la variance (ANOVA) pour MRR	80
Tableau III.13 :	Expériences de confirmation.	87
Tableau III.14 :	Résultats expérimentaux pour la rugosité de surface, l'effort tangentiel, la puissance de coupe et le volume de coupe enlevé.	92
Tableau III.15 :	Tableau de réponse des S/N pour : (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) puissance de coupe, (d) volume de copeau enlevé.	93
Tableau III.16 :	Objectifs et plages de paramètres pour différents cas d'optimisation.	98
Tableau III.17 :	Résumé des solutions obtenues pour les quatre cas d'optimisation.	99

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DES PARAMÈTRES EN UTILISANT L'APPROCHE ANN ET COMPARAISON

Tableau IV.1 :	Architectures RNA testées de modèles simultanés (Ra) et (Fz).	108
Tableau IV.2 :	R ² et RMSE du modèle de (Ra) et (Fz) simultanément.	109
Tableau IV.3 :	Architectures RNA testées pour le modèle (Ra).	111
Tableau IV.4 :	R ² et RMSE du modèle de rugosité de surface Ra	112
Tableau IV.5 :	Architectures RNA testées pour le modèle (Fz)	113
Tableau IV.6 :	R ² et RMSE pour le modèle (Fz)	114
Tableau IV.7 :	Comparaison des résultats expérimentaux et estimés par MSR et RNA	116

Nomenclatures

V_c	Vitesse de coupe [m/min]
f	Avance par tour [mm/tr]
ap	Profondeur de passe [mm]
$F_x (F_a)$	Effort de coupe axial [N]
$F_y (F_r)$	Effort de coupe radial [N]
$F_z (F_t)$	Effort de coupe tangentiel [N]
$F_{rés}$	Effort de coupe résultant [N]
MRR	Volume de copeau enlevé (Débit de coupeau) [cm ³ /min]
P_c	Puissance de coupe [W]
HRC	Dureté Rockwell
R_a	Rugosité moyenne arithmétique [μ m]
R_t	Rugosité totale [μ m]
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité [μ m]
t	Temps d'usinage [min]
r_ϵ	Rayon de bec de l'outil [mm]
$ANOVA$	Analyse de la variance
SS	Somme des carrés
MS	Les carrés moyens
$Cont.\%$	Pourcentage de contribution
DL	Degré de liberté
F	Valeur de Fisher
R^2	Coefficient de détermination
S/N	Rapport signal sur bruit [dB]
MSR	Méthodologie de Surface de Réponse
RNA	Réseau de Neurons Artificiels, en anglais ANN : Artificial Neural Network
DF	Fonction de désirabilité

Symboles

χ_r	Angle de direction principal [°]
α	Angle de dépouille principal [°]
β	Angle de tranchant [°]
γ	angle d'attaque [°]
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante [°]
α'	Niveau de signification

Introduction générale	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction.....	3
I.2 Généralité sur la coupe des métaux	3
I.3 Définition de l'usinabilité	3
I.3.1 Critère d'évaluation l'usinabilité	4
I.3.2 Facteurs influençant l'usinabilité	4
I.4 Aciers inoxydables.....	6
I.4.1 Définition	6
I.4.2 Types d'aciers inoxydables	6
I.4.3 Principales nuances d'aciers inoxydables.....	7
I.5 Usinage des matériaux difficilement usinables	8
I.5.1 Tournage dur	8
I.5.2 Avantage du tournage dur par rapport à la rectification	9
I.5.3 Application du tournage dur aux matériaux à usinabilité difficile.....	10
I.5.4 Facteurs clés pour le tournage dur	12
I.6. Outils de coupe impliqués en tournage dur	12
I.7. Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques.....	16
I.7.1 Définitions de la rugosité	16
I.7.2 État de surface en tournage	17
I.7.3 Caractéristiques de la surface.....	18
I.8 Efforts de coupe.....	19
I.9 Travaux de recherche (état de l'art).....	21
I.10 Conclusion.....	36

CHAPITRE II : PROCEDURES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction	37
II.2. Matériels utilisé	37
II.2.1. Machine-outil.....	37
II.2.2. Matériau à usiné.....	37
II.2.3. Traitement thermique.....	39
II.2.4 Mesure de dureté.....	42
II.2.5. Outils de coupe utilisés	43
II.2.5.1. Porte plaquette.....	43
II.2.5.2. Plaquettes de coupe	44
II.2.6. Instruments de mesure utilisés.....	44
II.2.6.1. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	45
II.2.6.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	46
II.3. les plans d'expériences	49
II.3.1. Définition.....	49
II.3.2. Terminologie.....	49
II.3.3. Méthodologie des plans d'expériences	51
II.3.4. plan d'expérience existant	52
II.3.5. Choix du type de plan et des conditions de coupe.....	52
II.4. Conclusion	54

CHAPITRE III : MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN UTILISANT L'APPROCHE MSR

III.1 Introduction.....	55
III.2 Méthodologie des surfaces de réponse.....	55
III.2.1 Principes généraux	55
III.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse	55
III.2.3.1 Planification expérimentale	56
III.2.3.2 Modélisation	56
III.2.3.3 Validation des modèles.....	58
III.3 Etude statistique et modélisation.....	60
III.3.1 Résultats des expériences	60
III.3.2 Modélisation et Analyse de la variance (ANOVA) pour les critères de Rugosité de surface en fonction des paramètres d'usinage	62
III.3.2.1 Analyse de la variance pour les rugosités (R_a , R_z , R_t)	62

III.3.2.2 Analyse de régression : R_a , R_z et R_t en fonction de V_c , f et ap	65
III.3.2.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	67
III.3.3 Modélisation des efforts de coupe en fonction de V_c , f et ap	69
III.3.3.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe F_x , F_y et F_z	70
III.3.3.2 Analyse de régression : F_x , F_y et F_z en fonction de V_c , f et ap	73
III.3.3.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	75
III.3.4 Modélisation de la puissance de coupe P_c et le volume de matériau enlevé MRR en fonction de V_c , f et ap	78
III.3.4.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe P_c et MRR	79
III.3.4.2 Analyse de régression : P_c et MRR en fonction de V_c , f et ap	81
III.3.4.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées	82
III.4 Analyse de Pareto	84
III.5 Expériences de confirmation	87
III.6 Profil de surface et topographie 3D	88
III.7 Optimisation des conditions de coupe pour R_a , F_z , P_c et MRR	89
III.7. 1 Optimisation des paramètres d'usinage	90
III.7. 1.1 Optimisation mono-objective des paramètres technologiques en utilisant la méthode de Taguchi	90
III.7. 1.2 Optimisation multi-objective des paramètres technologiques en utilisant la méthode de la fonction de désirabilité (FD)	97
III.8 Conclusion	102
CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES PARAMÈTRES EN UTILISANT L'APPROCHE RNA ET COMPARAISON AVEC LA METHODE MSR	
IV.1. Introduction	103
IV.2 Réseaux de neurones artificiels (RNA)	103
IV.2.1 Calcule de la valeur prédite	104
IV.2.2 Les neurones formels	105
IV.2.3 Différentes fonctions de transfert	106
IV.2.4 Perceptron simple	106
IV.2.5 Perceptron multicouches	107
IV.2.6 Algorithme de rétro-propagation	107
IV.2.7 Apprentissage	107
IV.3 Modélisation par RNA	107

IV.3.1 Modélisation de la rugosité Ra et de la force F_z simultanément par RNA.....	107
IV.3.2 Modélisation de Ra et F_z séparément par RNA.....	110
IV.3.2.1 Modélisation de la rugosité Ra	111
IV.3.2.2 Modélisation de la force tangentielle F_z	113
IV.4 Comparaison des résultats expérimentaux et des modèles estimés de rugosité de surface Ra et de la force tangentielle F_z par le MSR et RNA.....	115
IV.5 Conclusion	118
Conclusion générale.....	119
Référence bibliographiques.....	123

Introduction générale

Les aciers inoxydables sont largement utilisés dans les différents domaines à cause de leur résistance à la corrosion. Parmi les types de ces aciers il y a les martensitiques, les ferritiques et les austénitiques. Les matériaux en acier inoxydable martensitique ont apporté certains avantages pour l'aérospatiale, l'automobile, les moteurs hydroélectriques, les couverts, la défense, les outils à main électriques, les pièces de pompe, les sièges de soupape, les bagues, les roulements à billes, l'industrie des équipements sportifs, les instruments dentaires et chirurgicaux, etc. en raison de leur résistance à la corrosion, leur dureté, leur résistance et leur résistance à l'usure. Les opérations d'usinage telles que le fraisage, le tournage, le perçage peuvent être appliquées pour leur donner la forme finale. Mais ces types d'aciers sont spécifiés comme matériaux difficiles à usiner en raison de leur résistance élevée, de leur faible conductivité thermique et de leur tendance à la trempe au cours des opérations d'usinage.

Aussi, afin d'en assurer une qualité satisfaisante des produits finis en minimisant la rugosité de surface, une consommation minimale d'énergie, des efforts de coupe basses et une productivité élevée durant le processus de coupe, une attention particulière doit être portée sur la modélisation des paramètres technologiques et aussi l'optimisation des conditions de coupe. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de recherche de notre thèse de doctorat. La thèse de doctorat est structurée comme suit :

Le premier chapitre, est réservé pour la présentation d'une introduction sur l'usinabilité et la coupe des métaux, suivie par la présentation des aciers inoxydables, les matériaux de coupe et leurs caractéristiques, le tournage dur et en dernier lieu un aperçu des différents phénomènes intervenant dans de la coupe. La fin de ce chapitre est consacrée à l'état de l'art, qui présente le noyau de n'importe étude bibliographique. Dans cette partie, une synthèse sur les résultats des travaux de recherche antérieurs (publications) relatifs à l'usinage des aciers inoxydable et particulièrement l'usinage des aciers inoxydables martensitiques ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation du processus de coupe ont été présentés.

Dans le second chapitre, est consacré aux équipements nécessaires à la réalisation des essais et la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe. Les dispositifs de mesure des paramètres de sortie sont aussi présentés d'une manière précise avec les détails

nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe. Les aspects théoriques et opératoires des méthodes mathématiques statistiques des plans d'expérience sont également exposés.

Le troisième chapitre, est dédié à la présentation des résultats expérimentaux des essais réalisés sur l'acier inoxydable martensitique (AISI 420) à l'état trempé pour un plan de Taguchi (L_{25}) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiés.

La méthode de surface de réponse MSR été optée et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f , et ap) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «Design-Expert» pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse. Le traitement statistique des résultats a permis de proposer des modèles mathématiques des paramètres de sortie. Ces modèles sont exploités dans le but de faire deux optimisations mono et multi-objective des conditions de coupe en se basant sur les deux approches de Taguchi et de la fonction de désirabilité (DF). Aussi une attention particulière sur la topographie de surface 3 D en fonction des conditions de coupe est réalisée.

Dans le quatrième chapitre, nous discuterons les résultats d'une deuxième méthode de modélisation qui concerne les réseaux de neurones artificiels (RNA). Cette dernière est appliquée pour la modélisation non linéaire du processus de coupe en tournage dur de l'acier AISI 420. L'étude a été réalisée pour les paramètres technologiques d'usinage (R_a et F_z) en fonction de différents paramètres de régime de coupe (V_c , f et ap) pour un plan de 25 essais. La fin du chapitre a été réservé à une comparaison entre la modélisation par la méthode de la surface de réponse RSM et la modélisation par RNA et cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes.

Enfin, et comme la règle l'exige, nous terminerons par une conclusion générale, dans laquelle nous présentons l'essentiel de la contribution apportée par cette d'étude, ainsi que les éventuelles perspectives.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

Ce chapitre commence par des notions de base sur l'usinabilité et la coupe des métaux, en suite une présentation générale des aciers inoxydables, de son utilisation, de ses propriétés physiques et mécaniques ainsi que son usinabilité. L'étude bibliographique traite aussi les paramètres technologiques d'usinage intervenant dans le processus de coupe. En dernier lieu, une synthèse des travaux de recherche sur l'usinage des aciers inoxydables et les méthodes de modélisation et d'optimisation, a été abordée

I.1 Introduction

Dans le domaine d'usinage des métaux, le tournage dur est aujourd'hui en plein développement. Les besoins industriels sont importants. Les enjeux économiques sont grands mais la maîtrise du procédé est loin d'être acquise. Si la dureté à haute température des nouveaux matériaux de coupe tel que les céramiques revêtu permet d'envisager l'usinage de pièces de dureté de plus en plus importante, l'intérêt économique du procédé n'est pas encore prouvé. Dans ce chapitre introductif concerne l'étude bibliographique. Dans un premier temps, il permet de rappeler les bases scientifiques du phénomène de la coupe des métaux. Dans un deuxième temps, les travaux marquants dans le domaine du tournage dur sont présentés et analysés [1]. Pour en finir avec ce chapitre et dans le but d'élargir les connaissances et de se mettre à jour sur les techniques d'investigation, une synthèse des travaux de recherches sur l'usinage des aciers inoxydable et les méthodes de modélisation et d'optimisation dans le processus de coupe est exposé.

I.2 Généralité sur la coupe des métaux

Il est important de délimiter clairement le domaine de la coupe des métaux et celui très voisin de l'étude de l'usinabilité. La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents ; facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance, arrosage ...) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes. Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage. [2]

I.3 Définition de l'usinabilité

L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier bas carbone est plus facile à usiner qu'un acier fortement alliés. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers fortement alliés. Le concept de « bonne usinabilité » renvoie généralement à une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent

l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières dans des conditions comparables. D'autres facteurs tels que la microstructure, la tendance au collage, la machine-outil utilisée, la stabilité, le bruit, la durée de vie d'outil, etc. sont aussi pris en compte.

Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux, l'usinabilité est définie aussi sous différentes formes [3] :

- 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.
- 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 [4].
- La notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être mis en forme par outil coupant [5].

I.3.1 Critère d'évaluation l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont [6] [7] :

- ❖ la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- ❖ les conditions de coupe ;
- ❖ les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- ❖ le fractionnement du copeau ;
- ❖ l'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité ;
- ❖ la productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités.

I.3.2 Facteurs influençant l'usinabilité

a) La résistance mécanique

On pense couramment que la résistance mécanique, ou la dureté qui lui est équivalente constitue un indice d'usinabilité significatif. En réalité, des aciers dont la dureté est rendue plus élevés par un traitement de trempe et revenu au lieu d'un traitement de recuit,

peuvent avoir une usinabilité meilleure dans l'état le plus dur. Ce résultat est valable pour certaines résistances aux environs 800 MPa mais ne peut être étendu aux résistances plus élevées de l'ordre de 1100MPa. On rencontre alors des difficultés d'usinage dues à la résistance élevée du métal à la déformation.

b) Les caractéristiques thermiques

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

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

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

c) Les compositions chimiques

L'élément le plus important est le carbone. A basse teneur, l'acier composé de ferrite, est difficile à usiner. L'augmentation du pourcentage (% C) crée des solutions de continuité dans la matière de ferrite par formation de plages de perlite. On atteint un optimum d'usinabilité avec l'acier demi-dur à 0.35 % de carbone. Une augmentation supplémentaire de la teneur en carbone rend l'acier de plus en plus dur et moins usinable. Le manganèse n'agit pas de façon sensible tant qu'il n'est pas en proportion notable. A forte teneur, il favorise l'écrouissabilité et diminue l'usinabilité. Les éléments d'alliages usuels, comme le nickel ou le chrome n'ont que peu d'influence aux teneurs présentes dans les aciers de construction industriels faiblement

alliés. A forte teneur, dans le cas d'aciers spéciaux ils agissent sur la structure et l'érouissabilité. Les aciers inoxydables de type 18/8 (18% Cr et 8% Ni) par exemple, sont austénitiques, très érouissables et difficiles à usiner.

I.4 Aciers inoxydables

L'acier inoxydable (inox), est un matériau relativement récent dont l'usage ne s'est développé qu'à partir des années 1920. Le principe d'allier fer et chrome remonte à 1821, mais ce n'est qu'en 1904 que l'on s'aperçoit que la présence de carbone inhibe la résistance à la corrosion. L'inox, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc. Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome (couche passive) qui confère à ces aciers leur inoxydabilité (**Figure I.1**)



Figure I.1 : Échantillon d'oxyde de chrome [8] .

I.4.1 Définition

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

I.4.2 Types d'aciers inoxydables

Les aciers inoxydables peuvent être classés en trois grandes familles :

- **Les austénitiques** sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre ou du laiton, et aussi de

leurs bonnes caractéristiques mécaniques élevées. Les teneurs en éléments d'addition tournent autour de 18% de chrome, 10% de nickel et de 0.02 à 0.06% de carbone.

- **Les ferritiques** ne prennent pas la trempe. On trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 30%), particulièrement intéressants en présence de soufre.

- **Les martensitiques** sont utilisés lorsque les caractéristiques de résistance mécanique sont importantes. Les plus courants titrent 13% de chrome avec au moins 0.08% de carbone. D'autres nuances sont plus chargées en additions, avec éventuellement un faible pourcentage de nickel.

- Enfin, **les austéno-ferritiques** ont une structure mixte ferrite/austénite et sont chargés en éléments d'alliage : 22 à 25 % de chrome, 5 à 6 % de nickel, 2 à 3 % de molybdène. Ils ont de bonnes propriétés mécaniques et surtout une très bonne résistance à la corrosion.

I.4.3 Principales nuances d'aciers inoxydables

La plupart des aciers inoxydables utilisés sont conformes à des normes :

- européennes (norme EN DIN 10088 en particulier) ;
- américaines (normes de l'ASTM) ; L : signifie *low carbon* (bas carbone), H : signifie *High carbon* (haut carbone) ;
- d'autres pays également, mais ces normes sont peu connues internationalement.

Concernant le **tableau I.2** d'équivalence ci-dessous il faut remarquer que la nuance américaine de type 316 autorise une teneur en molybdène de 3 % maximum ce qui peut poser un problème de conformité lorsque la spécification préconise une norme européenne qui limite la teneur en molybdène à 2,5 %.

Tableau I.2 : Équivalences des désignations. [9]

EN 10027 (européenne)	Afnor NF A 35573 (France)	AISI (États-Unis)	Composition								Autres
			% C	% Cr	% Ni	% Mo	% Si	% Mn	% P	% S	
X12CrNi18-09	Z10CN18-09	302	0,12	16 à 18	6 à 8	—	1	2	0,04	0,03	—
X12CrNi18-08	Z10CNF18-09	303	≤ 0,12	17 à 19	8 à 10	0,6	1	2	0,06	≥ 0,15	—
X5CrNi18-09 1.4301	Z7CN18-09	304	0,05	17 à 19	8 à 10	—	1	2	0,04	0,03	—
X2CrNi18-09 1.4307	Z3CN18-10	304 L	0,02	17 à 19	9 à 11	—	1	2	0,04	0,03	—
X5CrNi19-11 1.4303	Z8CN18-12	305	0,05	17 à 19	11 à 13	—	1	2	0,04	0,03	—
X7CrNi23-14	Z12CNS25-13	309	0,07	22 à 25	11 à 14	—	1	2	0,04	0,03	—
X12CrNiSi25-20	Z12CNS25-20	310	0,12	23 à 26	18 à 21	—	1	2	0,04	0,03	—
X5CrNiMo18-10 1.4401	Z6CND17-11	316	0,05	16 à 18	10 à 12,5	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	—
X2CrNiMo17-12-02 1.4404	Z2CND17-12	316 L	0,02	16 à 18	10,5 à 13	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	—
X10CrNiMoTi18-10 1.4571	Z6CNDT17-12	316 Ti	0,1	16 à 18	10,5 à 13	2 à 2,5	1	2	0,04	0,03	Ti . 5 C ; Ti . 0,6
X10CrNiTi18-09 1.4541	Z6CNT18-10	321	0,10	17 à 19	10 à 12	—	1	2	0,04	0,03	Ti . 5 C ; Ti . 0,6
X7Cr13 1.4003	Z6C13	403	0,07	11,5/13,5	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X10Cr13 1.4006	Z12C13	410	0,08/0,15	11,5/13,5	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X12CrS13	Z12CF13	416	0,08/0,15	12 à 14	0,5	0,15/0,6	1	1,5	0,06	≥ 0,15	—
X20Cr13 1.4021	Z20C13	420	0,16-0,25	12	—	—	≤ 1	≤ 1,5	≤ 0,04	≤ 0,015	—
X30Cr13 1.4028	Z30C13	420 B	0,3	12 à 14	—	—	1	1	0,04	0,03	—
X6Cr17 1.4016	Z8C17	430	0,08	16/18	0,5	—	1	1	0,04	0,03	—
X12CrMoS17	Z10CF17	430 F	0,12	16/18	0,5	0,2/0,6	1	1,5	0,06	≥ 0,15	—
X22CrNi17 1.4057	Z15CN16-02	431	0,1/0,2	15/17	1,5/3	—	1	1	0,04	0,03	—
X105CrMo17	Z100CD17	440 C	1	17	—	—	—	1	—	—	—

I.5 Usinage des matériaux difficilement usinables

I.5.1 Tournage dur

Le tournage des métaux durs (dureté de 45 HRC à 68 HRC) est un procédé assez récent dans son utilisation (**Figure I.2**). Le but de celui-ci est, à terme de supprimer lors de l'usinage de pièces de précision, la phase de rectification, souvent longue et coûteuse. [10]

Aussi, le tournage des métaux durs est prometteur et intéresse de nombreuses entreprises de fabrication mécanique à cause des gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser sur l'usinage des pièces. En effet, avec les méthodes d'usinage conventionnel, là où une grande dureté fonctionnelle des pièces est demandée (50 à 65 HRC), consiste à faire les différentes phases successives suivantes [11]:

- Usinage de la pièce à l'état non traité ;
- Traitement thermique jusqu'à l'obtention de la dureté désirée ;
- Finition par rectification pour que la pièce respecte les cotes notifiées sur le dessin de définition.

Cette longue séquence d'opérations est causée en partie par :

- La non disponibilité (jusqu'à récemment) d'un matériau à outil coupant les matériaux de hautes duretés, résistant à l'usure et tenace ;
- La mauvaise appréciation du besoin en machines-outils plus puissantes, plus rigides et plus précises ;
- La pratique traditionnelle qui consiste à faire l'ébauchage sur une machine et après faire la finition sur une autre machine plus précise.

Ce type d'usinage conventionnel implique donc des montages et des démontages des pièces qui sont inutiles avec le tournage dur [12]. Avec le nouveau mode d'usinage, le brut peut être usiné directement après TTH et beaucoup d'opérations peuvent être supprimées par substitution d'une opération à deux, donnant ainsi un gain considérable aussi bien en temps qu'en coût [13].

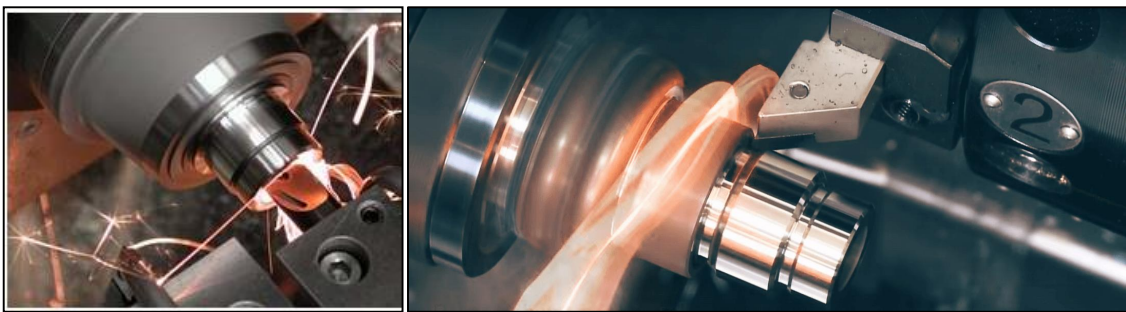


Figure I.2 : Alésage à sec d'une pièce en acier traité à (62 HRC) avec une céramique mixte.

I.5.2 Avantage du tournage dur par rapport à la rectification

- Le tournage dur est une technique d'usinage à un seul point de contact qui permet d'usiner des contours complexes sans avoir recours aux meules de forme coûteuses que nécessite la rectification à points de contact multiples.
- Le tournage dur permet en outre de réaliser plusieurs opérations en un seul montage avec pour résultat une excellente précision de positionnement, moins de manipulations et une baisse des risques d'endommagement des pièces.
- Le tournage dur autorise des taux d'enlèvement de matière trois à quatre fois supérieurs à ceux de la rectification conventionnelle.
- L'usinage pouvant s'effectuer à sec, le procédé contribue à des économies de lubrifiant. Aujourd'hui l'utilisation des liquides d'arrosage et des huiles représente 16 % des coûts totaux de fabrication, tant en produits utilisés qu'en recyclables de destruction entretien des installations ;
- Le tournage dur permet d'obtenir des qualités IT5-IT6, mais la rectification s'impose pour de meilleures qualités ;

- Pour un volume de matière déterminée, le tournage dur consomme 5 fois moins de puissance que la rectification ;
- Les efforts de coupe sont plus faibles qu'en rectification ;
- Finalement, le tournage dur réduit les coûts machine et permet une meilleure maîtrise de la production, des rendements plus élevés et une meilleure qualité de la pièce finie.

Tous ces avantages mis bout à bout, il est évident que les économies engendrées par l'adoption du tournage dur sont considérables (**Figure I.3**) [13] [14] [15].

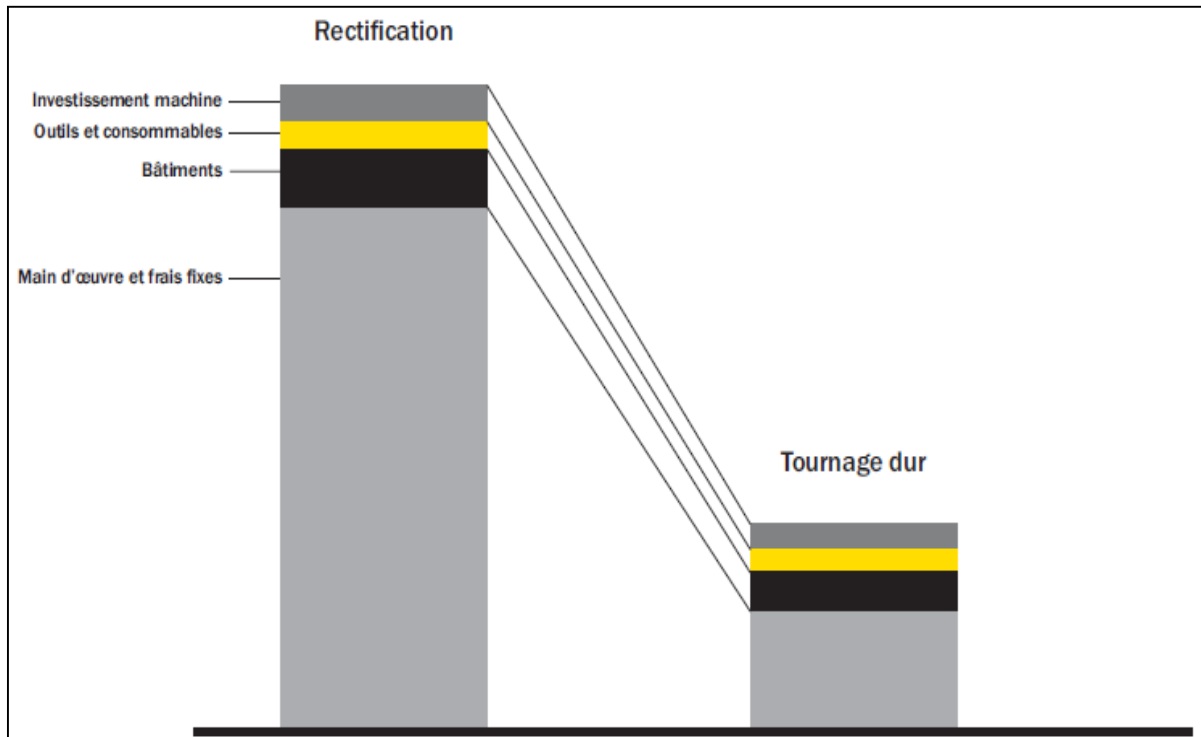


Figure I.3 : Comparatif de coûts entre tournage dur et rectification.

I.5.3 Application du tournage dur aux matériaux à usinabilité difficile

Le tournage dur est appliqué à plusieurs familles de matériaux classés parmi les matières à usinabilité difficile. Ils sont classés comme suit [16] :

- **Les aciers d'outillages pour travail à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,...)**

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous les travaux pour travail à froid (poinçons d'estampage, outils de découpe, outils d'extrusion).

- **Les aciers d'outillages pour travail à chaud (X40CrMoV5-1, X38CrMoV40NiCrMo16, 35CrNiMo4...)**

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à haute température, leur ténacité leur permettent d'être utilisés dans les

domaines du matriçage à chaud, moules à couler sous pression, vis d'extrudeuse, filage à chaud, lame de cisaille à chaud. Après TTH ces aciers peuvent atteindre une dureté de 30 à 55 HRC.

- **Les aciers à moules (XC48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16...)**

L'acier XC48, permet après TTH d'obtenir une dureté de surface appréciable (50HRC). Le 40CrMnMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules, pour matrice plastique et outils pour moulage sous pression, etc.....

- **Les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100)**

Ce matériau peut atteindre une dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils céramiques et CBN sont employés avec succès.

- **Les aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8)**

Cette famille d'acier comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons.

- **Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10 CrNi6, C10, 18CrMo4...) et de nitruration (30CrMo4, 30CrAlMo6-12, 40CrAlV6-10)**

Les aciers de cémentation et de nitruration avec des duretés de 65HRC peuvent être effectués avec des outils en céramique et CBN à des vitesses de coupe élevées.

- **Les fontes**

Les fontes grises, blanches en et nickel/chrome représentent un marché important de l'utilisation des CBN et des outils céramiques. Elles sont utilisées en grandes quantités pour des applications générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les outils en CBN et les céramiques à base de nitrure de silicium ($\text{Si}_3\text{N}_4\text{-TiC}$) présentent une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage des fontes.

- **Alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718) ou cobalt (stellite)**

Les alliages à base de nickel ou de cobalt sont très utilisés dans l'industrie aéronautique et sont plus difficiles à usiner que la plus part des aciers par ce qu'ils sont réfractaires. Ils maintiennent donc une grande partie de leur résistance pendant l'usinage mais s'écaillent également.

En conclusion les grandes entreprises ayant compris les gains financiers qu'elles pouvaient en tirer de la technique du tournage dur sont de plus en plus nombreux. On citera à titre d'exemple : Ford (Bordeaux), Mercedes (Gaggenau), Volkswagen (Kassel), Fiat (Turin), BMW (Munich), General motors, etc.... Les pièces usinées sont des baladeurs, des couronnes, des manchons d'accouplement, des pignons, des arbres, des cages de roulement. Dans ce contexte il faut indiquer aussi que, s'il est quelquefois possible d'usiner complètement par

tournage dur les pièces traitées, il est vain de vouloir en faire un substitut à la rectification. En combinant les deux techniques d'usinage, il est possible de réduire considérablement les temps d'usinage et de réalisations des produits.

I.5.4 Facteurs clés pour le tournage dur

En plus des recommandations générales pour le tournage, certains facteurs spécifiques doivent être soulignés lors de la préparation de la pièce avant la trempe (**Figure I.4**) [17]:

- Eviter les bavures
- Produire des cotes proches de la tolérance
- Usiner les chanfreins et produire les rayons avant la trempe
- Eviter les entrées ou sorties abruptes de la matière
- Entrer ou sortir de la matière par interpolation.

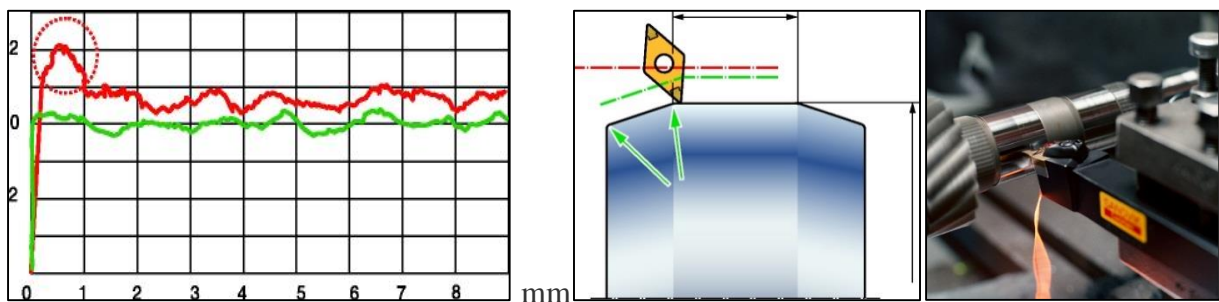


Figure I.4 : *Recommandations en tournage dur.* [17]

I.6. Outils de coupe impliqués en tournage dur

Les outils de coupe impliqués dans l'usinage des matériaux durs ou difficiles à usiner sont soumis d'une part à des grandes charges mécaniques et à des températures élevées, dans certains cas la température à l'interface outil-copeau dépasse les 700°C. Et d'autre part, ces outils sont soumis au frottement avec la matière enlevée et la surface usinée. Il est donc primordial que les outils de coupe doivent acquérir certaines caractéristiques mécaniques et chimiques telles que [18] :

- ✓ Une stabilité chimique et physique à des températures élevées.
- ✓ Une grande résistance à l'usure sous ses différentes formes (abrasion, adhésion...).
- ✓ Une ténacité élevée pour résister la rupture, particulièrement lors de la coupe interrompue.
- ✓ La dureté de l'outil de coupe ne doit pas être affectée par élévation de la température.

Les principaux matériaux employés en tournage dur sont les carbures cémentés, les céramiques (Al_2O_3 , Si_3N_4 ...etc.) et les matériaux extra-durs (PCD, PCBN) [19].

Il faut savoir que le choix de l'outil approprié est très important. Le laboratoire américain de technologie et de fabrication NIST a révélé que le bon choix de l'outil est raté à 50%. En plus, l'outil n'est utilisé avec une vitesse de coupe optimale qu'à 58%, et qu'il n'est exploité qu'à 38% seulement de sa durée de vie totale. Ces pratiques sous optimales sont estimées à coûter à l'industrie américaine \$10 milliards par an [20].

➤ **Les carbures cémentés**

Ils sont fabriqués à partir du mélange des micro-grains de carbure de tungstène avec le cobalt à haute température et pression. Des carbures de tantale, de titane ou de vanadium peuvent être également obtenus par le même procédé. Les carbures métalliques sont différenciés selon la proportion du liant (cobalt). Il se trouve que leur dureté augmente avec la réduction de la proportion du cobalt. Cette dernière varie généralement de 6 à 12 %. Aussi, ils sont différenciés selon la taille des grains ; les plus petits sont les grains, le plus dur est le matériau. La dureté de ces matériaux de coupe varie de 600 à 2100 HV [18].

Les carbures métalliques sont classées par ISO en six groupes (M, P, K, N, S et H) selon le travail qu'ils doivent fournir, sans indiquer la quantité du cobalt ni la taille des grains. Par conséquent, un carbure métallique issu de différents fabricants peut avoir la même désignation mais pas la même performance. Les recommandations sont telles que suit :

- ✓ P, indiqué pour les aciers à basse teneur en carbone et les aciers faiblement alliés ;
- ✓ M, composé des carbures cémentés, ils sont appropriés à l'usinage des aciers inoxydables ;
- ✓ K, indiqué pour les fontes et les aciers alliés, ils sont plus durs que la série de P et de M ;
- ✓ H, indiqué pour l'usinage des aciers trempés et durcis ;
- ✓ S, pour les alliages de titane ;
- ✓ N, pour les alliages d'aluminium.

➤ **Les cermets :**

Ce type d'outil regroupe le carbure de tungstène cémenté, le carbure de titane et dans certains cas le carbonitrure de titane TiCN, qui sont généralement liés par le (cobalt, nickel, nickel fer, nickel chrome,...etc.). Les cermets offrent une stabilité chimique à des températures élevées (1000°C) et des duretés de l'ordre de 1500 à 2000 HV. Ils sont donc souvent utilisés en tournage de semi-finition ou de finition des aciers, comme ils peuvent être appliqués en fraisage.

➤ **Les céramiques**

Les outils céramiques à base d'alumine (Al_2O_3) sont parmi les matériaux les plus appropriés à l'usinage des aciers durcis en raison de leur dureté à chaud élevée, leur résistance

à l'usure et leur stabilité chimique à 1500°C. Ils ont également l'avantage d'être une alternative économique par rapport aux outils de nitrure de bore cubique. Cependant, ces outils présentent un degré élevé de fragilité et une basse résistance au choc thermique, qui mène habituellement à l'usure excessive ou à la rupture brutale particulièrement en usinage interrompu. Ils sont donc recommandés à l'usinage à sec avec des vitesses élevées de coupe. Afin d'améliorer leur ténacité, ces outils de coupe sont généralement renforcés avec TiC, TiN, ZrO₂, (W,Ti)C, Ti(C, N), SiC p, SiC w, TiB₂ [21] [22] [23] [24] (**Figure I.5**). Bien que l'addition de ces éléments apporte une certaine amélioration, néanmoins leur ténacité reste toujours faible par rapport à celle des carbures cémentés. En conséquence, le risque de la rupture brutale de l'outil reste éminent [25].

La céramique renforcée par le nitrure de silicium (Si₃N₄) présente une résistance plus élevée au choc thermique et une dureté plus élevée. Elle est impliquée dans l'usinage de la fonte et dans la coupe fortement interrompue telle que le fraisage.

La céramique renforcée par le carbure de silicium whiskers (Al₂O₃ + SiCw) est appliquée avec succès à l'usinage des matériaux réfractaire tel que l'Inconel 718. Et peut même être appliquée dans la coupe interrompue [26].

Les céramiques renforcées à 30 % par le nitrure et/ou le carbure de titane appelées mixtes ou noires, sont appropriées à l'usinage de finition des aciers durcis avec des vitesses de coupe élevées [27]. L'emploi de la céramique noire wiper améliore la rugosité de surface par rapport à la céramique conventionnelle. Aussi, l'utilisation de cette dernière réduit les efforts de coupe, la puissance et l'effort spécifique [28].

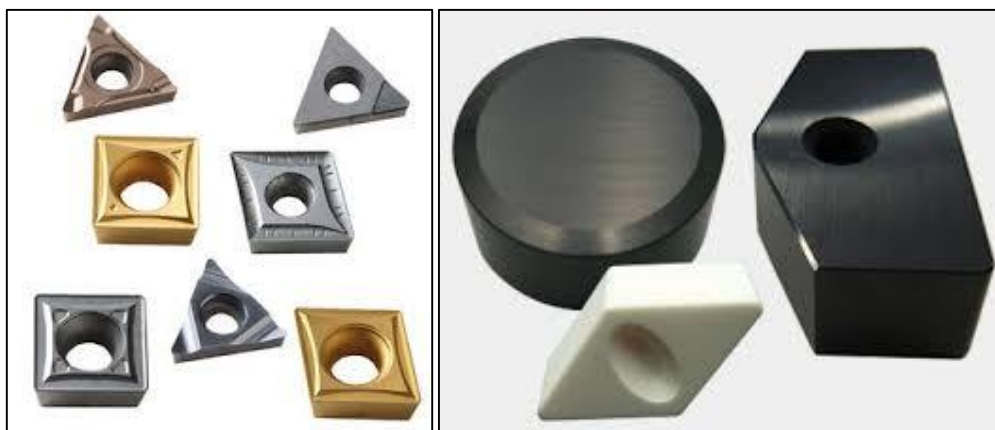


Figure I.5 : Plaquettes de céramique : alumine (blanche), alumine et Si₃N₄ (grise), alumine et TiC (noire).

➤ **Les PCD**

Est un diamant polycristallin synthétique d'une dureté qui avoisine la dureté du diamant naturel, il convient à l'usinage des matériaux non ferreux abrasifs, des plastiques et des composites.

➤ **Les CBN**

Le nitrure de bore cubiques CBN présente une combinaison unique de propriété qui les favorise à l'usinage des matériaux ferreux durcis, car ils ont une dureté, une résistance à chaud et à l'usure très élevés tout en étant stable thermo-chimiquement [29].

Les grains de CBN sont agglomérés par un liant (Co, W ou céramique). Les CBN sont classés selon la taille, la forme et le rapport de masse entre le CBN et le liant. La teneur des cristaux de CBN s'étend de 40 à 95 %. Un outil à faible taux de CBN est plus approprié à l'usinage continu et semi-interrompu, tandis qu'un outil à taux élevé de CBN présente une vie légèrement plus longue en usinage interrompu [30].

L'inconvénient du CBN est qu'il est fortement réactif avec la ferrite dû à la diffusion du bore dans la matrice de ferrite, ce qui mène à la dégradation du CBN.

➤ **Les revêtements**

Afin d'améliorer les performances de l'outil, une couche fine de 3 à 15 μm d'épaisseur est solidement adhérente avec le substrat. Les revêtements mono-couche ou multicouche (**Figure I.6**) fournissent à l'outil une stabilité chimique, une protection thermique et par conséquent une résistance à l'usure élevée.

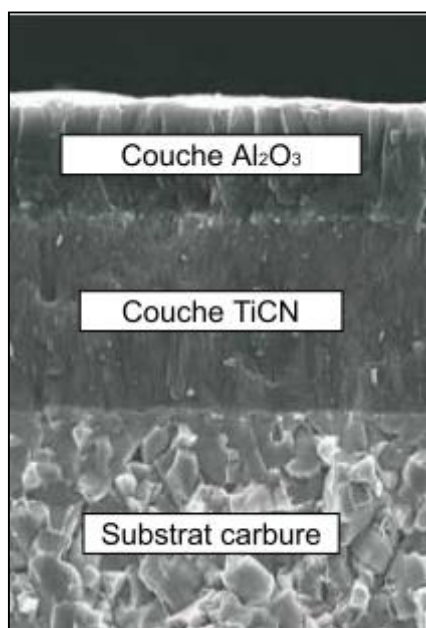


Figure I.6 : Revêtement multicouche d'un substrat carbure. [31]

Il existe deux méthodes de dépôt que chacune a des avantages et des inconvénients. Les deux méthodes sont :

Le CVD (dépôt chimique en phase vapeur).

Le PVD (dépôt physique en phase vapeur).

Les revêtements largement utilisés sont le nitrure de titane TiN, le carbure de titane TiC, le carbonitrure de titane (TiCN) et l'alumine Al₂O₃. Concernant les revêtements TiN et le TiCN, une réduction de dureté se manifeste au-dessus de 500°C, ce qui limite ainsi leur utilisation à grande vitesse ou à sec. L'addition de l'aluminium au revêtement à base TiN d'où il résulte le TiAlN, fournit non seulement une dureté élevée 3300 HV mais aussi une amélioration remarquable du comportement à hautes températures.

I.7. Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

I.7.1 Définitions de la rugosité

C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [32] [33].

✓ **Surface géométrique**

Surface parfaite ; sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

✓ **Surface spécifiée**

Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

✓ **Surface mesurée**

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

✓ **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication (**Figure. I.7**).

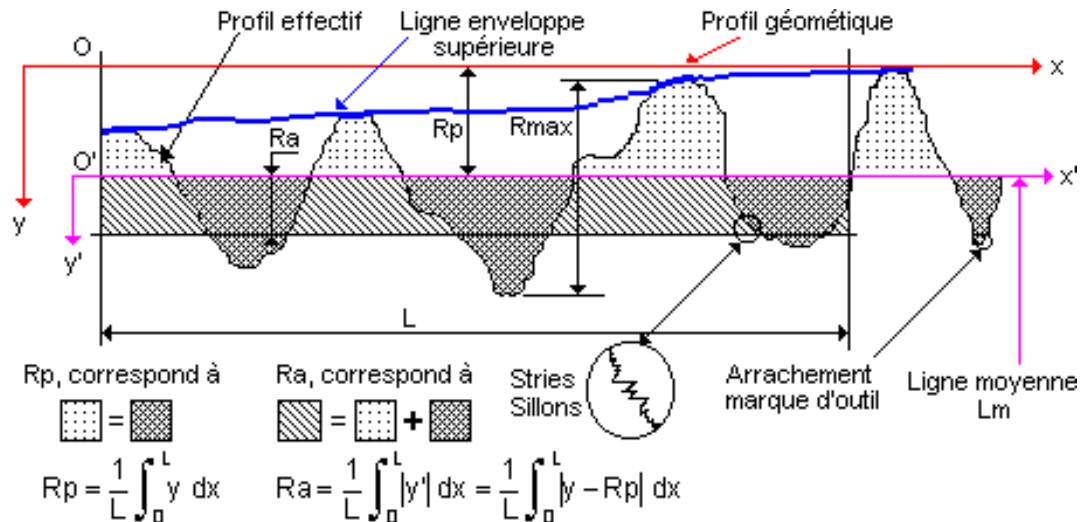


Figure I.7 : Caractéristiques du profil.

- ❖ L Longueur de base du profil moyen
- ❖ R_p Profondeur moyenne de rugosité. Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L .
- ❖ R_a Écart moyen arithmétique. Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y' (entre chaque point de la courbe et l'axe Ox').

I.7.2 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la **Figure I.8**. Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité R_{max} et donné par [34]:

$$R_{max} = \frac{f^2}{8 \times r} \quad (I.1)$$

- R_{max} : la rugosité maximale en millimètre ;
- f : l'avance en millimètre ;
- r : le rayon de l'outil de coupe maximal en millimètre ;

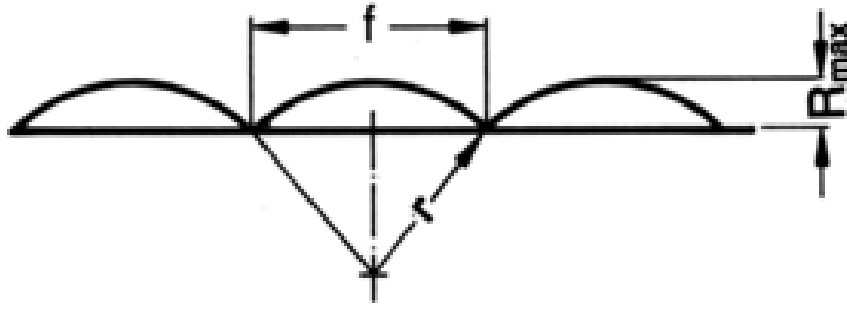


Figure I.8 : Profil de surface tournée.

I.7.3 Caractéristiques de la surface

La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface [35].

Paramètres caractéristiques des états de surface

- ❖ **Rugosité moyenne arithmétique R_a** : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation l_m

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \quad (\text{I.2})$$

- ❖ **Rugosité moyenne profondeurs R_z** : Moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives l_e

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad (\text{I.3})$$

- ❖ **Hauteur maximale des pics R_p** : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m

$$R_p = R_{p3} \quad (\text{I.4})$$

- ❖ **Profondeur maximale des vallées R_v** : Profondeur maximale du profil de rugosité R en dessous de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m

- ❖ **Rugosité maximale R_t** : Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R , sur la longueur totale d'évaluation l_m (Figure I.9) [36].

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \quad (\text{I.5})$$

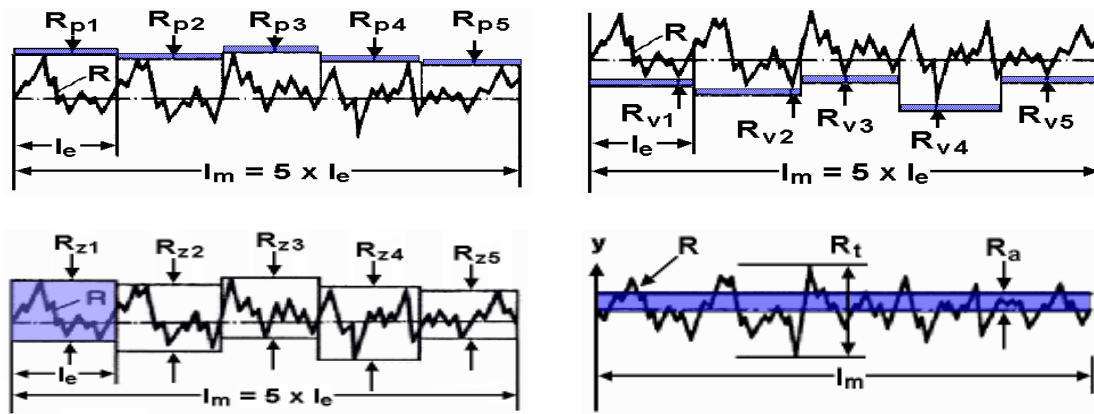


Figure I.9 : Les critères de la rugosité.

I.8 Efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand la vitesse d'avance double) [37].

- **Définition et intérêt de leur mesure**

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe $F_{rés}$, peu utilisée en pratique, est la somme de 3 composantes (**Figure I.10**).

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

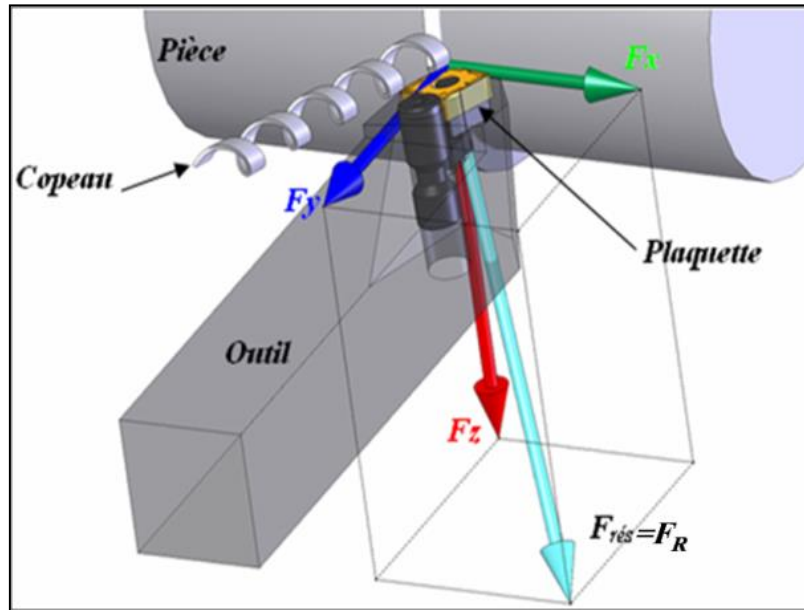


Figure I.10 : Composantes des efforts de coupe.

La connaissance des efforts de coupe est à la base de puissance nécessaire à la coupe, aussi elle est nécessaire pour l'évaluation du rendement mécanique d'une machine-outil. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machine et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage, et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin, les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal, dans le processus de formation du copeau. D'après la (**Figure I.10**), la force de coupe résultante $F_{rés}$, étant une diagonale du parallélépipède elle sera donnée par l'expression :

$$F_{rés} = \sqrt{F_a^2 + F_r^2 + F_t^2} \quad (\text{I.6})$$

L'évaluation des composantes peut être donnée à travers des modèles empiriques déterminés par des méthodes statistiques à partir de résultats expérimentaux.

$$F_a = C_1 a p^{x_1} \cdot f^{y_1} \cdot V_C^{n_1} \cdot K_a \quad (\text{I.7})$$

$$F_r = C_2 a p^{x_2} \cdot f^{y_2} \cdot V_C^{n_2} \cdot K_r \quad (\text{I.8})$$

$$F_t = C_3 a p^{x_3} \cdot f^{y_3} \cdot V_C^{n_3} \cdot K_t \quad (\text{I.9})$$

Où les coefficients C_1, C_2, C_3 sont des constantes qui dépendent des propriétés mécaniques du métal à usiner et conditions de son usinage. Les coefficients K_a, K_r, K_t se sont les coefficients correctifs relatifs aux conditions concrètes d'usinage. Les exposants $x_{1,2,3}, y_{1,2,3}, n_{1,2,3}$, caractérisent le degré d'influence des paramètres V_c, f et ap sur les forces de coupes F_a, F_r, F_t .

I.9 Travaux de recherche (état de l'art)

Diverses recherches ont été entreprises pour étudier l'usinabilité des aciers inoxydables et particulièrement l'acier les aciers inoxydables martensitiques. Les études se sont focalisées sur l'endommagement et l'usure des outils de coupe, l'intégrité de surfaces, la mesure des efforts de coupe, la puissance de coupe, le volume de copeau enlevé, la formation de copeau, la géométrie des plaquettes de coupe et les vibrations en usinage dur. Aussi, d'autres travaux se sont intéressés à la modélisation des paramètres technologiques d'usinage en utilisant divers techniques de modélisation et qui se rattachent à l'intelligence artificielle. Ces techniques permettent de proposer des modèles mathématiques qui seront utilisés pour l'optimisation des conditions de coupe en utilisant différentes approches. Parmi eux, on peut citer les travaux de recherche suivants :

Bouzid et al. [38], ont présenté une étude statistique afin d'établir un modèle reliant les paramètres de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe), les composants de la force de coupe (force axiale (F_x), force radiale (F_y), force tangentielle (F_z)) et la rugosité de surface R_a . Le couple outil/matériau choisi pour le processus de tournage est un outil en carbure revêtues par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et un acier inoxydable martensitique AISI 420 non traité thermiquement. Un plan factoriel complet de trois facteurs et de quatre niveaux (4^3) a été adopté pour réaliser les résultats les expériences et l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (MSR) ont été adoptés pour modéliser le processus. Les régimes de coupes optimales ont été déterminés l'approche par la fonction de désirabilité. Les résultats trouvés montrent la bonne concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites (**Figures I.11 et I.12**).

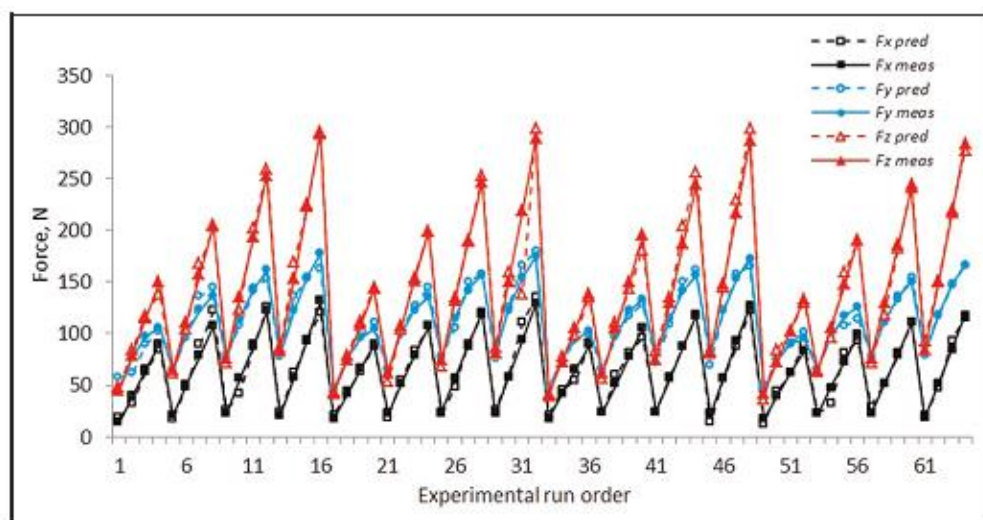


Figure I.11 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites des efforts de coupe.

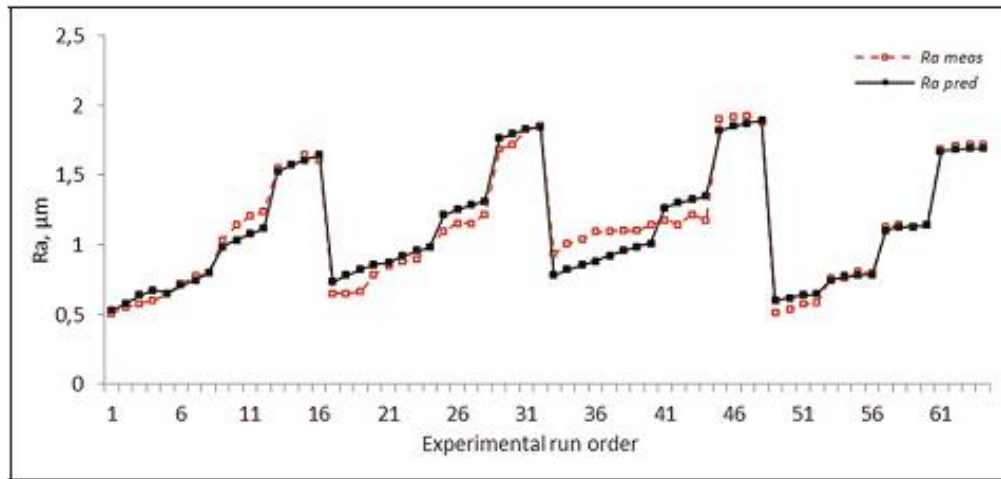


Figure I.12 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra.

Bruni et al. [39] ont réalisé une étude expérimentale sur l'effet de lubrification sur la rugosité de surface (Ra) et l'usure de l'outil (VB) dans les opérations de fraisage de l'acier inoxydable AISI 420 par des plaquettes en carbure revêtue en (TiN et TiAlN). Les auteurs ont usiné l'acier AISI 420 sous différentes vitesses de coupe (V_c) et de conditions de lubrification (sec, lubrifié et Quantité minimum de lubrifiant (MQL)). Les auteurs ont utilisé deux types de modélisation qui sont la modélisation par MSR et RNA afin de modéliser la rugosité de surface et l'usure de l'outil (**Figures I.13 à I.15**).

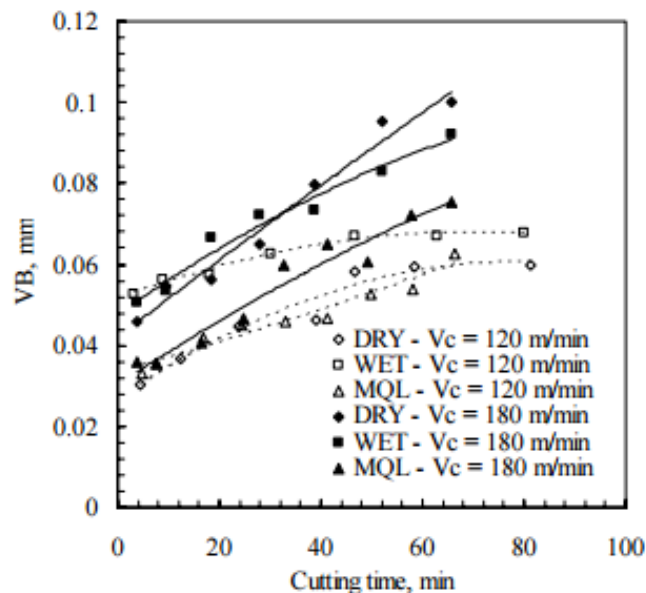


Figure I.13 : Evolution d'usure d'outil (VB) en fonction du temps de coupe sous les conditions : Sec, Lubrifié et Quantité Minimum de Lubrifiant (MQL) à $V_c=120$ et 180 m/min.

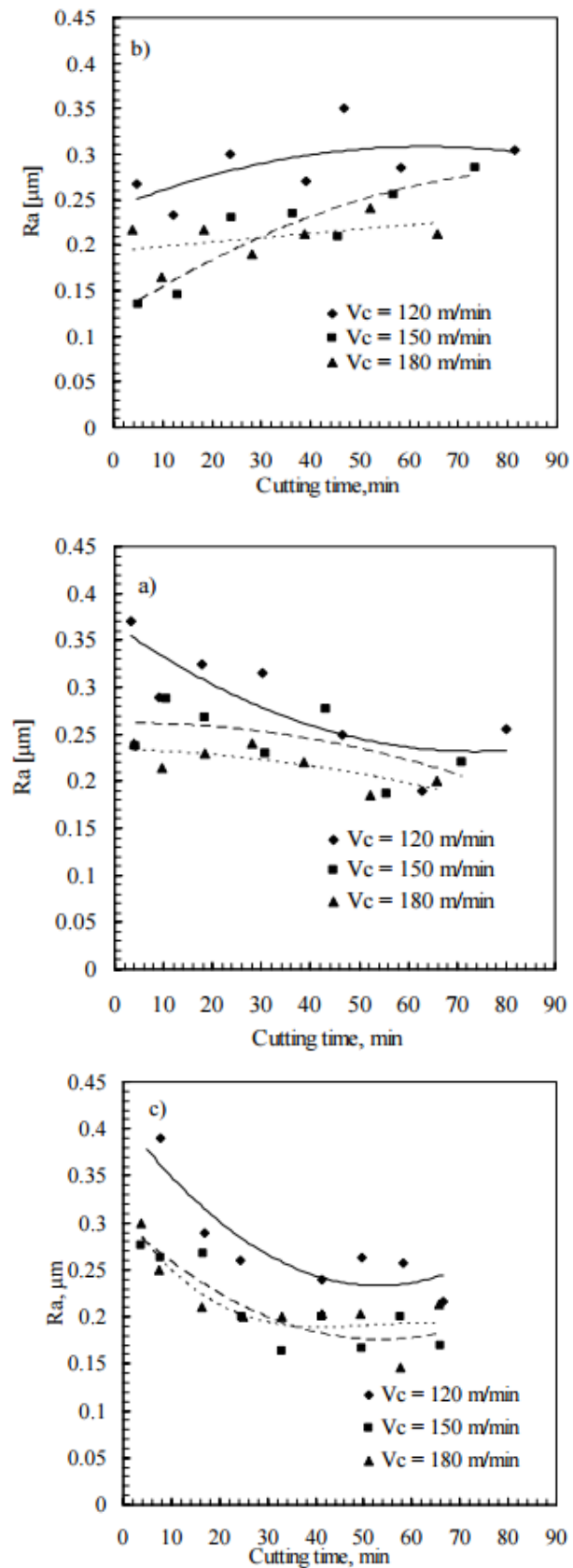


Figure I.14 : Rugosité de surface en fonction du temps de coupe sous conditions : a) lubrifié, b) sec et c) quantité minimum de lubrifiant (MQL) à des $V_c = 120, 150$ et 180 m/min.

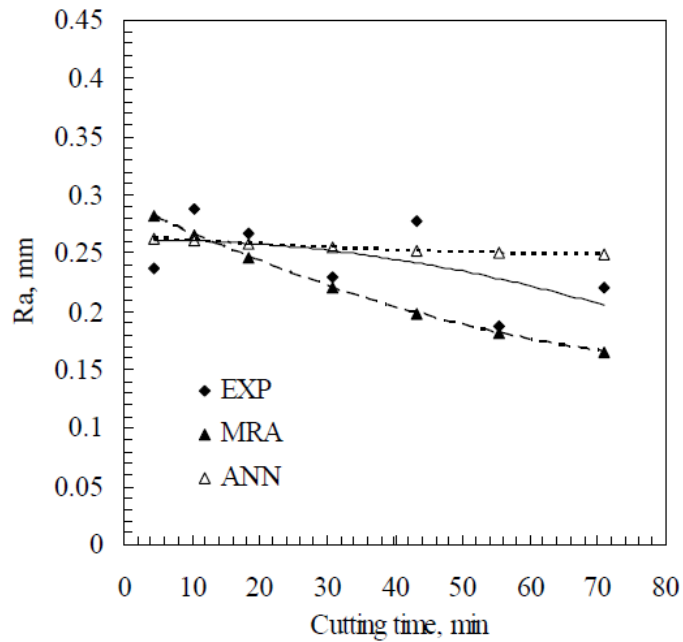


Figure I.15 : Comparaison entre les valeurs expérimentales de R_a avec les deux modèles MSR et RNA, Pour $V_c = 150$ m/min avec lubrification.

Liew et al. [40] ont étudié la rugosité de surface et l'usure d'outils en carbure avec et sans revêtement $TiAlN$ PVD, dépôt physique en phase vapeur, pendant l'opération de perçage du STAVAX (AISI 420 modifié) pour des faibles vitesses. Les auteurs ont utilisé deux vitesses de coupe 25 à 50 m/min et plusieurs dureté du matériau allant de 35 à 55 HRC, avec lubrification (Figures I.16 et I.17). Les auteurs ont abouti aux conclusions suivantes :

- Aucun changement significatif de l'usure de l'outil a été observé lorsque la vitesse de coupe augmente de 25 à 50 m / min ;
- L'augmentation de la dureté de la pièce de 35 à 55 HRC a provoqué une augmentation remarquable de l'usure ;
- Usiner avec une dureté de 35 et 40 HRC, l'outil revêtu est principalement soumis à une usure par abrasion pendant toute la durée de l'essai ;
- L'outil revêtu a montré une résistance de rupture beaucoup plus élevée que l'outil non revêtu et cela est dû à l'efficacité du revêtement qui empêche la formation des fissures ;
- L'utilisation du liquide lubrifiant empêchant la rupture catastrophique de l'outil.

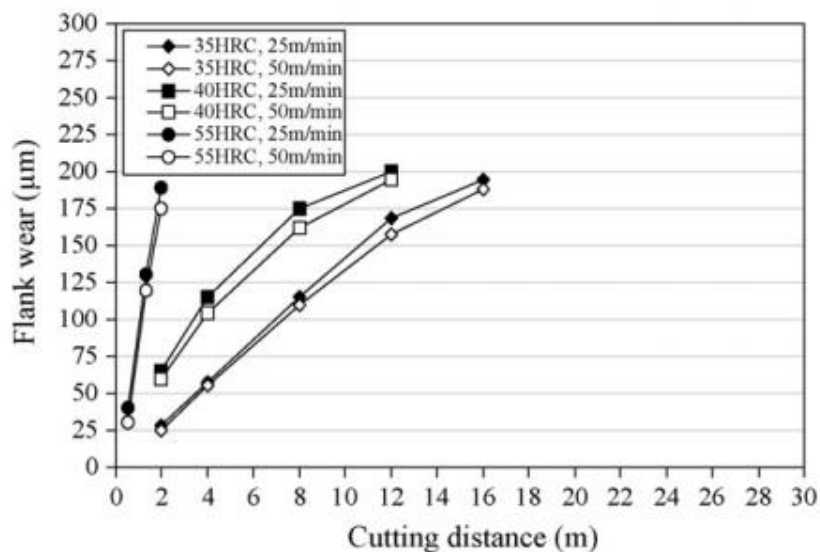


Figure I.16 : Changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure non revêtu.

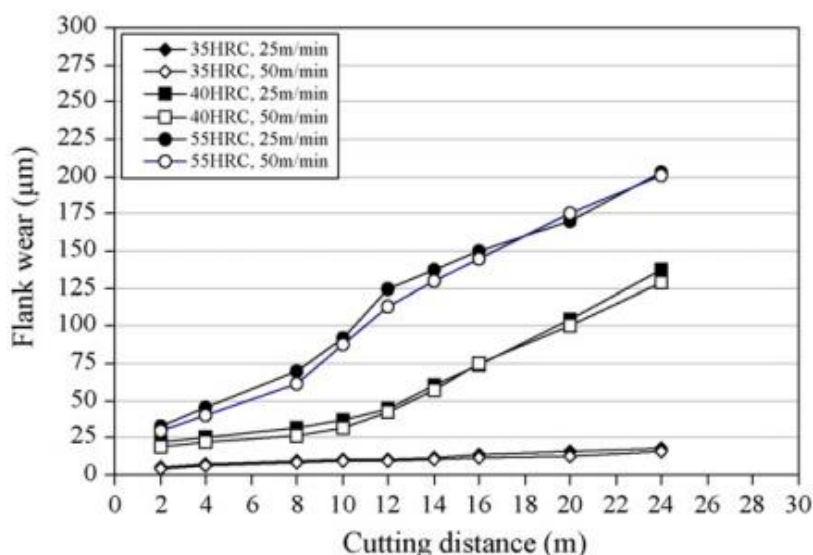


Figure I.17 : Changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure revêtu.

El-Tamimi al. [41] ont étudié les caractéristiques d'usinage des matériaux à haute résistance de l'acier inoxydable à haute résistance AISI 420 dans différents conditions de coupe et angles d'attaque d'outil en utilisant des outils de coupe en carbure de type P10 à trois angles de coupe (-6, 0, +6) et à différentes conditions de coupe. L'évaluation est réalisée en étudiant l'effet des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, et la géométrie d'outil) sur les paramètres de sorties. Des équations empiriques et des corrélations de comportement de chacune des réponses ont été proposées en fonction des variables indépendantes d'usinage. Les résultats trouvés par les auteurs montrent, quand la vitesse de coupe atteint une valeur de 60

m/min, les composantes de l'effort de coupe et la pression spécifique de coupe augmentent pour atteindre des valeurs critiques maximum. D'autre part l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 100 m/min réduit les composantes de l'effort de coupe et la pression spécifique de coupe graduellement. Un accroissement ultérieur de vitesse de coupe (au-dessus de 100 m/min) garde la pression spécifique de coupe et les composantes de l'effort de coupe presque constantes, **Figure I.18**.

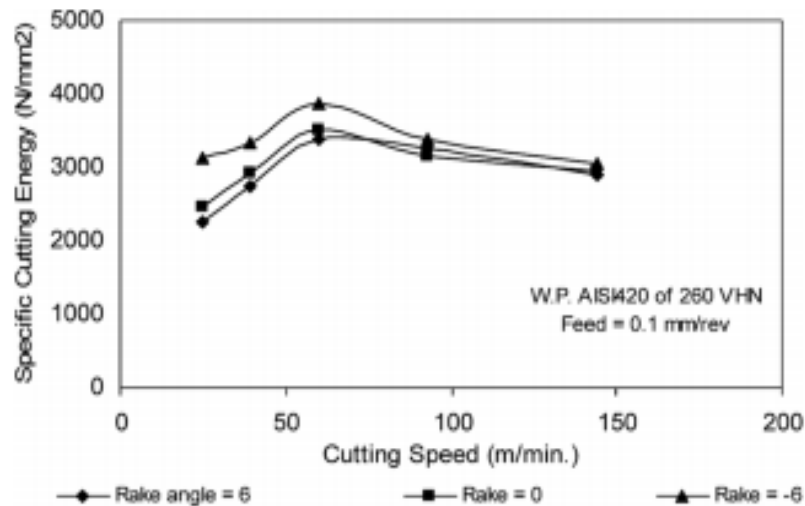


Figure I.18 : *Effet de la vitesse de coupe sur l'énergie spécifique de coupe à des différents angles de coupe.*

K. S. NEO et al. [42] 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 Ra 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.19**).

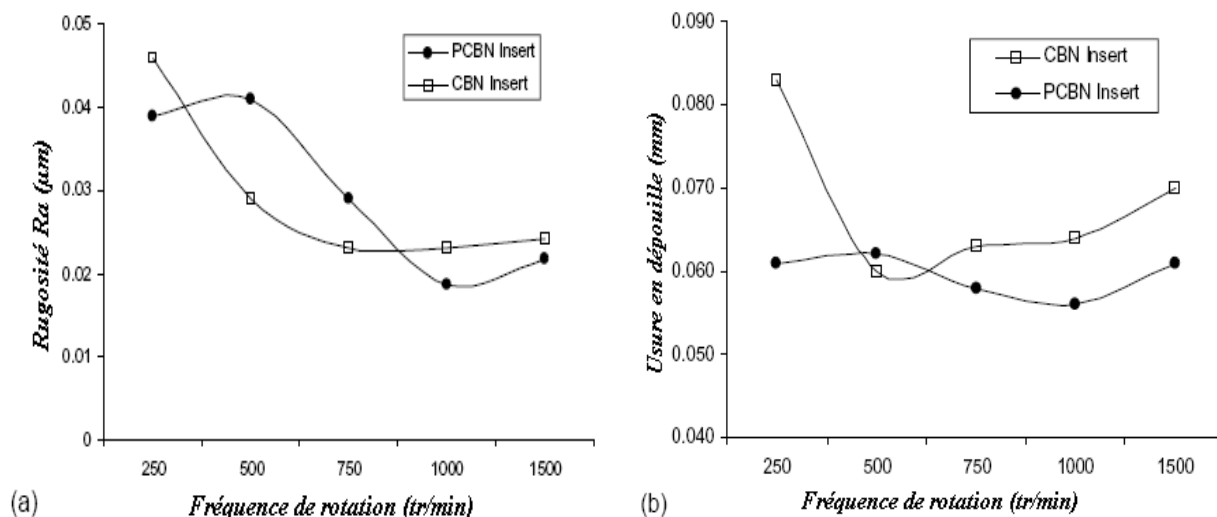


Figure I.19 : Evolution de la rugosité et de l'usure en dépouille en fonction de la fréquence de rotation.

M.Y. Noordin et al. [43] 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 différentes 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.20** et **I-21** illustrent une comparaison de performance entre le cermet KT315 et le carbure KC9110.

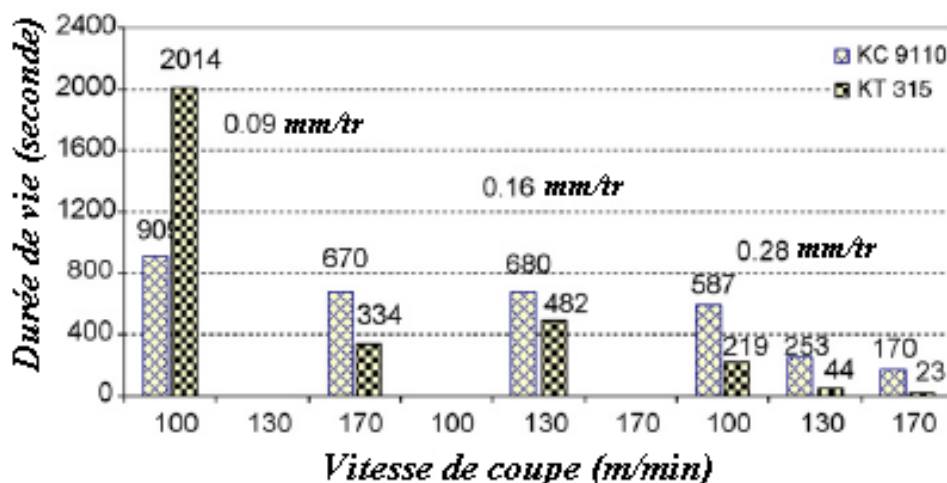


Figure I.20 : Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différentes vitesses de coupe et avances pour un angle d'attaque -5°.

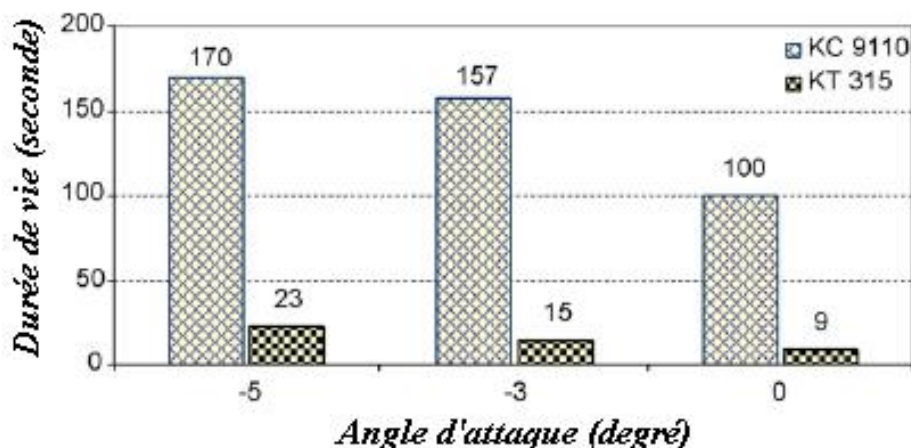


Figure I.21 : *Durée de vie du cermet KT315 et du carbure KC9110 aux différents angles d'attaque pour $V_c=170$ m/min.*

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.

K. Chandrasekaran et al. [44] 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 ($TiCN+Al_2O_3$, $Ti(C, N, B)$, $(Ti, Al) N$). 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 R_a . 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 ($TiCN+Al_2O_3$ 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.

M. Thiyagu et al. [45] 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 μm) 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. [46] 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. [47] 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 [48] 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. [49] 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).

Uysal et al. [50] ont appliqué la méthode de lubrification de quantité minimum (MQL) en utilisant un fluide de coupe de légumes commerciaux et 1% en poids. de nano MoS₂ (disulfure de molybdène) particules fluide de coupe végétale renforcée au cours du fraisage de l'acier inoxydable martensitique AISI 420 avec un outil de coupe en carbure de tungstène non revêtu. Les expériences ont été effectuées à une vitesse de coupe, une alimentation et une profondeur de coupe constantes. Deux quantités différentes de nanofluides - brouillard d'air sous pression fourni par le système MQL ont été appliquées à raison de 20 ml/h et 40 ml/h. À la suite des opérations de fraisage, l'usure initiale des outils et la rugosité de la surface ont été étudiées. Selon les résultats expérimentaux, la méthode MQL a réduit l'usure de l'outil et la rugosité de la surface. De plus, des valeurs minimales d'usure de l'outil et de rugosité de surface ont été obtenues lors du fraisage avec nano MQL à un débit MQL de 40 ml/h (Figures I.22 et I.23).

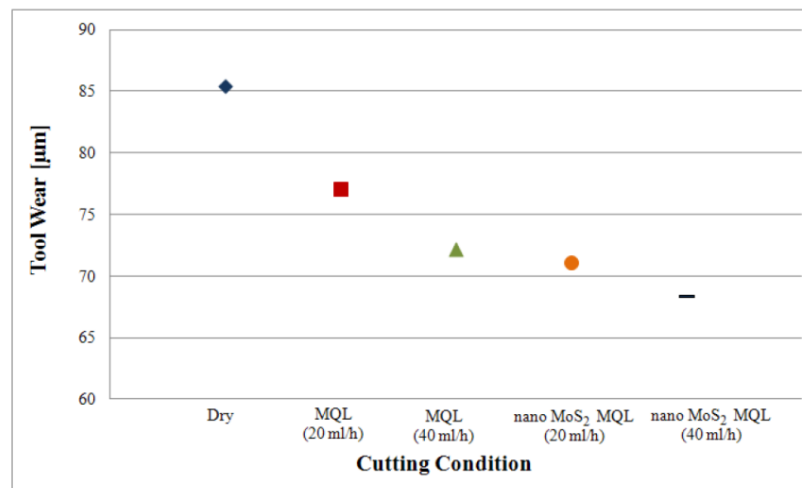


Figure I.22 : Variation de l'usure initiale de l'outil et des conditions de coupe (fraisage pendant 40 secondes).

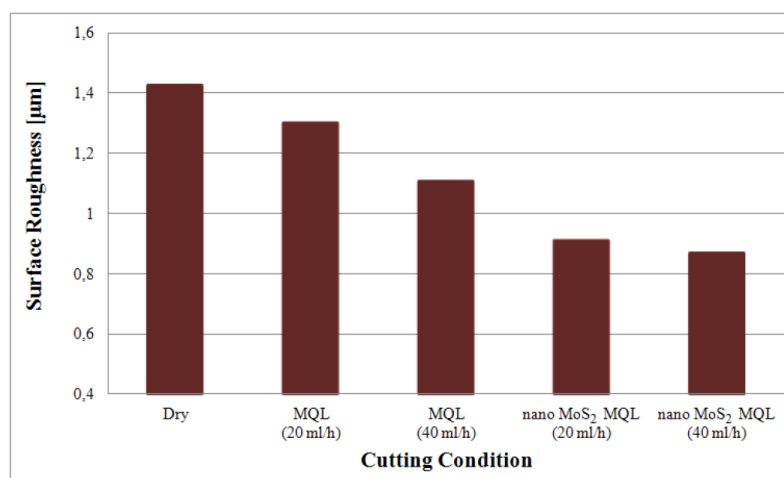


Figure I.23 : Variation de la rugosité de la surface en fonction des conditions de coupe.

Philip Selvaraj et al. [51] ont réalisé une optimisation des conditions de coupe en utilisant la méthode Taguchi lors du tournage à sec de deux qualités différentes d'acier inoxydable duplex. Les opérations de tournage ont été réalisées avec des inserts d'outils de coupe en carbure revêtu TiC et TiCN. Les expériences ont été réalisées à trois vitesses de coupe différentes (80, 100 et 120 m/min) avec trois vitesses d'avance différentes (0,04, 0,08 et 0,12 mm / tour) et une profondeur de coupe constante (0,5 mm). Les paramètres de coupe sont optimisés en utilisant le rapport signal sur bruit et l'analyse de la variance. Les effets de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur la rugosité de la surface, la force de coupe et l'usure de l'outil ont été analysés. Les résultats ont révélé que le débit d'alimentation est le paramètre le plus important qui influe sur la rugosité de la surface et la force de coupe. La vitesse de coupe a été identifiée comme le paramètre le plus important influençant l'usure de l'outil. Les auteurs ont réalisé des essais de confirmation dans des conditions de coupe optimales. Les résultats prédits trouvés sont plus proches des résultats expérimentaux avec des écarts de 8%.

Nayak et al. [52] ont effectué une optimisation multi-objective des paramètres d'usinage pendant le tournage à sec de l'acier inoxydable austénitique AISI 304. Les auteurs ont utilisé un plan d'expérience de Taguchi L_{27} pour étudier l'influence de différents paramètres d'usinage tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de coupe (t) sur trois caractéristiques importantes de l'usinabilité telles que la vitesse d'enlèvement de matière (MRR), la force de coupe (F_c) et la rugosité de surface (R_a). Les inserts en carbure cémenté non revêtus ISO P30 ont été utilisés comme outil de coupe, et les conditions de coupe suivantes ont été adoptées : $V_c = 25, 35, 45$ m/min ; $f = 0,1 ; 0,15 ; 0,2$ mm/tour et $t = 1 ; 1,25 ; 1,5$ mm. L'optimisation a également été faite pour optimiser simultanément des paramètres d'usinage en utilisant une analyse relationnelle grise (GRA). La combinaison paramétrique recommandée basée sur les critères de performance étudiés (c'est-à-dire MRR, F_c et R_a) s'est révélée être $V_c = 45$ m/min, $f = 0,1$ mm/tour, $t = 1,25$ mm (**Figure I.24**).



Figure I.24 : Vue agrandie de l'outil et de la pièce du montage expérimental.

Elmunafi et al. [53] ont indiqué que les fluides de coupe ont été utilisés avec succès dans l'usinage pour prolonger la durée de vie de l'outil de coupe, mais les problèmes liés à l'environnement, la santé et les coûts de fabrication suggèrent de diminuer leur utilisation autant que possible. Les huiles végétales sont considérées pour une utilisation dans MQL en raison de leur bonne lubrification et performance de pression. C'est dans ce cadre qu'ils ont évalué la performance des outils de coupe en carbure revêtu en termes de durée de vie sous MQL avec un débit de 50 ml/h en utilisant de l'huile de ricin (castor oil) comme fluide de coupe. L'usinage a été réalisé sur une pièce en acier inoxydable AISI 420 trempé (avec 47 - 48HRC dureté). L'évaluation de la performance a été faite sous différentes vitesses de coupe (de 100, 135 et 170 m / min) et des avances (0,16, 0,2 et 0,24 mm / tour). Des modèles empiriques de la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe et de l'avance ont été développés dans la plage des paramètres de coupe évalués. Il a été constaté que la vie de l'outil est inversement proportionnelle à la vitesse de coupe et à l'avance, l'effet de la vitesse de coupe est plus important que l'avance (**Figure I.25**) (**Tableau I.3**).

Tableau I.3 : Résultat de la durée de vie des outils de coupe en carbure revêtus dans des conditions MQL.

Standard No.	Cutting speed (m/min)	Feed (mm/rev)	Tool life (min)
1	100	0.16	33.7
2	135	0.20	8.3
3	135	0.20	7.4
4	135	0.20	8.2
5	135	0.24	3.9
6	100	0.20	31.7
7	170	0.20	2.2
8	100	0.24	20.1
9	170	0.24	1.5
10	170	0.16	6.8
11	135	0.16	8.4

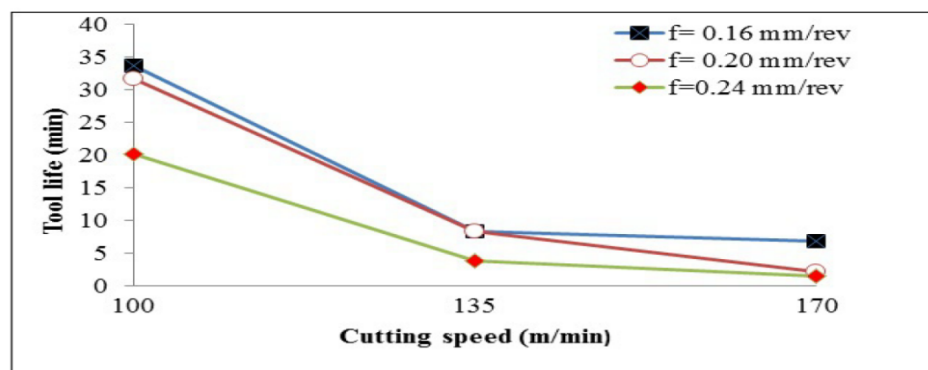


Figure I.25 : Durée de vie de l'outil revêtu d'essuie-glace à différentes vitesses de coupe et avances.

Bagaber et al. [54] ont fait une étude qui vise à optimiser les paramètres d'usinage (c'est-à-dire la consommation d'énergie et la rugosité de surface) de l'acier inoxydable 316 avec un outil CBN lors de l'usinage à sec. La méthodologie de surface de réponse avec la conception Box-Behnken (BBD) a été utilisée pour optimiser les paramètres d'usinage et la fonction de désirabilité composée a été appliquée pour déterminer les niveaux optimaux et la contribution des paramètres. Un test de validation a été effectué pour confirmer les résultats. Les résultats trouvés montrent que la combinaison de paramètres a entraîné une consommation d'énergie minimale de 6,78% et une diminution de la rugosité de surface de 13,89% et que cette méthode réduit également efficacement les effets sur l'environnement en termes d'utilisation de fluide sans interruption et moins d'énergie requise qui est affectée dans la durabilité de l'usinage (**Figure I.26**).

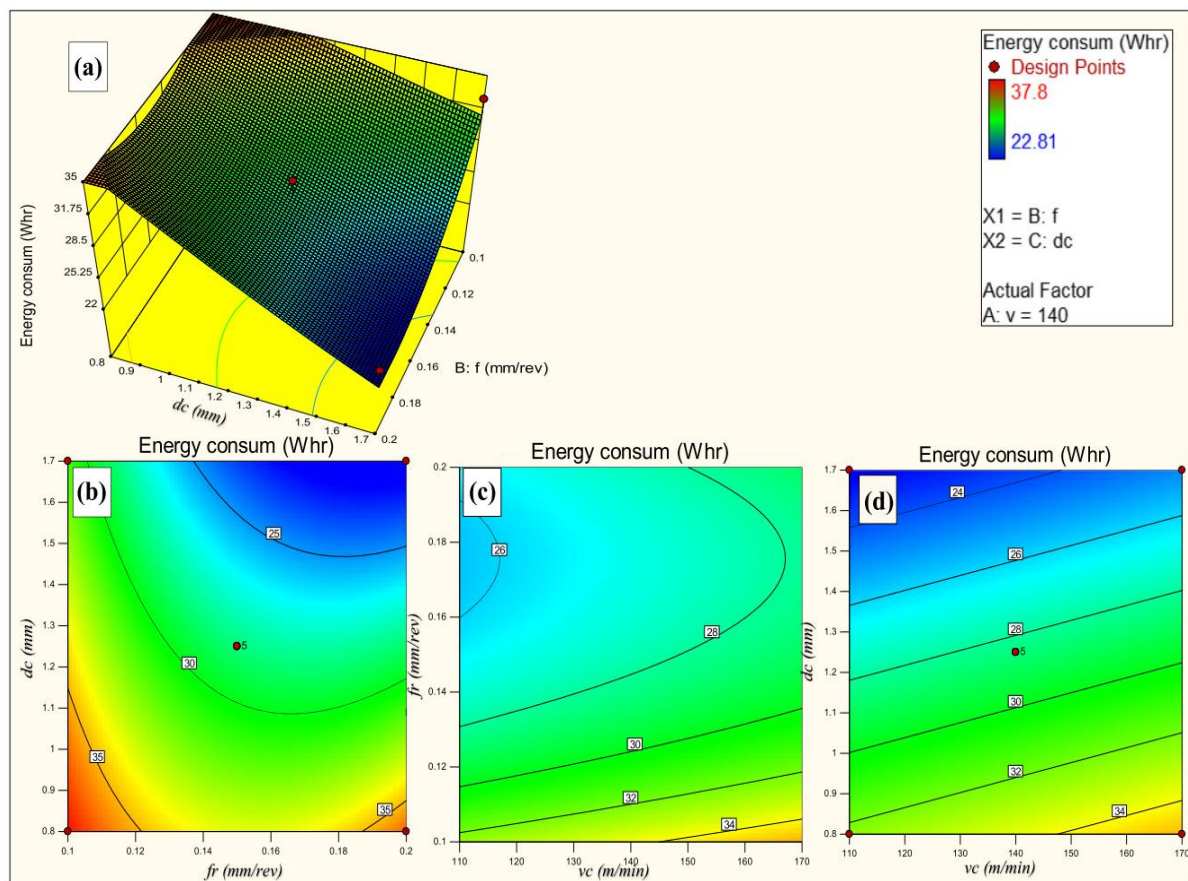


Figure I.26 : Contour et graphiques en 3D de la consommation d'énergie par rapport aux paramètres.

Korkmaz et al. [55] ont présenté une étude pour modéliser les forces de coupe et la consommation d'énergie lors de tournage de l'acier inoxydable AISI 420 martensitique à l'aide de la méthode des éléments finis. La modélisation par éléments finis des forces de coupe a été

préférée pour estimer les paramètres de coupe optimaux pour une consommation d'énergie moindre. Dans ce contexte, les simulations d'éléments finis sont effectuées en fonction de trois niveaux différents : vitesse de coupe, profondeur de coupe et vitesse d'avance. Les résultats révèlent que la profondeur de coupe a été évaluée comme le facteur le plus important avec un pourcentage de contribution de 49,55% en ce qui concerne la consommation d'énergie. La moyenne de 7% de différence a été obtenue entre les forces de coupe expérimentales et simulées. L'écart de 4,5% a été évalué entre les résultats expérimentaux et les sorties de simulation en comparant la consommation d'énergie. Les auteurs indiquent aussi que la modélisation par éléments finis des forces de coupe et de la consommation d'énergie est tout à fait compatible avec les résultats expérimentaux, et elle peut être réalisée par haute précision sans expérimentations excessives d'usinage de matériaux difficiles à découper (**Figure I.27**).

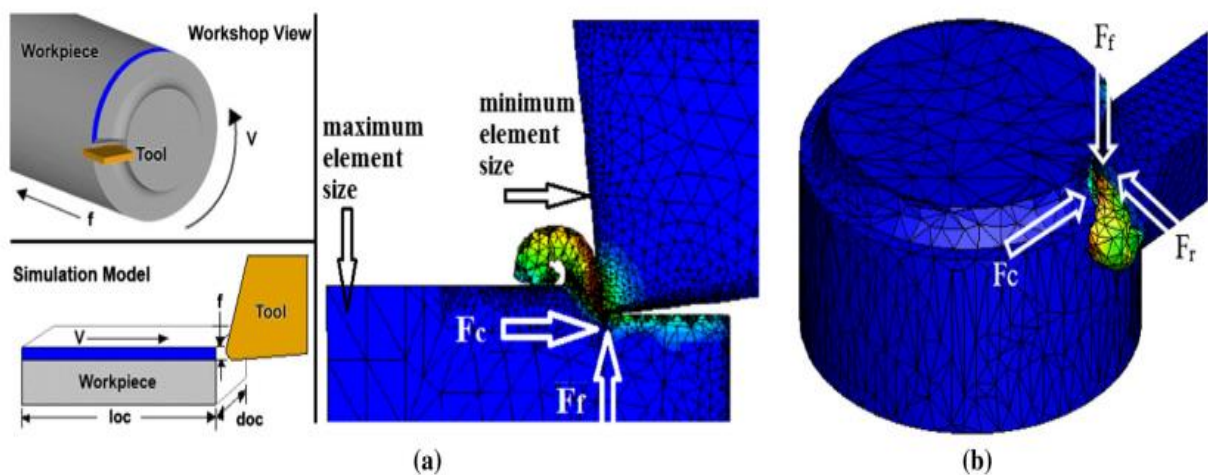


Figure I.27 : Schéma de coupe pour la simulation : (a) 2D et (b) 3D.

Rosa et al. [56] ont évalué les mécanismes d'usure et d'usure des outils utilisés dans le tournage dur de l'acier inoxydable AISI 420C avec outil carbure à grain ultrafin revêtu de TiAlN dans différentes conditions de coupe. Des tests de durée de vie de l'outil ont été effectués en utilisant différents niveaux de vitesse d'avance et de vitesse de coupe. Les essais d'usinage étaient périodiquement rompus afin d'évaluer l'usure en dépouille. La finition de la surface des pièces usinées a été évaluée pendant toute la durée de vie de l'outil et les outils ont été analysés à l'aide de microscopie (SEM / EDS). Les résultats du test indiquent l'influence à la fois de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur la durée de vie de l'outil. Après avoir atteint le critère de la durée de vie de l'outil d'une usure de 0,2 mm, la microscopie au MEB a mis en évidence l'usure abrasive dans les conditions testées. Le délaminage du revêtement de l'outil et l'usure du cratère ont été observés dans certaines conditions spécifiques testées. L'analyse EDS

a révélé des quantités significatives de fer et de chrome collé sur tous les outils à la vitesse de coupe la plus élevée, indiquant un mécanisme d'usure par oxydation (**Figures I.28 et I.29**).

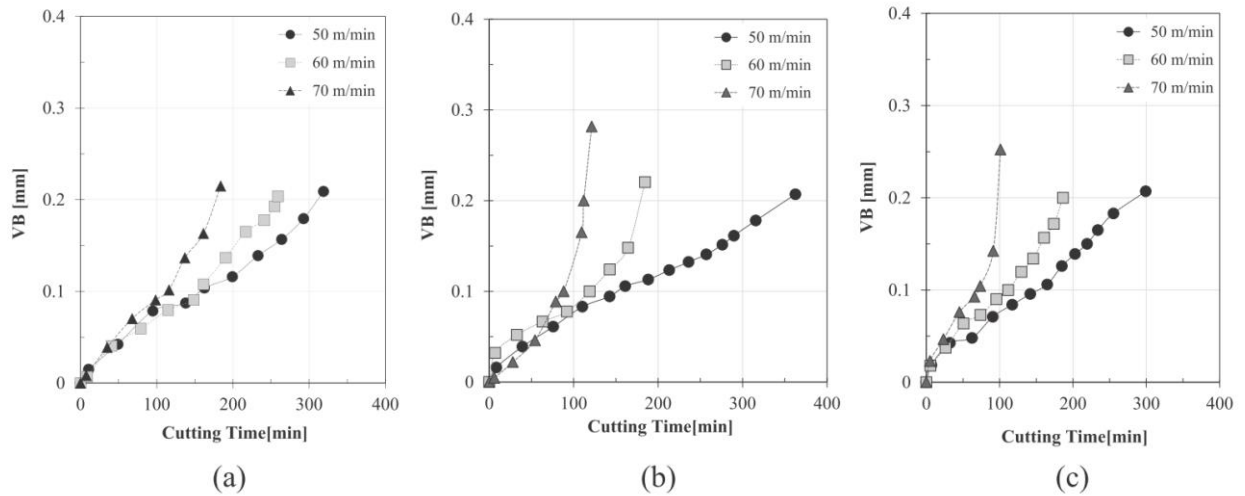


Figure I.28 : Usure en dépouille (VB) par rapport au temps de coupe pour les conditions testées : (a) $f=0.08\text{mm/tr}$, (b) $f=0.10\text{mm/tr}$ and (c) $f=0.12\text{mm/tr}$.

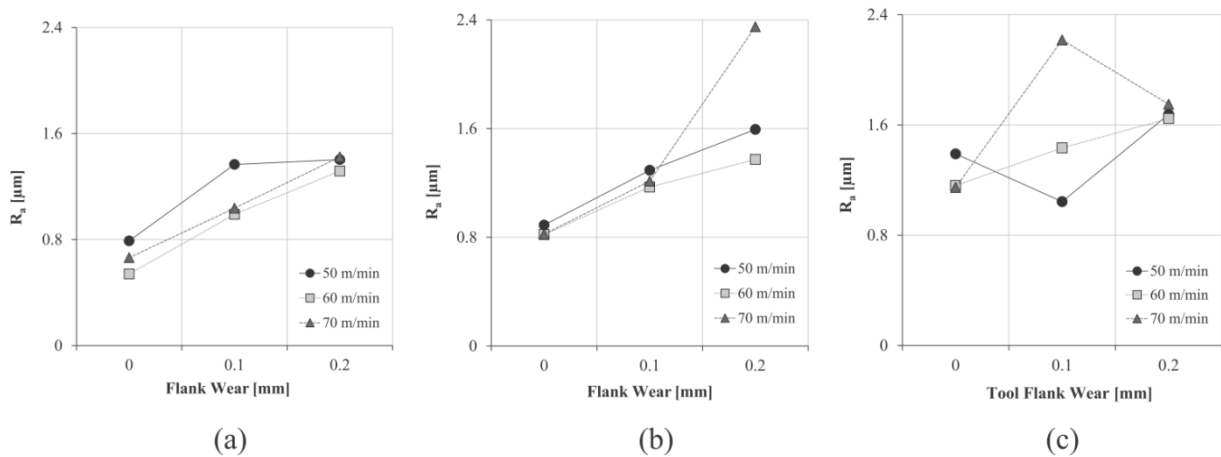


Figure I.29 : Variation de la rugosité de surface avec l'usure de l'outil : (a) $f=0.08\text{mm/tr}$, (b) $f=0.10\text{mm/tr}$ and (c) $f=0.12\text{mm/tr}$.

Bouزيد et al. [57] ont fait une investigation expérimentale sur la rugosité de surface et le volume de copeau enlevé lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13. Quatre étapes ont été considérées dans ce travail à savoir ; l'étude statistique des résultats expérimentaux basés sur ANOVA, la modélisation basée sur l'analyse de régression et l'optimisation mono et multi-objectives. Dans la première étape, un plan d'expérience de Taguchi (L16) a été réalisé. Les effets des paramètres de coupe sur la rugosité de surface et le taux d'enlèvement de matière ont été déterminés à l'aide d'ANOVA et de tracés d'interaction.

Dans la deuxième étape, l'analyse de régression a été utilisée pour proposer des modèles mathématiques de second ordre permettant la prédiction des paramètres de sorti lors du tournage de l'acier X20Cr13. Dans la troisième étape, les réponses ont été utilisées seules dans une étude d'optimisation en tant que fonction objective en utilisant le rapport signal/bruit de Taguchi. Dans la quatrième étape, les réponses ont été optimisées simultanément en utilisant une analyse relationnelle grise (GRA) (Figure I.30).

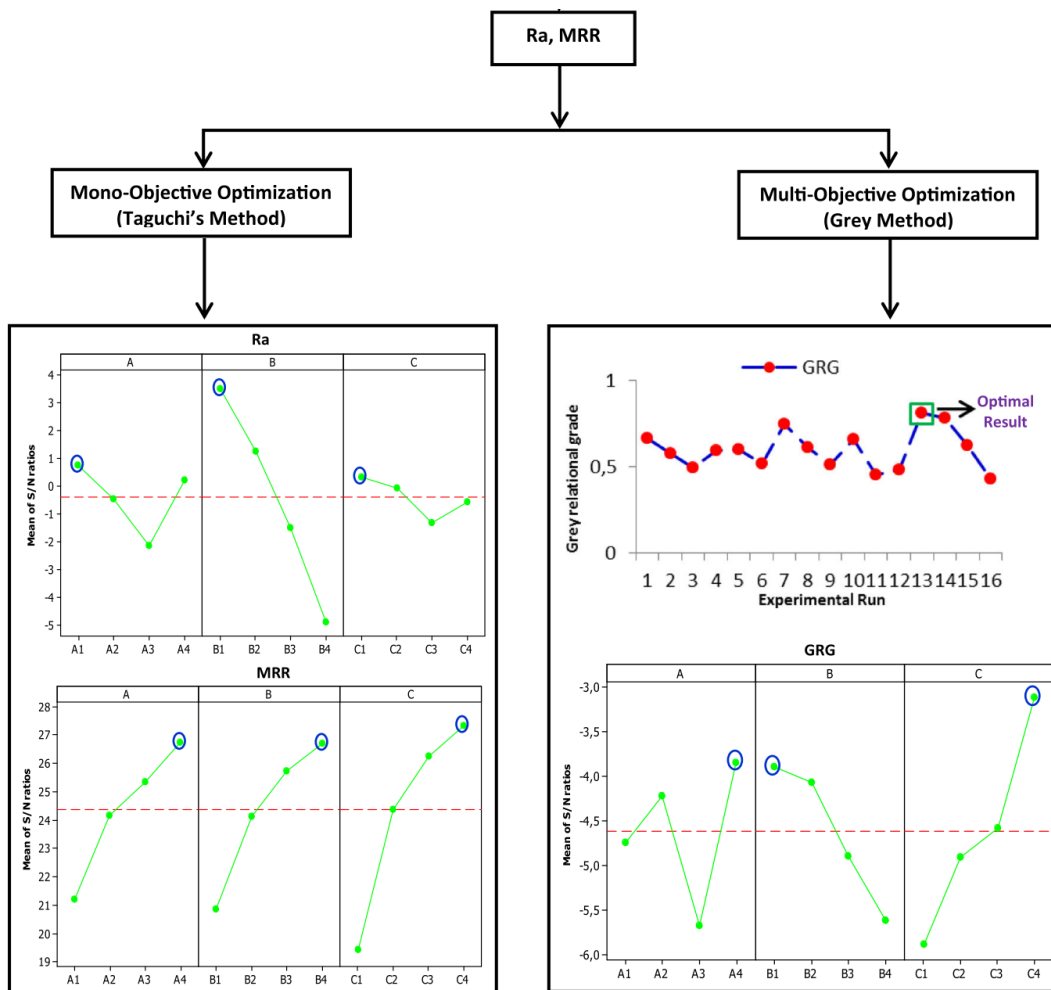


Figure I.30 : Configurations d'optimisation pour Ra et MRR.

I.10 Conclusion

Ce chapitre a été réservé à l'étude bibliographique sur la coupe des métaux en générale et l'usinage des aciers inoxydable en particulier. La dernière partie de cette étude bibliographique est consacrée aux travaux de recherche en tournage et particulièrement la modélisation des paramètres technologiques d'usinage et l'optimisation des conditions de coupe. Cette étude nous a permis de comprendre les phénomènes physiques intervenants dans le processus de coupe et aussi les méthodes modernes d'optimisation des conditions de coupe.

CHAPITRE II

PROCEDURES EXPERIMENTALES

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble du matériel mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique, ainsi que la méthodologie de recherche qui repose sur la planification des expériences. Les conditions de coupe ont été définies.

II.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre l'ensemble du matériel mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique, qui a servi à l'étude de la modélisation des différents paramètres technologiques d'usinage, tels que la rugosité de surface, les efforts de coupe, la puissance de coupe et enfin le volume de copeau enlevé, lors de l'usinage d'un acier inoxydable martensitique à différentes conditions de travail avec des plaquettes en céramique mixte. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

II.2. Matériels utilisés

II.2.1. Machine-outil

L'usinage a été réalisé sur un tour conventionnel SN 40C d'une puissance de 6,6 kW sur la broche, ayant une gamme de vitesses de 45 à 2000 tr/mn et d'avances de 0,08 à 6,4 mm/tr (Figure II.1).



Figure II.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40C.

II.2.2. Matériau à usiné

Le matériau sur lequel ont été testées nos plaquettes, est l'acier inoxydable martensitique X20Cr13 (AISI420) traité.

L'acier inoxydable AISI 420 martensitique est connu pour sa dureté élevée (valeur moyenne mesurée : 59HRC) et sa résistance à la corrosion atmosphérique. D'où ses applications qui incluent la fabrication des pièces médicales et dans l'agroalimentaire, d'axes et de billes

d'acier, d'instruments chirurgicaux, de calibres, d'éléments de pompes et d'outils de traitement des aliments. Ils jouent aussi un rôle très important dans l'industrie aéronautique. Les aciers inoxydables peuvent contenir environ 13 à 30% de chrome [58]. Les éprouvettes utilisées pour les essais de rugosité, d'effort de coupe, sont coupées sur des barres plaines en acier *X20Cr13* (AISI420) obtenues par laminage, avec une dureté de 180 HB et qui possèdent un diamètre $D = 70$ mm et une longueur $L = 330$ mm (**Figure II.2**).

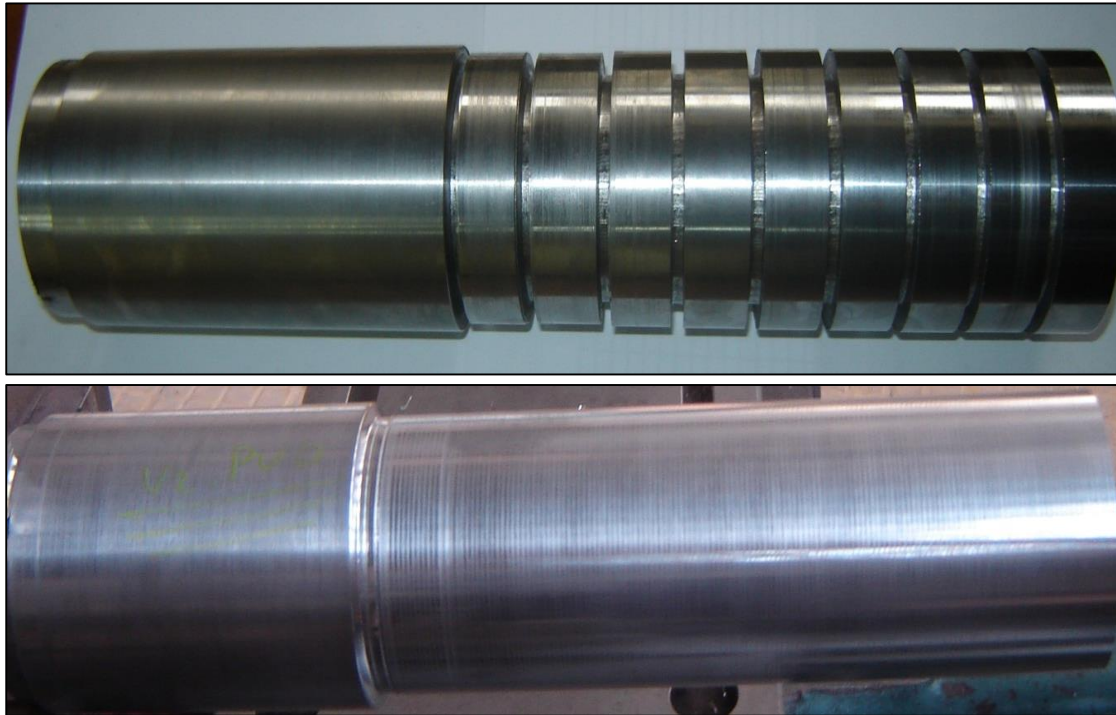


Figure II.2 : *Éprouvettes utilisées.*

La composition chimique de la nuance d'acier utilisé est donnée dans le **tableau II.1**, avec à peu près 13% de chrome.

Tableau II.1 : Composition chimique de l'acier inoxydable X20Cr13

<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>	<i>S</i>
0,36	13,87	0,19	0,28	0,005	0,018
<i>Mo</i>	<i>Mn</i>	<i>Sn</i>	<i>Cu</i>	<i>P</i>	<i>Fe</i>
0,04	0,52	0,005	0,04	0,019	rest

Le **tableau II.2** donne les équivalences des standards internationaux pour la désignation de cet acier.

Tableau II.2 : Équivalence de X20Cr13 en fonction des normes et des pays. [59]

<i>France</i> <i>[AFNOR]</i>	<i>Allemagne</i> <i>[DIN]</i>	<i>Suède</i> <i>[SS]</i>	<i>USA</i> <i>[AISI]</i>	<i>Italie</i> <i>[UNI]</i>	<i>Grande-Bretagne</i> <i>[BS]</i>
Z20Cr13	X20Cr13	2303	420	X20Cr13	420S37

II.2.3. Traitement thermique

Afin d'augmenter la dureté des pièces utilisées dans la présente étude, ces dernières ont subies un traitement thermique (**Tableau II.3** et **Figures II.3** et **II.4**) incluant un préchauffage de température entre 600–850°C et puis un échauffement jusqu'à 1030°C pendant 30 minutes et d'une trempe à l'huile.

Tableau II.3 : Temps de maintien et dureté avant revenu.

Température °C	Temps de maintien* minutes	Dureté avant revenu (HRC)
1020	30	56± 2
1050	30	57± 2

* Temps de maintien = temps de maintien à la température de trempe, après chauffage à cœur de l'outil.

Durant la trempe, il convient de protéger la pièce de la décarburation et de l'oxydation.

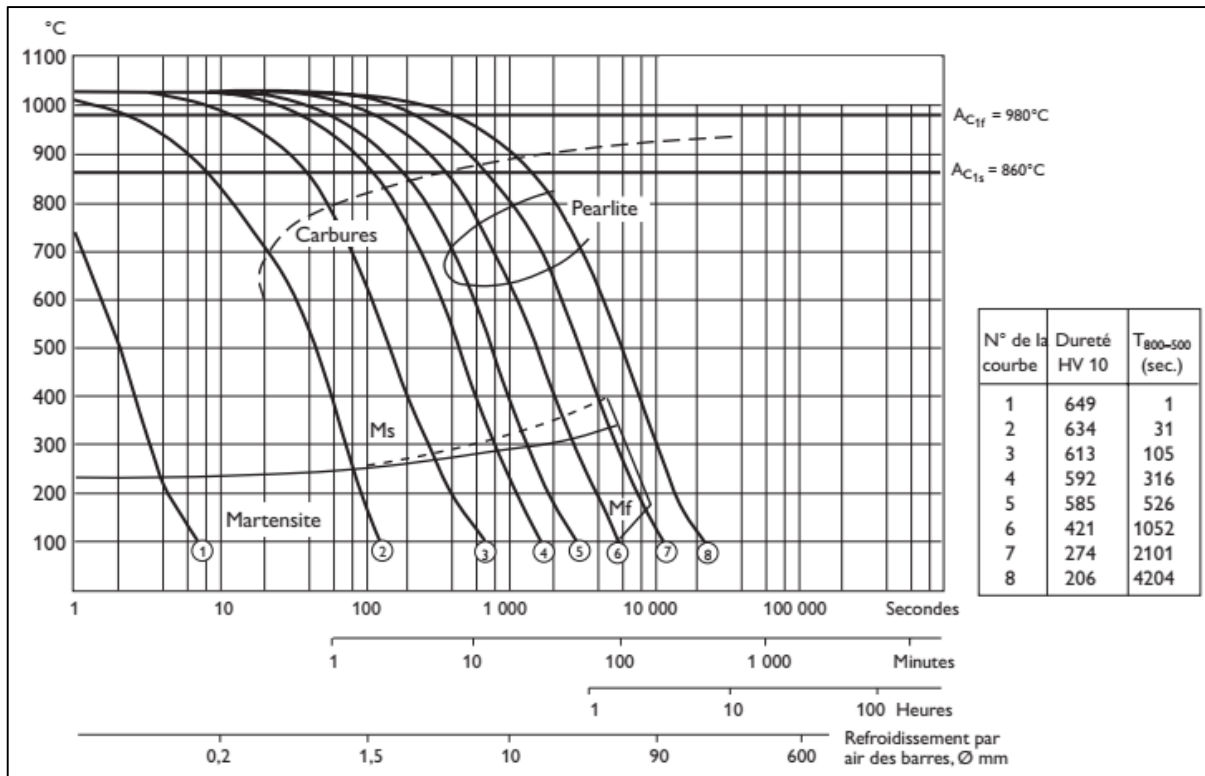


Figure II.3 : Diagramme CCT (Température d'austénitisation 1030°C, séjour de 30 minutes).

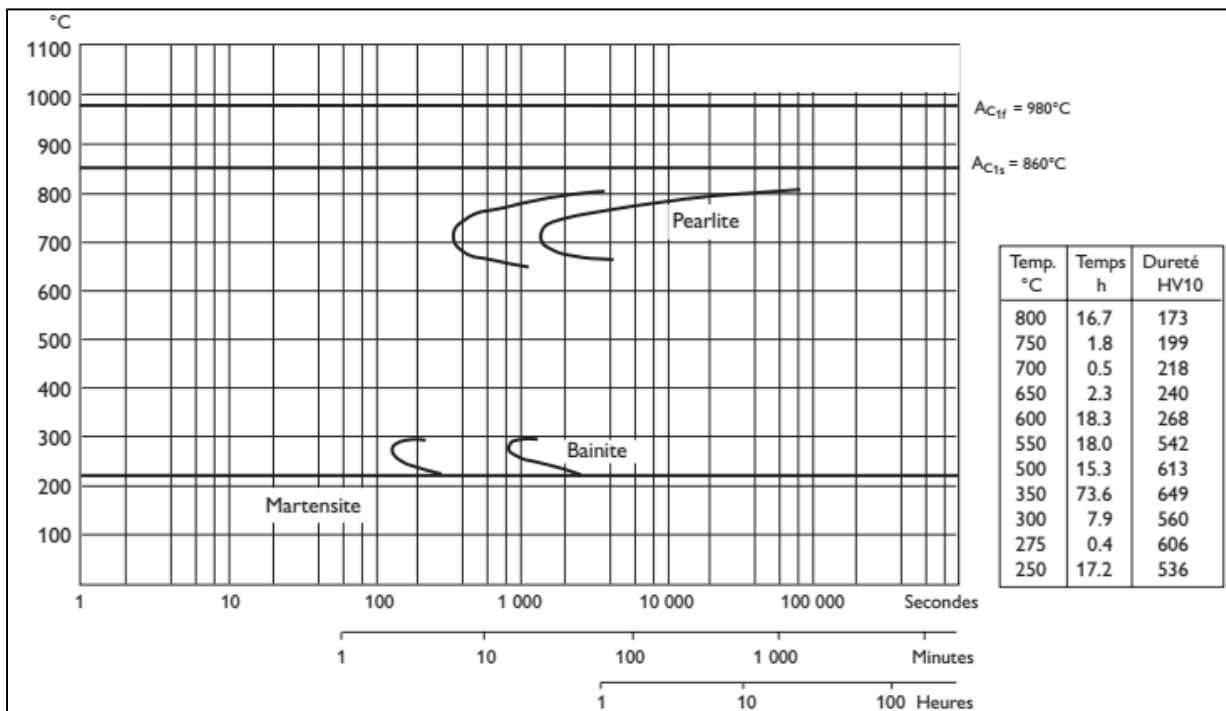


Figure II.4 : Diagramme TTT (Température d'austénitisation 1030°C, séjour de 30 minutes).

La trempe est suivie d'un revenu pour éliminer les contraintes internes. **La figure II.5** présente le diagramme de revenu de l'acier **AISI 420** de manière à obtenir la dureté désirée. Tenir compte ici de l'influence du temps de maintien à la température de revenu. Procéder à deux revenus successifs.

- Température minimale de revenu : 250°C.
- Temps de maintien à cette température : min. 2 heures.

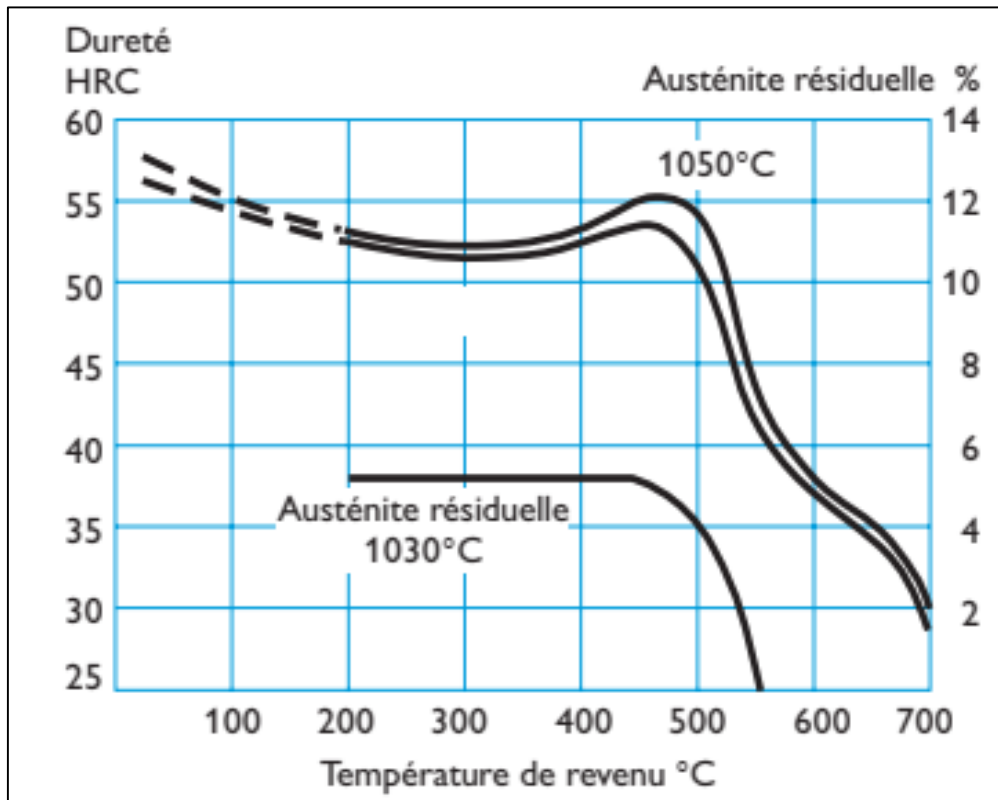


Figure II.5 : Diagramme de revenu. [60]

- Note 1 : Un revenu à 250°C est recommandé pour une meilleure combinaison de ténacité, dureté et résistance à la corrosion.
- Note 2 : Les courbes ci-dessous sont valables pour de petits échantillons. La dureté atteinte dépend de la taille du moule.
- Note 3 : Une combinaison de haute température d'austénitisation et de basse température de revenu <250°C donne un haut niveau de tensions dans le moule et devrait être évitée.

Après les traitements thermiques réalisés (**Figure II. 6**), la dureté de la pièce a augmenté de 180 HB à 59 HRC

Le traitement thermique a été réalisé dans un four électrique (B 180) de caractéristiques suivantes :

- ✓ Puissance : 14 KW
- ✓ Température maximum : 1200°C
- ✓ Dimension : 330*500*280



(a) Chauffage des éprouvettes

(b) Transport de la pièce

(c) Trempe à l'huile

Figure II.6 : Trempe à l'huile de la pièce chauffée.

II.2.4 Mesure de dureté

Après le traitement thermique, une mesure de la dureté des pièces a été réalisée par un duromètre digital type DM2-D 390 (**Figure II.7**), dont les caractéristiques sont les suivantes :

- ✓ Les charges utilisées sont : (10 ; 25 ; 50 ; 100 ; 200 ; 300 ; 500 et 1000) gf ;
- ✓ La hauteur max de l'échantillon ne doit pas dépasser 90 mm ;
- ✓ L'intervalle de la dureté est de 211 à 1037 HV (17 à 70) HRC ;
- ✓ Le temps de chargement est de (0 à 99) secondes.



Figure II.7 : Duromètre digital type DM2-D 390.

II.2.5. Outils de coupe utilisés

II.2.5.1. Porte plaquette

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte-outil (SANDVIK) sur lequel sont fixées les plaquettes mécaniquement par trou central (**Figure II.8**). La désignation du porte-outil selon la norme ISO est PCBNR2525M12 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.



Figure II.8 : Porte outil utilisé.

II.2.5.2. Plaquettes de coupe

La plaquette utilisée pour les essais d'usinage est une plaquette en céramique mixte revêtue (CC6050), elle est amovible de forme carrée (**Figure II.9**) à fixation par trou central, toutes les informations relatives sur la plaquette de coupe sont au tableau ci-dessous :

Tableau II.4 : Informations relatives aux plaquettes utilisées.

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Marque	Composition
Céramique revêtue	CC6050	CNGA 12 04 08S01525	Sandvik	70%Al ₂ O ₃ +30%TiC +TiN

La céramique revêtue (CC6050), de par leur propriété notamment sa dureté à chaud très élevée, sa très grande stabilité thermique et chimique, sa haute résistance à la chaleur est très appropriée pour le tournage dur. Le revêtement en nitrure de titane permet de compenser l'absence de refroidissement. Elle est ainsi particulièrement recommandée pour toutes les opérations d'usinage à grande vitesse et à sec.

Les plaquettes ont un revêtement PVD (à base de nitrure de titane).

- Dépôt : Base TiN
- Dureté (HV) : 2100
- Coefficient de frottement (acier à sec) : 0.5. - Epaisseur : 3-7 μ m
- Température max d'utilisation en °C : 700

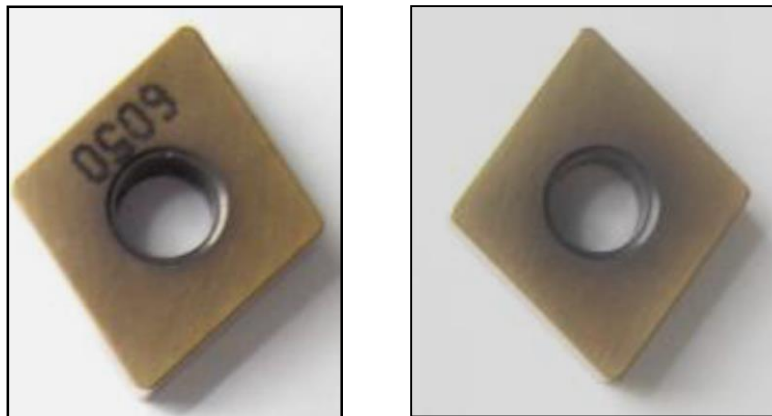


Figure II.9 : Plaquettes CC6050 utilisée.

II.2.6. Instruments de mesure utilisés

Lors de nos expériences nous avons utilisé plusieurs instruments de mesure. Un dynamomètre KISTLER 9257B pour la mesure des efforts de coupe, un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface, un rugosimètre 3D pour voir la topographie de la surface et un microscope optique pour la mesure de l'usure.

II.2.6.1. 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 d'une plaque de fixation. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (**Figure II.10**).

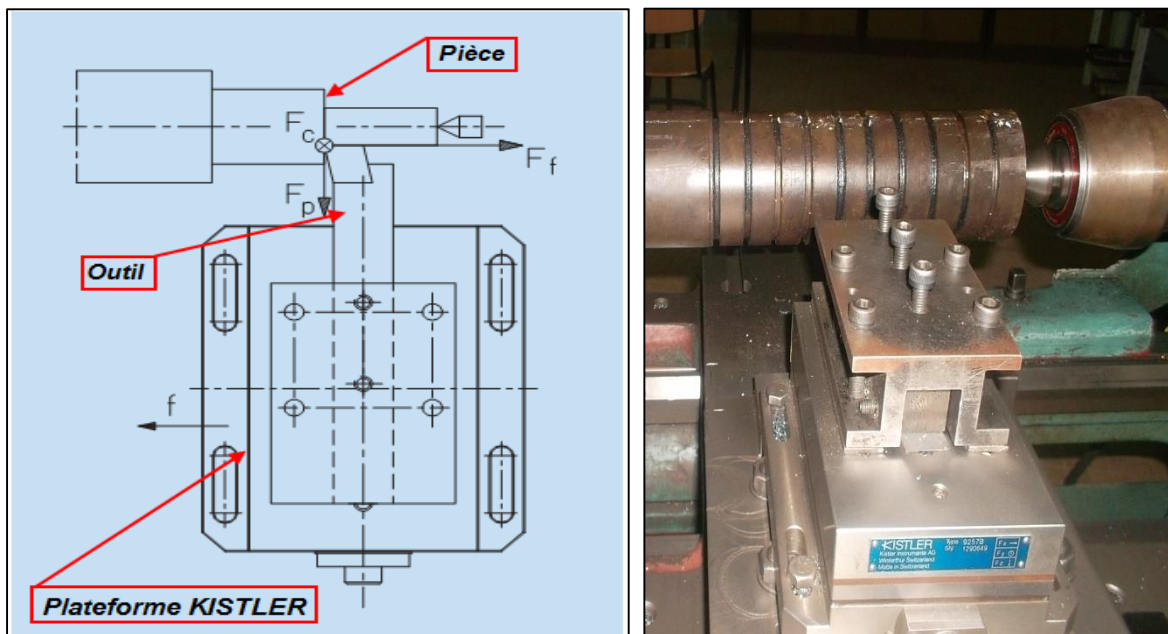


Figure II.10 : Plateforme d'effort de coupe **KISTLER**.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux. Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (**DYNOWARE**) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes. La **Figure II.11**

présente un exemple d'acquisition du logiciel qui montre les profils des trois composants de l'effort de coupe (Force axiale : F_x , Force radiale : F_y et Force tangentielle : F_z).

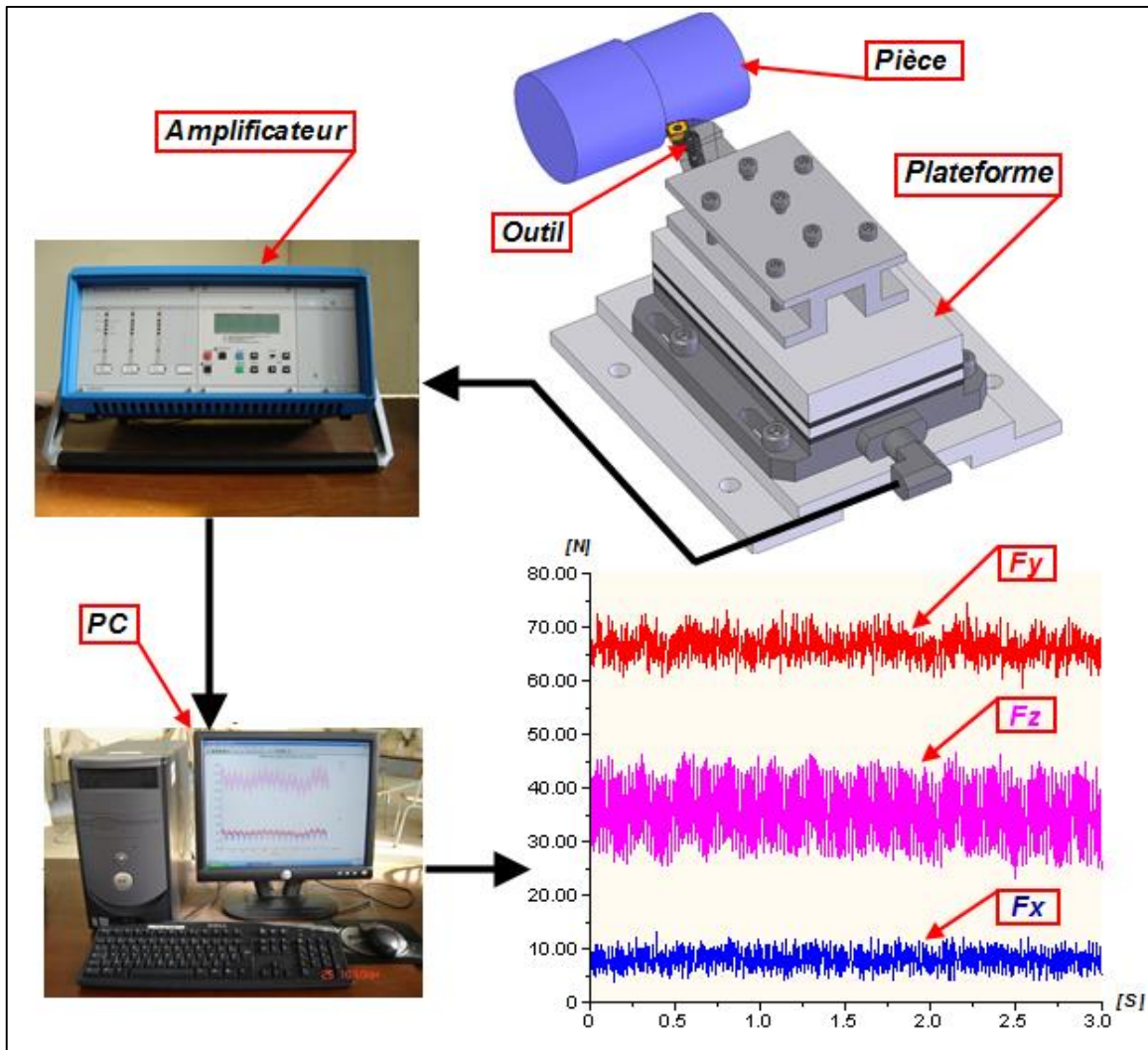


Figure II.11 : Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.2.6.2. Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

➤ Rugosimètre 2D

Nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo) pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t et R_z). Il 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 pièce et sans la démonter du tour. Les mesures sont répétées à trois reprises sur la surface de la pièce usinée à trois lignes de référence également positionnés à 120° et le résultat final est une moyenne de ces valeurs (Figure II.12).

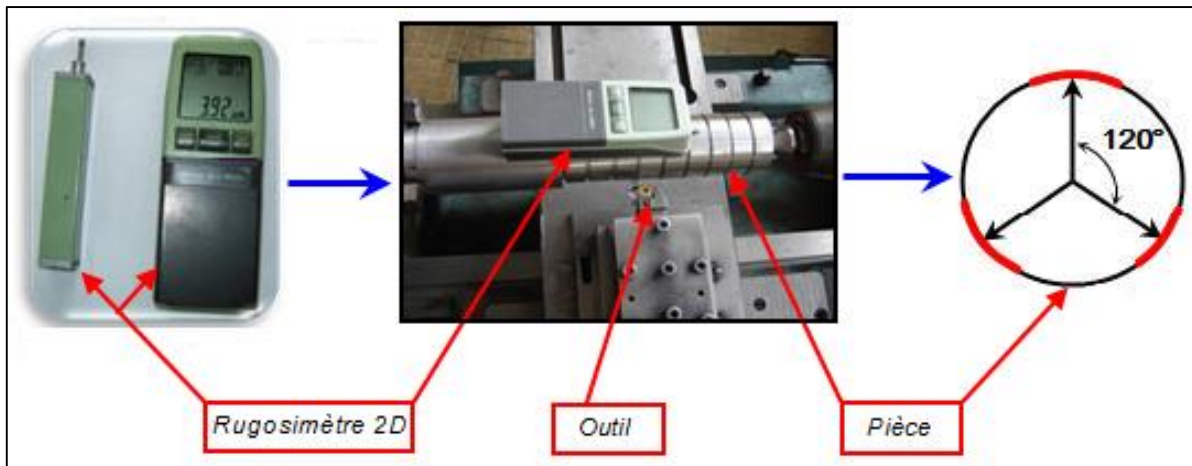


Figure II.12 : *Rugosimètre 2D (Surftest 201, Mitutoyo).*

➤ Rugosimètre 3D

Pour mieux visionné la surface usinée nous avons utilisé un appareil de métrologie optique *AltiSurf®500*, qui permet d'étudier finement la topographie de surface des échantillons d'essai (**Figure II.13**). Il représente un outil performant dans l'établissement de relations entre les états de surface, micro dimensions, revêtement Et la fonctionnalisation ou les qualités attendues d'un produit.

✓ Caractéristiques et descriptif du matériel

- Plateforme de métrologie modulaire 100 x 100 x 100 mm
- Deux sondes confocales chromatiques.
- Gamme de mesure : 1,1 mm et 300 μm
- Précision de déplacement de la plateforme $\sim 0,7 \mu\text{m} / 100 \text{ mm}$
- Spécification type : 2nm/mm, sigma/step inf. 3nm
- Vitesse de déplacement et pas de mesure réglables
- Camera CCD haute définition pour définir les zones de mesure
- Poids maximal des échantillons : 10 kg

✓ De différents accessoires :

- Quatre poignées de transport amovibles. Fixées sur le marbre, elles facilitent le déplacement de la platine. Un jeu de quatre amortisseurs antivibratoires. Un jeu de cale-étalon (plan de verre, cale de rugosité, cale de step).

✓ Prestations proposées

- Profils 2D ou topographie 3D
- Rugosités de surface Ra, Rz, Rv, Rp

- Porosités
- Etude de corrosion
- Comptage d'éclat suite à grenailage
- Mesure de planéité
- Saut de marche
- Mesure de profondeur de gravage
- Mesure d'épaisseur sur revêtement non opaque.

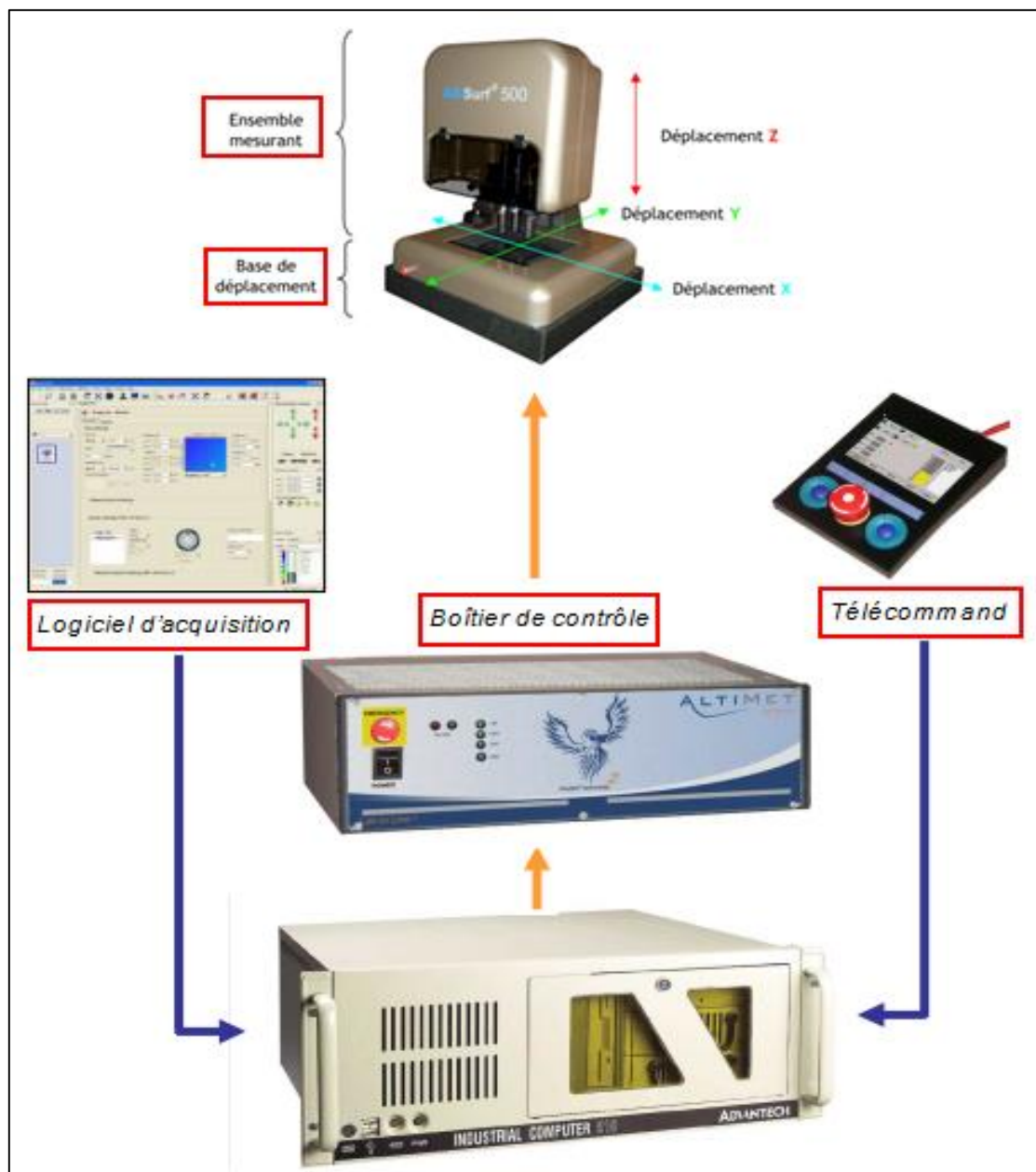


Figure II.13 : Rugosimètre 3D (AltiSurf® 500).

II.3. les plans d'expériences

Dans le but d'optimiser le nombre des essais, et par suite le temps et le coût de réalisation des essais, nous avons utilisé une approche statistique pratique et informatisée dite « plans d'expériences ». L'utilisation de cet outil demande une connaissance préalable de son principe et de son mode de fonctionnement. Pour cela et avant d'entamer la procédure expérimentale, nous rappelons ci-après la définition des plans d'expériences, leurs domaines d'utilisation ainsi que leur démarche.

II.3.1. Définition

Un plan d'expérience est une approche statistique permettant de maîtriser un problème à plusieurs paramètres tout en suivant un programme préconçu des différentes expériences qu'on se doit effectuer. Il a pour but de minimiser le nombre d'essais pour obtenir des résultats fiables qui reflètent la variation réelle du phénomène étudié en fonction de ses diverses caractéristiques. Le diagramme ci-dessous (**Figure II.14**) résume de manière plus simple cette définition :

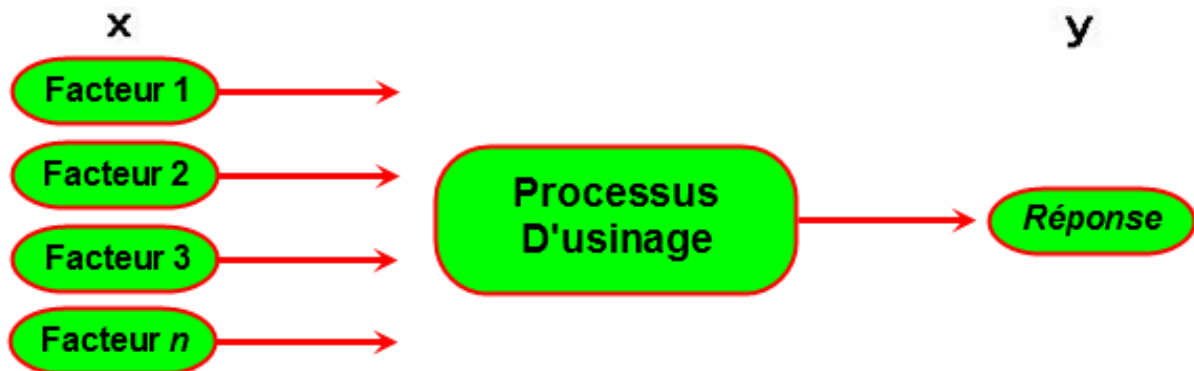


Figure II.14 : Le diagramme d'une approche statistique.

L'Output (aussi appelée Réponse, ou Y) d'un processus est dépendant d'un ou plusieurs facteurs (les variables X), d'où la relation :

$$Y = f(X) \quad (\text{II.1})$$

II.3.2. Terminologie

Avant d'entamer l'élaboration du plan d'expérience, la connaissance d'une certaine terminologie qui lui est associée revêt une importance primordiale [61].

- ✓ **Facteurs** : Un facteur est un paramètre que l'on peut varier d'une expérience à une autre, et qui influence le résultat final (réponse). Le nombre de facteurs entrant en jeu est, couramment, supérieur à celui des réponses. Deux types de facteurs sont distingués :
 - **Facteur quantitatif** : tout facteur mesurable, lorsqu'ils sont naturellement exprimés à l'aide de valeurs numériques (pression, température, durée, etc...)

- **Facteur qualitatif** : tout facteur non mesurable tel que (couleur, type de matériau, sexe, etc...).
- ✓ **Niveau des facteurs** : C'est la délimitation du domaine de variation d'un facteur donné. En général, la variation de chaque facteur est délimitée par deux niveaux : supérieur et inférieur. (Figure II.15)

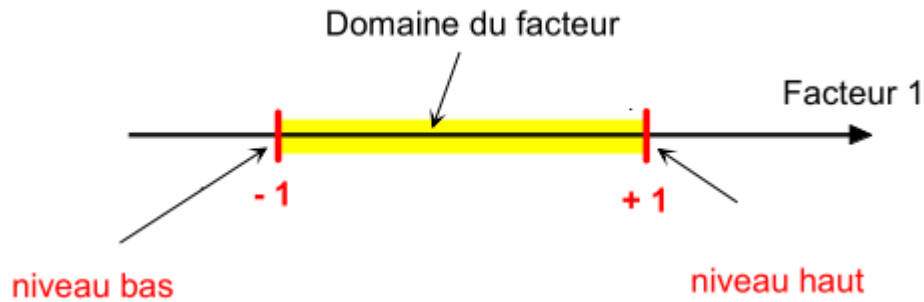


Figure II.15 : *Domaine de variation du « facteur », constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.*

- ✓ **Domaine expérimental** : (Figure II.16) Le domaine expérimental est schématisé par un polyèdre à k dimensions, où k est le nombre de facteurs considérés. Chaque côté de ce polyèdre, est défini par les deux niveaux extrêmes caractérisant le facteur correspondant à ce côté.

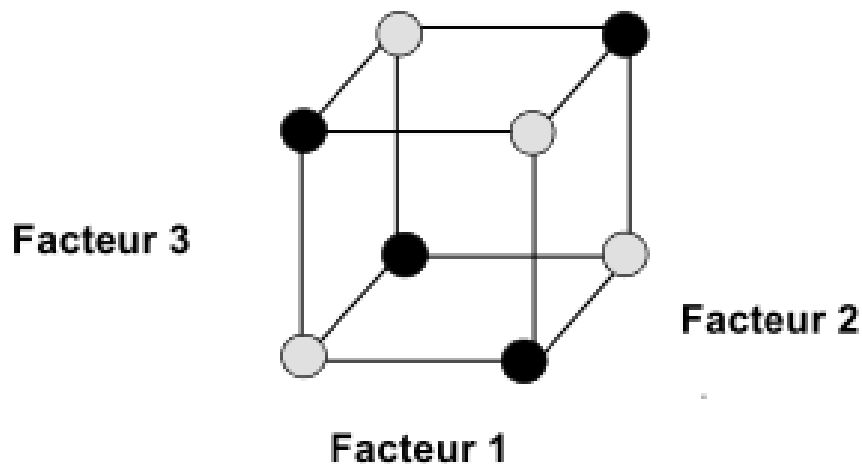


Figure II.16 : *Définition du domaine expérimental.*

- ✓ **Réponses** : (Figure II.17) Les réponses sont les propriétés à mesurer pour la variation d'un facteur.

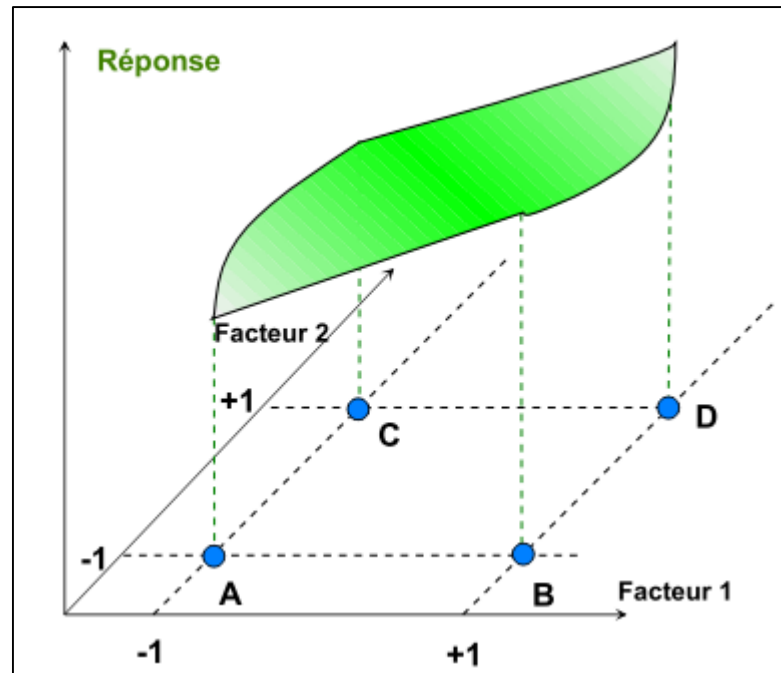


Figure II.17 : Définition de la surface de réponse.

- ✓ **Effet** : L'effet d'un facteur X sur une réponse Y est obtenu en étudiant les variations des valeurs de Y en fonction de celles de X . Si le facteur X a une interaction avec lui-même, on parle d'un effet quadratique. Un effet peut être positif, nul ou négatif. Il est exprimé par le coefficient multiplicatif de X dans un modèle mathématique de la réponse. La signification de l'effet de X sur Y est donnée par des tests statistiques.
- ✓ **Interaction** : On dit qu'il y a interaction entre deux facteurs X et X' si l'effet de X dépend du niveau de X' et inversement. Cette interaction est notée interaction XX' ou interaction $X'X$.

II.3.3. Méthodologie des plans d'expériences

Pour l'élaboration d'un plan d'expériences, on passe généralement par les trois étapes suivantes :

- ✓ **La recherche des facteurs influents** : Cette étape consiste à répondre à un ensemble de questions concernant l'influence des facteurs considérés sur le phénomène étudié : parmi tous les facteurs susceptibles d'influer sur la réponse, lesquels ont une influence significative ? Que vaut cette influence ? et y a-t-il des interactions entre ces facteurs ?

Une fois les facteurs influents sont bien déterminés et leurs influences est quantifiées, on passe au second stade :

- ✓ **La modélisation** : Dans cette phase, on cherche quelle est la forme de l'influence définie dans la première étape : linéaire, courbe... et quelle est l'équation mathématique régissant, avec une précision donnée, la variation du phénomène en fonction des

facteurs influents. La modélisation d'une réponse se fait en choisissant des points expérimentaux dont le nombre est au moins égal à la somme des effets, des interactions et des effets quadratiques. Ainsi on définit une matrice de n lignes et k colonnes, où n est le nombre d'expériences et k est le nombre des effets.

- ✓ **L'optimisation** : Après la détermination de la forme graphique et analytique de notre réponse, il est primordial d'aller chercher les conditions expérimentales donnant le meilleur résultat. Cette étape nécessite préalablement une connaissance assez profonde du phénomène étudié.

II.3.4. plan d'expérience existant

En raison du grand nombre de facteurs pouvant influencer la performance de l'usinage, il serait préférable de développer des stratégies optimales en se servant des méthodes de plan d'expériences. Les plans d'expériences permettent dans certains cas de déterminer les effets des paramètres et des éventuelles interactions, et de modéliser la réponse à partir des équations de prédiction. La réponse est ensuite optimisée et validée, parmi les plans existant :

- **Plan factoriel complet**
- **Plan fractionnelle**
- **Plan de taguchi**
- **Plan box**
- **Plan composite centré...**

II.3.5. Choix du type de plan et des conditions de coupe

Dans notre cas, nous avons choisi le plan de Taguchi L_{25} , son intérêt dans le cadre de notre étude est de pouvoir :

- ✓ dans un premier temps évoluer, vers un plan factoriel de 25 essais permet de caractériser les influences des paramètres par un modèle quadratique et de trouver les conditions de coupe optimales en utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) et les réseaux de neurones (RNA).

❖ Les tables de Taguchi

La méthode de Taguchi vient pour enrichir les méthodes de plans d'expériences en apportant une amélioration considérable aux plans factoriels complets et fractionnaires [62]. Elle a pour but de simplifier le protocole expérimental afin de mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. Elle permet d'obtenir des résultats en utilisant moins essais expérimentaux que les autres méthodes. Taguchi a montré que si ces essais expérimentaux sont choisis de manière appropriée, il n'est pas nécessaire de réaliser des expériences factorielles complètes. La base de la méthode de Taguchi est les tableaux orthogonaux, qui montrent que

les niveaux de facteur doivent être choisis chaque fois pour faire le moins de passages possibles. L'idée principale est de se concentrer uniquement sur les quelques expériences qui sont essentielles pour l'analyse. Les résultats obtenus ne peuvent pas être optimale, mais lorsque ces résultats sont mis en œuvre, le procédé est amélioré. Par conséquent, moins d'argent et de temps sont dépensés lorsque la méthode de Taguchi est employée.

Comme tout plan d'expérience, le plan adopté implique le choix des **paramètres d'entrée** et l'identification des **variables de sortie**. Les paramètres d'entrée sont ceux qui changent suivant les essais. Leur nombre définit le nombre total d'essais du plan d'expériences. Les variables de sortie constituent l'ensemble des réponses.

Dans cette étude, la table orthogonale standard L_{25} de Taguchi [63] sont adoptée comme plan expérimentale (**Tableaux II.5 et II.6**). Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company) et à partir des essais préliminaires (**Chapitre III**).

Tableau II.5 : Niveaux de différents paramètres.

Niveaux	1	2	3	4	5
V_c (m/min)	80	120	170	240	340
f (mm/tr)	0.08	0.12	0.16	0.2	0.4
ap (mm)	0.1	0.2	0.3	0.24	0.5

Tableau II.6 : Matrice de planification pour un plan de Taguchi 25 essais.

N° d'essai	Conditions de coupe		
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	80	0.08	0.1
2	80	0.12	0.2
3	80	0.16	0.3
4	80	0.2	0.4
5	80	0.24	0.5
6	120	0.08	0.2
7	120	0.12	0.3
8	120	0.16	0.4
9	120	0.2	0.5

10	120	0.24	0.1
11	170	0.08	0.3
12	170	0.12	0.4
13	170	0.16	0.5
14	170	0.2	0.1
15	170	0.24	0.2
16	240	0.08	0.4
17	240	0.12	0.5
18	240	0.16	0.1
19	240	0.2	0.2
20	240	0.24	0.3
21	340	0.08	0.5
22	340	0.12	0.1
23	340	0.16	0.2
24	340	0.2	0.3
25	340	0.24	0.4

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe, la composition chimique du matériau usiné, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre III qui suit, nous présenterons une étude sur l'usinabilité de l'acier inoxydable martensitique traité usiné par une céramique revêtue en termes de rugosité de surface, efforts de coupe, puissance de coupe et enfin volume de copeau enlevé.

CHAPITRE III

MODÉLISATION ET OPTIMISATION DES PARAMÈTRES TECHNOLOGIQUE EN UTILISANT L'APPROCHE MSR

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des critères de rugosité de surface (R_a , R_z , R_t), les composantes efforts de coupe (F_x , F_y , F_z), la puissance de coupe (P_c) et le volume de copeau enlevé (MRR) lors de l'usinage de l'acier AISI 420 traité en utilisant un outil de coupe en céramique revêtu (CC6050), suivant un plan d'expérience de Taguchi du type L_{25} . Les modèles sont déterminés en appliquant la Méthodologie de surface de réponse (MSR) pour mettre en évidence la relation entre les paramètres de coupe à savoir (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe) et les réponses étudiées (R_a , R_z , R_t , F_x , F_y , F_z , P_c et MRR). Dans ce chapitre nous allons présenter aussi deux optimisations mono et multi-objective l'approche de Taguchi et la fonction de désirabilité, des paramètres technologiques (R_a , F_z , P_c et MRR).

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse MSR et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f , et ap) et leurs interactions sur les paramètres technologiques (Ra , Rz , Rt , F_x , F_y et F_z). Pour cela nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé «Design-Expert» pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse. Le traitement statistique des résultats a permis de proposer des modèles mathématiques des paramètres de sortie. Ces modèles sont exploités dans le but de faire deux méthodes optimisations mono et multi-objective des conditions de coupe en se basant sur l'approche de Taguchi et de la fonction de désirabilité (DF). Aussi une attention particulière sur la topographie de surface 3 D en fonction des conditions de coupe est réalisée.

III.2 Méthodologie des surfaces de réponse

III.2.1 Principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (MSR) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants [64].

L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs. Dans le présent travail nous avons choisi la méthodologie de surfaces de réponse (MSR) car elle est largement utilisée en mécanique et particulièrement dans le domaine de la coupe des matériaux. Cette technique est une approche de modélisation empirique dictée par la détermination d'une relation entre les paramètres d'entrées et de sorties impliquées dans une expérience ou n'importe quel processus. L'objectif est d'explorer et de quantifier l'effet de des variables d'entrées sur les réponses et par conséquent d'optimiser ces réponses. Cette méthode présente l'avantage aussi d'être facile à appliquer, même lorsque l'information disponible sur les processus en cours est minime et les modèles trouvés sont faciles à évaluer, même dans le cas des problèmes non linéaires tout en conservant un bon niveau de prédiction des réponses. [65]

III.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

La **Figure. III.1** schématise l'enchaînement des étapes de la méthodologie de surface de réponses. Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative. Dans une première étape, on construit un plan

d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présumé s'avère inadéquat.

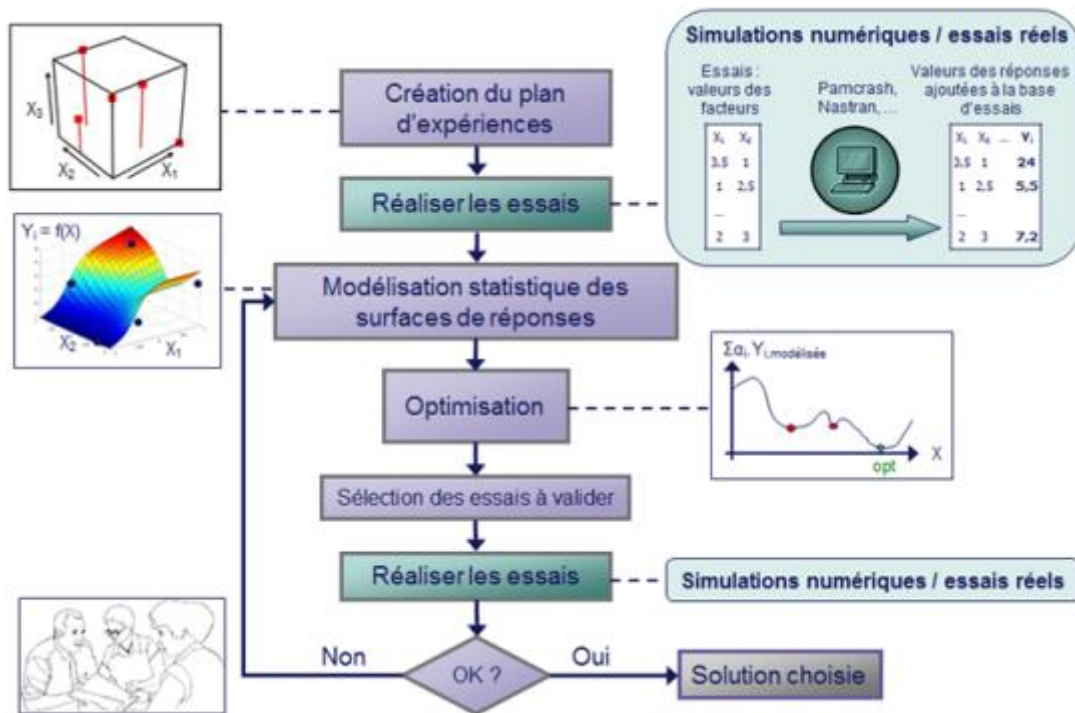


Figure III.1 : Etapes de la méthodologie de surface de réponse [66].

III.2.3.1 Planification expérimentale

Pour une bonne planification expérimentale, il est souhaitable que le nombre d'expériences effectuées, soit le plus faible possible afin de réduire les besoins informatiques, le délai et les coûts d'expérimentation. Une bonne sélection des points pour l'expérimentation permettra de réduire la variance des coefficients de notre modèle mathématique, ce qui rendra les surfaces de réponses obtenues plus fiables. Pour ce faire, il faut déterminer le plan d'expérience le plus approprié afin d'obtenir les expériences les plus intéressantes pour notre type de problème. Les plans utilisés dans le cadre d'une étude de MSR sont des plans quadratiques tels que les plans centraux composites (Box-Wilson) ou les plans de Box-Behnken. Le plan central composite (CCD) est le plus souvent employé. Mais d'autres types de plan quadratique s'offrent à l'expérimentateur [67].

III.2.3.2 Modélisation

Lorsque l'on utilise la MSR, on cherche à relier une réponse continue y à k facteurs continus et contrôlés X_1, X_2, \dots, X_k à l'aide d'un modèle de régression linéaire qui peut s'écrire :

$$y = f_{\beta}(X_1, X_2, \dots, X_p) + \varepsilon \quad \text{(III.1)}$$

Bien que la forme précise de la fonction de réponse f_{β} soit inconnue, l'expérience montre que l'on peut en avoir une bonne approximation par un polynôme.

Dans le cas de deux facteurs, le modèle de régression linéaire est de la forme :

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon \quad \text{(III.2)}$$

Il s'agit d'un des modèles les plus simples qui correspond à un modèle du premier degré avec interaction. Lorsque ce modèle est insuffisant pour décrire avec efficacité la réalité expérimentale, il est courant d'utiliser un modèle du second degré incluant les effets quadratiques des facteurs qui, dans la plupart des cas, est suffisant pour modéliser correctement les phénomènes étudiés.

Un modèle de surface de réponses du second degré avec (d) variables peut s'écrire de la manière suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^d \beta_i x_i + \sum_{i=1}^d \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^d \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad \text{(III.3)}$$

Où: $i, j, d = 1, 2 \dots n$

x_i : variables de prédiction codées appelées facteurs

β : coefficient de régression

ε : erreur totale qui est la différence entre les valeurs observées et les valeurs estimées de la réponse

Dans la phase d'expérimentation de MSR, il convient de transformer les variables de conception réelles en variables codées, qui sont définies comme étant sans dimension avec une moyenne de zéro et le même écart-type. Le but de l'opération est de traiter tous les facteurs de la même manière et de façon plus aisée car, simplifiée. La règle de passage des variables courantes aux variables codées est :

$$x_i = \frac{2R_i - [R_{max} + R_{min}]}{[R_{max} - R_{min}]} \quad \text{(III.4)}$$

Où:

x_i : variables de prédiction centrée réduite (codée)

R_i : Variable courante (naturelle, réelle)

Les coefficients de régression, paramètres inconnus du modèle équation (III.3), sont estimés par la technique des moindres carrées et la qualité d'ajustement du modèle est évaluée à l'aide d'outils classiques de régression linéaire multiple.

Le modèle d'approximation peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = Xb \quad \text{(III.5)}$$

Où:

$\hat{y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]^T$: estimation du vecteur de réponse des n réponses observées

X : la matrice de terme de modèle évalué aux points de conception

b : est l'estimateur des moindres carrés du vecteur de régression β , dont la valeur est estimée en minimisant la somme des carrés de l'erreur SS_E définie par :

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad \text{(III.6)}$$

Une fois les modèles mathématiques obtenus, il est nécessaire de vérifier que ces modèles donnent une approximation adéquate du système réel à l'étude.

III.2.3.3 Validation des modèles

Une fois la modélisation effectuée, il faut valider les modèles obtenus. Pour cela, des mesures statistiques importantes sont à considérer :

- le coefficient de détermination statistique : R^2 ;
- le coefficient de détermination ajusté : R_{adj}^2 ;
- l'erreur rms : RMSE. Il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire.

Leurs définitions impliquent la partition de l'erreur totale :

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 \quad \text{(III.7)}$$

En une somme de l'erreur accidentelle et de l'erreur systématique.

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad \text{(III.8)}$$

Où:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad \text{est la moyenne des réponses.}$$

Quant au coefficient de détermination R^2 il permet d'estimer la variation de la réponse autour de la moyenne qui peut être représentée par le modèle. Il est compris entre 0 et 1 et un R^2 de 1 exprime une correspondance parfaite entre l'évaluation et la valeur réelle ($\hat{y}_i = y_i$). Par contre, un R^2 de 0 signifie que l'évaluation est incapable de prédire la valeur réelle.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad \text{(III.9)}$$

Le coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 est une mesure améliorée de R^2 . Contrairement à R^2 , R_{adj}^2 , n'augmente pas lorsque des paramètres redondants sont ajoutés à l'approximation de surface de réponse.

$$R_{adj}^2 = 1 - \left[\frac{n-1}{n-p} \right] (1 - R^2) \quad \text{(III.10)}$$

Quant à la RMSE, il s'agit d'une estimation de la déviation standard de l'erreur aléatoire et peut s'écrire :

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_E}{(n-p)}} \quad \text{(III.11)}$$

- 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 **(III.12)** [68].

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \quad \text{(III.12)}$$

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 [69]:

$$A = -N - S \quad \text{(III. 13)}$$

Où : N est la taille de l'échantillon.

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\log F(Y_i) + \log(1 - F(Y_{N+1-i}))] \quad \text{(III.14)}$$

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. [70]

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

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

III.3 Etude statistique et modélisation

III.3.1 Résultats des expériences

Le plan expérimental adopté dans cette étude est un réseau orthogonal (L_{25}) de Taguchi de 3 facteurs chacun d'eux varie 5 fois (5 niveaux). Il a été adopté pour réduire le nombre d'expériences et augmenter le nombre de niveaux. En conséquence, le coût et le temps expérimentaux seront réduits. Les valeurs des niveaux de paramètres de coupe sont illustrées dans le **tableau III.1**.

Le **tableau III.2** montrent les résultats expérimentaux des critères de rugosité de surface (Ra , Rz , Rt), les composantes de l'effort de coupe (Fx , Fy , Fz), la puissance de coupe (Pc) et le volume de copeau enlevé (MRR) qui sont obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe lors de l'usinage du l'acier inoxydable martensitique (AISI 420) en utilisant un outil de coupe en céramique revêtue. L'analyse statistique est faite dans l'objectif d'analyser les effets de la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) sur les réponses. Et cela, en choisissant un niveau de signification de 5% (l'intervalle de confiance de 95 %). Le traitement statistique des résultats de **tableau III. 2** ont été réalisés en trois phases. La première phase portait sur l'analyse de la variance et de l'effet des facteurs et des interactions. La

deuxième phase a permis d'obtenir des modèles mathématiques des paramètres étudiés (régression quadratique). Enfin, une optimisation des conditions de coupe qui permis de proposer un régime optimal grâce à la fonction de désirabilité.

Tableau III.1 : Niveaux de différents paramètres.

Niveaux	1	2	3	4	5
V_c (m/min)	80	120	170	240	340
f (mm/tr)	0.08	0.12	0.16	0.2	0.24
ap (mm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

Tableau III.2 : Résultats des rugosités de surface (Ra , Rz , Rt), les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z), la puissance de coupe (P_c) et le volume de copeau enlevé (MRR) en fonction des différentes combinaisons des conditions de coupe.

N° d'essai	Réponses							MRR (cm^3/min)
	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	P_c (W)	
01	0.47	2.68	3.05	17.52	70.56	40.18	53.57	0.64
02	0.76	3.94	4.25	52.38	133.24	108.46	144.61	1.92
03	1.14	5.75	6.05	88.2	200.82	173.94	231.92	3.84
04	3.07	12.33	12.65	169.53	343.14	283.52	378.03	6.4
05	2.96	11.78	12.52	269.78	599.21	441.59	588.79	9.6
06	0.65	3.36	3.76	75.84	203.55	106.62	213.24	1.92
07	0.49	3.06	3.41	139.31	286.27	172.68	345.36	4.32
08	0.7	4.39	5.22	163.57	352.31	269.76	539.52	7.68
09	1.07	6.73	7.14	201.42	465.16	377.18	754.36	12
10	3.67	15.46	16.75	83.47	199.79	121.15	242.3	2.88
11	0.42	2.1	2.49	72.48	143.14	101.87	288.63	4.08
12	0.63	3.05	3.13	126.19	200.97	186.38	528.08	8.16
13	1.03	4.82	5.2	174.41	282.03	267.14	756.9	13.6
14	1.98	10.46	10.75	36.16	136.58	84.72	240.04	3.4
15	2.97	12.79	13.12	64.24	201.57	170.59	483.34	8.16
16	0.5	3.01	3.24	108.95	191.73	128.24	512.96	7.68
17	0.99	5.01	5.93	144.48	234.86	216.03	864.12	14.4
18	1.99	11.21	11.59	45.93	125.18	63.99	255.96	3.84
19	2.8	13.07	13.54	146.29	242.04	147.94	591.76	9.6
20	2.64	11.12	11.56	228.12	296.3	266.72	1066.88	17.28
21	0.39	2.23	2.69	123.87	183.26	158	895.33	13.6
22	0.68	3.87	4.39	28.64	86.08	47.45	268.88	4.08
23	1.24	6.08	6.57	64.39	150.4	126.68	717.85	10.88
24	1.98	9.15	9.74	79.5	208.46	211.15	1196.52	20.4
25	2.76	12.75	13.35	124.82	303.19	290.53	1646.34	32.64

III.3.2 Modélisation et Analyse de la variance (ANOVA) pour les critères de Rugosité de surface en fonction des paramètres d'usinage

III.3.2.1 Analyse de la variance pour les rugosités (R_a , R_z , R_t)

Les **tableaux III.3 à III.5** montrent les résultats d'analyse de la variance, respectivement, pour R_a , R_t et R_z .

Les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour les critères de la rugosité en utilisant le (*Seq SS*) pour les tests. L'analyse est effectuée pour un niveau de signification $\alpha = 0.05$ (c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95%). Dans ce tableau sont mentionnés les valeurs des degrés de liberté (*DL*), la somme des carrés des écarts (*SS*), les carrés moyens (*MS*), la valeur de la probabilité (*p-value*) indiquant le niveau de signification des paramètres pour chaque source de variation. La valeur de (*p-value*) inférieur à 0.05 pour n'importe quel facteur à un impact significatif sur la réponse mesurées [71], la propriété statistique (*F*) et la contribution en pourcentage (*Cont%*) de chaque facteur et des différentes interactions. L'analyse a été effectuée en utilisant des données non codées. En outre, la dernière colonne des tableaux montrent la contribution en pourcent (*Cont%*) de chaque facteur et des différentes interactions, indiquant le degré d'influence sur les résultats. Plus le pourcentage de contribution (*Cont%*) est grand plus le facteur à un effet sur les paramètres étudiées.

Le **tableau III.3** résume les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité R_a . Le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface R_a est l'avance par tour (f) avec une contribution de (80,71 %), des résultats similaires ont été trouvé par [72, 73 et 74]. La vitesse de coupe (V_c) n'a pas d'effet significatif, ceci est en désaccord avec les résultats de [75]. La profondeur de passe (ap) et les interactions ($V_c \times f$ et $V_c \times ap$) restent insignifiantes.

Tableau III.3 : Analyse de la variance (ANOVA) pour le critère de la rugosité (R_a).

Sources	SS	DL	MS	F-Value	p-value	Cont.%	Remarque
Modèle	23.06	9	2.56	11.46	< 0.0001		Significatif
V_c	3.363×10^{-3}	1	3.363×10^{-3}	0.015	0.9040	0.02%	Non Significatif
f	18.07	1	18.07	80.84	< 0.0001	80.71%	Significatif
ap	0.67	1	0.67	2.99	0.1041	2.99%	Non Significatif
$V_c \times f$	0.087	1	0.087	0.39	0.5428	0.39%	Non Significatif
$V_c \times ap$	0.042	1	0.042	0.19	0.6708	0.19%	Non Significatif
$f \times ap$	0.010	1	0.010	0.046	0.8338	0.04%	Non Significatif
V_c^2	0.021	1	0.021	0.094	0.7639	0.09%	Non Significatif
f^2	0.099	1	0.099	0.44	0.5156	0.44%	Non Significatif
ap^2	0.037	1	0.037	0.17	0.6898	0.17%	Non Significatif
Erreur	3.35	15	0.22			14.96	
Totale	26.42	24				100%	

Dans le **tableau III.4**, on peut voir les résultats de l'analyse de la variance pour R_z . Il semble que l'avance par tour (f) affecte R_z , avec un pourcentage de contribution de 80.26%. La profondeur de passe (ap) influe aussi sur R_z avec un pourcentage de contribution 4.16%. La vitesse de coupe (V_c), les produits (V_c^2 , f^2) et les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times p$, et $f \times ap$) n'ont pas d'effet significatif.

Tableau III.4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_z .

Sources	SS	DL	MS	F-Value	p-value	Cont. %	Remarque
Modèle	392.01	9	43.56	13.80	< 0.0001		Significatif
V_c	2.27	1	2.27	0.72	0.4101	0.57%	Non Significatif
f	320.69	1	320.69	101.58	< 0.0001	80.26%	Significatif
ap	16.61	1	16.61	5.26	< 0.0367	4.16%	Significatif
$V_c \times f$	3.18	1	3.18	1.01	0.3316	0.80%	Non Significatif
$V_c \times ap$	3.29	1	3.29	1.04	0.3237	0.82%	Non Significatif
$f \times ap$	1.73	1	1.73	0.55	0.4707	0.43%	Non Significatif
V_c^2	3.52	1	3.52	1.12	0.3075	0.88%	Non Significatif
f^2	0.17	1	0.17	0.052	0.8222	0.04%	Non Significatif
ap^2	0.74	1	0.74	0.23	0.6350	0.19%	Non Significatif
Erreur	47.35	15	3.16			11.85%	
Totale	439.36	24				100%	

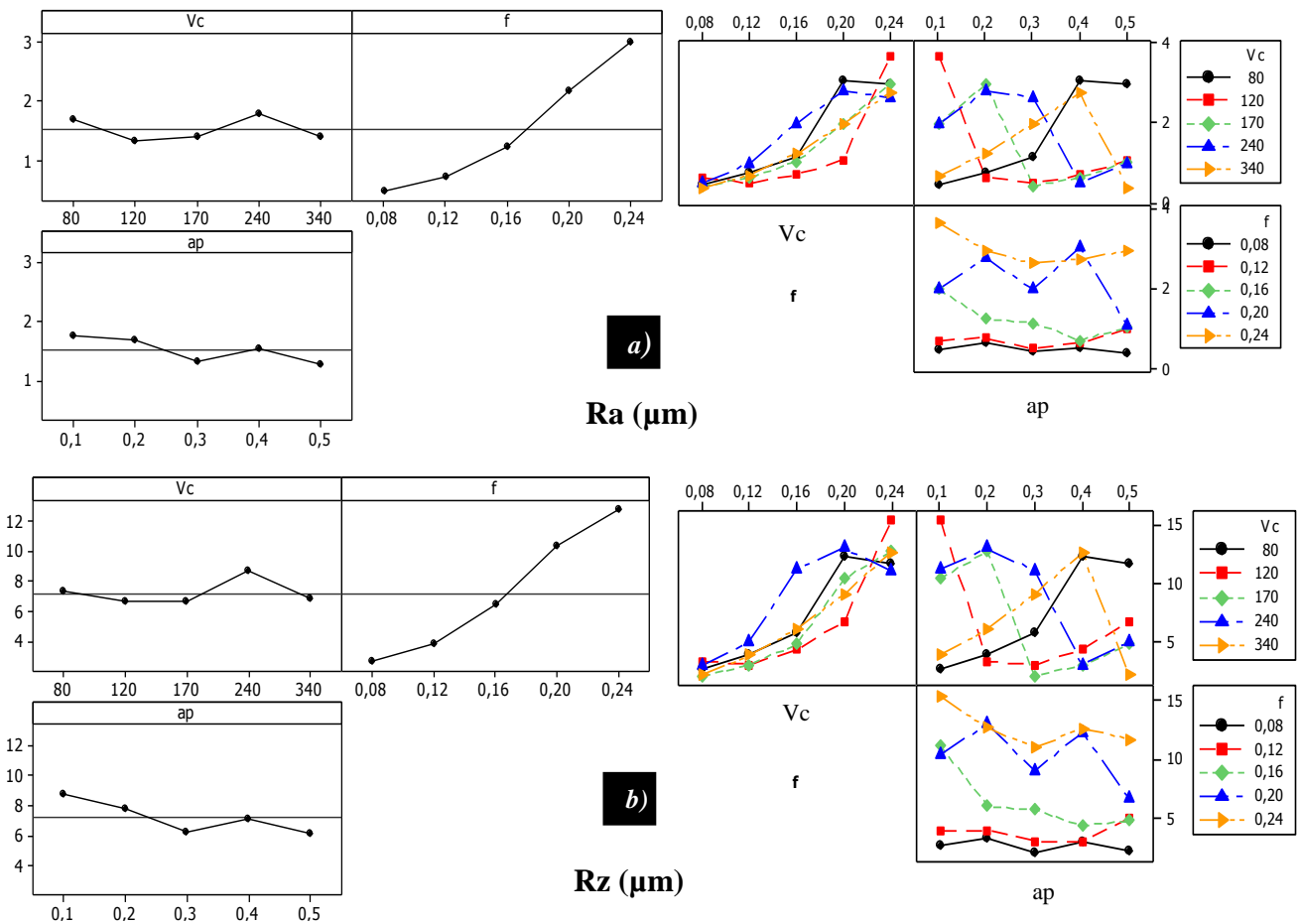
D'après le **tableau III.5**, on peut voir qu'apparemment la vitesse d'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte R_t . Sa contribution est 81.80%; suivi par la profondeur de passe (ap) avec un pourcentage de contribution de 3,92 % respectivement. Les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times ap$ et $f \times ap$) et les produits (ap^2 , V_c^2 , f^2), n'ont pas d'influence significative.

Tableau III.5 : Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_t .

Sources	SS	DL	MS	F-Value	p-value	Cont. %	Remarque
Modèle	409.57	9	45.51	13.59	< 0.0001		Significatif
V_c	1.46	1	1.46	0.44	0.5192	0.36%	Non Significatif
f	334.59	1	334.59	99.90	<0.0001	81.80%	Significatif
ap	16.05	1	16.05	4.79	<0.0448	3.92%	Significatif
$V_c \times f$	1.88	1	1.88	0.56	0.4648	0.46%	Non Significatif
$V_c \times ap$	2.02	1	2.02	0.60	0.4494	0.49%	Non Significatif
$f \times ap$	0.71	1	0.71	0.21	0.6526	0.17%	Non Significatif
V_c^2	1.97	1	1.97	0.59	0.4550	0.48%	Non Significatif
f^2	4.541×10^{-4}	1	4.541×10^{-4}	1.356×10^{-4}	0.9909	0.0001%	Non Significatif
ap^2	0.094	1	0.094	0.028	0.8690	0.02%	Non Significatif
Erreur	50.24	15	3.35			12.28%	
Totale	459.81	24				100%	

Avec l'augmentation de la vitesse d'avance (f), l'outil de coupe doit enlever plus de volume de matière usiné, ce qui augmente la quantité de chaleur générée. La déformation plastique de la pièce usinée est généralement proportionnelle à la quantité de chaleur produite et favorise la dégradation de la rugosité de surface [76, 77]. En raison de l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce à usiner, la profondeur de passe (ap) a un effet beaucoup plus faible par rapport à celui de la vitesse d'avance (f). Basé sur les résultats obtenus, l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur l'évolution de la rugosité de surface. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux des chercheurs [78, 79].

Les graphiques des effets principaux et des interactions sont présentés dans la Figure III.2 (a, b et c). A partir de cette figure, il apparaît clairement que l'avance par tour (f) affecte fortement les rugosités Ra , Rz et Rt la vitesse de coupe a un faible effet sur l'évolution des rugosités Ra , Rz et Rt . En outre, aucune variation significative n'a été observée sur les trois critères de rugosité en raison de la variation de la profondeur de passe (ap). Les interactions ($Vc \times ap$, $Vc \times f$ et $f \times ap$) n'ont pas d'effet significatif. Cela a été confirmé par les résultats de l'analyse statistique ANOVA.



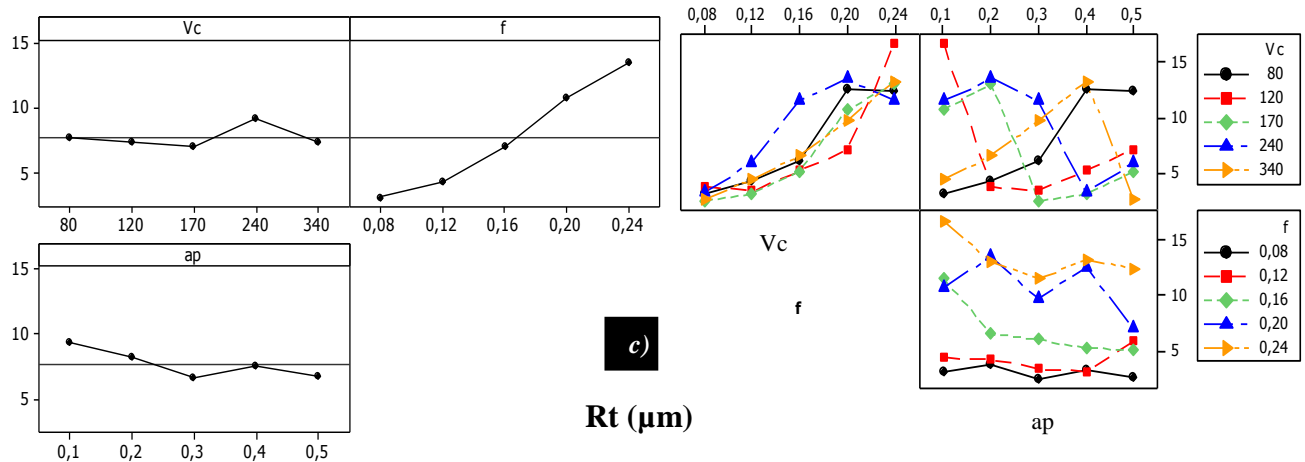


Figure III.2 : Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) R_a ; (b) R_z et (c) R_t .

III.3.2.2 Analyse de régression : R_a , R_z et R_t en fonction de V_c , f et a_p

La relation entre les entrées (*facteurs*) et les sorties (*critères de rugosité*) a été modélisées par des équations quadratique de régression. Les équations de régressions obtenues sont présentées ci-dessous :

Le modèle de la rugosité moyenne arithmétique (R_a) est donné par l'équation. (III.15). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 87.31\%$).

$$R_a = -0.458 + 7.187 \times 10^{-3} \times V_c + 6.507 \times f - 2.523 \times a_p - 0.040 \times V_c \times f + 0.011 \times V_c \times a_p + 10.325 \times f \times a_p - 9.023 \times 10^{-6} \times V_c^2 + 46.981 \times f^2 - 4.585 a_p^2 \quad \text{(III.15)}$$

Le modèle de la rugosité (R_z) est donné par l'équation. (III.16). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 89.22\%$).

$$R_z = -5.100 + 0.063 \times V_c + 98.499 \times f - 36.490 \times a_p - 0.247 \times V_c \times f + 0.1 \times V_c \times a_p + 134.48 \times f \times a_p - 1.171 \times 10^{-4} \times V_c^2 - 60.522 \times f^2 - 20.514 \times a_p^2 \quad \text{(III.16)}$$

Le modèle de la hauteur maximale du profil (R_t) est donné par l'équation. (III.17). avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 89,07\%$).

$$R_t = -3.103 + 0.047 \times V_c + 82.164 \times f - 31.977 \times a_p - 0.190 \times V_c \times f + 0.078 \times V_c \times a_p + 85.965 \times f \times a_p - 8.757 \times 10^{-5} \times V_c^2 + 3.173 \times f^2 - 7.314 \times a_p^2 \quad \text{(III.17)}$$

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe) sur les critères de rugosité R_a , R_t et R_z , les surfaces de réponse (3D) sont tracés dans la **Figure III.3 (a, b et c)**. Les résultats d'ANOVA montrent que l'avance par tour (f) est le facteur le plus influent sur l'évolution de la rugosité de surface. À partir du tracé des interactions (**Figure III.3**), on peut observer que, les rugosités de surface (R_a , R_z et R_t) augmentent rapidement avec l'augmentation de l'avance par tour. Cependant, la vitesse de coupe et la profondeur de passe ont une faible influence sur les trois critères de rugosité de la

surface. Il convient de noter que la rugosité de surface minimale est survenue pour la combinaison des trois valeurs faibles des paramètres (f , ap et Vc).

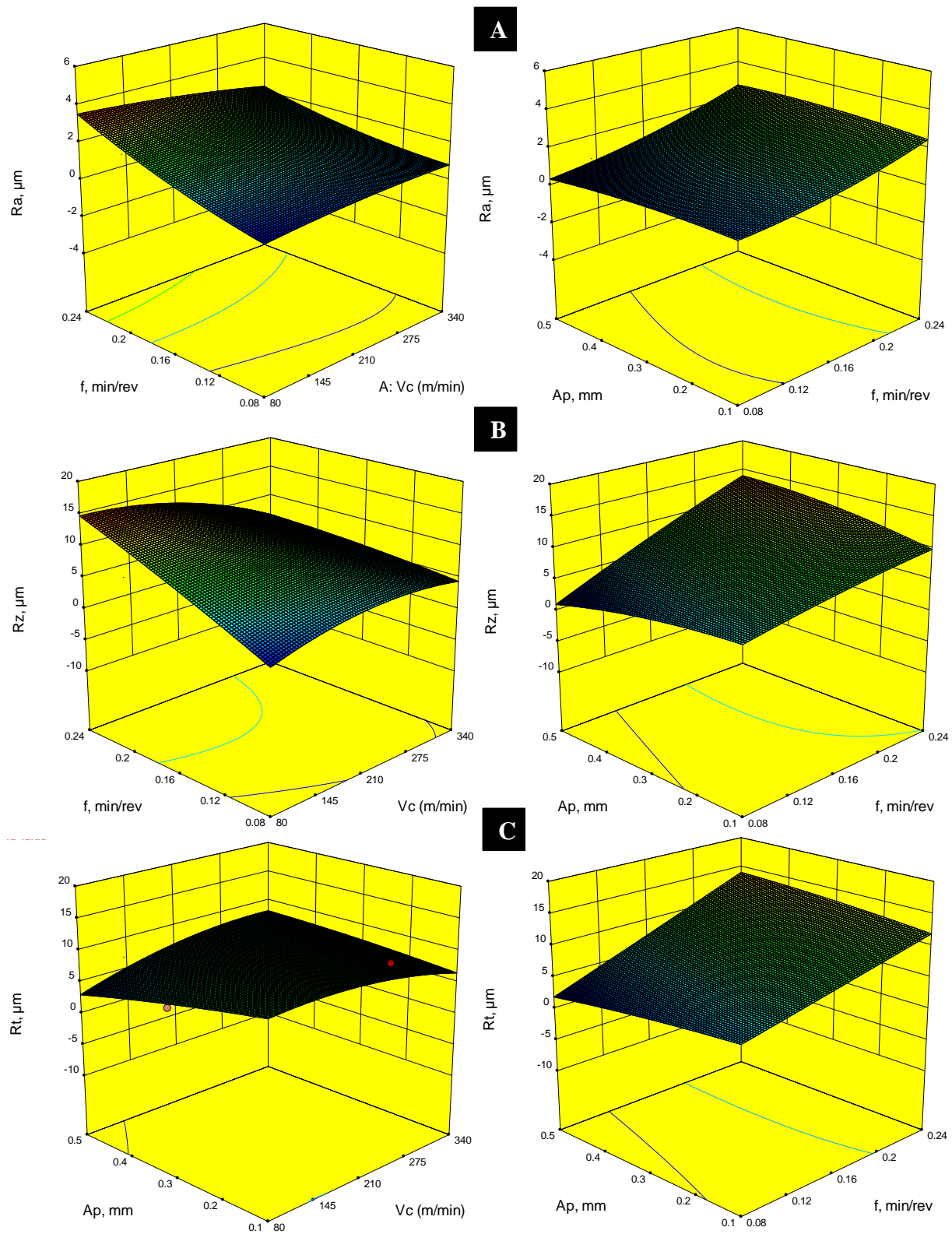
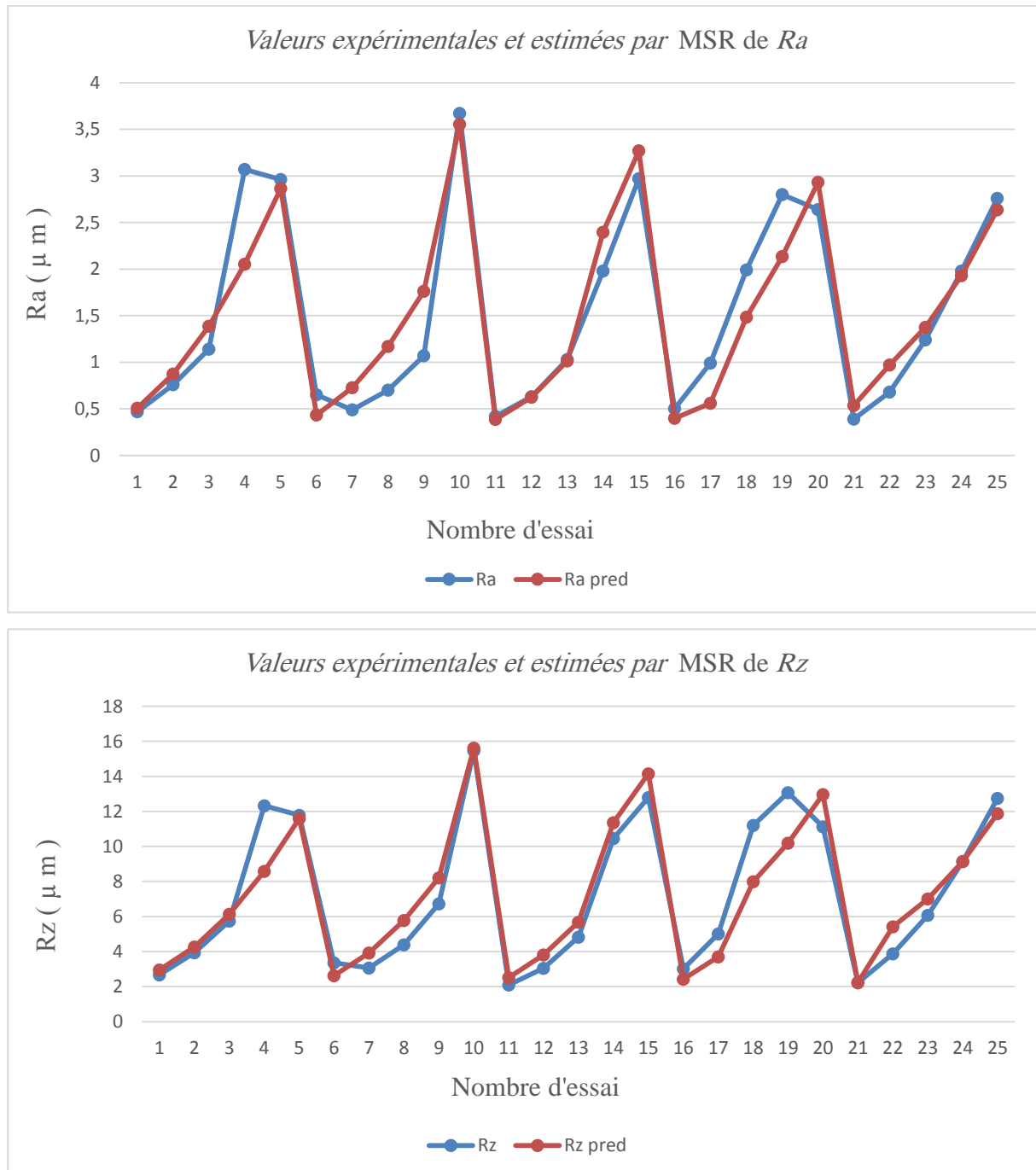


Figure III.3 : Effet des paramètres de régime de coupe sur la rugosité de surface : (a) Ra ; (b) Rz et (c) Rt .

III.3.2.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La Figure III.4 montre la comparaison entre les valeurs prédites et mesurées des critères de rugosité de surface Ra , Rz et Rt . Les valeurs prédites des critères de rugosité de surface sont plus proches de ceux enregistrés expérimentalement. Par conséquent, les modèles quadratiques obtenus par l'analyse de régression peuvent être utilisés pour prévoir les valeurs de rugosité de surface pour toute combinaison de la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (f), et la profondeur de coupe (a_p) dans la plage de l'expérimentation effectuée.



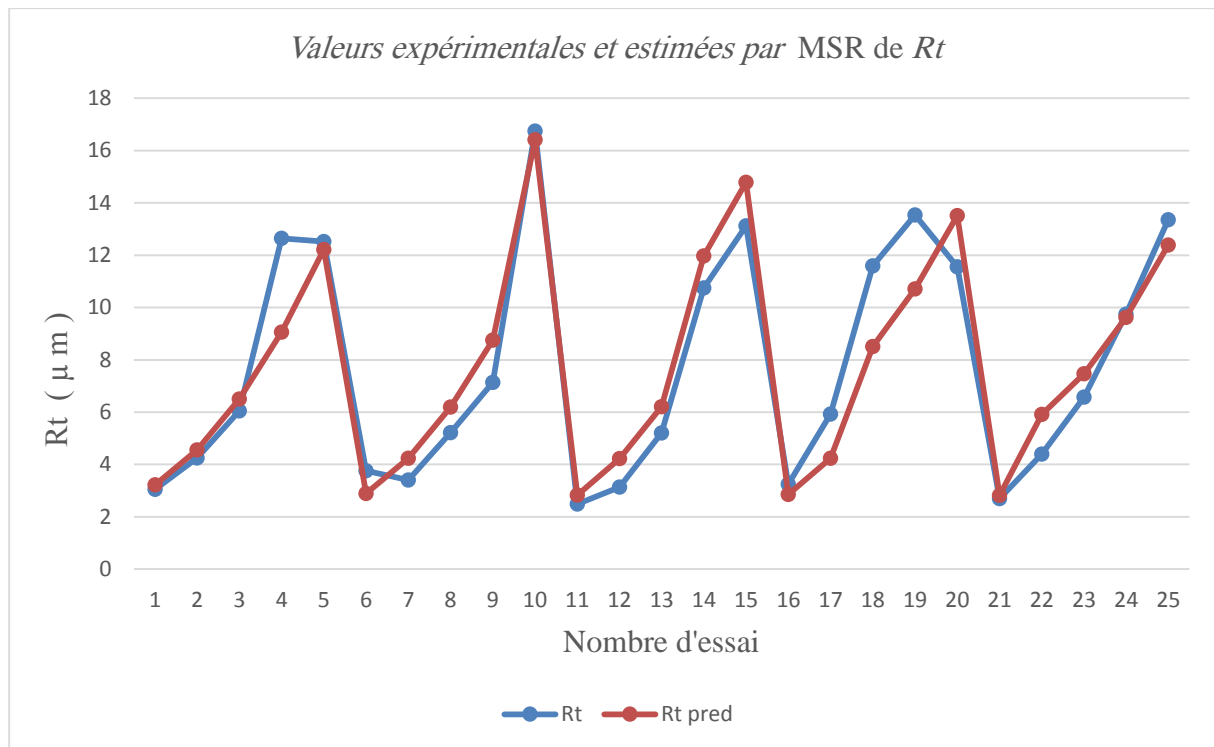
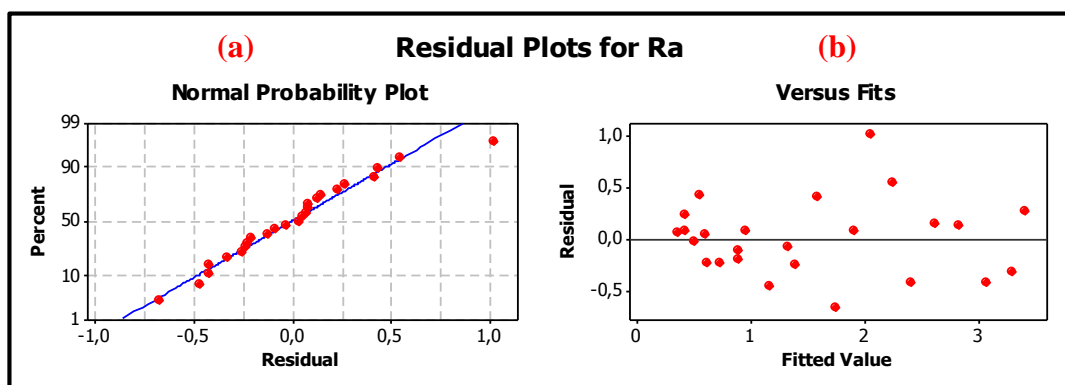


Figure III.4 : Comparaison entre les valeurs mesurée et estimée pour R_a , R_z et R_t .

Pour valider ces modèles, il est nécessaire d'étudier la distribution des résidus (différence entre les valeurs expérimentales de la rugosité (R_a , R_z , R_t) et celles obtenues à partir des modèles de prédiction). La distribution des résidus est déterminée par l'évaluation des équations (III.15, 16, 17) [80]. Les tests de la normalité (d'Anderson - Darl) de ces distributions doivent suivre la loi normale (**Figure. III.2 a**).

Les tracés des valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées sont illustrés dans la (**Figure.III.2b**). L'analyse montre que la structure comparative de distribution des points au-dessus et au-dessous de l'axe des abscisses (valeurs ajustées) montre que l'erreur est indépendamment distribuée et la variance est constante. Des résultats semblables ont été rapportés par **Douglas et al. [81]**.



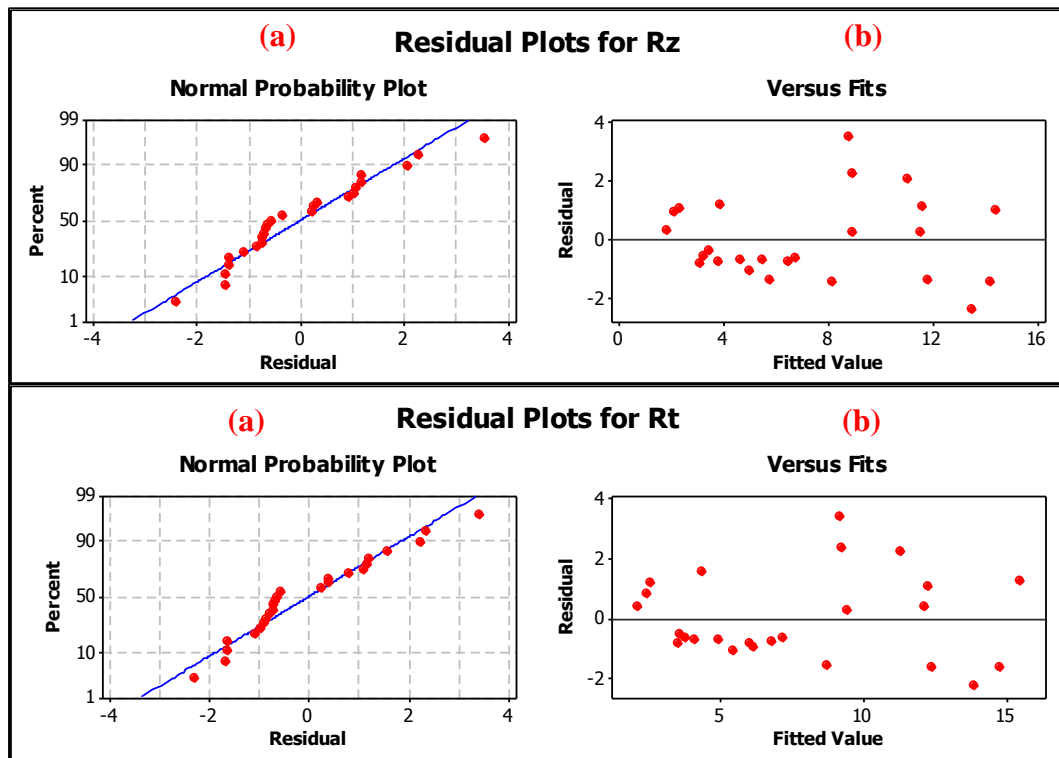


Figure III.5 : Graphique des valeurs résiduelle pour l’ajustement des modèles pour les critères de rugosités (R_a , R_z , R_t) :

- (a) test de normalité de la distribution des résidus ;
- (b) valeur résiduelle en fonction des valeurs ajustée.

III.3.3 Modélisation des efforts de coupe en fonction de V_c , f et ap

Le **tableau III.6** présente les résultats expérimentaux correspondants aux trois efforts de coupe F_x , F_y et F_z , lors de l’usinage de l’acier inoxydable martensitique AISI 420 traité par un outil de céramique revêtu (CC6050).

Tableau III.6 : Résultats expérimentaux des efforts de coupe.

Essais N° :	Facteurs			Réponses		
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)
1	80	0.08	0.1	17.52	70.56	40.18
2	80	0.12	0.2	52.38	133.24	108.46
3	80	0.16	0.3	88.2	200.82	173.94
4	80	0.20	0.4	169.53	343.14	283.52
5	80	0.24	0.5	269.78	599.21	441.59
6	120	0.08	0.2	75.84	203.55	106.62
7	120	0.12	0.3	139.31	286.27	172.68
8	120	0.16	0.4	163.57	352.31	269.76
9	120	0.20	0.5	201.42	465.16	377.18

10	120	0.24	0.1	83.47	199.79	121.15
11	170	0.08	0.3	72.48	143.14	101.87
12	170	0.12	0.4	126.19	200.97	186.38
13	170	0.16	0.5	174.41	282.03	267.14
14	170	0.20	0.1	36.16	136.58	84.72
15	170	0.24	0.2	64.24	201.57	170.59
16	240	0.08	0.4	108.95	191.73	128.24
17	240	0.12	0.5	144.48	234.86	216.03
18	240	0.16	0.1	45.93	125.18	63.99
19	240	0.20	0.2	146.29	242.04	147.94
20	240	0.24	0.3	228.12	296.3	266.72
21	340	0.08	0.5	123.87	183.26	158
22	340	0.12	0.1	28.64	86.08	47.45
23	340	0.16	0.2	64.39	150.4	126.68
24	340	0.20	0.3	79.5	208.46	211.15
25	340	0.24	0.4	124.82	303.19	290.53

III.3.3.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe F_x , F_y et F_z

Le **tableau III.7** expose les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour déterminer l'influence des différents facteurs sur l'effort axial (F_x). La profondeur de passe et le facteur qui influe énormément sur l'effort axial avec une contribution de (53.76%), suivie par l'avance par tour (13.45%), alors que la vitesse de coupe n'est pas influente sur l'effort axial (F_x). les produits (V_c^2 , f^2 , ap^2) et les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times ap$, $f \times ap$) n'ont pas un effet significatif.

Tableau III.7 : Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial F_x .

Sources	SS	DL	MS	F-Value	p-value	Cont. %	Remarque
Modèle	83923.94	9	9324.88	9.22	0.0001		Significatif
V_c	19.22	1	19.22	0.019	0.8922	0.02%	Non Significatif
f	10458.47	1	10458.47	10.34	<0.0058	13.45%	Significatif
ap	41821.90	1	41821.90	41.35	< 0.0001	53.76%	Significatif
$V_c \times f$	1995.00	1	1995.00	1.97	0.1806	2.56%	Non Significatif
$V_c \times ap$	565.98	1	565.98	0.56	0.4660	0.73%	Non Significatif
$f \times ap$	2358.46	1	2358.46	2.33	0.1476	3.03%	Non Significatif
V_c^2	3463.70	1	3463.70	3.42	0.0840	4.45%	Non Significatif
f^2	146.72	1	146.72	0.15	0.7086	0.19%	Non Significatif
ap^2	1784.40	1	1784.40	1.76	0.2040	2.29%	Non Significatif
Erreur	15172.87	15	1011.52			19.51%	
Totale	99096.82	24				100%	

Le **tableau III.8** présente les résultats d'analyse de la variance pour l'effort radial (F_y). L'analyse des résultats montre que la profondeur de coupe a une influence statistiquement significative avec une contribution de (50.79%). La contribution de l'avance par tour est de (27.27%), qui est jugé moins important, tandis que ceux de la vitesse de coupe et les produits (V_c^2 , f^2 , ap^2) et les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times ap$, $f \times ap$) sont insignifiants.

Tableau III.8 : Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial F_y .

Sources	SS	DL	MS	F-Value	p-value	Cont. %	Remarque
Modèle	2.986×10^5	9	33177.21	14.82	< 0.0001		Significatif
V_c	3874.61	1	3874.61	1.73	0.2080	1.85%	Non Significatif
f	56911.70	1	56911.70	25.43	< 0.0001	27.27%	Significatif
ap	1.060×10^5	1	1.060×10^5	47.36	< 0.0001	50.79%	Significatif
$V_c \times f$	2194.13	1	2194.13	0.98	0.3378	1.051%	Non Significatif
$V_c \times ap$	5.33	1	5.33	2.383×10^{-3}	0.9617	0.003%	Non Significatif
$f \times ap$	3905.22	1	3905.22	1.74	0.2063	1.87%	Non Significatif
V_c^2	1193.45	1	1193.45	0.53	0.4765	0.57%	Non Significatif
f^2	133.83	1	133.83	0.060	0.8101	0.06%	Non Significatif
ap^2	908.19	1	908.19	0.41	0.5337	0.43%	Non Significatif
Erreur	33573.22	15	2238.21			16.08%	
Totale	3.322×10^5	24				100%	

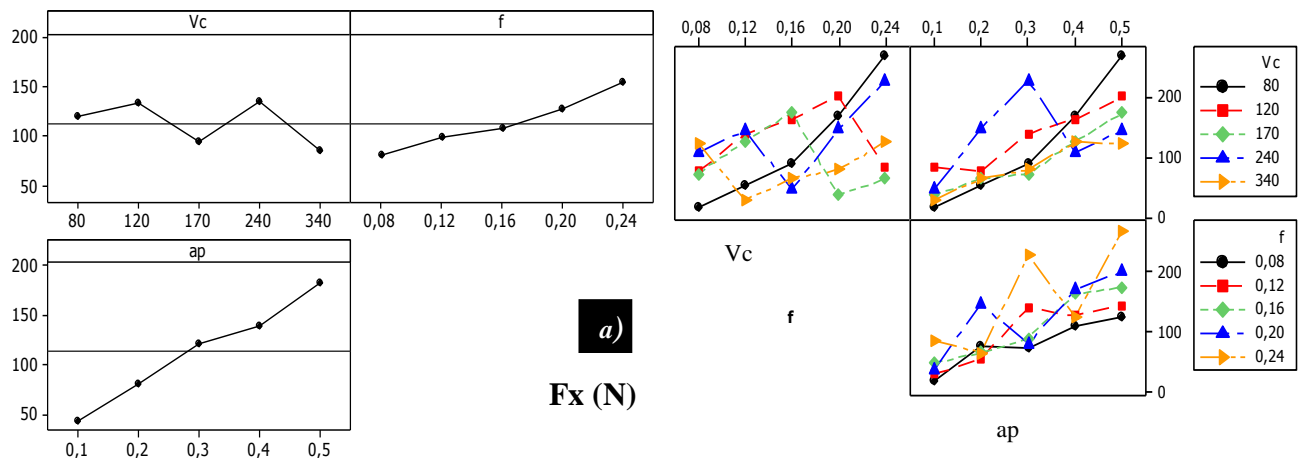
Lorsque l'on considère l'effort tangentiel (F_z), les résultats du (**tableau III.9**) indiquent que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel (F_z). Sa contribution est de (65.31%). Le second facteur qui a une influence sur l'effort tangentiel (F_z) est l'avance par tour (30.98%). D'autre part, les interactions ($f \times ap$, $V_c \times f$ et $V_c \times ap$) et les produits (V_c^2 , f^2 , ap^2) ne sont pas significatifs, leurs contributions sont (0,03 ; 0,01 ; 0,48 ; 0,004 ; 0,01 et 0,04) % respectivement.

Tableau III.9 : Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel F_z .

Sources	SS	DL	MS	F-Value	p-value	Cont. %	Remarque
Modèle	2.377×10^5	9	26412.82	82.72	< 0.0001		Significatif
V_c	1030.63	1	1030.63	3.23	0.0926	0.56%	Non Significatif
f	57497.29	1	57497.29	180.08	< 0.0001	30.98%	Significatif
ap	1.212×10^5	1	1.212×10^5	379.55	< 0.0001	65.31%	Significatif
$V_c \times f$	51.61	1	51.61	0.16	0.6933	0.03%	Non Significatif
$V_c \times ap$	24.22	1	24.22	0.076	0.7867	0.01%	Non Significatif
$f \times ap$	897.41	1	897.41	2.81	0.1144	0.48%	Non Significatif
V_c^2	0.69	1	0.69	2.148×10^{-3}	0.9636	0.004%	Non Significatif
f^2	25.04	1	25.04	0.078	0.7833	0.01%	Non Significatif
ap^2	70.69	1	70.69	0.22	0.6447	0.04%	Non Significatif
Erreur	4789.41	15	319.29			2.58%	
Totale	2.425×10^5	24				100%	

On observe que chaque hausse des composantes des efforts de coupe est le résultat de l'augmentation de la profondeur de passe (ap) et/ou l'avance par tour (f). Ceci est en bon accord avec les résultats trouvés par [82] lors du tournage de l'acier AISI H11. Quand on augmente l'avance par tour (f), la section du copeau cisailé augmente aussi, par conséquent, la force nécessaire pour l'enlèvement de matière augmente. En outre, l'augmentation de la profondeur de passe conduit à un copeau métallique très épais (c-à-d. plus grand volume de matière déformé) qui nécessite de plus grandes forces de coupe. Il est à noter que lors de l'augmentation de la profondeur de passe (ap), la coupe se fait à l'extérieur de la limite de rayon de bec de l'outil et la pièce exerce une résistance à la pénétration de l'outil dans les deux directions axiales et tangentielles. Cette situation implique que la longueur de contact entre l'outil et la pièce est devenue suffisamment élevée et l'outil ne coupe plus avec son rayon de bec comme il se doit.

Les graphiques des effets principaux et des interactions sont représentés dans la **Figure III.6 (a, b et c)**. On peut conclure que la profondeur de passe (ap) affecte fortement les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), suivie par l'avance par tour (f). Comme prévu, la profondeur de passe (ap) a un effet très important alors que la vitesse de coupe a un faible effet sur les composantes des efforts de coupe. D'autre part les interactions ($f \times ap$, $V_c \times f$ et $V_c \times ap$) n'ont pas d'effet significatif.



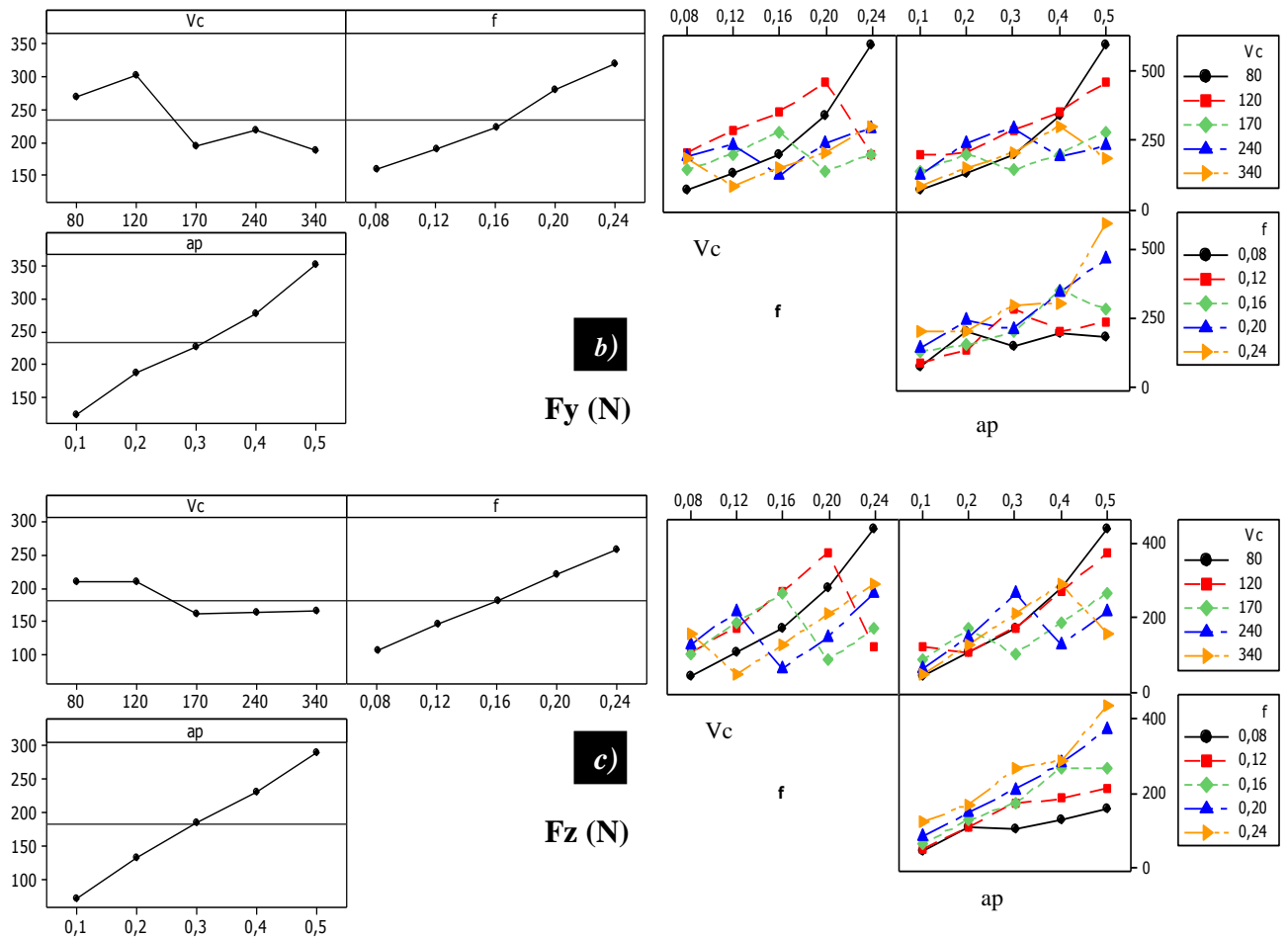


Figure III.6 : Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) F_x ; (b) F_y et (c) F_z .

III.3.3.2 Analyse de régression : F_x , F_y et F_z en fonction de V_c , f et ap

L'analyse de régression de F_x en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (III.18) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 84.69\%$).

$$F_x = -170.006 + 2.152 \times V_c + 774.596 \times f - 159.535 \times ap + 6.198 \times V_c \times f + 1.320 \times V_c \times ap + 4966.635 \times f \times ap - 3.672 \times 10^{-5} \times V_c^2 - 1804.196 \times f^2 - 1006.697 \times ap^2 \quad \text{(III.18)}$$

Le modèle de l'effort radial (F_y) est donnée par l'équation (III.19) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 89.89\%$).

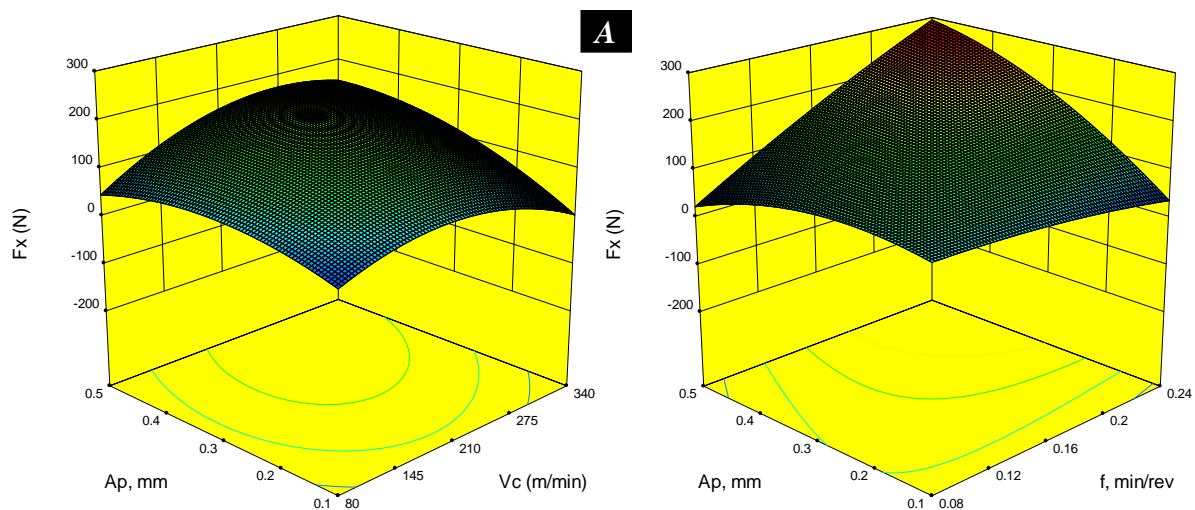
$$F_y = -9.666 + 1.700 \times V_c - 204.155 \times f - 127.512 \times ap - 6.500 \times V_c \times f + 0.128 \times V_c \times ap + 6391.029 \times f \times ap - 2.155 \times 10^{-3} \times V_c^2 + 1723.129 \times f^2 - 718.192 \times ap^2 \quad \text{(III.19)}$$

Le modèle de l'effort tangentielle (F_z) est donnée par l'équation (III.20) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98.03\%$).

$$F_z = -2.47 + 0.156 \times V_c - 44.174 \times f + 212.434 \times ap - 0.996 \times V_c \times f - 0.273 \times V_c \times ap + 3063.689 \times f \times ap$$

$$5.167 \times 10^{-5} \times Vc^2 + 745.392 \times f^2 - 200.374 \times ap^2 \quad (\text{III.20})$$

Les surfaces de réponses 3D (**Figure III.7 a, b et c**) montre la variation des efforts de coupe avec la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap). Comme observé sur la figure, la vitesse de coupe a un effet négligeable sur les trois composantes de l'effort de coupe, des résultats similaires ont été rapportés par [83] lors de l'usinage de l'acier AISI 4340, avec un outil en carbure revêtu. Alors que, pour une avance (f) donnée, les composantes de la force de coupe augmentent fortement avec l'augmentation de la profondeur de passe. Pour des avances faibles, les composantes de la force de coupe sont très sensibles à la profondeur de passe et pour toute augmentation de cette dernière, (ap) augmente brusquement les composantes de la force de coupe. En conséquence, il est clair que la profondeur de passe est le facteur le plus influent sur les composantes des efforts de coupe. En d'autres termes, la force de coupe peut être minimisée en utilisant des valeurs plus faibles de l'avance (f), la profondeur de passe et la vitesse de coupe, tandis que les valeurs les plus élevées se trouvent à la vitesse d'avance et la profondeur de passe maximale.



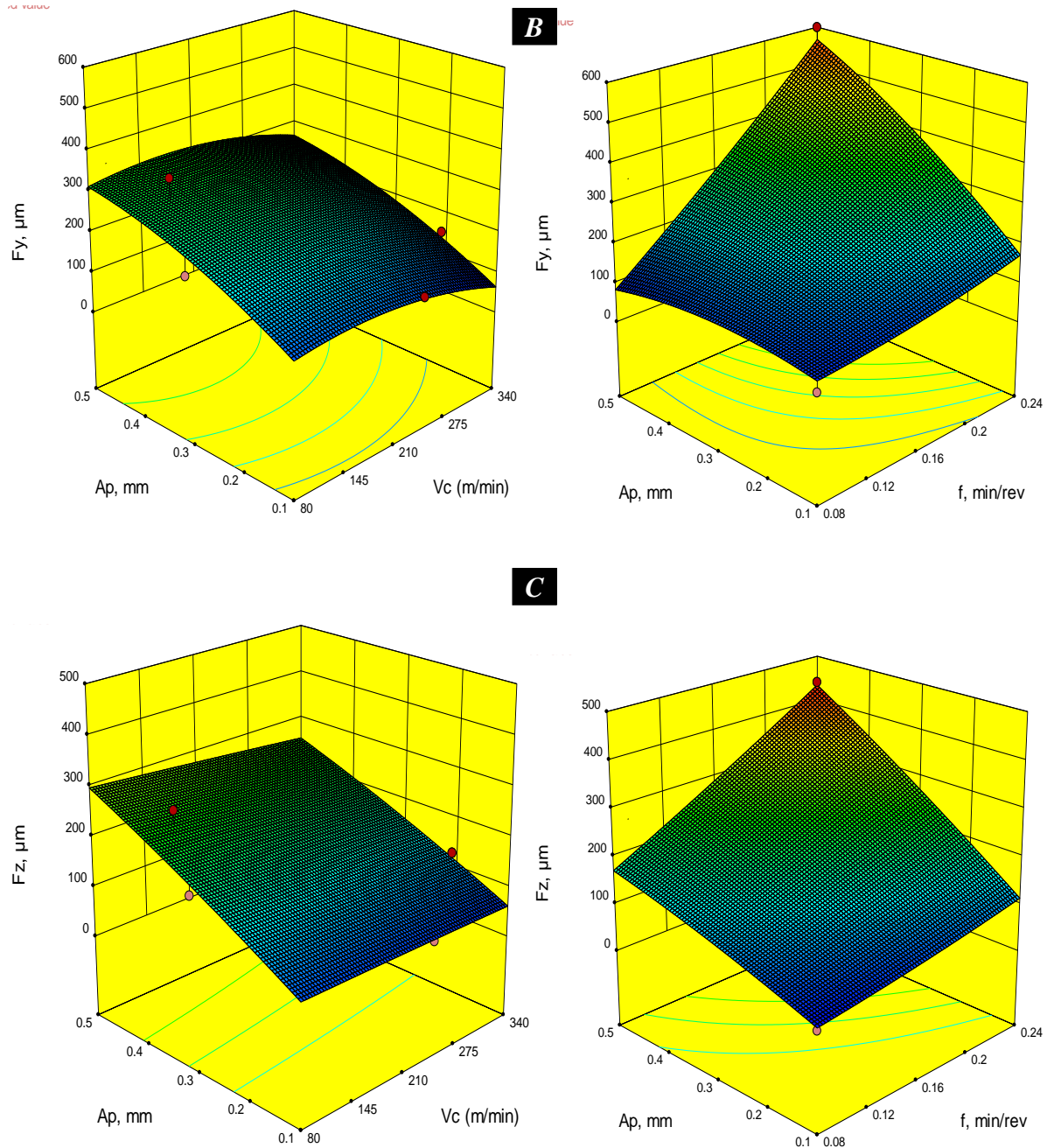


Figure III.7 : Effet des paramètres de régime de coupe sur les efforts de coupe : (a) F_x ; (b) F_y et (c) F_z .

III.3.3.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z) et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par l'analyse de régression est présentée graphiquement sur la **Figures III.8**. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

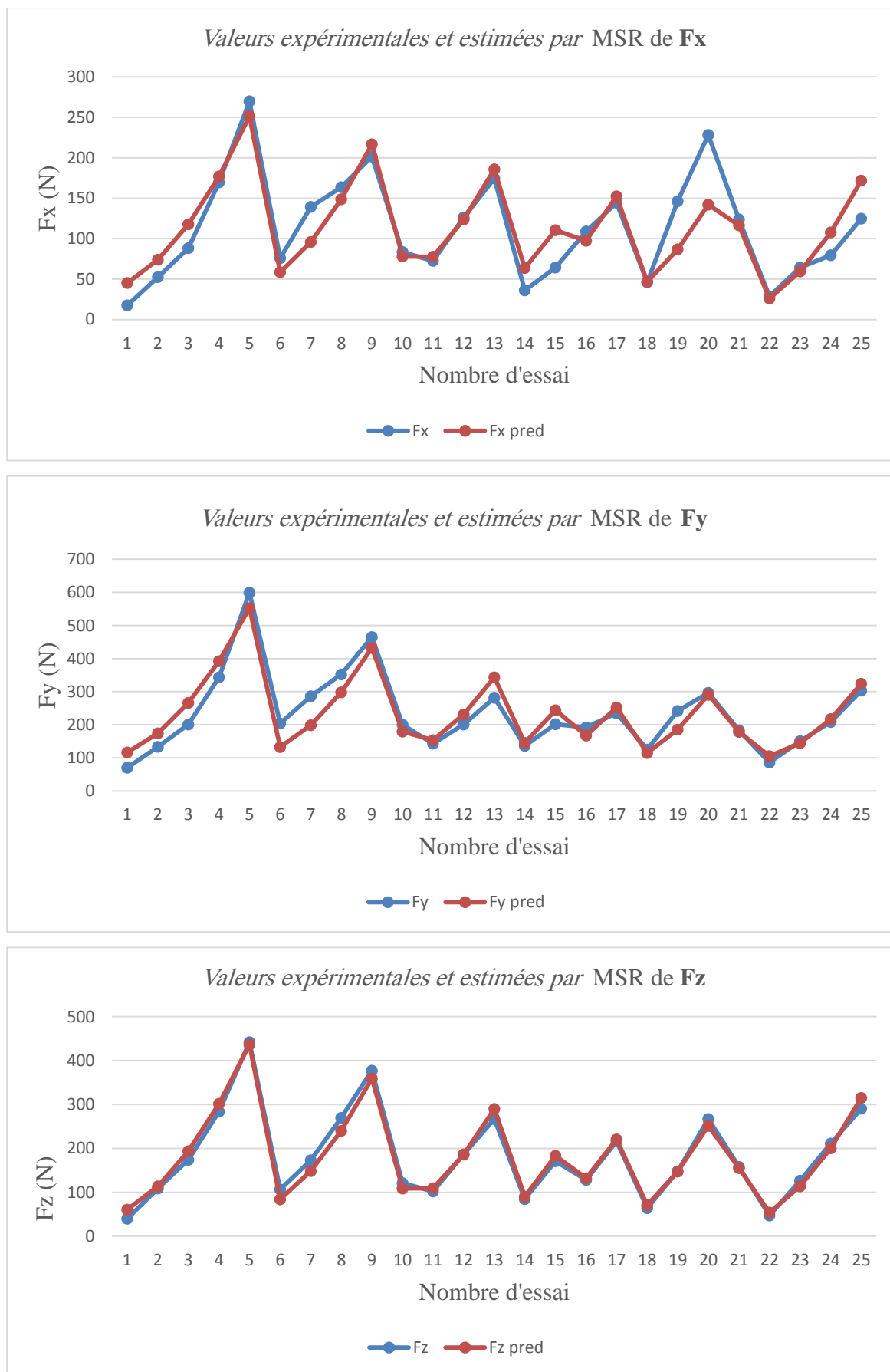
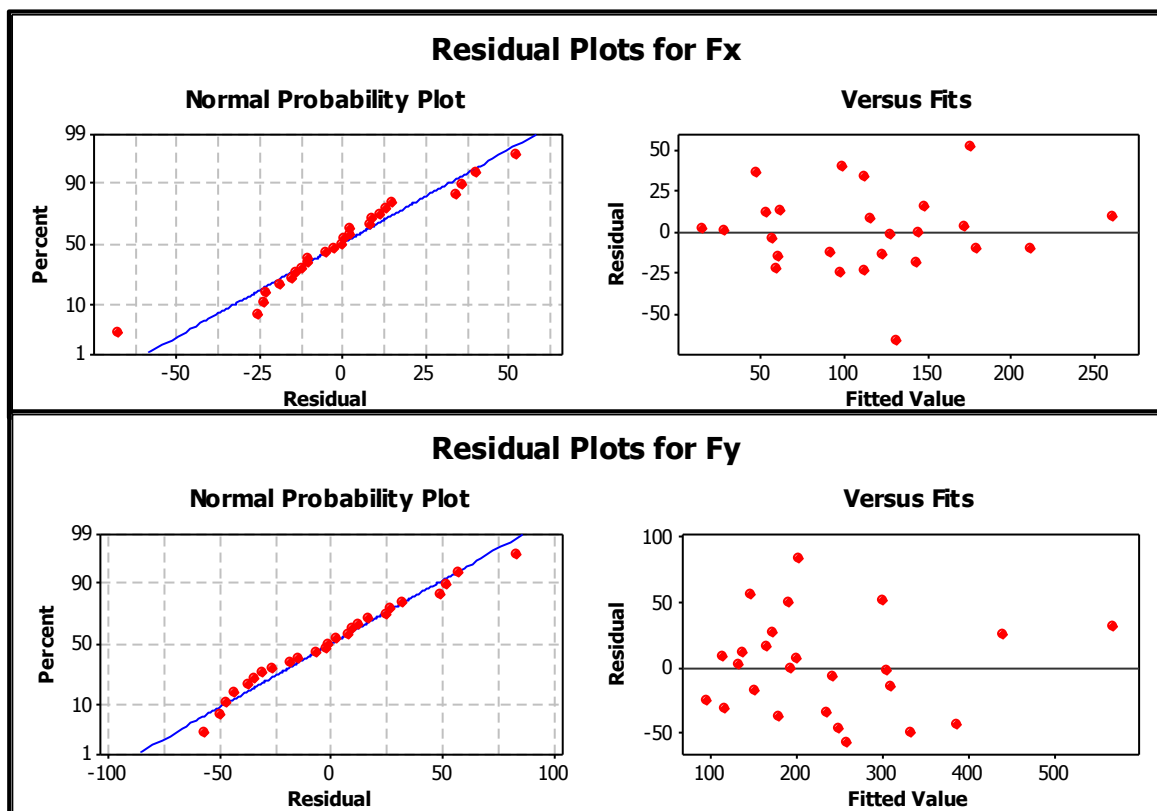


Figure III.8 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées des efforts de coupe.

L'adéquation des modèles élaborées ont été vérifiées par l'analyse de la variance (ANOVA). Les modèles sont adéquats comme les valeurs de F -calculée (9,22 ; 14.82 ; 82.72) respectivement à F_x , F_y et F_z sont supérieures à la valeur de F -table (intervalle de confiance de 95%). R^2 est un coefficient de détermination multiple, qui mesure la variation de la proportion de l'ensemble des points donnés [84]. Dans la présente étude, les valeurs de R^2 sont proches de 1, ce qui suggère une qualité raisonnable du modèle qui peut être utilisé pour la prédiction dans les limites des facteurs étudiés.

Les modèles ont été vérifiés aussi par l'examen des résidus. Ils représentent la différence entre les réponses observées et prédites. L'analyse des résidus de données est présentée dans la **Figure III.9**. Les tracés de la probabilité normale de F_x , F_y et F_z , sont représentés dans la **Figure III.9 (a, b et c)**. Les figures ont révélé que les résidus s'alignent sur une droite ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement. Et montre les résidus en ce qui concerne les 64 essais expérimentaux de F_x , F_y et F_z . Les résidus ne présentent pas de tendance évidente et sont distribués dans les deux directions positives et négatives, ce qui implique que les modèles sont adéquats.



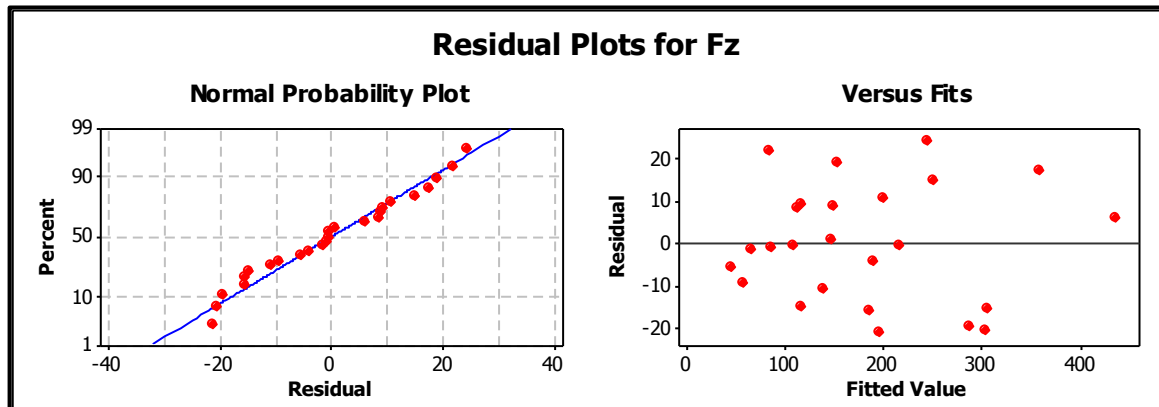


Figure. III.9 : Probabilités normales des résidus pour (a) F_x , (b) F_y et (c) F_z .

III.3.4 Modélisation de la puissance de coupe P_c et le volume de matériau enlevé MRR en fonction de V_c , f et a_p

Afin de déterminer l'énergie consommée pendant l'opération d'usinage, la puissance de coupe P_c (W) liée à la force de coupe F_z (N) est mesurée. La puissance de coupe (P_c) est calculée avec les résultats obtenus par la force de coupe tangentielle comme suit :

$$P_c = \frac{F_z \times V_c}{60} \quad (W) \quad (III.21)$$

Le volume de matériau enlevé (MRR) peut être défini comme le volume de matériau enlevé divisé par le temps d'usinage. Il est calculé en utilisant la formule suivante :

$$MRR = V_c \times f \times a_p \quad (cm^3 / min) \quad (III.22)$$

Le **tableau III.10** présente les résultats expérimentaux correspondants à la puissance de coupe P_c et le volume de matériau enlevé MRR , lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique *AISI 420 traité* par un outil de céramique revêtue (CC6050).

Tableau III.10 : Résultats expérimentaux de P_c et MRR .

Essais $N^{\circ}=$	Facteurs			Réponses	
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	P_c (W)	MRR (cm^3/min)
1	80	0.08	0.1	53,57	0,64
2	80	0.12	0.2	144,61	1,92
3	80	0.16	0.3	231,92	3,84
4	80	0.20	0.4	378,03	6,4
5	80	0.24	0.5	588,79	9,6
6	120	0.08	0.2	213,24	1,92

7	120	0.12	0.3	345,36	4,32
8	120	0.16	0.4	539,52	7,68
9	120	0.20	0.5	754,36	12
10	120	0.24	0.1	242,3	2,88
11	170	0.08	0.3	288,63	4,08
12	170	0.12	0.4	528,08	8,16
13	170	0.16	0.5	756,9	13,6
14	170	0.20	0.1	240,04	3,4
15	170	0.24	0.2	483,34	8,16
16	240	0.08	0.4	512,96	7,68
17	240	0.12	0.5	864,12	14,4
18	240	0.16	0.1	255,96	3,84
19	240	0.20	0.2	591,76	9,6
20	240	0.24	0.3	1066,88	17,28
21	340	0.08	0.5	895,33	13,6
22	340	0.12	0.1	268,88	4,08
23	340	0.16	0.2	717,85	10,88
24	340	0.20	0.3	1196,52	20,4
25	340	0.24	0.4	1646,34	32,64

III.3.4.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe P_c et MRR

Le **tableau III. 11** illustre l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c). On constate que c'est la profondeur de passe (ap) qui contribue le plus (37,56 %), suivi par l'avance (f) avec un pourcentage de 21,14 % et de vitesse de coupe (V_c) avec (12,96) %. Les produits (V_c^2 , f^2 , ap^2) et les interactions ($V_c \times f$, $V_c \times ap$, $f \times ap$) n'ont pas de signification statistique sur la puissance de coupe (P_c).

Tableau III. 11 : Analyse de la variance (ANOVA) pour P_c .

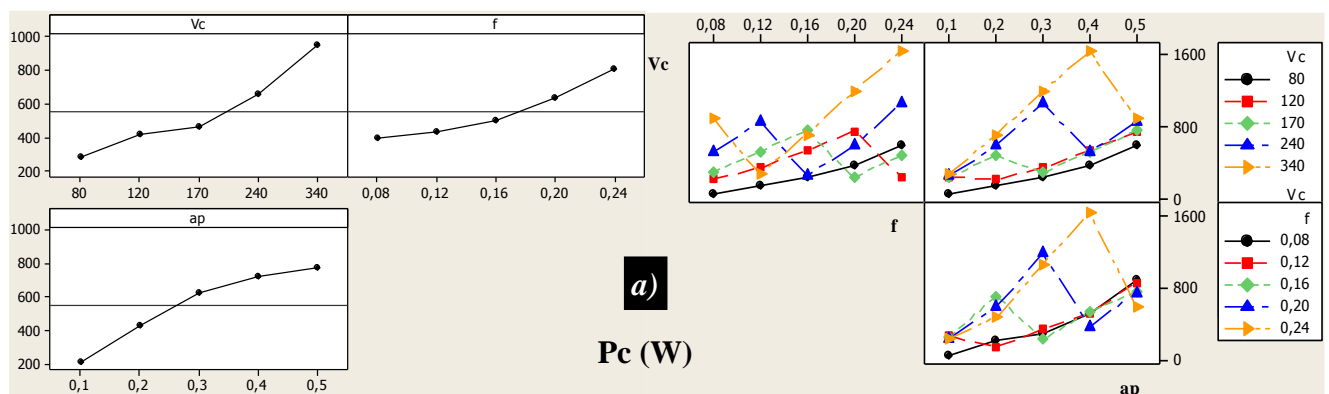
Sources	SS	DL	MS	F-value	p-value	Cont. %	Remarque
Modèle	3.323×10^6	9	3.692×10^5	213.34	< 0.0001		Significatif
V_c	4.341×10^5	1	4.341×10^5	250.87	< 0.0001	12.96%	Significatif
f	7.079×10^5	1	7.079×10^5	409.05	< 0.0001	21.14%	Significatif
ap	1.258×10^6	1	1.258×10^6	727.12	< 0.0001	37.56%	Significatif
$V_c \times f$	28931.83	1	28931.83	16.72	0.0010	0.86%	Non Significatif
$V_c \times ap$	637.56	1	637.56	0.37	0.5529	0.02%	Non Significatif
$f \times ap$	426.72	1	426.72	0.25	0.6267	0.01%	Non Significatif
V_c^2	2944.56	1	2944.56	1.70	0.2117	0.09%	Non Significatif
f^2	4489.89	1	4489.89	2.59	0.1281	0.13%	Non Significatif
ap^2	1233.58	1	1233.58	0.71	0.4118	0.04%	Non Significatif
Erreur	25957.87	15	1730.52			0.78%	Non Significatif
Totale	3.349×10^6	24				100%	

Le **tableau III.12** présente l'ANOVA pour *MRR*. L'analyse des résultats montre que l'profondeur de passe (*ap*) est le facteur le plus influent avec une contribution de 36,45%, suivi par la vitesse d'avance (*f*) avec un pourcentage de 24,56%, et vitesse de coupe (*Vc*) avec 11,60%. Les produits (Vc^2 , f^2 , ap^2) et les interactions ($Vc \times f$, $Vc \times ap$, $f \times ap$) n'ont pas d'effet significatif.

Tableau III.12 : Analyse de la variance (ANOVA) pour *MRR*.

Sources	SS	DL	MS	F-value	p-value	Cont. %	Remarque
Modèle	1212.56	9	134.73	566.72	< 0.0001		Significatif
<i>Vc</i>	141.02	1	141.02	593.18	< 0.0001	11.6%	Significatif
<i>f</i>	298.69	1	298.69	1256.41	< 0.0001	24.56%	Significatif
<i>ap</i>	443.32	1	443.32	1864.79	< 0.0001	36.45%	Significatif
$Vc \times f$	16.73	1	16.73	70.36	< 0.0001	1.38%	Significatif
$Vc \times ap$	0.042	1	0.042	0.18	0.6796	0,00%	Non Significatif
$f \times ap$	0.34	1	0.34	1.44	0.2481	0.03%	Non Significatif
Vc^2	2.61	1	2.61	10.98	0.0047	0.21%	Non Significatif
f^2	2.46	1	2.46	10.35	0.0058	0.2%	Non Significatif
ap^2	2.46	1	2.46	10.35	0.0058	0.2%	Non Significatif
Erreur	3.57	15	0.24			0.29%	Non Significatif
Totale	1216.12	24				100%	

Les graphiques de la puissance de coupe et le volume matériau enlevé leurs effets principaux et des interactions sont représentés dans la **Figure III.10 (a et b)**. On peut conclure que la profondeur de passe (*ap*) affecte fortement les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), suivie par la vitesse d'avance (*f*). Comme prévu, la profondeur de passe (*ap*) a un effet très important alors que la vitesse de coupe a un faible effet sur les composantes des efforts de coupe. L'interaction ($f \times ap$) a un effet significative sur les trois efforts de coupe, d'autre part les interactions ($Vc \times f$ et $Vc \times ap$) n'ont pas d'effet significatif.



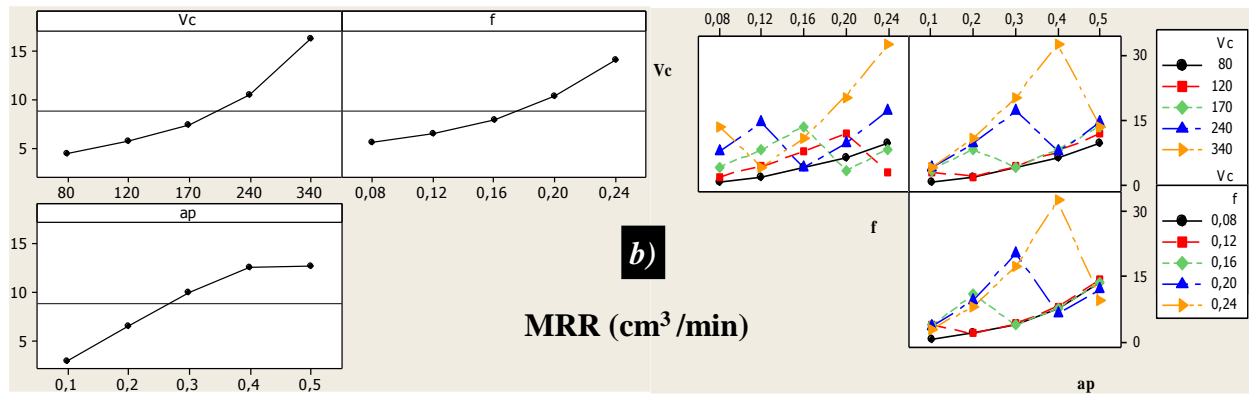


Figure III.10 : Graphiques des effets principaux et des interactions pour : (a) P_c ; (b) MRR .

III.3.4.2 Analyse de régression : P_c et MRR en fonction de V_c , f et ap

L'analyse de régression de P_c en fonction de V_c , f et ap donne l'équation du modèle complet (III.23) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,22\%$).

$$P_c = +513.61 + 314.37 \times V_c + 258.08 \times f + 344.09 \times ap + 288.29 \times V_c \times f + 42.80 \times V_c \times ap - 38.97 \times f \times ap + 62.16 \times V_c^2 + 71.26 \times f^2 + 37.35 \times ap^2 \quad (\text{III.23})$$

Le modèle du volume de matériau enlevé (MRR) est donnée par l'équation (III.24) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 99,7\%$).

$$MRR = +12.88427 - 0.11307 \times V_c - 136.37040 \times f + 15.51696 \times ap + 0.66653 \times V_c \times f + 0.013388 \times V_c \times ap - 69.07505 \times f \times ap + 1.09507 \times 10^{-4} \times V_c^2 + 260.59023 \times f^2 + 41.69444 \times ap^2 \quad (\text{III.24})$$

Les surfaces de réponses 3D (Figure III.11 a et b) montre la variation de la puissance de coupe et le volume de matériau enlevé avec la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap). Comme observé sur la figure, les résultats indiquent que les pentes des facteurs (ap) et (f) ont une amplitude assez grande. L'augmentation simultanée de (ap) et (f) provoque une augmentation remarquable de (P_c) (Figure III.11. a). On note aussi que la pente de (V_c) est très faible par rapport à (ap) et (f), ce qui indique que ce paramètre n'a pas une grande influence sur (F_z). Par contre, il est en troisième position pour (P_c). Il est donc clair que ces résultats sont en accord avec ceux de l'ANOVA (tableau III.11). En général, plus les facteurs (ap et f) sont élevés, plus (P_c) est grand. Ces résultats sont en accord avec les résultats rapportés par [85] [86]. La Figure III.12.B montre les graphes 3D de (MRR), selon les facteurs de combinaison (V_c , f et ap). Il est clair que l'augmentation des facteurs (V_c , f et ap) conduit directement à l'augmentation de (MRR) (équation 22).

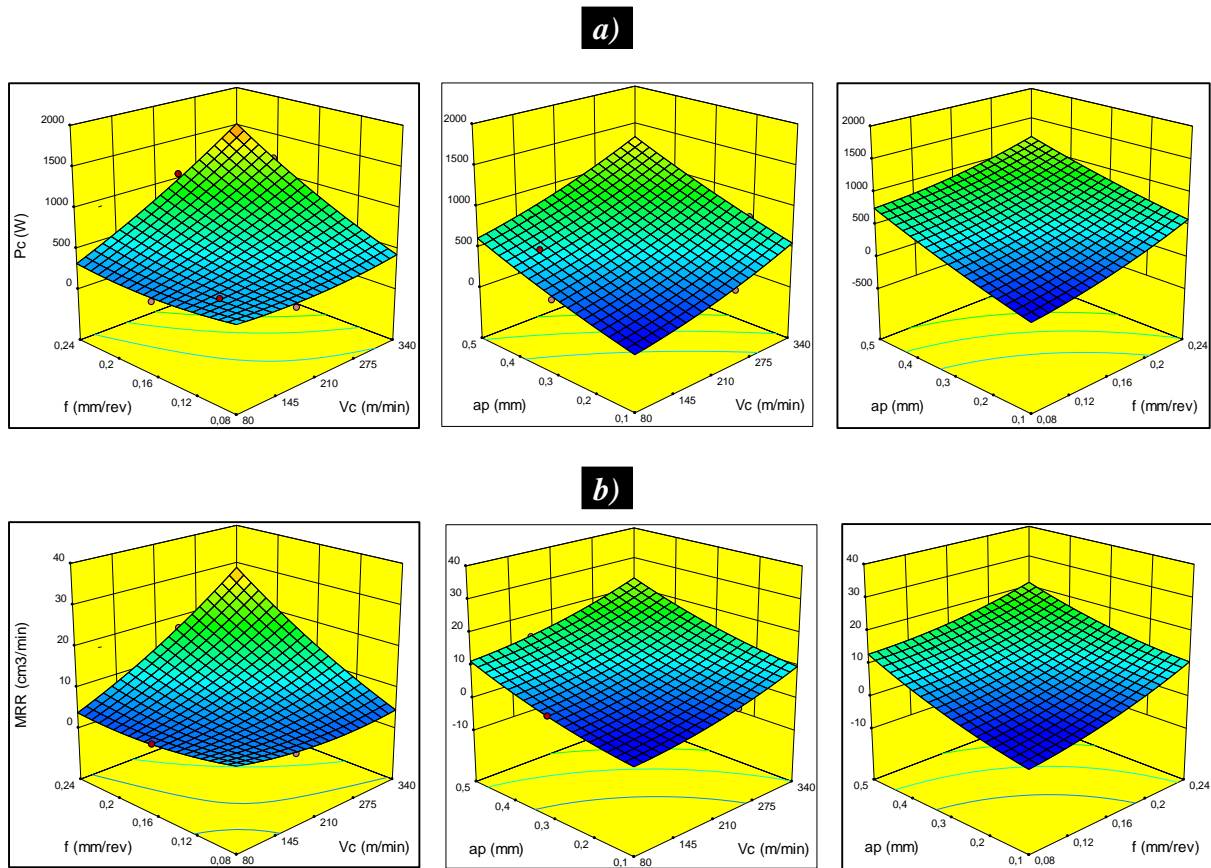


Figure III.11 : Effet des paramètres de régime de coupe sur : (a) P_c ; (b) MRR .

III.3.4.3 Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées

La comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la puissance de coupe P_c et le volume matériau enlevé MRR et celles estimées par les modèles mathématiques (quadratique) obtenus par l'analyse de régression est présentée graphiquement sur la **Figure III.12**. L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches.

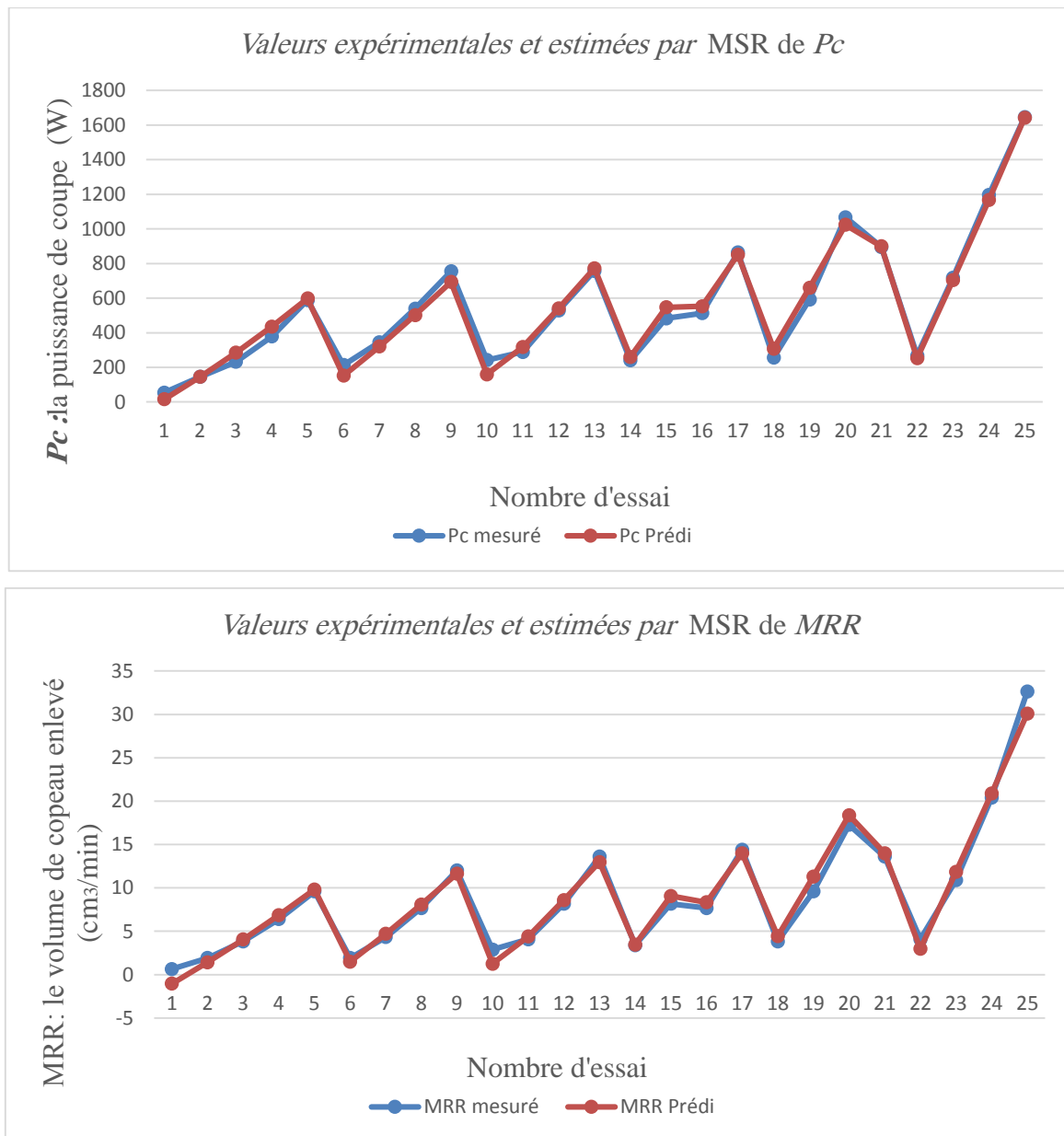


Figure III.12 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées de P_c et MRR .

L'adéquation des modèles élaborés ont été vérifiées par l'analyse de la variance (ANOVA). Les modèles sont adéquats comme les valeurs de F -calculée (213,34 ; 566,72) respectivement à P_c et MRR sont supérieures à la valeur de F -table (intervalle de confiance de 95%). R^2 est un coefficient de détermination multiple, qui mesure la variation de la proportion de l'ensemble des points donnés [87]. Dans la présente étude, les valeurs de R^2 sont très proches de 1, ce qui suggère une qualité raisonnable du modèle qui peut être utilisé pour la prédiction dans les limites des facteurs étudiés. Les modèles ont été vérifiés aussi par l'examen des résidus. Ils représentent la différence entre les réponses observées et prédites. L'analyse des résidus de données est présentée dans la **Figure III.13**. Les tracés de la probabilité normale de P_c et MRR , sont représentés dans la **Figure III.13 (a et b)**. Les figures ont révélé que les résidus s'alignent

sur une droite ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement. Et montre les résidus en ce qui concerne les 25 essais expérimentaux de P_c et MRR . Les résidus ne présentent pas de tendance évidente et sont distribués dans les deux directions positives et négatives, ce qui implique que les modèles sont adéquats.

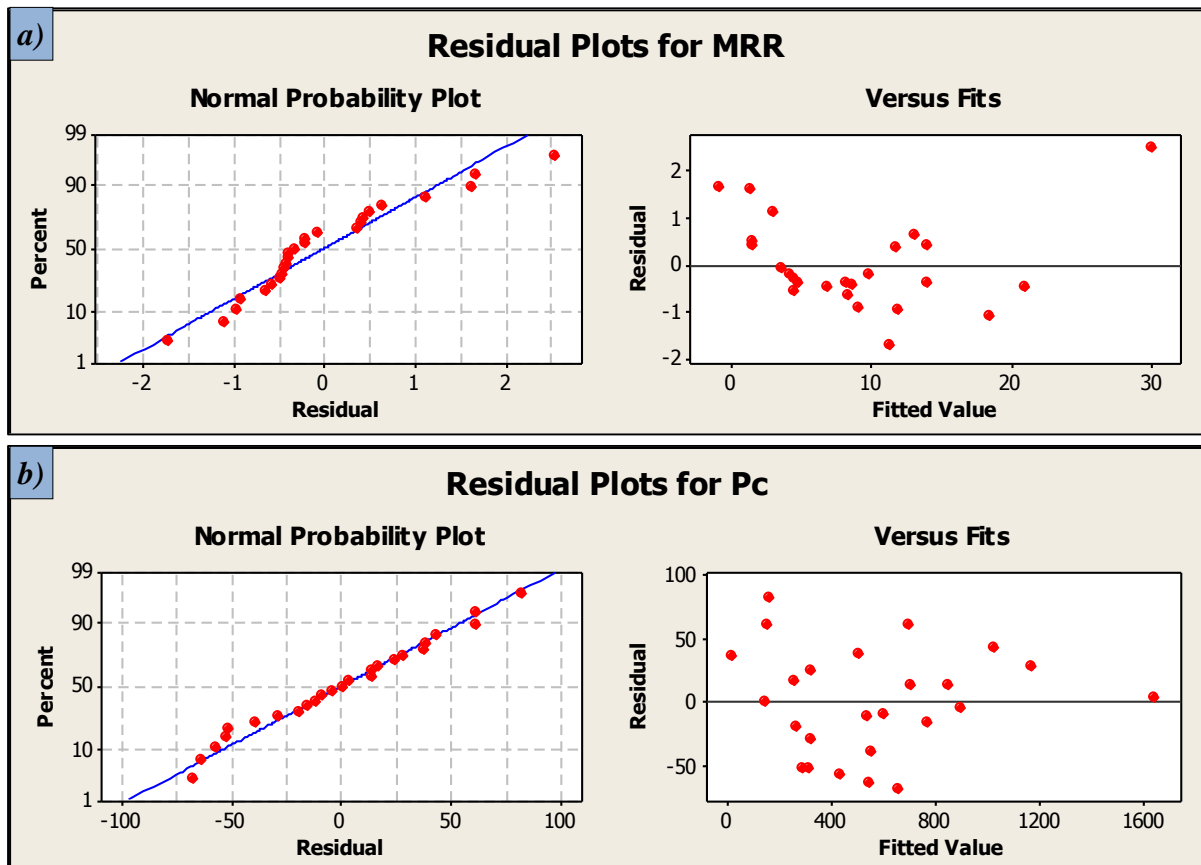
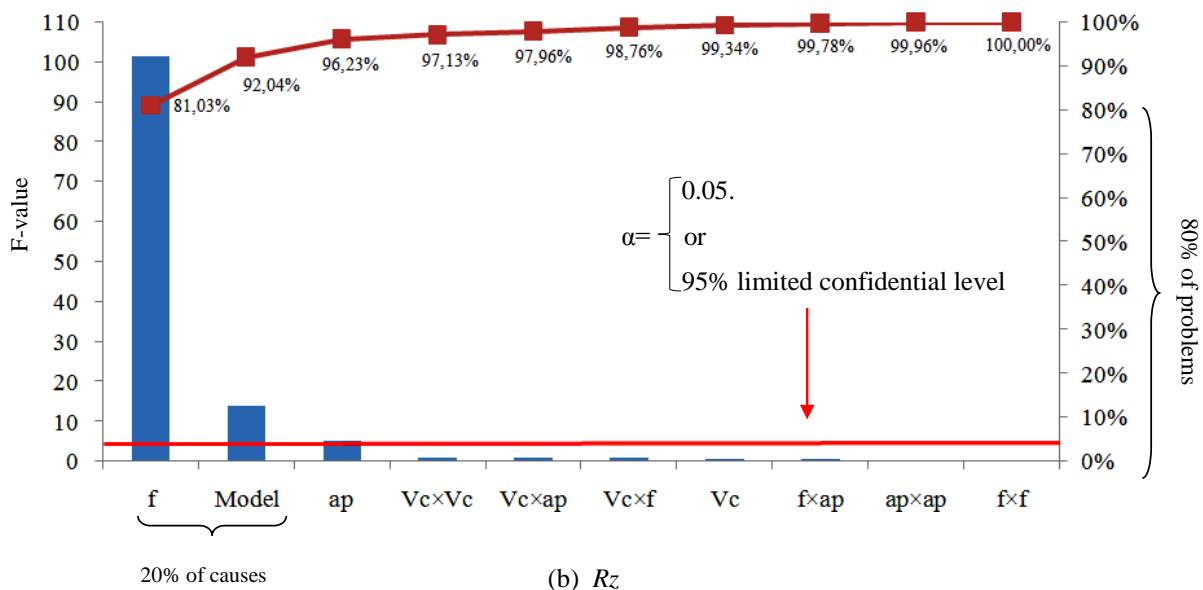
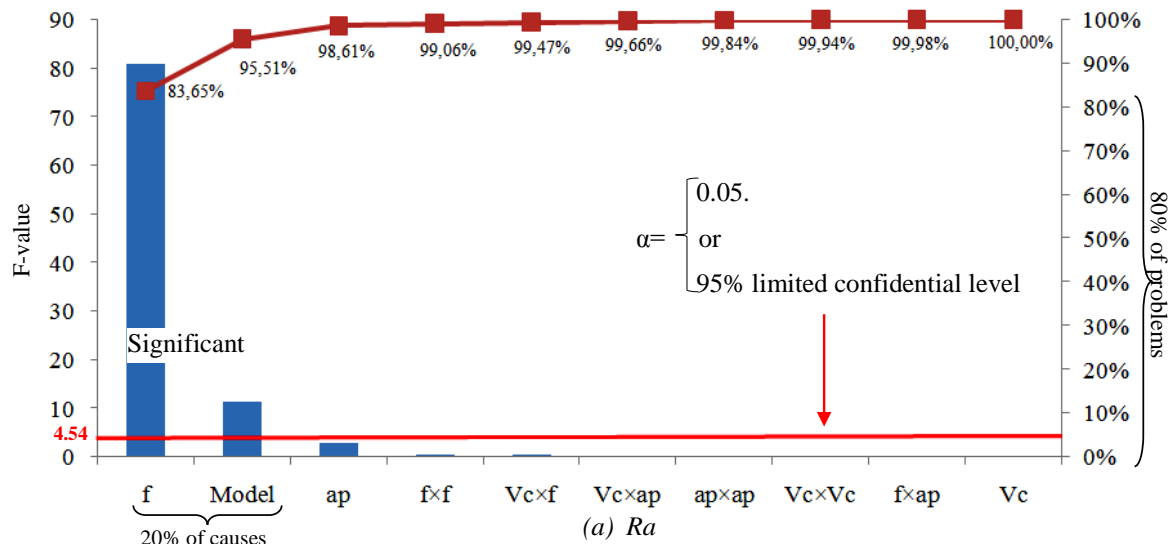


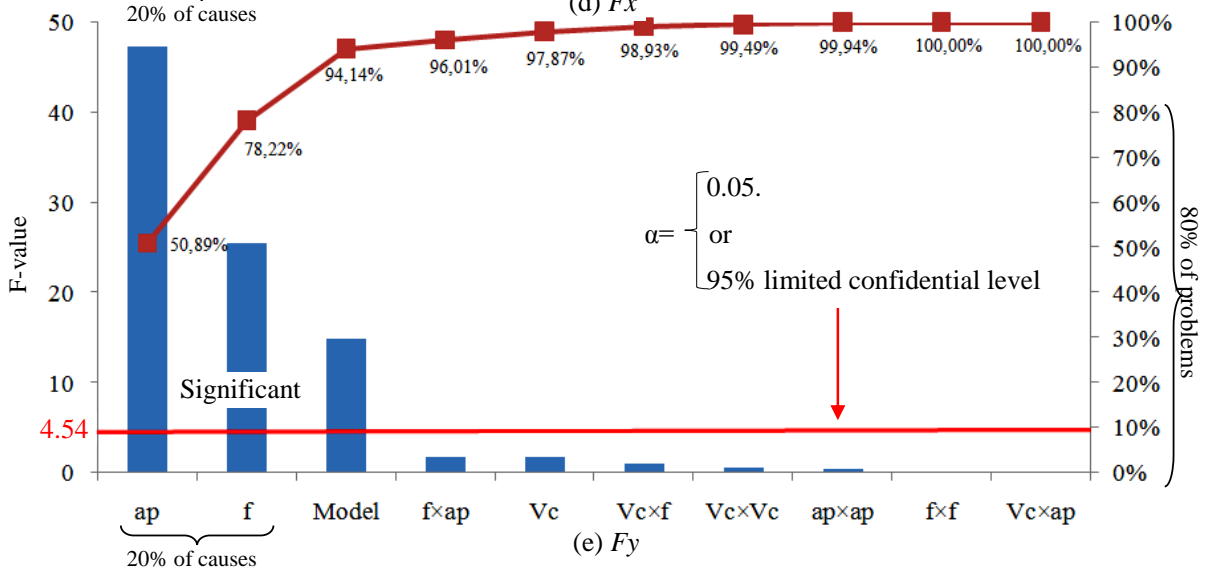
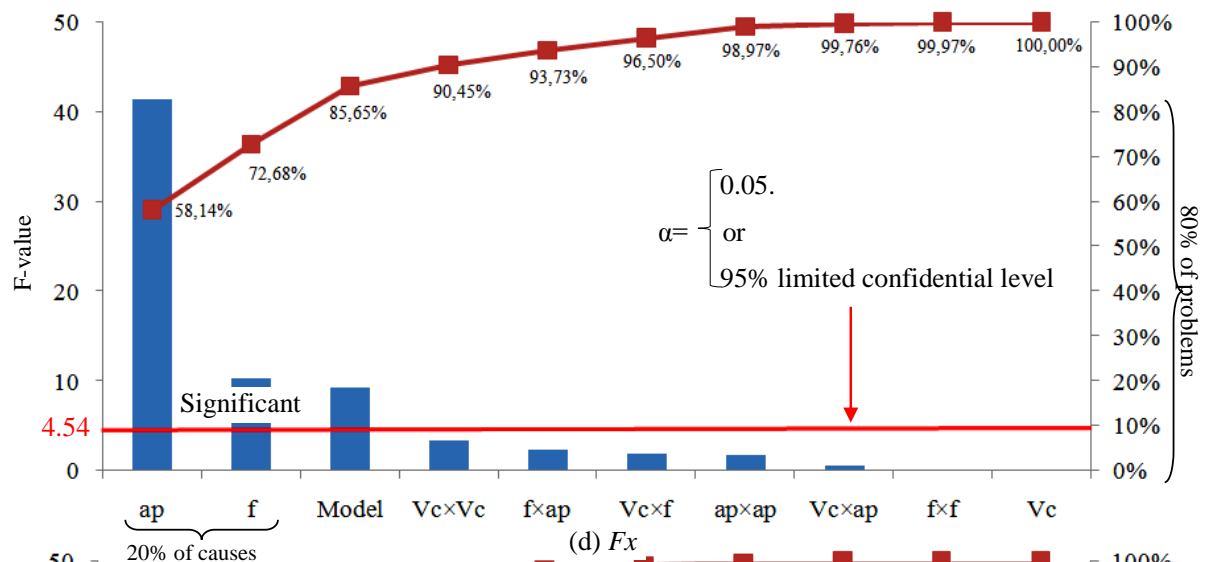
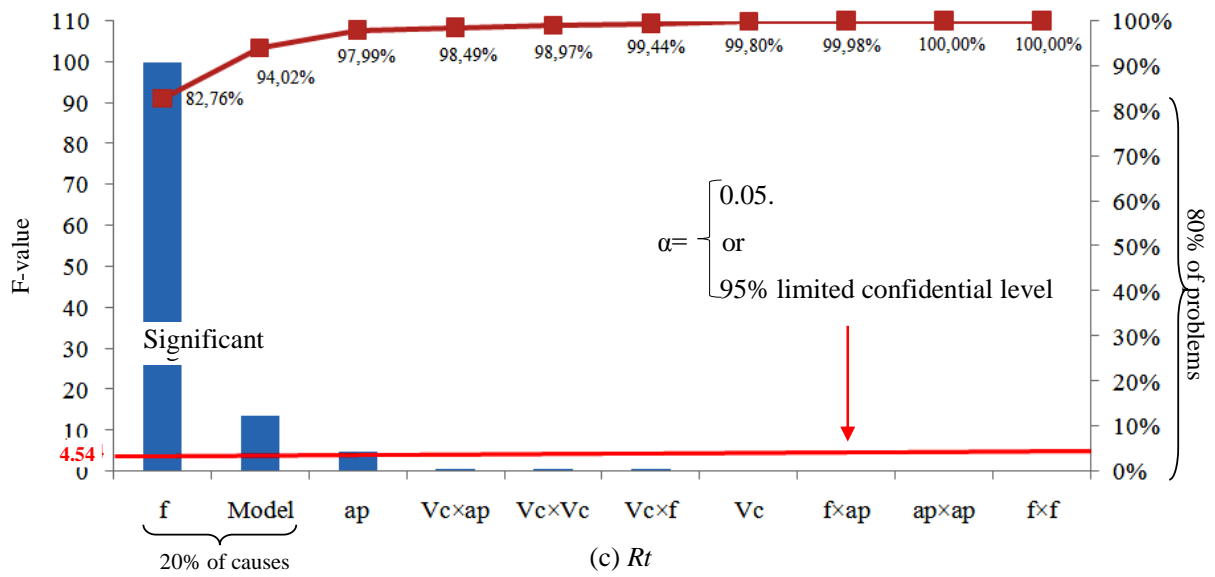
Figure. III.13 : Probabilités normales des résidus pour (a) P_c et (b) MRR .

III.4 Analyse de Pareto

De plus, un autre outil statistique puissant qui permet de déterminer l'effet significatif de chaque paramètre d'entrée sur chaque réponse de sortie, appelé analyse de Pareto. Ce dernier classe dans l'ordre croissant la "valeur F" de Fisher pour identifier le degré d'influence du plus grand à l'effet le plus faible des paramètres de coupe avec leurs interactions et leurs termes carrés sur les réponses (Figure III.14). Dans cette analyse, la "valeur F" est obtenue en divisant les carrés moyens de chaque facteur par l'erreur des carrés moyens. Les effets sont standardisés "F-value" pour une meilleure comparaison. Plus l'effet est normalisé, plus le terme considéré comme influent est élevé. Si la "valeur F", qui correspond aux paramètres de coupe avec leurs interactions et leurs carrés, est supérieure à 4,5, les effets sont significatifs. Par contre, si la

"valeur F" est inférieure à 4,54, les effets ne sont pas significatifs. L'intervalle de confiance choisi est de 95 % ($\alpha=0.05$).





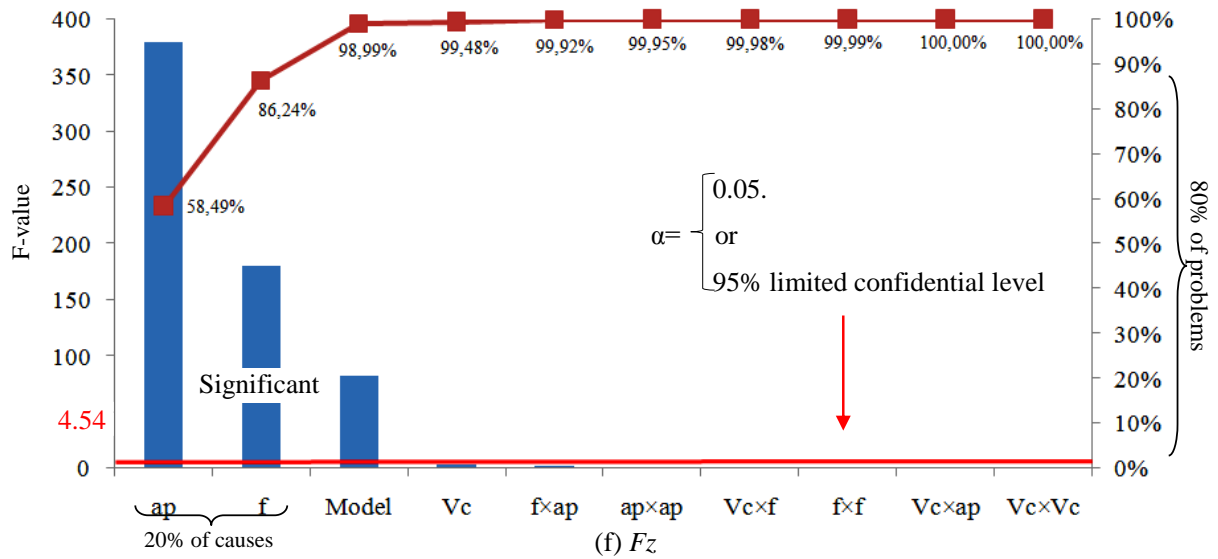


Figure III.14 : Résultats des diagrammes de Pareto.

III.5 Expériences de confirmation

En plus des expériences effectuées dans le **tableau III.13**, six autres combinaisons d'expérience ont été faites en utilisant d'autres conditions de coupe afin de valider la précision des modèles mathématiques de Ra et Fz . Le **tableau III.13** et les **Figures III.15** et **III.16** résument les résultats obtenus et les erreurs calculées. Il est clair que les valeurs expérimentales et prévues sont très proches les unes des autres. Les erreurs calculées pour Ra et Fz varient respectivement de 1,35 à 4,66 % et de 0,22 à 5,28 %.

Tableau III.13 : Expériences de confirmation.

N°	Série testée	Ra prédit (μm)	Ra exp. (μm)	Erreur (%)	Fz prédit (N)	Fz exp. (N)	Erreur (%)
01	$f=0.11\text{mm/tr}$; $ap=0.2\text{mm}$; $Vc=110\text{m/min}$	0.85	0.82	3.78	99.67	101.93	2.22
02	$f=0.14\text{mm/tr}$; $ap=0.2\text{mm}$; $Vc=110\text{m/min}$	1.4	1.35	3.48	116.34	113.86	2.18
03	$ap=0.15\text{mm}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $Vc=110\text{ m/min}$	0.53	0.52	1.35	64.85	65	0.22
04	$ap=0.45\text{mm}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $Vc=110\text{ m/min}$	1.11	1.16	4.66	187.20	190.43	1.70
05	$Vc=110\text{m/min}$; $f=0.09\text{ mm/tr}$; $ap=0.2\text{mm}$	0.51	0.53	3.11	90.19	95.21	5.28
06	$Vc=160\text{m/min}$; $f=0.09\text{ mm/tr}$; $ap=0.2\text{mm}$	0.78	0.75	4.53	84.59	80.39	5.23

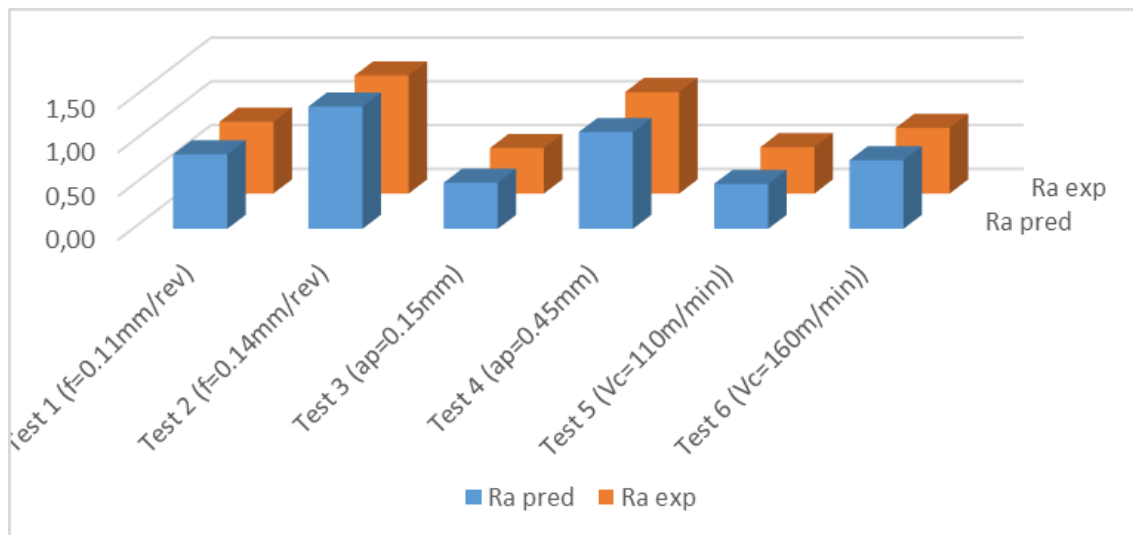


Figure III.15 : Histogrammes comparatifs entre les valeurs expérimentales et les valeurs prévues pour Ra (μm).

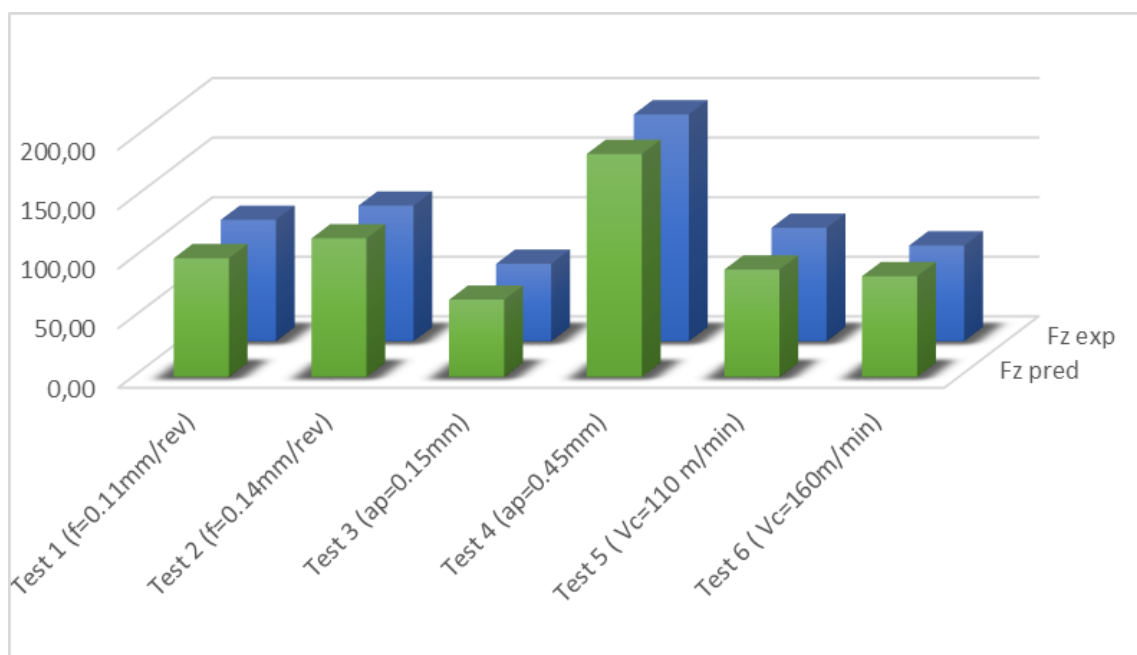


Figure III.16 : Histogrammes comparatifs entre les valeurs expérimentales et les valeurs prévues pour Fz (N).

III.6 Profil de surface et topographie 3D

La **Figure III.17** illustre deux cas de topographie de surface 3D, avec une vitesse d'avance de 0,08mm/tour et 0,2mm/tour, en conservant la même vitesse de coupe $V_c = 160m/min$ et $ap=0,2$ mm. Après l'analyse des profils de surface, il a été constaté que l'augmentation de (f) conduit à l'augmentation de (Ra), ce qui montre que plus la valeur de (f) est élevée, plus la distance entre les pics et les vallées est élevée. En réalité, cela s'explique par le fait que la

surface générée comprend des rainures hélicoïdales résultant des mouvements de translation de l'outil et de rotation de la pièce [88-89]. Des caractéristiques de profil plus détaillées peuvent être reconnues dans la **Figure III.17** montrant des zooms de plusieurs irrégularités.

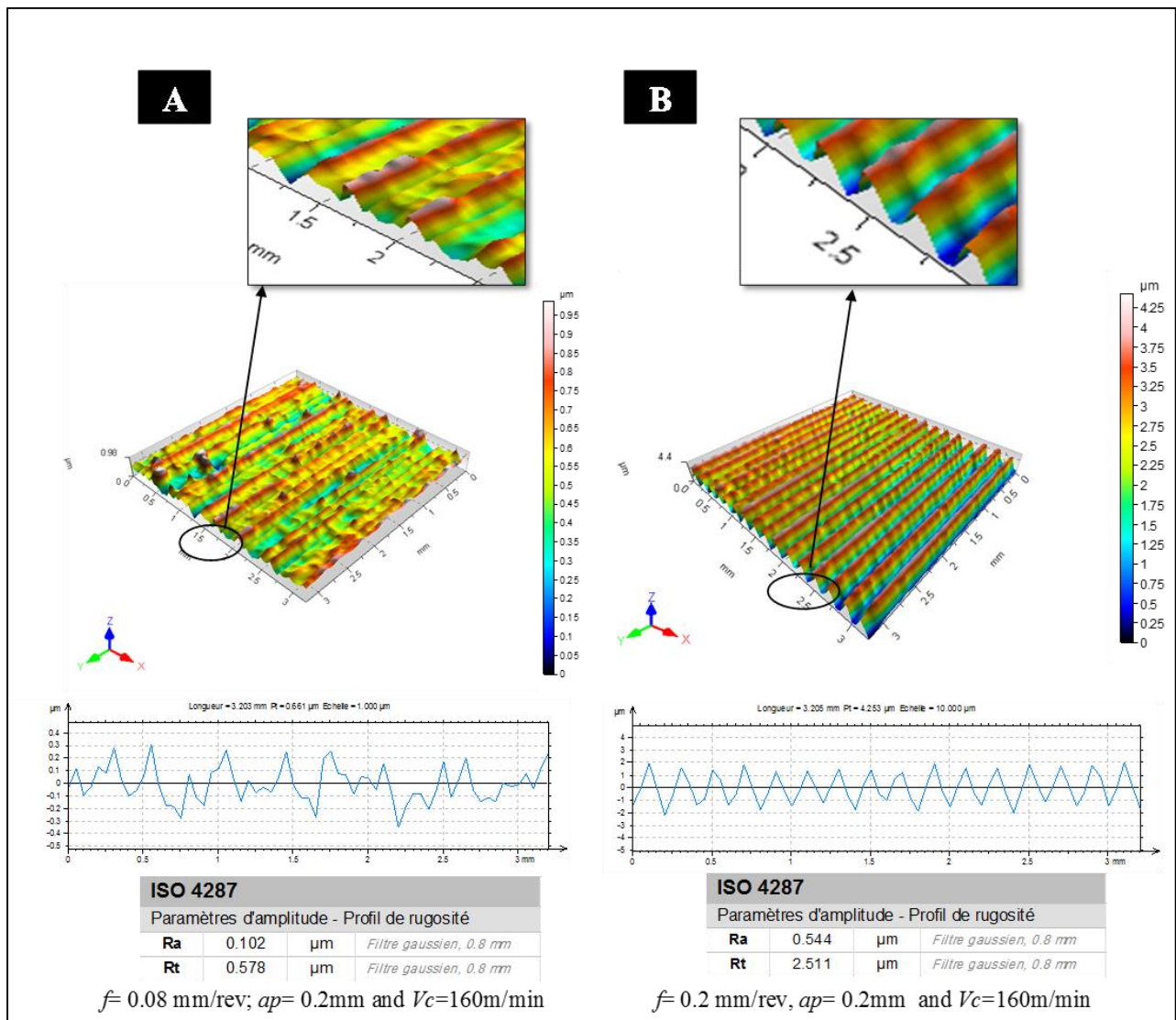


Figure III. 17 : Topographie 3D pour la rugosité de surface Ra.

III.7 Optimisation des conditions de coupe pour Ra, Fz, Pc et MRR

L'optimisation des paramètres d'usinage a fait l'objet de plusieurs études de recherche utilisant diverses techniques [90-91]. L'optimisation permet de choisir les conditions de coupe les plus appropriées afin d'obtenir les résultats souhaités. Cela a généralement un impact économique direct sur la productivité en termes de temps d'usinage, de coût global d'usinage et de qualité de surface [92-93].

Dans cette étude, deux méthodes d'optimisation « mono et multi-objective » ont été exploités, pour déterminer les régimes optimaux. Les paramètres de coupe pris en compte lors

de cette étude sont les suivants : (V_c, f et ap) et les paramètres technologiques étudiés sont : (Ra, F_z, P_c et MRR). L'optimisation mono-objective a été effectuée en se basant sur l'approche de Taguchi et l'analyse du rapport signal/bruit (S/N). Par contre l'optimisation multi-objective a été réalisée par la méthode de la fonction de désirabilité (FD), qui est utilisée pour l'optimisation multi-objective des réponses.

III.7. 1 Optimisation des paramètres d'usinage

III.7. 1.1 Optimisation mono-objective des paramètres technologiques en utilisant la méthode de Taguchi

➤ Description de la méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi est une technique utile qui a une grande contribution dans l'amélioration des performances des systèmes et de résoudre les problèmes d'optimisation complexes (paramètres) pendant la production du produit, par la mise en œuvre de la planification des expériences, qui sont basées sur l'utilisation des tableaux orthogonaux proposés par Taguchi. Le but est de minimiser le nombre d'essais et de se concentrer seulement sur les expériences essentielles pour l'analyse, ce qui conduit à gagner du temps et réduire les coûts [94]. De plus, cette méthode permet de contrôler simultanément les facteurs contrôlables et incontrôlables en convertissant les réponses en rapport signal/bruit (S/N) pour identifier les performances du système [95]. Le rapport S/N est le critère essentiel dans la méthode de Taguchi, il permet de définir le degré d'influence du bruit indésirable sur le signal voulu [96]. **Taguchi [94]** recommande l'utilisation des plans orthogonaux pour attribuer les facteurs choisis pour l'expérience. Le plus couramment utilisé sont des types de L_8 (c.-à-d., huit essais expérimentaux), L_{16} et L_{18} . La puissance de la méthode Taguchi, c'est qu'il intègre des méthodes statistiques dans le processus d'ingénierie. **Bendell et al. [97]** et **Rowlands et al. [98]** ont rapporté la réussite de l'application de la méthode de Taguchi dans l'automobile, les plastiques, les semi-conducteurs, de la transformation des métaux, et de la fonderie industrielle. Les rapports S/N sont généralement divisés en trois catégories données par les équations suivantes [99] :

$$\text{Nominale est le meilleur : } S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y} \right) \quad \text{(III.25)}$$

$$\text{Plus grand est le meilleur (maximiser) : } S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad \text{(III.26)}$$

Plus petit est le meilleur (minimiser) : $S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$ (III.27)

Où \bar{y} est la moyenne des données observées, s_y^2 est la variance de y , n est le nombre d'observations et y_i est les données observées.

Pour atteindre la qualité des produits souhaitable, Taguchi suggère un processus en trois étapes (**Figure III.18**) : la planification du système, la planification des paramètres, et la planification de tolérance.

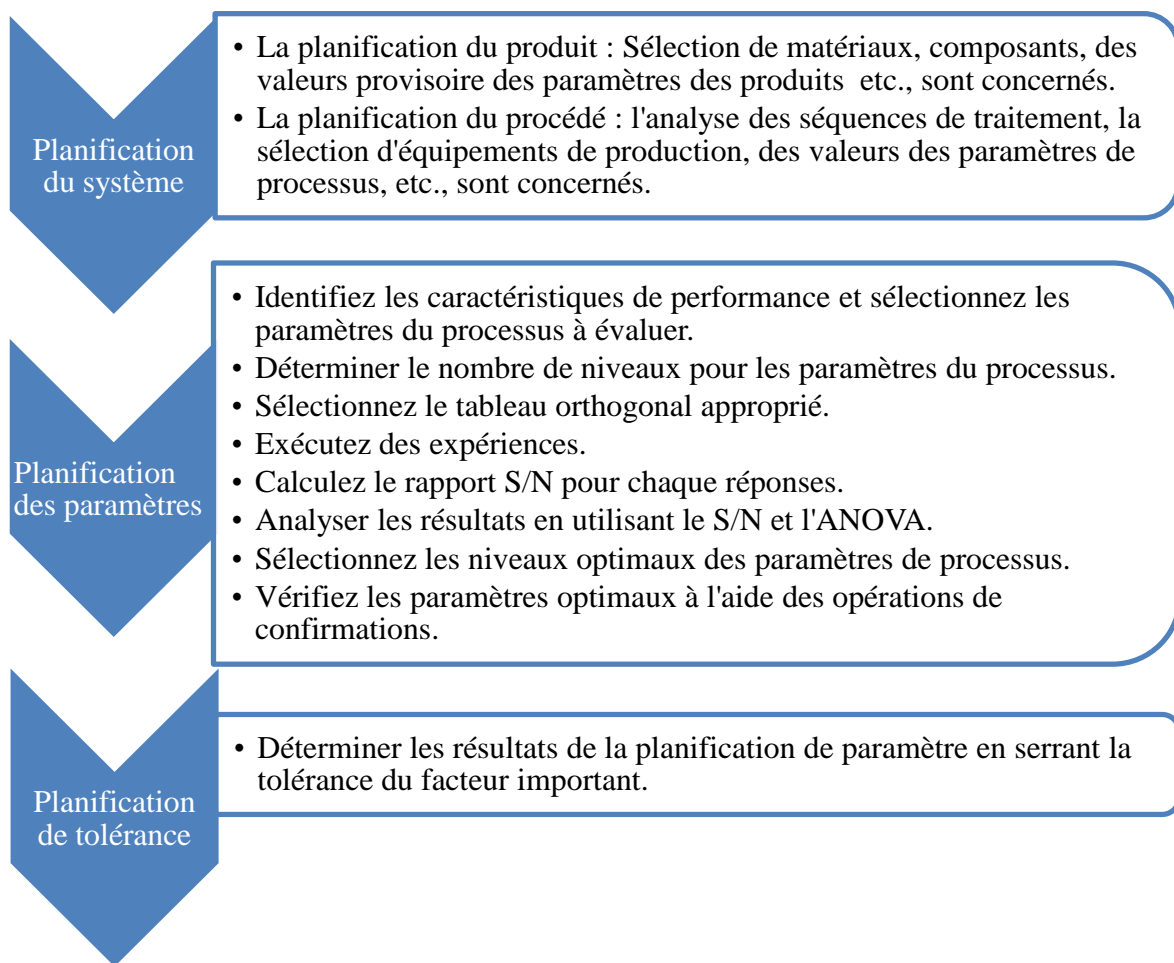


Figure III.18 : Procédure de la planification de Taguchi.

➤ **Optimisation mono-objectif**

Les résultats expérimentaux de (Ra , Fz , Pc et MRR) avec leurs rapports S/N calculé sont présentés dans le **tableau III.14**. Le facteur de contrôle qui a la plus grande influence est déterminé en fonction de la valeur du delta comme indiqué dans le **tableau III.15 (a, b, c et d)**. Delta est égal à la différence entre le maximum et minimum de la moyenne des rapports S/N

pour un facteur de contrôle particulier. Plus la valeur de delta est élevée, plus le facteur de contrôle est important. D'après l'analyse du **tableau III.15 (a, b, c et d)**, on observe clairement que le même classement par ordre décroissant d'influence de tous les facteurs principaux (V_c , f , ap) sur les réponses (R_a , F_z , P_c et MRR) est obtenu par l'analyse de la variance et confirmé par le graphique de Pareto.

Tableau III.14 : Résultats expérimentaux pour la rugosité de surface, l'effort tangentiel, la puissance de coupe et le volume de coupe enlevé.

N° Essai	Paramètres d'usinage			Réponses							
	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	R_a (μm)	S/N (dB)	F_z (N)	S/N (dB)	P_c (W)	S/N (dB)	MRR (cm^3/min)	S/N (dB)
1	80	0,08	0,1	0,47	6,56	40,18	-32,08	53,573	-34,58	0,64	-3,88
2	80	0,12	0,2	0,76	2,38	108,5	-40,71	144,61	-43,20	1,92	5,67
3	80	0,16	0,3	1,14	-1,14	173,9	-44,81	231,92	-47,31	3,84	11,69
4	80	0,2	0,4	3,07	-9,74	283,5	-49,05	378,03	-51,55	6,4	16,12
5	80	0,24	0,5	2,96	-9,43	441,6	-52,90	588,79	-55,40	9,6	19,65
6	140	0,08	0,2	0,65	3,74	106,6	-40,56	213,24	-46,58	1,92	5,67
7	140	0,12	0,3	0,49	6,20	172,7	-44,74	345,36	-50,77	4,32	12,71
8	140	0,16	0,4	0,7	3,10	269,8	-48,62	539,52	-54,64	7,68	17,71
9	140	0,2	0,5	1,07	-0,59	377,2	-51,53	754,36	-57,55	12	21,58
10	140	0,24	0,1	3,67	-11,29	121,2	-41,67	242,3	-47,69	2,88	9,19
11	170	0,08	0,3	0,42	7,54	101,9	-40,16	288,63	-49,21	4,08	12,21
12	170	0,12	0,4	0,63	4,01	186,4	-45,41	528,08	-54,45	8,16	18,23
13	170	0,16	0,5	1,03	-0,26	267,1	-48,53	756,9	-57,58	13,6	22,67
14	170	0,2	0,1	1,98	-5,93	84,72	-38,56	240,04	-47,61	3,4	10,63
15	170	0,24	0,2	2,97	-9,46	170,6	-44,64	483,34	-53,69	8,16	18,23
16	240	0,08	0,4	0,5	6,02	128,2	-42,16	512,96	-54,20	7,68	17,71
17	240	0,12	0,5	0,99	0,09	216	-46,69	864,12	-58,73	14,4	23,17
18	240	0,16	0,1	1,99	-5,98	63,99	-36,12	255,96	-48,16	3,84	11,69
19	240	0,2	0,2	2,8	-8,94	147,9	-43,40	591,76	-55,44	9,6	19,65
20	240	0,24	0,3	2,64	-8,43	266,7	-48,52	1066,9	-60,56	17,28	24,75
21	340	0,08	0,5	0,39	8,18	158	-43,97	895,33	-59,04	13,6	22,67
22	340	0,12	0,1	0,68	3,35	47,45	-33,52	268,88	-48,59	4,08	12,21
23	340	0,16	0,2	1,24	-1,87	126,7	-42,05	717,85	-57,12	10,88	20,73
24	340	0,2	0,3	1,98	-5,93	211,2	-46,49	1196,5	-61,56	20,4	26,19
25	340	0,24	0,4	2,76	-8,82	290,5	-49,26	1646,3	-64,33	32,64	30,28

Tableau III.15 : Tableau de réponse des S/N pour : (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) puissance de coupe, (d) volume de copeau enlevé.

(a)

Niveau	V_c	f	ap
1	-2,2730	6,4068	-2,6592
2	0,2310	3,2060	-2,8283
3	-0,8194	-1,2285	-0,3545
4	-3,4489	-6,2280	-1,0858
5	-1,0183	-9,4849	-0,4009
Delta	3,6799	15,8917	2,4738
Rang	2	1	3

(b)

Niveau	V_c	f	ap
1	-43,91	-39,79	-36,39
2	-45,42	-42,21	-42,27
3	-43,46	-44,03	-44,95
4	-43,38	-45,81	-46,90
5	-43,06	-47,40	-48,73
Delta	2,36	7,61	12,34
Rang	3	2	1

(c)

Niveau	V_c	f	ap
1	-46,41	-48,72	-45,33
2	-51,44	-51,15	-51,21
3	-52,51	-52,96	-53,88
4	-55,42	-54,74	-55,84
5	-58,13	-56,33	-57,66
Delta	11,72	7,61	12,34
Rang	2	3	1

(d)

Niveau	V_c	f	ap
1	9,849	10,876	7,968
2	13,371	14,398	13,989
3	16,396	16,897	17,511
4	19,391	18,835	20,009
5	22,417	20,419	21,948
Delta	12,568	9,542	13,979
Rang	2	3	1

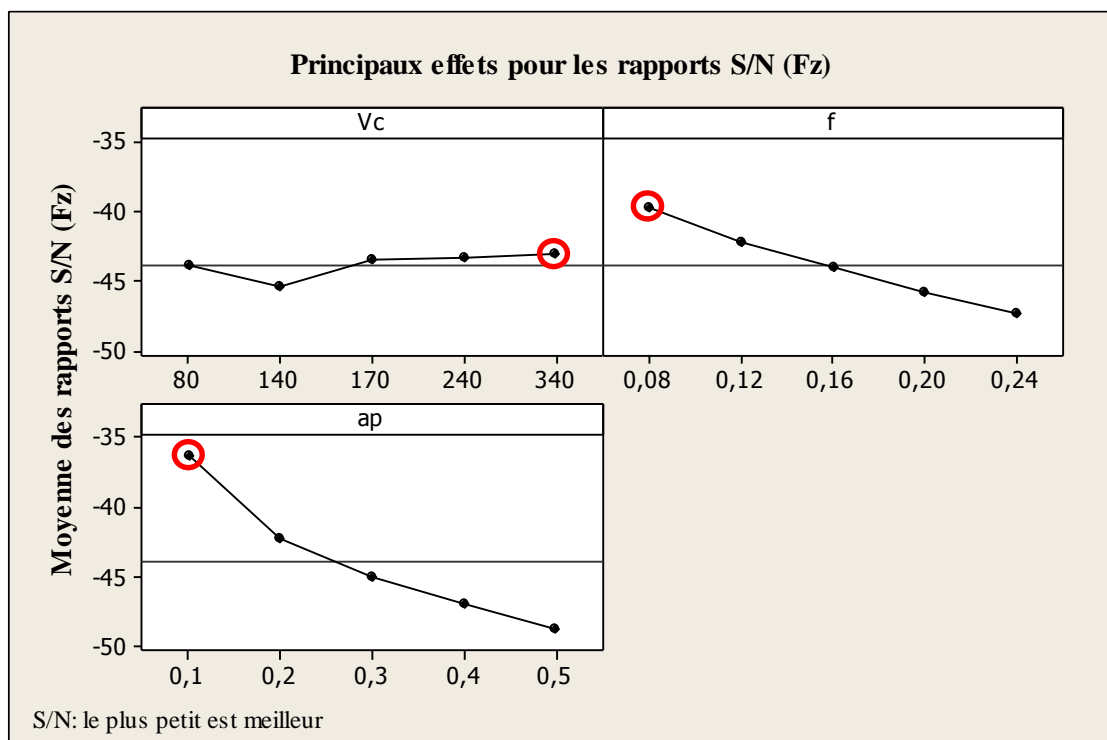
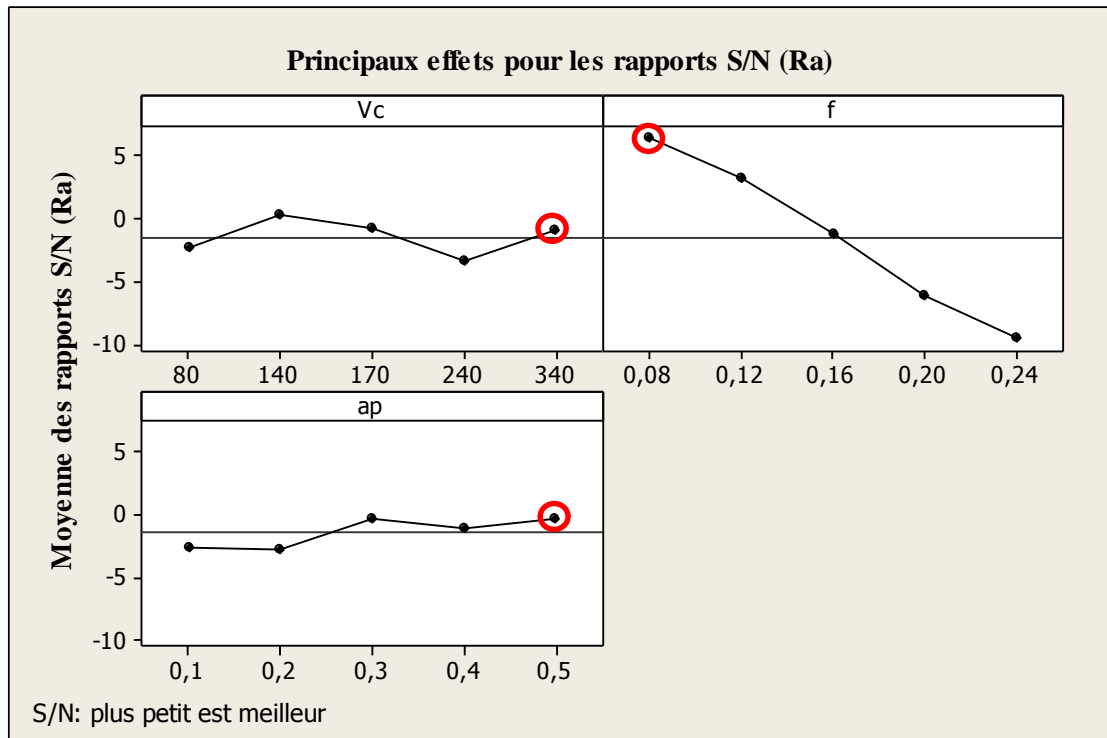
Les graphiques des rapports S/N pour les réponses sont présentés dans la **Figure III.19**. Ces graphiques montrent la variation du rapport S/N en fonction du changement des niveaux des facteurs de contrôle d'un niveau à un autre. Quelle que soit la catégorie de caractéristique de performance, la valeur maximale du rapport S/N correspondante à une meilleure performance selon la méthode de Taguchi. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres de processus de coupe est le niveau avec le plus grand rapport S/N qui apparaît dans le **tableau III.14 (a, b, c et d)** en rouge avec un style gras.

Les niveaux optimaux pour chaque facteur de contrôle peuvent être facilement déterminés à partir des graphiques de la **Figure III.19**. Tous les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence en cercles rouge sur la **Figure III.19**. D'après la **Figure III.19 (a)**, les conditions optimales pour une rugosité de surface minimale sont la combinaison des niveaux ($Vc5, f1, ap5$) : vitesse de coupe de 340 m/min, avance (f) de 0.08 mm/tr et profondeur de passe de 0.5 mm. Cela implique que, pour réduire la rugosité de la surface, il est recommandé de sélectionner la plus petite valeur de l'avance avec une grande vitesse de coupe et la profondeur de coupe.

La **Figure III.19 (b)** montre que le niveau optimal des paramètres de coupe afin de minimiser l'effort tangentiel (Fz) a été spécifié comme suit : $Vc5, f1, ap1$, en d'autres termes, une valeur optimale de Fz est obtenu à une vitesse de coupe de 340 m/min, l'avance de 0.08 mm/tr et profondeur de passe de 0.1 mm. Les mêmes niveaux ont été choisis par **Bouزيد et al [100]** et **Hessainia et al. [101]** pour minimiser l'effort tangentiel.

La **Figure III.19 (c)** montre que le niveau optimal des paramètres de coupe afin de minimiser la puissance de coupe (Pc) a été spécifié comme suit : $Vc1, f1, ap1$, en d'autres termes, une valeur optimale de Pc est obtenu à une vitesse de coupe de 80 m/min, l'avance de 0.08 mm/tr et profondeur de passe de 0.1 mm. Dans le travail de **Hanafi et al. [102]**, il est indiqué que la puissance de coupe est minimisée lorsque les plus petites valeurs de profondeur de coupe, de vitesse d'avance et de vitesse de coupe sont sélectionnées.

D'après la **Figure III.19 (d)** le régime optimal sélectionné par la méthode de Taguchi afin de maximiser le volume de copeau enlevé est donné comme suit ($Vc5, f5, ap5$) : vitesse de coupe de 340 m/min, l'avance de 0.24 mm/tr et profondeur de coupe de 0.5 mm.



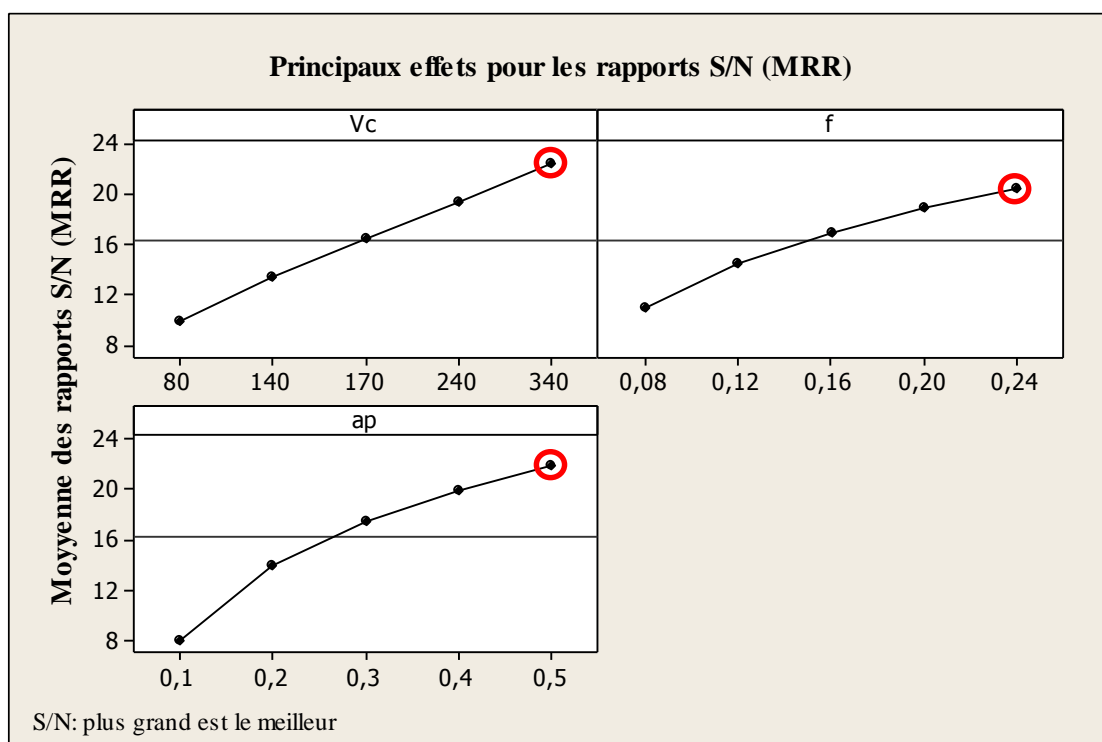
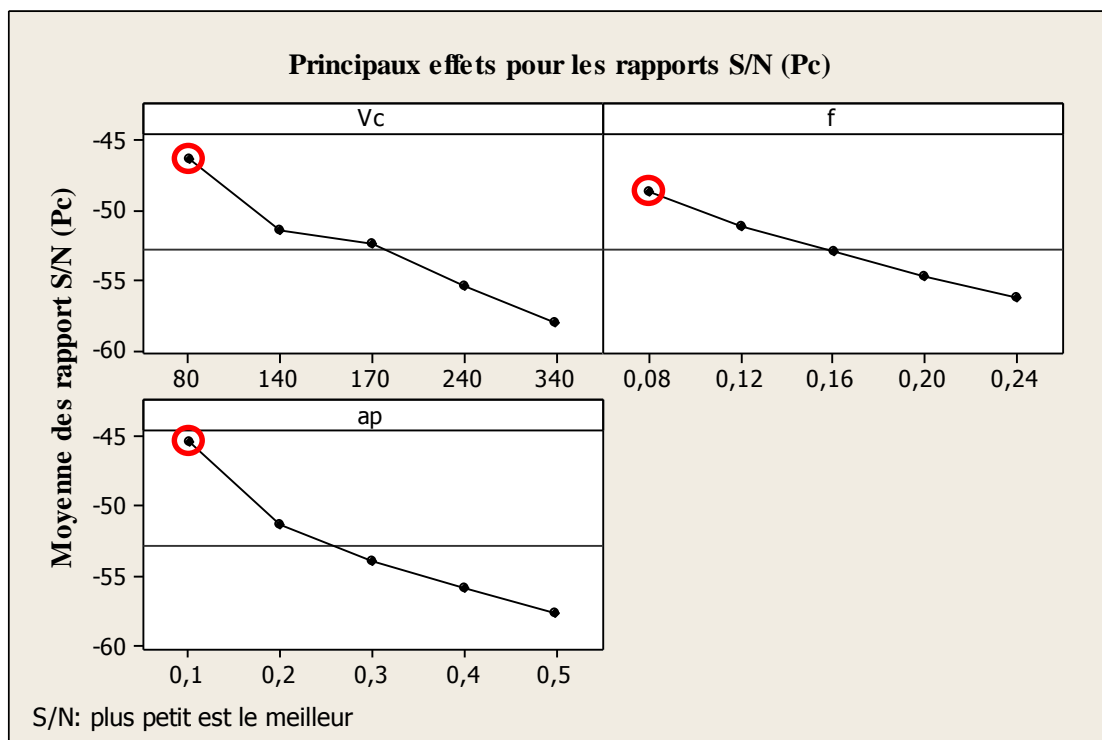


Figure III.19 : Effets principaux de S/N pour : (a) rugosité de surface, (b) effort tangentielle, (c) puissance de coupe (d) volume de copeau enlevé.

III.7. 1.2 Optimisation multi-objective des paramètres technologiques en utilisant la méthode de la fonction de désirabilité (FD)

Cette méthode est largement appliquée par les chercheurs [103-104], en raison de sa simplicité, de son efficacité et de sa disponibilité dans les logiciels statistiques, dans notre cas, le logiciel Design Expert 10.

La désirabilité permet d'évaluer, en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction à l'égard des objectifs fixés.

En recherchant un minimum ou un maximum, la désirabilité peut être calculée par les équations suivantes respectivement (III.28, III.29 et III.30).

$$Des(y) = \begin{cases} 0, & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low}\right)^w, & Low \leq y \leq Tar \\ 1, & y > Tar \end{cases} \quad (III.28)$$

$$Des(y) = \begin{cases} 1, & y < Tar \\ \left(\frac{Up - y}{Up - Tar}\right)^w, & Tar \leq y \leq Up \\ 0, & y > Up \end{cases} \quad (III.29)$$

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_i \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n Des_i\right)^{\frac{1}{n}} \quad (III.30)$$

Dans ce travail, quatre cas d'optimisation pouvant être rencontrés lors de l'usinage de pièces mécaniques ont été étudiés.

Le premier cas concerne la minimisation de la rugosité de surface en lui donnant l'importance maximale (*****), tout en maintenant le (*MRR*) à son faible niveau (*). Pour l'usinage de finition, ce cas est recherché afin d'obtenir une bonne qualité de surface.

Le deuxième cas, concerne la maximisation de (*MRR*) en lui donnant une importance maximale de (*****) et une faible importance à la rugosité de surface (*). Ce cas d'optimisation est préféré pour les opérations d'ébauche où une production maximale est souhaitée.

Le troisième cas d'optimisation donne la même importance aux deux paramètres de sortie (*Ra*) et (*MRR*) de (*****). Ce cas est choisi lors de la recherche d'un compromis entre une rugosité minimale (*Ra*) et en même temps un (*MRR*) maximale.

Le dernier cas d'optimisation est réservé à la minimisation de la force de coupe et de la puissance de coupe en même temps. Dans ce cas, une importance de (*****) est donnée aux deux paramètres de sortie (*Fz*) et (*Pc*). Ce cas est intéressant lorsque la consommation d'énergie est demandée.

Le **tableau III.16** résume les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, les poids et l'importance accordée à chaque paramètre pour les quatre cas d'optimisation.

Tableau III.16 : Objectifs et plages de paramètres pour différents cas d'optimisation.

Conditions	Unité	objectif	Limite inférieure	Limite supérieure	Poids inférieur	Haut Poids	Importance
V_c	m/min	dans l'intervalle	80	340	1	1	Selon le cas
f	mm/tr	dans l'intervalle	0.08	0.24	1	1	
ap	mm	dans l'intervalle	0.1	0.5	1	1	
Ra	μm	Minimiser	0.39	3.67	1	1	
F_z	N	Minimiser	40.18	441.59	1	1	
P_c	W	Minimiser	53.5733	1646.34	1	1	
MRR	cm^3/min	Maximisé	0.64	32.64	1	1	
Cas 1							
Ra	μm	Minimiser	0.39	3.67	1	1	*****
MRR	cm^3/min	Maximisé	0.64	32.64	1	1	*
Cas 2							
Ra	μm	Minimiser	0.39	3.67	1	1	*
MRR	cm^3/min	Maximisé	0.64	32.64	1	1	*****
Cas 3							
Ra	μm	Minimiser	0.39	3.67	1	1	*****
MRR	cm^3/min	Maximisé	0.64	32.64	1	1	*****
Cas 4							
F_z	N	Minimiser	40.18	441.59	1	1	*****
P_c	W	Minimiser	53.5733	1646.34	1	1	*****

Le **tableau III.17** résume les cinq premières solutions retenues pour les quatre cas d'optimisation. Pour le premier cas d'optimisation, les conditions de coupe optimales trouvées sont : $V_c = 340m/min$, $f = 0,105mm/tour$ et $ap = 0,5mm$. La rugosité prend une valeur minimale, $(Ra) = 0,390\mu m$, le $(MRR) = 17,829cm^3/min$ et la désirabilité = 0,902.

Pour le deuxième cas d'optimisation, le (MRR) est devenu le mieux pris en compte.

Les conditions de coupe optimales sont les suivantes : $V_c = 340m/min$, $f = 0,192mm/tour$ et $ap = 0,5mm$. Le (MRR) prend une valeur maximale, $(MRR) = 32,640cm^3/min$, la rugosité $(Ra) = 1,805\mu m$ et la désirabilité = 0,910.

Le troisième cas se concentre sur une optimisation combinée entre (Ra) et (MRR) . Les conditions de coupe optimales sont les suivantes : $V_c = 340m/min$, $f = 0,155mm/tour$ et $ap = 0,5mm$. La rugosité prend une valeur moyenne, $(Ra) = 1.208\mu m$, le $(MRR) = 26.389cm^3 / min$ et la désirabilité = 0.777.

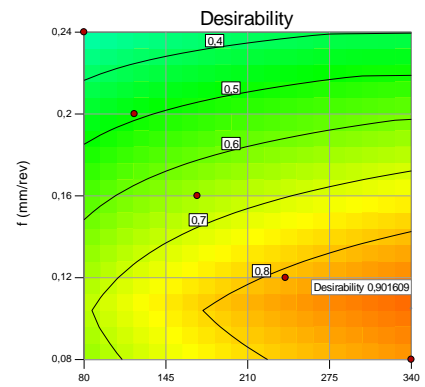
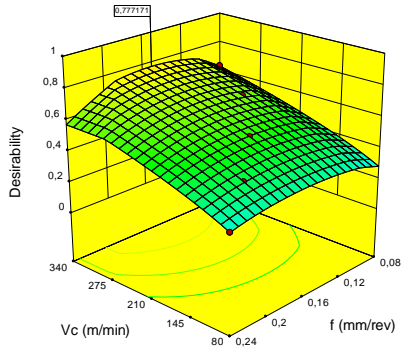
En ce qui concerne le dernier cas, les conditions de coupe optimales sont les suivantes : $V_c = 340\text{m/min}$, $f = 0,080\text{mm/tour}$ et $ap = 0,3\text{mm}$. La force de coupe (F_z) et (P_c) prennent des valeurs minimales, (F_z) = 45,710N, le (P_c) = 44,473W et la désirabilité = 0,993.

La **Figure III.20 (a-d)** montre la variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe pour les différents cas d'optimisation ainsi que les graphes de contour. La valeur de désirabilité la plus élevée est mentionnée pour quatre cas d'optimisation (a) R_a minimum (b) MRR maximum (c) compromis entre R_a et MRR (d) minimum F_z et P_c . Les **Figures III.21** et **III.22** montrent les diagrammes de rampe de désirabilité ainsi que des diagrammes à barres pour les quatre cas d'optimisation. En résumé, les solutions trouvées montrent qu'il n'y a pas un seul cas de conditions de coupe optimales, mais qu'il s'agit de rechercher à chaque fois des conditions de coupe correspondant à des besoins spécifiques en fonction du contexte industriel considéré.

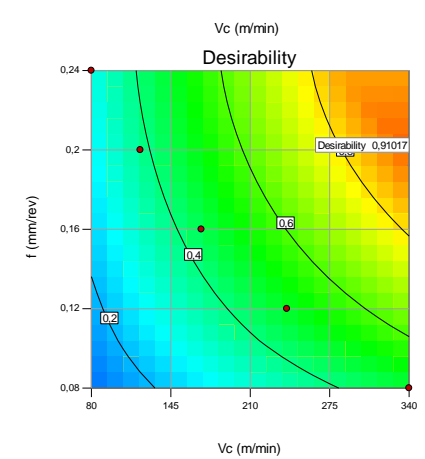
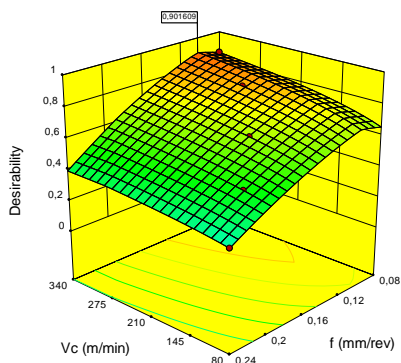
Tableau III. 17 : Résumé des solutions obtenues pour les quatre cas d'optimisation.

		Solutions						
	Numéro	V_c	f	ap	R_a	MRR	Désirabilité	
Cas 1	1	340	0.105	0.5	0.39	17.829	0.902	Sélectionner
	2	339.998	0.105	0.5	0.39	17.829	0.902	
	3	338.893	0.105	0.5	0.39	17.77	0.901	
	4	340	0.105	0.499	0.39	17.762	0.901	
	5	339.928	0.104	0.5	0.381	17.733	0.901	
Cas 2	1	340	0.192	0.5	1.805	32.64	0.91	Sélectionner
	2	338.936	0.193	0.5	1.815	32.64	0.909	
	3	339.99	0.193	0.5	1.815	32.746	0.909	
	4	339.998	0.193	0.498	1.817	32.64	0.909	
	5	340	0.193	0.496	1.831	32.64	0.908	
Cas 3	1	340	0.155	0.5	1.208	26.389	0.777	Sélectionner
	2	340	0.155	0.5	1.198	26.287	0.777	
	3	339.999	0.156	0.5	1.222	26.537	0.777	
	4	340	0.154	0.5	1.188	26.175	0.777	
	5	340	0.153	0.5	1.17	25.997	0.777	
	Numéro	V_c	f	ap	F_z	P_c	Désirabilité	
Cas 4	1	339.993	0.08	0.1	45.71	44.473	0.993	Sélectionner
	2	338.712	0.08	0.1	45.716	43.289	0.993	
	3	337.532	0.08	0.1	45.729	42.33	0.993	
	4	333.289	0.08	0.1	45.778	38.959	0.993	
	5	332.042	0.08	0.1	45.793	37.998	0.993	

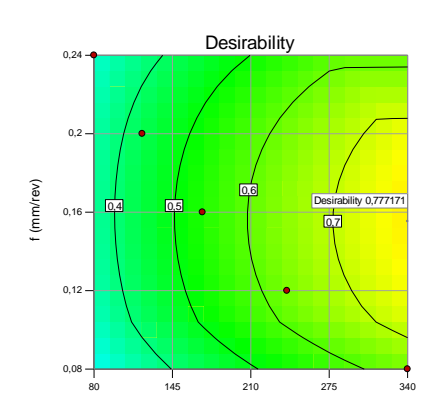
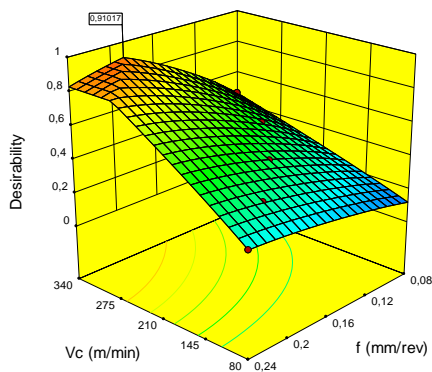
a-Cas 1



b-Cas 2



c-Cas 3



d-Cas 4

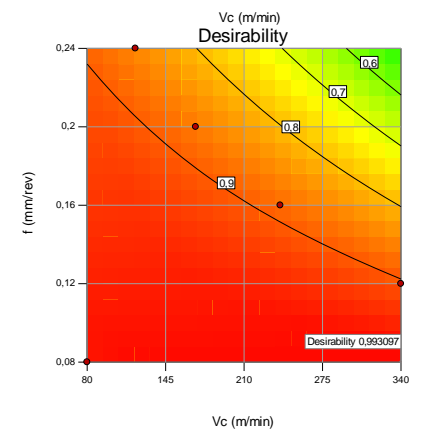
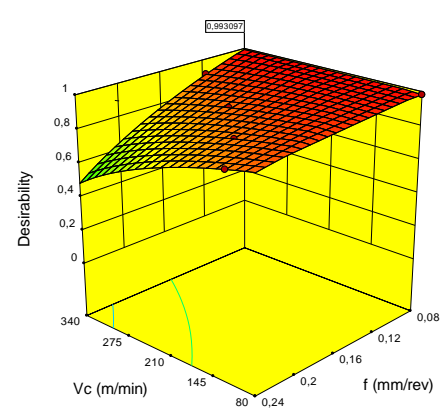


Figure III. 20 : Graphiques de désirabilité de quatre cas d'optimisation, (Diagramme de surface 3D et graphique de contour).

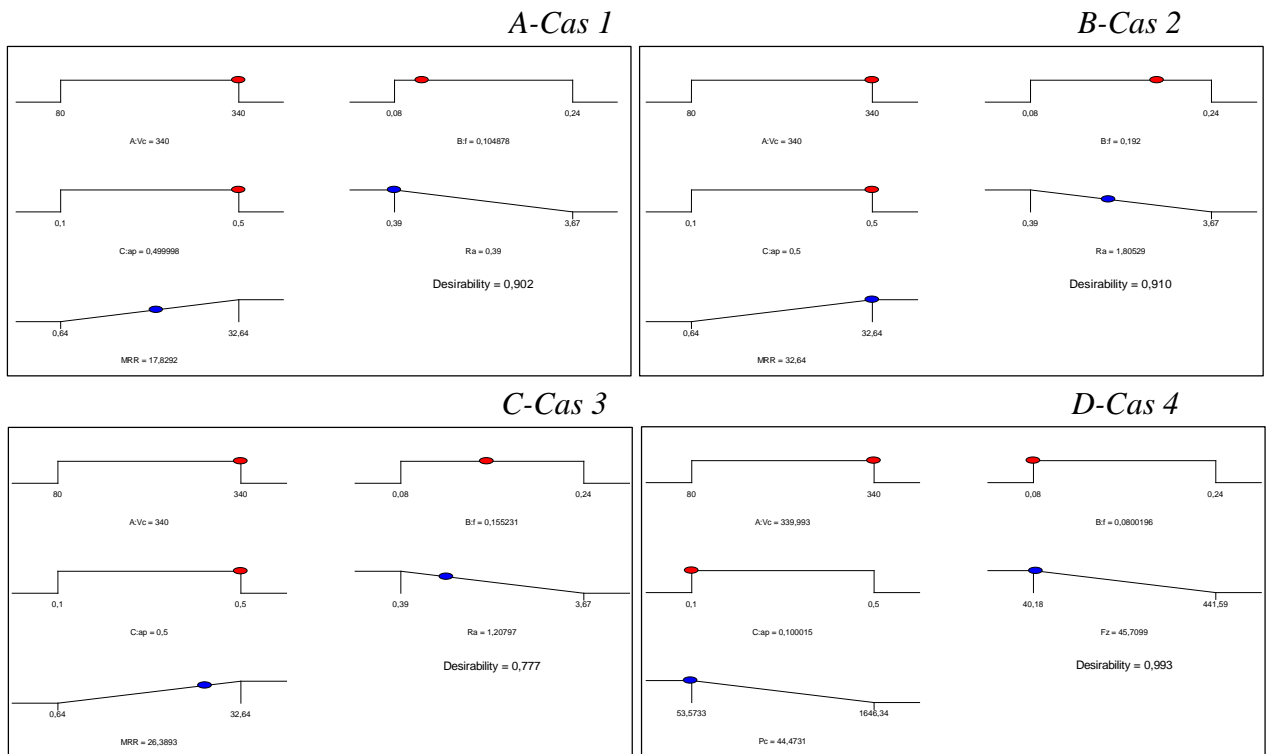


Figure III. 21 : Diagrammes de rampe de désirabilité pour les quatre cas d'optimisation.

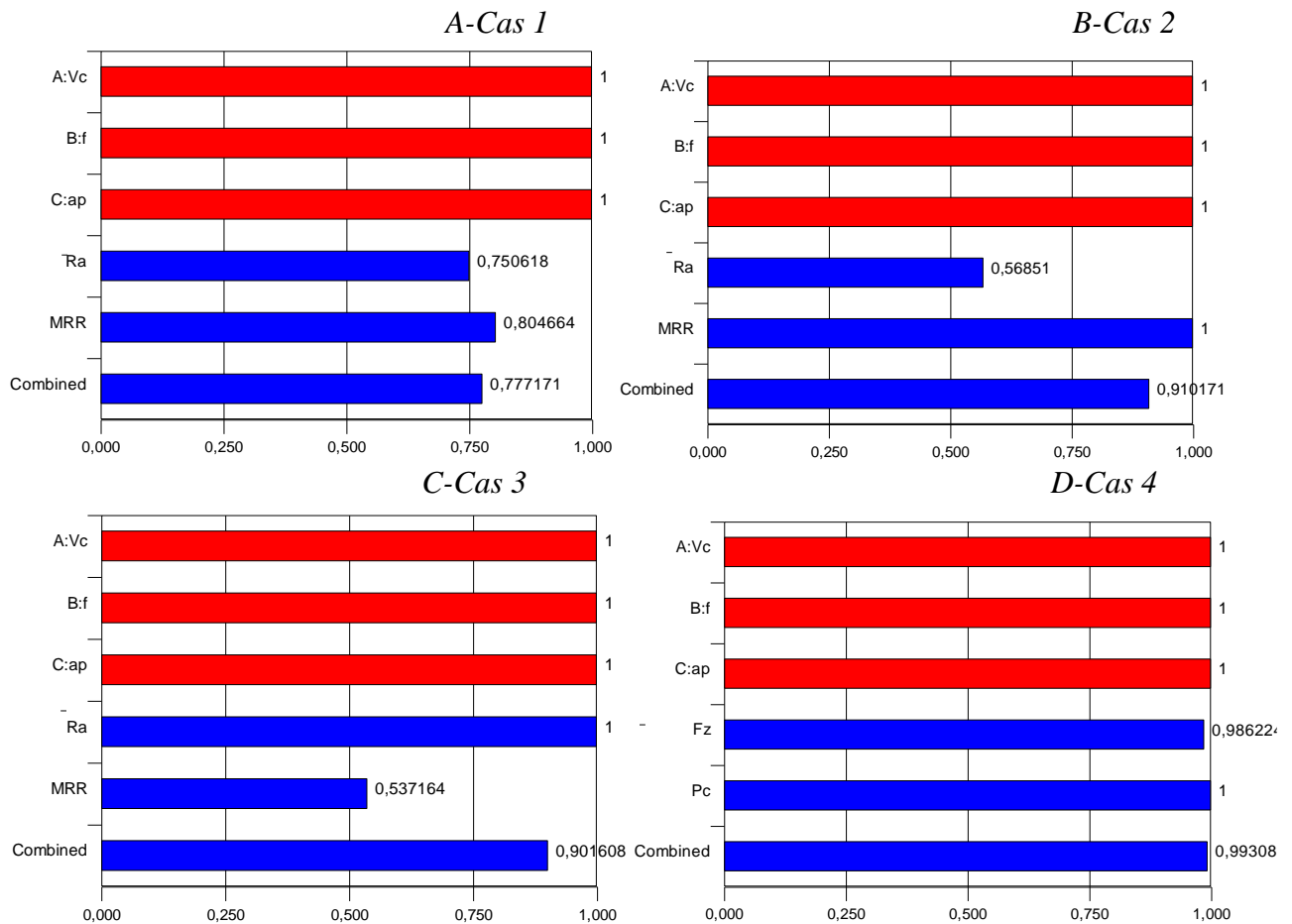


Figure III.22 : Graphe de bar de désirabilité pour les quatre cas d'optimisation.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de l'analyse de la variance ANOVA et l'analyse de régression en tournage dur de l'acier inoxydable AISI420 avec un outil de coupe en céramique revêtue a permis d'obtenir des modèles mathématiques des critères de rugosité (Ra , Rz , Rt), les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z), la puissance de coupe (P_c) et aussi le volume du copeau enlevé (MRR) en fonction des paramètres d'usinage (V_c , f et ap).

Les modèles sont exploités dans le but de faire deux optimisations mono et multi-objective des conditions de coupe en se basant sur les deux approches Taguchi et la fonction de désirabilité (DF), dont quatre cas d'optimisation ont été investigués : (a) minimum Ra (b) maximum MRR (c) compromis entre Ra and MRR (d) minimum F_z et P_c .

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DES PARAMÈTRES EN UTILISANT L'APPROCHE RNA ET COMPARAISON AVEC LA METHODE MSR

Ce chapitre, présente une étude des résultats d'une deuxième méthode de modélisation qui concerne les réseaux de neurones artificiels (RNA). Cette dernière est appliquée pour la modélisation non linéaire du processus de coupe en tournage dur de l'acier AISI 420. L'étude a été réalisée pour les paramètres technologiques d'usinage (R_a et F_z) en fonction de différents paramètres de régime de coupe (V_c , f et a_p) pour un plan de 25 essais. La fin du chapitre a été réservé à une comparaison entre la modélisation par la méthode de la surface de réponse MSR et la modélisation par RNA et cela dans le but de vérifier l'efficacité et la robustesse des deux méthodes.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, une deuxième méthode de modélisation a été développée afin de modéliser les paramètres de sortie. Cette méthode s'appelle l'approche des réseaux de neurones artificiels, elle a été appliquée sur les résultats d'un plan d'expérience de 25 essais (L_{25}). Ensuite, Les modèles mathématiques trouvés sont comparés aux les modèles mathématiques obtenus par la méthodologie de surface de réponse (MSR) afin de déterminer la capacité de prédiction et la précision des deux méthodes.

IV.2 Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Les vingt dernières années ont vu naître des applications basées sur une technologie appelée "réseaux de neurones artificiels". Ces applications couvrent de nombreux domaines tels que la reconnaissance de caractères, l'optimisation de tâches répétitives ou encore les prédictions financières. Le terme de "réseaux de neurones artificiels" décrit des familles d'algorithmes qui étaient à l'origine inspirés des réseaux de neurones humains, mais qui se sont ensuite éloignées des modèles du cerveau et rapprochées des méthodes statistiques.

Un réseau de neurones (**Figure IV.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 nœuds 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. Les neurones peuvent être organisés de différentes manières, c'est ce qui définit l'architecture et le modèle du réseau. L'architecture la plus courante est celle dite du perceptron multicouche. Avant de pouvoir utiliser les capacités de classification d'un réseau de neurones, il faut le construire. Ceci se déroule en quatre temps :

1. La construction de la structure du réseau (généralement empirique).
2. La constitution d'une base de données de vecteurs représentant au mieux le domaine à modéliser. Celle-ci est scindée en deux parties : une partie servant à l'apprentissage du réseau (on parle de base d'apprentissage) et une autre partie aux tests de cet apprentissage (on parle de base de test).
3. Le paramétrage du réseau par apprentissage. Au cours de l'apprentissage, les vecteurs de données de la base d'apprentissage sont présentés séquentiellement et plusieurs fois au réseau. Un algorithme d'apprentissage ajuste le poids du réseau afin que les vecteurs soient correctement appris. L'apprentissage se termine lorsque l'algorithme atteint un état stable.

4. La phase de reconnaissance qui consiste à présenter au réseau chacun des vecteurs de la base de test. La sortie correspondante est calculée en propageant les vecteurs à travers le réseau. La réponse du réseau est lue directement sur les unités de sortie et comparée à la réponse attendue. Une fois que le réseau présente des performances acceptables, il peut être utilisé pour répondre au besoin qui a été à l'origine de sa construction.

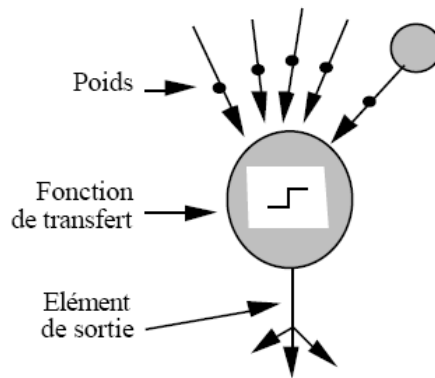


Figure IV.1 : Réseau de neurones artificiels.

IV.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 :

$$v_i = \alpha_{i,0} + \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_j \quad (\text{IV.1})$$

Où x_j est la $j^{\text{ème}}$ de n variables explicatives et $\alpha_{i,0}$ et α_{ij} 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 non-linéaire 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 :

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

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 recombinaées linéairement afin de calculer la valeur prédite par le réseau de neurones :

$$p(\vec{x}) = \beta_0 \sum_{i=1}^{n_h} \beta_i h_i \tag{IV.3}$$

où $p(\vec{x})$ est la valeur prédite par le réseau de neurones, n_h est le nombre d'unités cachées du réseau et β_0 et β_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 :

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

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

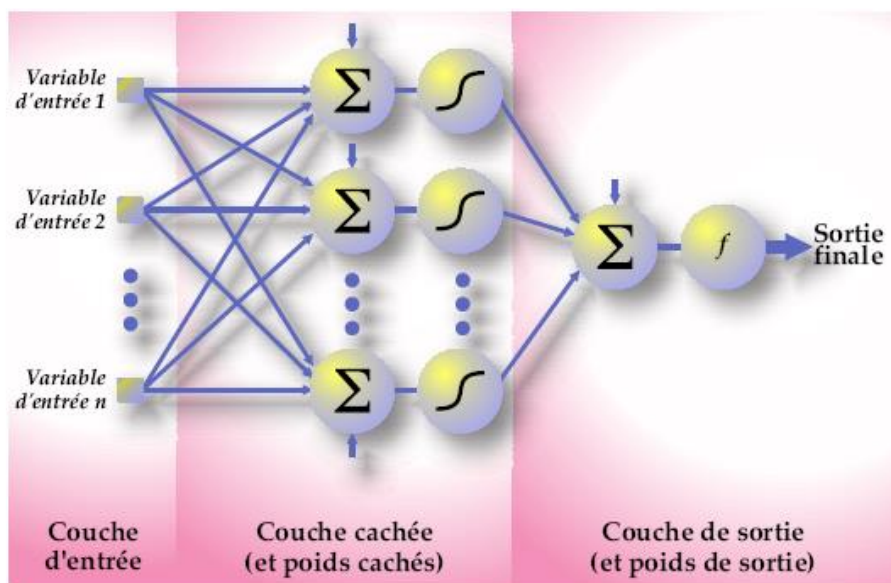


Figure IV.2 : Topologie d'un réseau de neurones.

IV.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" [105].

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 IV.3**.

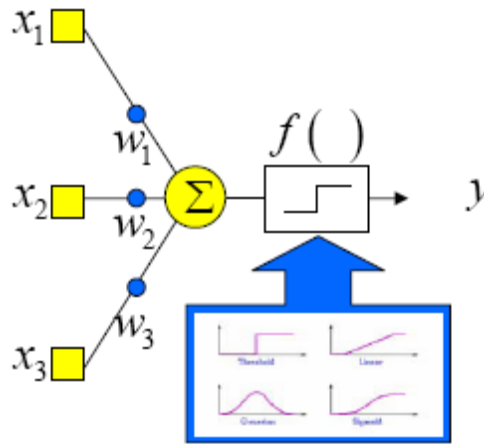


Figure IV.3 : Représentation d'un neurone formel. [106]

IV.2.3 Différentes fonctions de transfert

Les différents types de neurones se distinguent donc par la nature f de leur fonction de transfert (**Figure IV.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 [107].

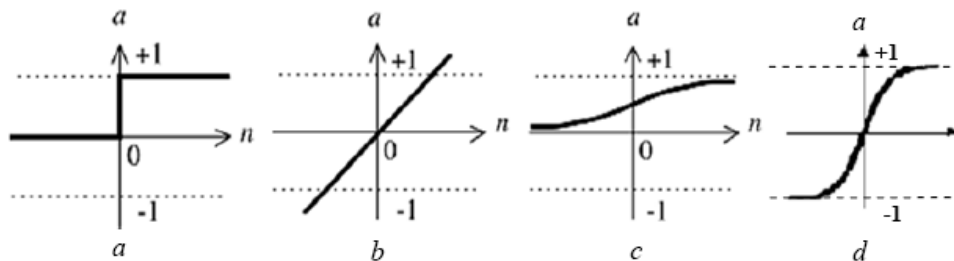


Figure IV.4 : Différentes fonction de transfert de réseau de neurones. [107]

IV.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 [108].

IV.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 [108].

IV.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 [108].

IV.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 IV.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.

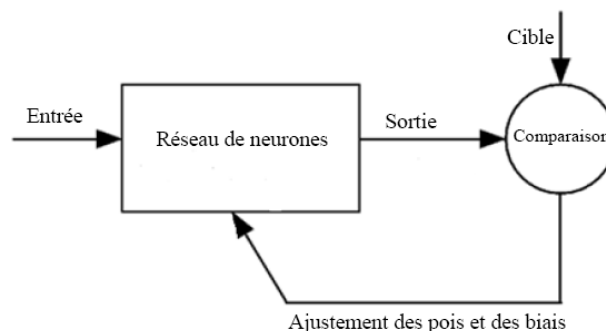


Figure IV.5 : *Processus d'apprentissage du réseau de neurones.*

IV.3 Modélisation par RNA

IV.3.1 Modélisation de la rugosité Ra et de la force Fz simultanément par RNA

Le **tableau IV.1** présente les différentes architectures testées pour sélectionner l'architecture optimale pour modéliser simultanément la rugosité de surface (Ra) et la force tangentielle (Fz) qui garantissent un minimum d'erreur quadratique moyenne (RMSE) et un coefficient de détermination (R^2) proche à l'unité.

Tableau IV.1 : Architectures RNA testées de modèles simultanés (Ra) et (Fz).

N° nœuds Entrée - sortie masqué e	N° de Test	Ra				Fz			
		Apprentissage		validation		Apprentissage		Validation	
		R ²	RMS E	R ²	RMS E	R ²	RMSE	R ²	RMSE
3_5_2	1	92.89	0.2745	96.24	0.1929	98.76	11.1481	92.78	18.8591
3_6_2	12	95.84	0.2099	99.71	0.0526	99.35	8.0685	97.76	10.4882
3_7_2	17	98.45	0.1195	87.63	0.4569	95.90	20.4898	98.19	10.0714
3_8_2	20	93.33	0.2744	91.12	0.0312	95.15	19.0714	99.17	12.1785
3_9_2	25	99.98	0.0132	99.99	0.0003	94.33	23.9194	85.79	26.4673
3_10_2	27	94.96	0.2368	99.98	0.0066	98.63	11.5136	98.85	8.774
3_11_2	30	99.91	0.0298	99.97	0.0146	95.52	21.256	98.08	9.7084
3_12_2	39	96.17	0.1950	94.80	0.2963	95.77	19.8015	99.63	1.8748
3_13_2	42	96.79	0.1787	99.03	0.1278	99.80	4.2671	99.29	2.5905
3_14_2	45	99.79	0.0436	99.83	0.0533	90.27	31.5803	96.08	14.8171

L'architecture appropriée pour ce modèle est 3-13-2 (**Figure IV.6**), c'est-à-dire les nœuds d'entrée de l'arbre (paramètres de coupe), treize nœuds dans la couche cachée et deux nœuds pour la sortie (rugosité de surface et force tangentielle).

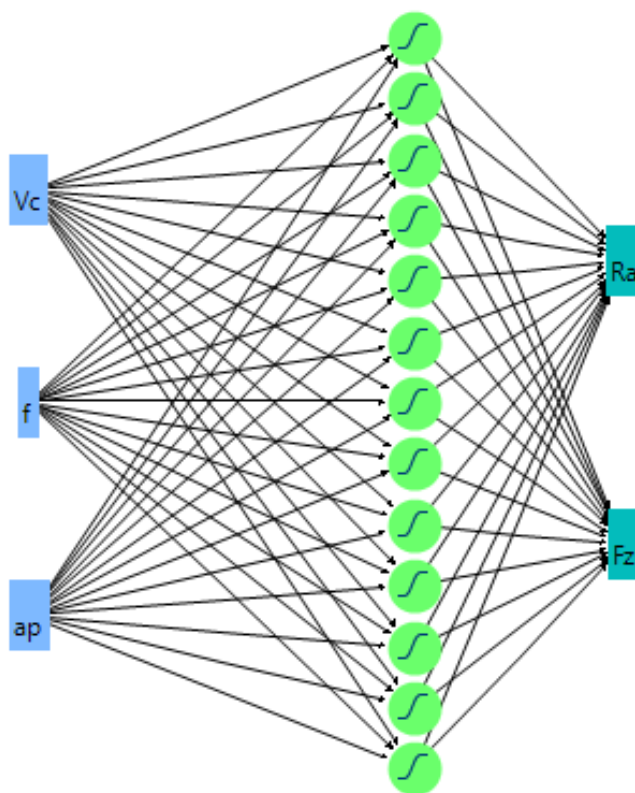


Figure IV.6 : Structure RNA (3-13-2) pour (Ra) et (Fz) simultanément.

Le **tableau IV.2** montre le coefficient de détermination (R^2), les valeurs moyennes carrées de l'erreur quadratique (RMSE) et le nombre de tests d'apprentissage et de validation. Pour cette architecture (3-13-2), vingt-trois (23) tests sont réservés à l'apprentissage et deux (02) tests pour validation.

Tableau IV.2 : R^2 et RMSE du modèle de (Ra) et (Fz) simultanément.

Entraînement		Validation		Entraînement		Validation	
Ra		Ra		Fz		Fz	
R^2	0.9679	R^2	0.9903	R^2	0.9980	R^2	0.9929
(RMSE)	0.1787	(RMSE)	0.1287	(RMSE)	4.2671	(RMSE)	2.5905
Somme	23	Somme	2	Somme	23	Somme	2
fréquence		fréquence		fréquence		fréquence	

Les équations (IV.5) et (IV.6) présentent le modèle mathématique obtenu par la méthode des réseaux de neurones pour la rugosité (Ra) et la force tangentielle (Fz).

$$Ra = -0.336 * H_1 - 5.189 * H_2 + 1.425 * H_3 + 0.639 * H_4 + 15.231 * H_5 - 3.279 * H_6 - 7.935 * H_7 + 11.286 * H_8 - 27.035 * H_9 - 3.181 * H_{10} + 0.541 * H_{11} + 6.61 * H_{12} + 5.909 * H_{13} + 3.678 \quad (IV.5)$$

$$Fz = 95.331 * H_1 + 3074.515 * H_2 - 98.055 * H_3 + 1653.325 * H_4 + 2187.495 * H_5 + 156.335 * H_6 - 3227.1 * H_7 + 2149.657 * H_8 - 6875.738 * H_9 - 361.799 * H_{10} + 102.298 * H_{11} + 393.73 * H_{12} + 222.789 * H_{13} + 2141 \quad (IV.6)$$

où : H_1 à H_{13} présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée.

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= \tanh(5 * (0.001 * Vc + 5.033 * f + 15.071 * ap - 4.26)) \\ H_2 &= \tanh(5 * (-0.005 * Vc + 13.687 * f + 2.086 * ap - 1.638)) \\ H_3 &= \tanh(5 * (-0.015 * Vc - 21.521 * f - 5.121 * ap + 8.757)) \\ H_4 &= \tanh(5 * (0.005 * Vc - 18.151 * f - 5.095 * ap + 3.005)) \\ H_5 &= \tanh(5 * (-0.002 * Vc + 20.634 * f - 1.557 * ap + 0.122)) \\ H_6 &= \tanh(5 * (-0.0009 * Vc - 36.327 * f - 3.279 * ap + 8.446)) \\ H_7 &= \tanh(5 * (-0.005 * Vc - 1.614 * f + 1.896 * ap + 1.741)) \\ H_8 &= \tanh(5 * (0.0008 * Vc + 19.514 * f - 2.746 * ap - 3.174)) \\ H_9 &= \tanh(5 * (0.0005 * Vc + 10.916 * f - 1.166 * ap - 0.969)) \\ H_{10} &= \tanh(5 * (-0.008 * Vc - 29.275 * f - 6.761 * ap + 7.339)) \\ H_{11} &= \tanh(5 * (-0.0007 * Vc - 21.901 * f + 12.182 * ap - 2.004)) \\ H_{12} &= \tanh(5 * (-0.01 * Vc - 25.081 * f + 20.497 * ap + 0.824)) \\ H_{13} &= \tanh(5 * (-0.0007 * Vc + 20.244 * f - 12.302 * ap - 0.0351)) \end{aligned} \right\} \quad (IV.7)$$

La **Figure IV.7** montre le graphe des valeurs observées en fonction des valeurs attendues dans les deux cas (apprentissage et validation) pour la rugosité (Ra) et la force (Fz). Il est bien observé que la plupart des points sont proches de la ligne médiane, ce qui implique que le modèle mathématique est adéquat. Les coefficients de corrélation pour (Ra) et (Fz) (apprentissage/validation) sont $R^2 = 99,79\% / 99,03\%$; $99,80\% / 99,29\%$ respectivement.

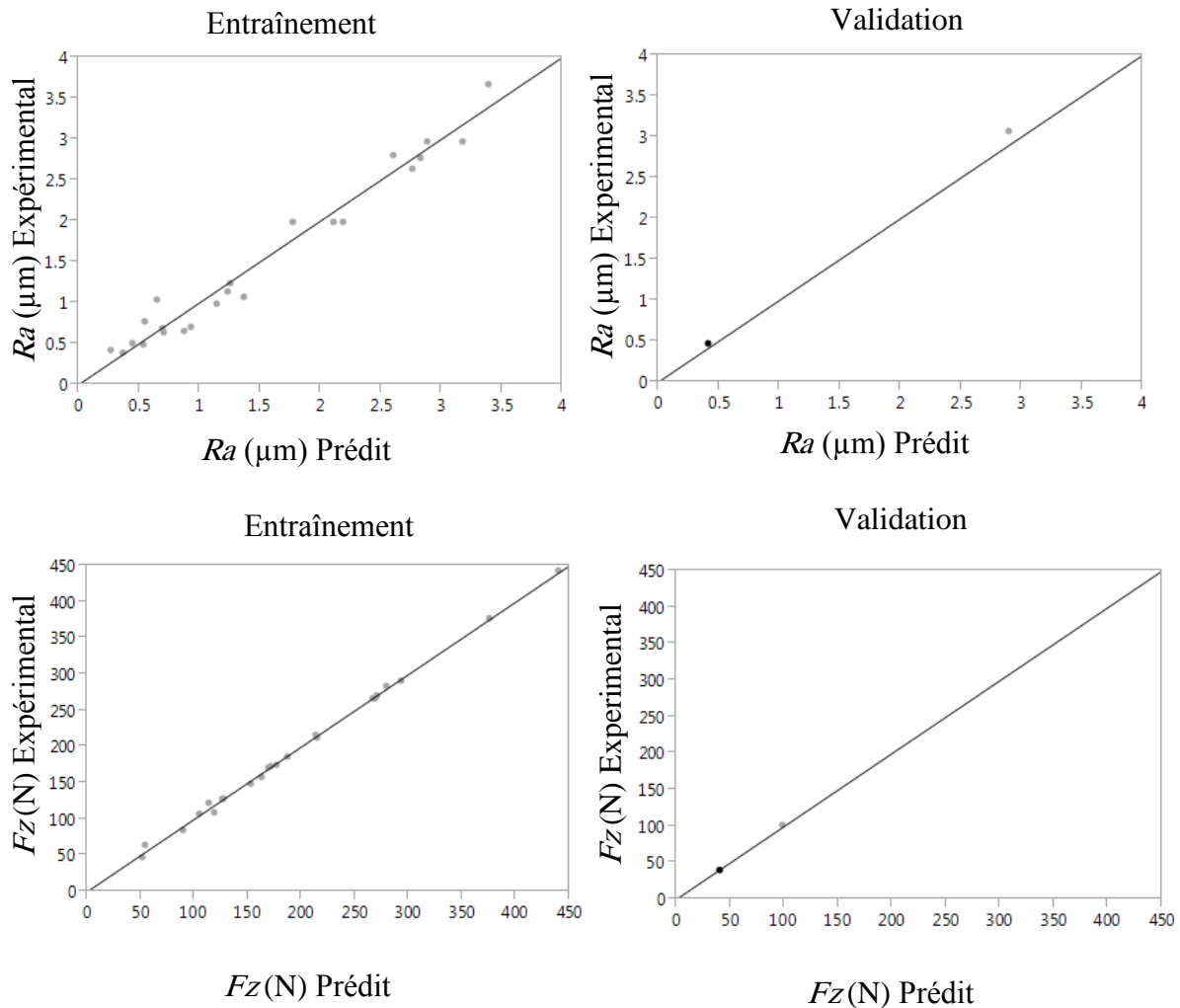


Figure IV.7 : Valeurs expérimentales par rapport aux valeurs prévues pour (Ra) et (Fz) simultanément.

IV.3.2 Modélisation de Ra et Fz séparément par RNA

Après avoir testé une architecture, qui a modélisé (Ra et Fz) ensemble, nous avons essayé de proposer d'autres architectures pour modéliser séparément (Ra) et (Fz) et comparer la précision des modèles obtenus.

IV.3.2.1 Modélisation de la rugosité Ra

Le **tableau IV.3** illustre les différentes architectures testées pour sélectionner l'architecture optimale afin de garantir une erreur quadratique moyenne (RMSE) minimale et un coefficient de détermination (R^2) proche à l'unité.

Tableau IV.3 : Architectures RNA testées pour le modèle (Ra).

N° nœuds Entrée - sortie masquée	Numéro de Teste	Apprentissage		Validation	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
3_5_1	4	99.86	0.0372	99.99	0.001
3_6_1	8	99.97	0.0141	99.96	0.0222
3_7_1	11	99.97	0.0174	99.85	0.0381
3_8_1	15	98.41	0.1296	99.66	0.0583
3_9_1	17	99.99	0.01	99.97	0.0145
3_10_1	21	99.85	0.0395	99.75	0.0445

L'architecture appropriée pour modéliser la rugosité de surface (Ra) est 3-9-1 (**Figure IV.8**), c'est-à-dire les nœuds d'entrée de l'arbre (paramètres de coupe), neuf nœuds dans la couche cachée et un nœud pour la sortie (rugosité de surface).

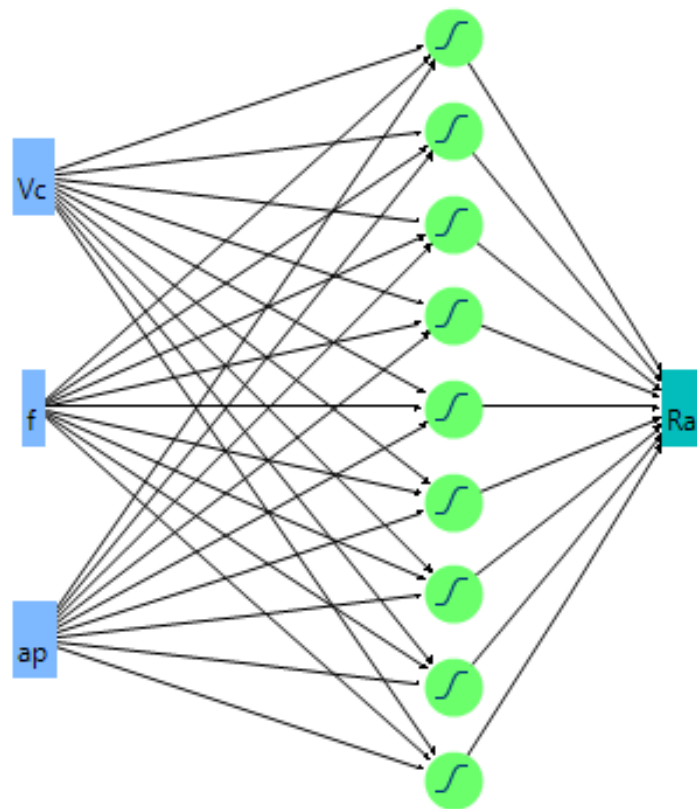


Figure IV.8 : Structure RNA (3-9-1) pour (Ra).

Le **tableau IV.4** montre le coefficient de détermination (R^2), les valeurs moyennes carrées de l'erreur quadratique (RMSE) et le nombre de tests d'apprentissage et de validation. Pour cette architecture (3-9-1), vingt-deux (22) tests sont réservés à l'apprentissage et trois (03) tests de validation.

Tableau IV.4 : R^2 et RMSE du modèle de rugosité de surface Ra .

Entraînement		Validation	
$Ra (\mu m)$		$Ra (\mu m)$	
R^2	99.99	R^2	99.97
(RMSE)	0.01	(RMSE)	0.0145
Somme	22	Somme	3
fréquence		fréquence	

L'équation (IV.8) présente le modèle mathématique obtenu par la méthode des réseaux de neurones pour la rugosité de surface (Ra). La somme des sorties des neuf neurones de la couche cachée multipliée par une fonction de transfert linéaire nous donne le modèle de la rugosité de surface (Ra).

$$Ra = 4.073 * H_1 - 6.69 * H_2 - 0.595 * H_3 - 0.3 * H_4 + 5.12 * H_5 - 5.398 * H_6 - 5.173 * H_7 + 0.682 * H_8 + 4.216 * H_9 + 1.788 \quad (IV.8)$$

Où : H_1 à H_9 présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée.

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= \tanh(5 * (0.027 * Vc + 32.955 * f + 9.936 * ap - 12.232)); \\ H_2 &= \tanh(5 * (-0.0264 * Vc - 1.263 * f - 6.952 * ap + 7.069)); \\ H_3 &= \tanh(5 * (-0.003 * Vc + 50.503 * f + 7.673 * ap - 9.837)); \\ H_4 &= \tanh(5 * (0.015 * Vc + 1.498 * f - 0.492 * ap - 2.752)); \\ H_5 &= \tanh(5 * (-0.03 * Vc - 19.19 * f - 1.71 * ap + 8.344)); \\ H_6 &= \tanh(5 * (-0.006 * Vc - 37.684 * f + 4.307 * ap + 7.241)); \\ H_7 &= \tanh(5 * (0.025 * Vc + 7.602 * f + 13.418 * ap - 9.483)); \\ H_8 &= \tanh(5 * (-0.004 * Vc + 13.002 * f + 4.879 * ap - 2.831)); \\ H_9 &= \tanh(5 * (-0.01 * Vc - 24.155 * f + 2.096 * ap + 6.588)); \end{aligned} \right\} \quad (IV.9)$$

La **Figure IV.9** montre le graphe des valeurs observées et prédites dans les deux cas (apprentissage et validation). Les points d'intersection entre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées de la rugosité de surface (Ra) sont très proches de la ligne médiane pour les deux cas (apprentissage et validation), cela implique que le modèle mathématique du (Ra) est adéquat. Les coefficients de corrélation pour Ra (apprentissage $R^2 = 99,99\%$ et validation $R^2 = 99,97\%$), cela montre la précision et la robustesse du modèle RNA.

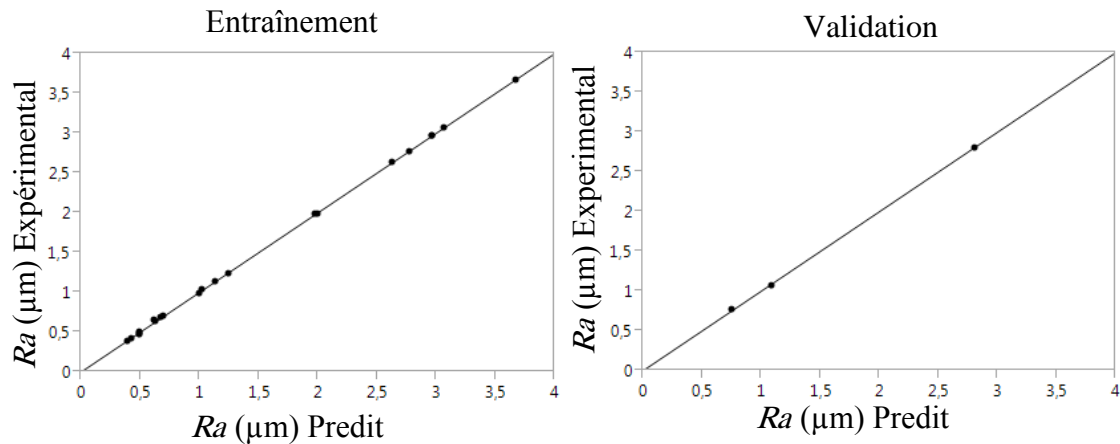


Figure IV.9 : Valeurs expérimentales par rapport aux valeurs prévues pour (Ra).

IV.3.2.2 Modélisation de la force tangentielle Fz

De la même manière, les mêmes étapes sont suivies pour trouver le modèle RNA pour (Fz). Les architectures testées sont présentées dans le **tableau IV.5**. Selon la plus grande valeur de (R^2) et la plus petite valeur de (RMSE), la structure 3-10-1 est adoptée ; elle est illustrée à la **Figure IV.10**. Pour cette architecture, vingt-deux (22) tests sont réservés à l'apprentissage et trois (03) tests de validation Tableau 6.

Tableau IV. 5 : Architectures RNA testées pour le modèle (Fz).

N° nœuds Entrée - sortie masquée	Numéro de teste	Apprentissage		Validation	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE
3_6_1	4	98.77	9.2904	99.45	12.3512
3_7_1	5	99.78	4.6795	99.88	0.5329
3_8_1	9	99.87	3.6102	98.15	10.9082
3_9_1	15	99.26	8.5263	99.59	5.7963
3_10_1	16	99.97	1.0971	99.95	1.7942
3_11_1	19	91.31	5.9847	99.97	1.9205
3_12_1	28	99.77	4.6407	99.82	3.5007

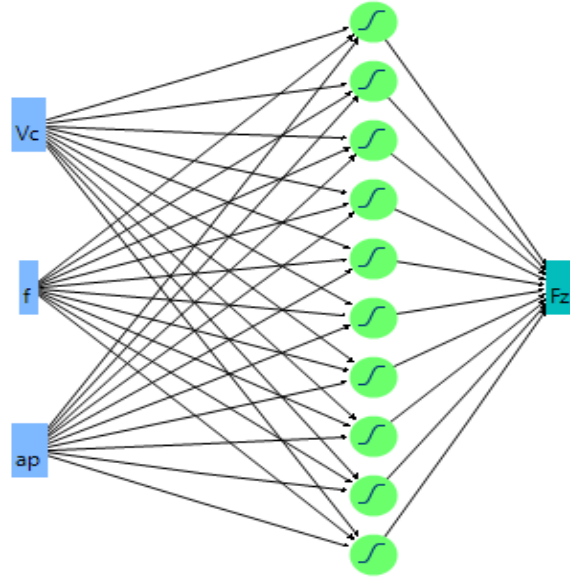


Figure IV.10 : Structure RNA (3-10-1) pour (Fz).

Tableau IV.6 : R² et RMSE pour le modèle (Fz).

Apprentissage		Validation	
Fz (N)		Fz (N)	
R ²	0.9997	R ²	0.9995
(RMSE)	1.0971	(RMSE)	0.7942
Somme fréquences	22	Somme fréquences	3

Le modèle RNA pour l'effort tangentiel (Fz) est présentée comme suit :

$$F_z = -303.449 * H_1 - 208.662 * H_2 + 411.782 * H_3 - 120.704 * H_4 + 17.753 * H_5 - 110.356 * H_6 - 251.274 * H_7 + 122.958 * H_8 + 147.457 * H_9 + 97.357 * H_{10} + 227.342 \quad (IV.10)$$

où : H1 à H10 présentent les sorties de chaque neurone de la couche cachée.

$$\begin{aligned}
 H_1 &= \tanh(5 * (-0.006 * V_c + 38.704 * f + 12.485 * a_p - 8.813)) \\
 H_2 &= \tanh(5 * (-0.005 * V_c - 37.295 * f - 8.878 * a_p + 8.675)) \\
 H_3 &= \tanh(5 * (0.015 * V_c + 12.672 * f - 5.194 * a_p - 3.737)) \\
 H_4 &= \tanh(5 * (0.01 * V_c - 23.835 * f - 11.593 * a_p + 6.775)) \\
 H_5 &= \tanh(5 * (-0.01 * V_c - 24.81 * f - 1.921 * a_p + 7.244)) \\
 H_6 &= \tanh(5 * (0.0004 * V_c - 3.762 * f + 5.276 * a_p - 1.878)) \\
 H_7 &= \tanh(5 * (0.011 * V_c + 10.109 * f - 2.927 * a_p - 2.507)) \\
 H_8 &= \tanh(5 * (-0.016 * V_c + 36.53 * f + 10.107 * a_p - 6.009)) \\
 H_9 &= \tanh(5 * (-0.0006 * V_c - 46.062 * f + 9.518 * a_p + 2.913)) \\
 H_{10} &= \tanh(5 * (0.0005 * V_c - 23.868 * f + 19.999 * a_p + 0.772))
 \end{aligned} \quad (IV.11)$$

La **Figure IV.11** illustre le tracé des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prévues correspondantes. Il est clair que la majorité des points d'intersection sont proches de la ligne médiane. Les coefficients de corrélation pour Fz (apprentissage/validation) sont : $R^2 = 99,97\%$ / $99,95\%$, ce qui confirme la robustesse de la technique de la modélisation RNA.

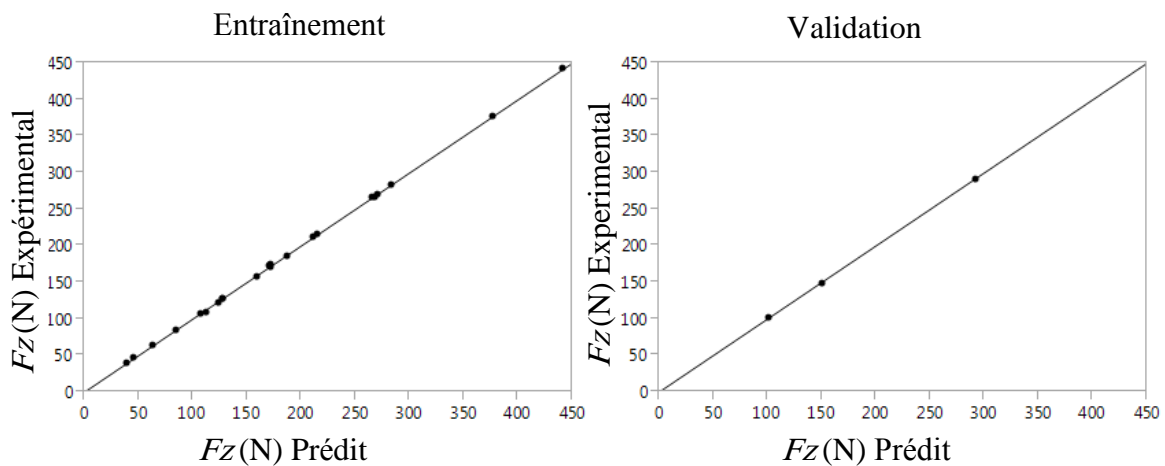


Figure IV.11 : Valeurs expérimentales par rapport aux valeurs prévues pour (Fz).

L'analyse des résultats des deux architectures pour la modélisation de (Ra et Fz) ensemble et séparément montre que les architectures séparées (R^2) sont meilleures que celles de l'architecture ensemble, ce qui nous permet d'avoir des modèles plus précis avec une exécution rapide.

IV.4 Comparaison des résultats expérimentaux et des modèles estimés de rugosité de surface Ra et de la force tangentielle Fz par le MSR et RNA

La comparaison entre les valeurs expérimentales de la rugosité de surface (Ra) et de la force tangentielle (Fz) et celles prévues par les modèles (RNA et MSR) pour les essais de conception Taguchi (L_{25}) est présentée dans le **tableau IV.7** et graphiquement dans les **Figures IV.12 et IV.13**. On a constaté que l'erreur entre le modèle RNA et les résultats expérimentaux se situe entre 0,01 à 5,62 % pour (Ra) et 0,02 à 3,99 % pour (Fz), ce qui est nettement inférieur aux erreurs données par le modèle MSR (3,85 à 67,09 % pour (Ra) et 0,19 à 20,58 % pour (Fz)). Par conséquent, le modèle RNA peut être utilisée pour prédire la rugosité de la surface et la force tangentielle de coupe pendant l'usinage de l'acier trempé martensitique à l'aide d'un outil en céramique revêtu.

Tableau IV.7 : Comparaison des résultats expérimentaux et estimés par MSR et RNA.

N° de teste	Rugosité de Surface (Ra)					Force Tangentiel (Fz)				
	Ra (μm) Exp.	Prédit (RNA)	Prédit. (MSR)	% erreur (RNA)	% erreur (MSR)	Fz (N) Exp.	Prédit (RNA)	Prédit (MSR)	% erreur (RNA)	% erreur (MSR)
1	0.47	0,50	0.50	5,62	6,38	40,18	39,48	45,69	1,74	13,71
2	0.76	0,75	0.88	0,79	15,79	108,46	112,79	109,11	3,99	0,60
3	1.14	1,14	1.4	0,28	22,81	173,94	171,72	195,25	1,28	12,25
4	3.07	3,07	2.05	0,05	33,22	283,52	283,34	304,11	0,06	7,26
5	2.96	2,96	2.83	0,04	4,39	441,59	441,71	435,68	0,03	1,34
6	0.65	0,62	0.42	4,21	35,38	106,62	107,29	84,68	0,63	20,58
7	0.49	0,50	0.73	1,45	48,98	172,68	170,17	153,6	1,45	11,05
8	0.7	0,70	1.17	0,20	67,14	269,76	270,83	245,24	0,40	9,09
9	1.07	1,09	1.75	1,86	63,55	377,18	377,11	359,59	0,02	4,66
10	3.67	3,67	3.40	0,02	7,36	121,15	123,38	112,85	1,84	6,85
11	0.42	0,42	0.36	0,56	14,29	101,87	100,53	116,77	1,32	14,63
12	0.63	0,63	0.59	0,05	6,35	186,38	186,83	190,51	0,24	2,22
13	1.03	1,02	0.96	1,05	6,80	267,14	264,99	286,97	0,80	7,42
14	1.98	1,98	2.40	0,02	21,21	84,72	85,21	85,52	0,58	0,94
15	2.97	2,97	3.30	0,01	11,11	170,59	171,4	186,42	0,47	9,28
16	0.5	0,50	0.42	0,03	16,00	128,24	128,13	139,23	0,09	8,57
17	0.99	1,00	0.56	1,28	43,43	216,03	215,1	216,44	0,43	0,19
18	1.99	2,00	1.58	0,26	20,60	63,99	62,66	65,6	2,08	2,52
19	2.8	2,81	2.25	0,51	19,64	147,94	150,37	147,26	1,64	0,46
20	2.64	2,63	3.07	0,50	16,29	266,72	267,43	251,63	0,27	5,66
21	0.39	0,39	0.62	0,17	58,97	158	158,79	149,23	0,50	5,55
22	0.68	0,67	0.89	0,96	30,88	47,45	46,07	57	2,91	20,13
23	1.24	1,24	1.33	0,26	7,26	126,68	127,1	117,38	0,33	7,34
24	1.98	1,98	1.9	0,15	4,04	211,15	210,68	200,48	0,22	5,05
25	2.76	2,77	2.61	0,48	5,43	290,53	291,93	306,29	0,48	5,42

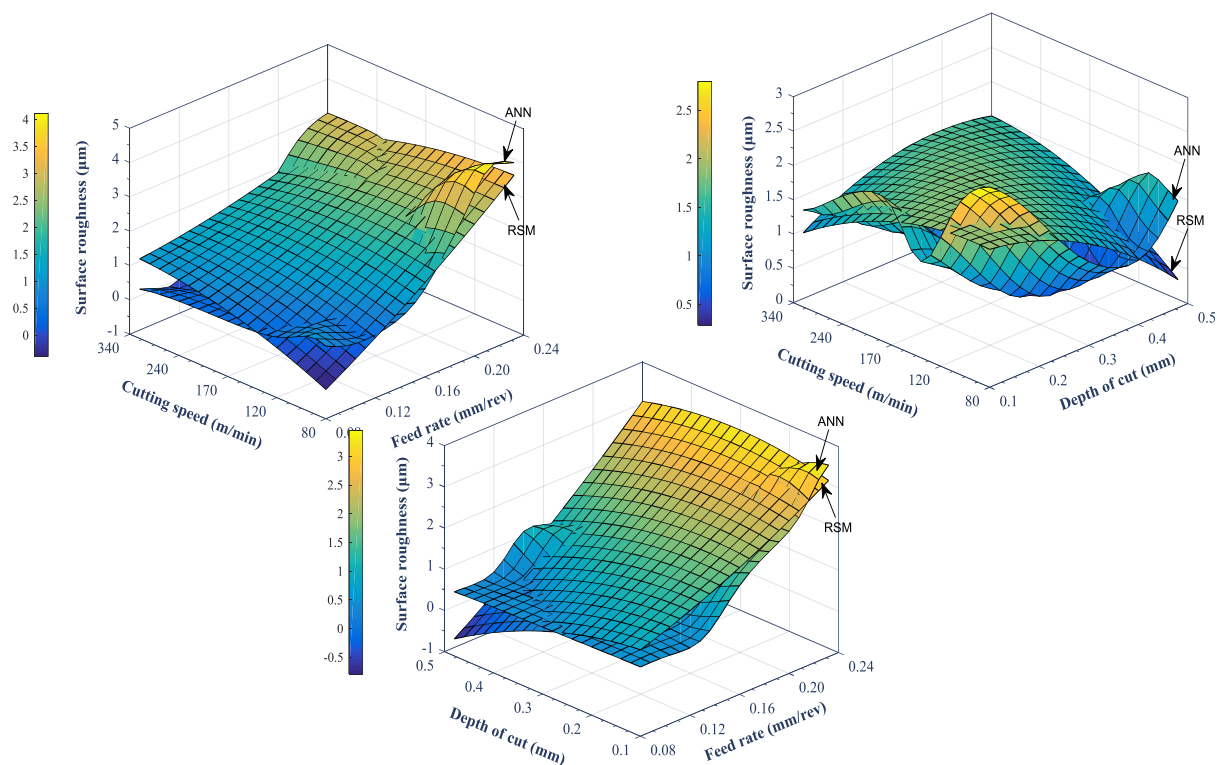


Figure IV.12 : Surface de réponse 3D des modèles RNA-MSR pour (R_a).

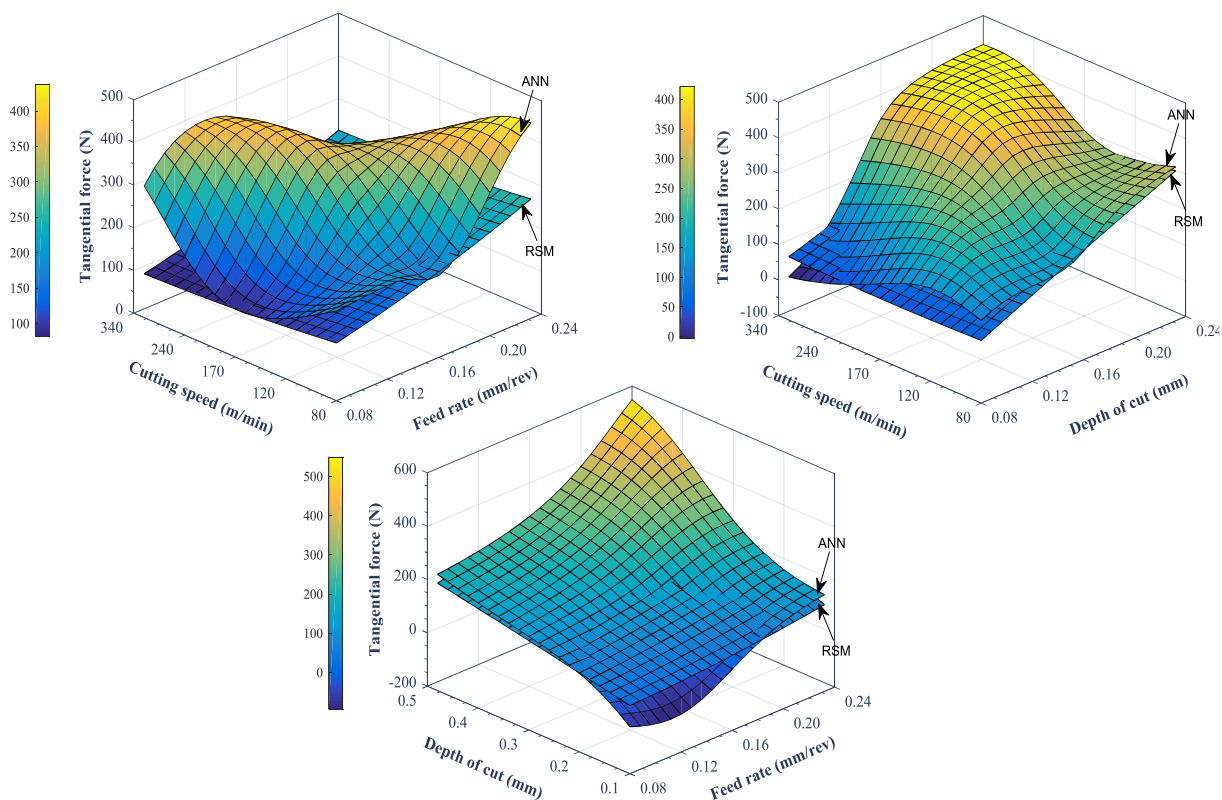


Figure IV.13 : Surface de réponse 3D des modèles RNA-MSR pour (F_z).

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de l'approche des réseaux de neurones (RNA) en tournage de l'acier inoxydable martensitique AISI 420 avec la céramique revêtue (CC6050) a permis d'obtenir à la fois des modèles mathématiques pour la rugosité (Ra), l'effort de coupe tangentiel (Fz), en fonction des paramètres de coupe. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- Les modèles mathématiques obtenus sont en accord avec les résultats expérimentaux. Ces modèles représentent un intérêt industriel important pour les entreprises de fabrication mécanique. Il a été constaté que les modèles RNA et MSR trouvés nous permettent de prédire les paramètres technologiques de l'usinage pour le couple CC6050 / AISI 420, ce qui représente un gain de temps et de matériaux significatif car les essais ne seront plus répétés.
- L'analyse des résultats des deux architectures pour la modélisation de (Ra et Fz) ensemble et séparément montre que les architectures séparées (R^2) sont meilleures que celles de l'architecture ensemble, ce qui nous permet d'avoir des modèles plus précis.
- La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux estimés par les modèles MSR et RNA montre clairement que les modèles RNA sont plus précis et donnent d'excellents résultats, (R^2) = 99,98 % pour (Ra) et (R^2) = 99,96 % pour (Fz) par rapport aux modèles résultant de la méthode MSR, (R^2) = 87,31 % pour (Ra) et (R^2) = 98,03 % pour (Fz). Par contre, selon l'ANOVA, la méthode MSR permet de quantifier l'effet des paramètres (Vc , ap et f) sur les paramètres technologiques (Ra , Rz , Rt , Rt , Fx , Fy , Fy et Fz).
- L'application de la technique (RNA) sur un plan factoriel complet d'expériences est capable de donner des résultats très satisfaisants. Les modèles obtenus ont été testés par une partie du plan expérimental qui n'a été pas introduite lors de l'apprentissage du réseau.

Conclusion générale

Le choix des conditions de coupe les plus convenables nécessite une étude approfondie des effets gouvernant le processus de coupe et de l'analyse des phénomènes qui trouvent naissance au cours de l'usinage orienté vers l'optimisation des conditions de coupe. La recherche de l'optimisation ne peut se passer de la connaissance des contraintes de production inhérentes à la nature du procédé, celles-ci dépendent des performances propres aux moyens mis en œuvre et en particulier de l'état du couple outil-matière.

C'est dans ce contexte que nous avons exploré, modéliser et optimiser un certain nombre de phénomènes qui interviennent lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique traité AISI 420 avec un outil en céramique revêtus.

En se basant sur les résultats trouvés, on peut dégager les principales conclusions suivantes :

- L'analyse statistique de variance (ANOVA) a confirmé que le taux de l'avance (f) a la plus forte influence sur les critères de rugosité de surface. Les proportions de la contribution sont respectivement (80,71 %, 80,26 %, 81,80 %), de R_a , R_z et R_t .
- L'analyse de la variance (ANOVA) des trois composantes de l'effort de coupe indique que la profondeur de coupe (ap) est le facteur qui a la plus grande influence sur (F_x , F_y et F_z) avec des contributions successives (53,76%, 50,79% et 65,31%). Le taux de l'avance (f) vient au deuxième rang avec des contributions de (13,45 % à 27 ; 27,27 %). Par contre, la vitesse de coupe (V_c), son influence est insignifiante (<2%).
- L'analyse de la variance (ANOVA) pour la puissance de coupe (P_c) montre que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus déterminant avec une contribution de (37,56)%, suivi de l'avance (f) avec un pourcentage de (21,14)% et de vitesse de coupe (V_c) avec (12,96)%. Les interactions et les termes carrés n'ont pas d'effet significatif.
- L'analyse de la variance (ANOVA) pour MRR a indiqué que la profondeur de passe (ap) est le facteur d'influence le plus important avec une contribution de 36,45 %, suivi de l'avance (f) avec un pourcentage de 24,56 % et de (V_c) avec 11,60 %.

- L'usinage dur de l'acier AISI 420 (59 HRC) avec céramique revêtue présente une alternative économique par rapport à l'usinage traditionnel car il permet d'obtenir une rugosité (Ra) inférieure à $0,4 \mu\text{m}$ et il n'y a pas besoin d'opérations de tournage.
- Les résultats obtenus par l'analyse ANOVA des paramètres technologiques ont été confirmés par un diagramme de Pareto, et l'effet des interactions sur les réponses a été vérifié par des tracés en 3D.
- Les cartes topographiques tridimensionnelles des surfaces usinées obtenues par la microscopie optique sont d'une grande importance dans l'investigation de la rugosité de surface.
- La méthode d'optimisation mono-objective de Taguchi a été exploitée avec succès pour identifier les paramètres de coupe optimale. De plus, le rapport S/N est le critère important dans cette méthode. Cette méthode est simple et rapide, et plus efficace dans le cas d'une seule réponse.
- Sur la base de l'approche d'optimisation de Taguchi, les paramètres de coupe optimale lors du tournage de l'acier AISI 420 avec céramique revêtue CC6050 pour minimiser la rugosité de surface sont comme suit : $V_c = 340 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.5 \text{ mm}$.
 - De même, en minimisant l'effort tangentielle pour un régime optimal de : $V_c = 340 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.1 \text{ mm}$.
 - Le régime optimal des paramètres de coupe afin de minimiser la puissance de coupe (P_c) a été spécifié comme suit : V_{c1} , f_1 , a_{p1} , en d'autres termes, une valeur optimale de P_c est obtenu à une vitesse de coupe de 80 m/min , l'avance de 0.08 mm/tr et profondeur de passe de 0.1 mm .
 - Le régime optimale sélectionné pour maximiser le volume de copeau enlevé est donné comme suit : $V_c = 340 \text{ m/min}$, $f = 0.24 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.5 \text{ mm}$.
- L'utilisation de (DF) pour l'optimisation multi-objectifs de certains paramètres de sortie montre qu'il n'y a pas une solution optimale, mais plusieurs. Il s'agit de rechercher à

chaque fois la solution optimale, qui correspond à des exigences spécifiques en fonction du contexte industriel considéré. Dans cette étude, les solutions trouvées pour les quatre cas d'optimisation sont :

Cas 1 : Minimisation de Ra : $Vc=340$, $f=0.105$, $ap=0.5$, $Ra=0.39\mu\text{m}$

Cas 2 : Minimisation de MRR : $Vc=340$, $f=0.192$, $ap=0.5$, $MRR=32.64\text{cm}^3/\text{min}$

Cas 3 : Compromis entre Ra et MRR : $Vc=340$, $f=0.155$, $ap=0.5$, $Ra=1.208\ \mu\text{m}$,
 $MRR=26.389\text{cm}^3/\text{min}$

Cas 4 : Minimisation de Fz et Pc : $Vc=339.99$, $f=0.08$, $ap=0.1$, $Fz=45.71\text{N}$,
 $Pc=44.473\text{W}$

- Les modèles mathématiques obtenus sont en accord avec les résultats expérimentaux. Ces modèles représentent un intérêt industriel important pour les entreprises de fabrication mécanique. Il a été constaté que les modèles RNA et MSR trouvés nous permettent de prédire les paramètres technologiques de l'usinage pour le couple CC6050 / AISI 420, ce qui représente un gain de temps et de matériaux significatif car les essais ne seront plus répétés.
- Les modèles mathématiques obtenus par la méthode MSR sont en accord avec les résultats expérimentaux. Les tests de validation ont présenté des erreurs très acceptables pour Ra et Fz , variant respectivement de 1,35 à 4,66 % et de 0,22 à 5,28 %.
- L'analyse des résultats des deux architectures pour la modélisation de (Ra et Fz) ensemble et séparément montre que les architectures séparées (R^2) sont meilleures que celles de l'architecture ensemble ce qui nous permet d'avoir des modèles plus précis.
- La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux estimés par les modèles MSR et RNA montre clairement que les modèles RNA sont plus précis et donnent d'excellents résultats, (R^2) = 99,98 % pour (Ra) et (R^2) = 99,96 % pour (Fz) par rapport aux modèles résultant de la méthode MSR, (R^2) = 87,31 % pour (Ra) et (R^2) = 98,03 % pour (Fz).

Par contre, selon l'ANOVA, la méthode MSR permet de quantifier l'effet des paramètres (V_c , ap et f) sur les paramètres technologiques d'usinage.

- Les modèles prédictifs représentent un intérêt industriel important, en termes d'économie de temps et de coûts, pour les entreprises de fabrication mécanique traitant de l'usinage de l'acier AISI 420 avec l'outil de coupe céramique CC6050.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche :

- Etude de l'évolution de l'usure, de la température de coupe et des contraintes résiduelles en fonction des conditions de coupe.
- Etude comparative entre la céramique mixte et des outils en nitrure de bore cubique.
- L'application des autres méthodes d'optimisation telle que (La logique floue et les algorithmes génétiques ...etc.).

Références bibliographiques

- [1] **Sourmail, T., and H. K. D. H. Bhadeshia.** "Stainless steels, University of Cambridge." 2011.
- [2] **Remadna M.** Le comportement du système usinant en tournage dur, application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (nitrure de bore cubique), thèse de doctorat, INSA de Lyon, pp. 220-243 (2001).
- [3] **CZAPLICKI A,** L'usinabilité et la coupe des métaux, Revue de la société royale belge des ingénieurs et des industries, n°12. pp. 708 – 736, 1962.
- [4] **GRUBER B,** Outillage et mesure, Dunod 2^{ème} édition, Lausanne, pp. 51-63, 1981.
- [5] **POULACHON G,** Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage c-bn des aciers durcis. Application : usinabilité de l'acier 100cr6 (Doctoral dissertation, Paris. ENSAM), 1999.
- [6] **TROMBERT C.;** Usinabilité des aciers inoxydables, Techniques de l'ingénieur M726.
- [7] **CUNAT P.;** Aciers inoxydables "Mise en œuvre", Techniques de l'ingénieur M4542.
- [8] **Documentations.** Euro inox, qu'est-ce que *l'acier inoxydable* ?, the european
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_inoxydable [En ligne].
- [10] **Noordin, M. Y., D. Kurniawan, and S. Sharif.** "Hard turning of stainless steel using wiper coated carbide tool." International Journal of Precision Technology ;,» pp. 1: 75-84., 2007.
- [11] Tournage dur, **TRAMETAL**, Mai 2005, pp. 6-12.
- [12] **Tönshoff H. K., Arendt C., Ben Amor R.** Cutting of hardened steel. CIRP Annals – Manufact Technol.;» p. 49(2): 547 – 566., (2000).
- [13] **POULACHON, Gérard, BANDYOPADHYAY, B. P., JAWAHIR, I. S., et al.** The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture,» pp. vol. 43, no 2,p. 139-144., 2003.
- [14] <https://www.productionmachining.com/articles/hard-turning-as-an-alternative-to-grinding> [En ligne].
- [15] **BARTARYA, Gaurav et CHOUDHURY, S. K.** State of the art in hard turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture,» vol. vol. 53, n° 1no1, p. 1-14. , 2012.
- [16] **G. Poulachon,** Usinabilité des matériaux difficiles : application aux aciers durcis. Techniques de l'ingénieur, BM7048, 2004.
- [17] https://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/knowledge/general_turning [En ligne]

- [18] **Davim J. P.** (2011) Machining of hard materials. London: Springer-Verlag. ISBN 1849964505, 9781849964500. doi:10.1007/978-1-84996-450-0
- [19] **Suha K. S., Zahid A. K., Aas M. & Arshad N. S.** (2014) A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications, *Production & Manufacturing Research: An Open Access Journal*, 2:1, 24-49
- [20] **Erol Z., Tugrul Ö.** (2002) Hard turning technology. Report no. Marl-01 Manufacturing Automation and Research Laboratory. Rutgers, The State University of New Jersey USA.
- [21] **Doni J. G., Buljan S. T.** (1988) Ceramics for machining. *Am Ceram Soc Bull*; 67:381–6.
- [22] **Li X.S.** (1994) Ceramic cutting tools: an introduction. *Key Eng Mater*; 96:1–18.
- [23] **Jianxin D., Xing A.** (1997) Wear resistance of Al₂O₃/TiB₂ ceramic cutting tools in sliding wear tests and in machining processes. *J Mater Process Technol*; 72:249–55.
- [24] **Lo Casto S., Lo Valvo E., Lucchini E., Maschio S., Piacentini M., Ruisi V. F.** (1996) Machining of steel with advanced ceramic cutting tools. *Key Eng Mater*; 114:105–34.
- [25] **Aslan E., Camuscu N., Birgoren B.** (2007) Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃ + TiCN mixed ceramic tool. *Mater Design*; 28: 1618 – 1622.
- [26] **Adilson J. O., Anselmo E. D., Davi J. U.** (2009) Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology xxx xxx–xxx*.
- [27] **Kumar A. S., Durai A. R., Sornakumar T.** (2003) Machinability of hardened steel using alumina based ceramic. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 21, 109 – 117.
- [28] **Gaitonde V. N., Karnik S. R., Figueira L., & Davim J. P.** (2009). Machinability investigations in hard turning of AISI D2 cold work tool steel with conventional and wiper ceramic inserts. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27, 754 – 763.
- [29] **Luo S.Y., Liao Y.S., Tsai Y.Y.** (1999) Wear characteristics turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools. *J. Mater. Proc. Technol.*, 88(1–3): 114–121.
- [30] **Diniz A. E., Gomes D. M., Braghini A.** (2005) Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 240 – 248.
- [31] www.mitsubishicarbide.com
- [32] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
[En ligne].
- [33] Etats de sur face des pièces mécaniques Sciences industrielles pour l'ingénieur PT – Lycée Lislet Geoffroy: <http://pt.llg.free.fr/13/S2I/etats%20de%20surface.pdf> [En ligne].
- [34] **CLAUDE B, LIONEL G,** Memotech productique matériaux et usinage, Editions casteilla,

PARIS, Septembre 1999.

- [35] Archive multilingue, Actionnées par WorldLingo. [En ligne].
http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/Etat_de_surface#Rugosit.C3.A9
- [36] **HUGHES L**, Etude de l'influence de la rugosité sur l'écoulement de fluide dans les fissures rocheuses, Thèse acceptée par la Faculté Polytechnique de Mons, L'obtention du grade de docteur en Sciences Appliquées, 2006.
- [37] **BELHADI S**, Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2009.
- [38] **L Bouzid, M AthmaneYalles, K Chaoui T Mabrouki, and L Boulanouar** Mathematical modeling for turning of AISI 420 stainless steel using surface response methodology.
- [39] **Bruni C, Forcellese A, Gabrielli F, Simoncini M**. Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420b, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46, pp. 1547–1554 (2006).
- [40] **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.
- [41] **EL-TAMIMI, A. M. et EL-HOSSAINY, T. M.** Investigating the tool life, cutting force components, and surface roughness of AISI 302 stainless steel material under oblique machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, vol. 23, no 4, p. 427-438.
- [42] **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.
- [43] **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.
- [44] **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.
- [45] **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).
- [46] **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.
- [47] **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.

- [48] **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.
- [49] **Acar, E., Camuşcu, N., Er, A. O., & Aslan, E.** (2011). Experimental robust optimal machining of hardened AISI 420 stainless steel with Al₂O₃+ TiCN mixed ceramic tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(7), 1033-1039.
- [50] **UYSAL, Alper, DEMIREN, Furkan, et ALTAN, Erhan.** Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS₂ reinforced vegetable cutting fluid. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2015, vol. 195, p. 2742-2747.
- [51] **SELVARAJ, D. Philip, CHANDRAMOHAN, P., et MOHANRAJ, M.** Optimization of surface roughness, cutting force and tool wear of nitrogen alloyed duplex stainless steel in a dry turning process using Taguchi method. *Measurement*, 2014, vol. 49, p. 205-215.
- [52] **NAYAK, Shreemoy Kumar, PATRO, Jatin Kumar, DEWANGAN, Shailesh, et al.** Multi-objective optimization of machining parameters during dry turning of AISI 304 austenitic stainless steel using grey relational analysis. *Procedia Materials Science*, 2014, vol. 6, p. 701-708.
- [53] **ELMUNAFI, Mohamed Handawi Saad, NOORDIN, M. Y., et KURNIAWAN, D.** Tool life of coated carbide cutting tool when turning hardened stainless steel under minimum quantity lubricant using castor oil. *Procedia Manufacturing*, 2015, vol. 2, p. 563-567.
- [54] **BAGABER, Salem Abdullah et YUSOFF, Ahmad Razlan.** Multi-responses optimization in dry turning of a stainless steel as a key factor in minimum energy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 96, no 1-4, p. 1109-1122.
- [55] **KORKMAZ, Mehmet Erdi et GÜNAY, Mustafa.** Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, p. 1-8.
- [56] **ROSA, Guilherme C., SOUZA, André J., POSSAMAI, Elizeu V., et al.** Wear analysis of ultra-fine grain coated carbide tools in hard turning of AISI 420C stainless steel. *Wear*, 2017, vol. 376, p. 172-177.
- [57] **BOUZID, Lakhdar, BOUTABBA, Smail, YALLESE, Mohamed Athmane, et al.** Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 74, no 5-8, p. 879-891.
- [58] **El-tamimi A, Soliman M.S, El-hossainy T.M & Muzher, J.A.** Developed models for understanding and predicting the machinability of a hardened martensitic stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 25:8, pp.758-768 (2010).
- [59] **Barrau O.** Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. Thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse (2004).
- [60] https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/40/2017/08/stavax_esr-fre_p_1108_e5.pdf

[En ligne].

- [61] **Goupy J.** «Introduction aux plans d'expériences». Dunod. Paris. pp. 303 (2001).
- [62] **Technique d'ingénieur f1006.** Plans d'expériences méthode de Taguchi (2007).
- [63] **Ross P.** Taguchi techniques for quality engineering loss function. Orthogonal experiments. Parameter and tolerance design, Mcgraw-hill. New York, pp. 10-50 (1988).
- [64] **Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery,** Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments, 1995.
- [65] **Chabbi, A., et al.** "Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2017; 91: 2267-2290.
- [66] **KARAM, Sandrine.** Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt. *Limoges University*, 2004.
- [67] **ETSINDA MF,** Nouvelle approche hybride d'optimisation multi-objective basée sur la méthode des surfaces de réponse et le système de colonies de fourmis, Comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie de la production automatisée M. Ing, Université du QUÉBEC, 2008.
- [68] **Myers RH, Montgomery DC,** Response Surface Methodology, 2nd Ed., WILEY C SONS (Éditeurs), New York, NY, USA, 2002.
- [69] **GLÈLÈ KAKAÏ, R., SODJINOÛ, E., et FONTON, N.** Conditions d'application des méthodes statistiques paramétriques : application sur ordinateur. *Bibliothèque Nationale, Bénin*, 2006.
- [70] **Gained VN, Karnik SR, Faustino M, Davim JP,** Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes, Int J Refract Metals hard Mater, Vol. 27, pp. 754-63, 2009.
- [71] **Bouacha K, Yallese M.A, Mabrouki T, Rigal J.F.** Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 28, pp. 349–361 (2010).
- [72] **Aouici H, Yallese M.A, Chaoui K, Mabrouki T, rigal J.F.** Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with cbn tool: prediction model and cutting conditions optimization. Measurement, 45, pp. 344–353 (2012).
- [73] **Yusuf S, Riza M.A.** Surface roughness model for machining mild steel with coated carbide tool. Material. Design, 26, pp. 321-326 (2005).
- [74] **Xavior M.A, Adithan M.** Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel, J. Materials. Process. Technology, 209, pp. 900–909 (2009).
- [75] **Ciftci I.** Machining of austenitic stainless steels using CVD multilayer coated cemented

- carbide tools, *Tribology International* 39, pp. 565–569 (2006).
- [76] **Davim J.P.** Machining of hard materials. Springer, (2011).
- [77] **Arsecularatne J.A, Zang L.C, Montross C, Mathew P.** On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools. *J. Materials. Processes. Technology*, 171, pp. 244-252 (2006).
- [78] **Bouchelaghem H, Yallese M.A, Mabrouki T, Amirat A, Rigal J.F.** Experimental investigation and performance analysis of CBN insert in hard turning of cold work tool steel (D3). *Machining. Science and. Technology: an Int. J*, 14, pp. 471-501 (2010).
- [79] **Suresh R, Basavarajappa S, Samuel G.L.** Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer-coated carbide tool. *Measurement*, 45, pp.1872–1884 (2012).
- [80] **HAMMOYD, Abdelmadjid, HADJSEYD, Sadek Walid, et BENTALEB, Faycel.** Optimisation des critères de la rugosité pare MSR et l’algorithme génétique en tournage à sec de l’acier 42CD4. Thèse de doctorat.
- [81] **Douglas Montgomery C, George Runger C,** *Applied Statistics and Probability for Engineers* 3rd edition, John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [82] **SAINI, Sanjeev, AHUJA, Inderpreet Singh, et SHARMA, Vishal S.** Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in hard turning of AISI H11 tool steel using ceramic tools. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, no 8, p. 1295-1302.
- [83] **LIMA, J. G., AVILA, R. F., ABRAO, A. M., et al.** Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 169, no 3, p. 388-395.
- [84] **Chinchanikar S, Choudhury S.K.** Effect of work material hardness and cutting parameters on performance of coated carbide tool when turning hardened steel: an optimization approach. *Measurement*, 11, 032 (2012).
- [85] **Korkmaz, Mehmet Erdi et Günay, Mustafa.** Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, p. 1-8.
- [86] **Berkani, Sofiane, Yallese, M., Boulanouar, Lakhdar, et al.** Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti (C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2015, vol. 6, no 4, p. 539-552.
- [87] **CHABBI, Amel, YALLESE, Mohamed Athmane, MEDDOUR, Ikhlas, et al.** Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of Polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function. *Measurement*, 2017, vol. 95, p. 99-115.
- [88] **Khellaf, A., Aouici, H., Smaiah, S., et al.** Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface

- topography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 89, no 1-4, p. 333-354.
- [89] **Żak, Krzysztof et Grzesik, Wit.** Metrological Aspects of Surface Topographies Produced by Different Machining Operations Regarding Their Potential Functionality. *Metrology and Measurement Systems*, 2017, vol. 24, no 2, p. 325-335.
- [90] **Zahia, Hessainia, et al.** "On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVD coated insert." *International Journal of Industrial Engineering Computations* 2015; 6: 267-284.
- [91] **Belhadi, S., Kaddeche, M., Chaoui, K., et al.** Machining Optimization of HDPE Pipe Using the Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *International Polymer Processing*, 2016, vol. 31, no 4, p. 491-502.
- [92] **Selaimia, Abdel-Ali, et al.** "Modeling and optimization in dry face milling of X2CrNi18-9 austenitic stainless steel using RMS and desirability approach." *Measurement* 2017; 107: 53-67.
- [93] **Shahrajabian, Hamzeh, and Masoud Farahnakian.** "Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2013; 14: 1829-1837.
- [94] **Taguchi G,** Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organisation, Tokyo 1986.
- [95] **Zhang JZ, Chen JC, Kirby ED,** Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method, *J Mater Process Technol* 184 233 – 239, 2007.
- [96] **Günay M, Kaçal A, Turgut Y,** Optimization of machining parameters in milling of Ti – 6Al – 4 V alloy using Taguchi method, *E-J New World Sci Acad Eng Sci* 6 (1) 428 – 440, 2011.
- [97] **Bendell A, Disney J, Pridmore WA,** Taguchi methods: applications in world industry, IFS Publications, Bedford 1989
- [98] **Rowlands H, Antony J, Knowles G,** An application of experimental design for process optimization. *TQM Mag* 12(2):78 – 83, 2000
- [99] **Nalbant M, Gökkaya H, Sur G,** Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Mater Des* 28:1379 – 1385, 2007
- [100] **Bouزيد L, Yaltese MA, Chaoui K, Mabrouki T, Boulanouar L,** Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* Vol. 229(1):45-61, 2015
- [101] **Hessainia Z, Yaltese MA, Bouزيد L, Mabrouki T,** On the application of response surface methodology for predicting and optimizing surface roughness and cutting forces in hard turning by PVD coated insert. *Int J Ind Eng Comput* 6:267 – 284, 2015

- [102] **Hanafi I, Khamlichi A, Francisco MC, Emiliano A, Abdallah J**, Optimization of cutting conditions for sustainable machining of peek-cf30 using tin tools. *Journal of Cleaner Production*, 33, pp. 1-9, 2012.
- [103] **Grzesik, W.** Prediction of surface topography in precision hard machining based on modelling of the generation mechanisms resulting from a variable feed rate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, no 9-12, p. 4115-4123.
- [104] **Bensouilah, Hamza, et al.** "Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process." *Measurement* 2016; 82: 1-18.
- [105] **Patrice W.** Réseaux de neurones artificiels : architectures et applications, Université de Haute Alsace Laboratoire MIPS (Modélisation, Intelligence, Processus, Systèmes) Avril (2009).
- [106] <http://alp.developpez.com/tutoriels/intelligence-artificielle/reseaux-de-neurones 30/03/2015>.
- [107] **Dipanda A**, Cours réseaux de neurones.
- [108] **Gerstner W, Beaulieu BL, Souksavanh S et Beuchat JL**, Réseaux de neurone artificiels, une introduction à l'apprentissage automatique. Laboratory of computational neuroscience, 2006.

Publications

- ✓ L'article intitulé : **Modeling and Multi objective optimization for Minimizing Surface Roughness, cutting Force and Power and maximizing productivity for Tempered Stainless Steel AISI 420 in Turning Operations**, est accepté dans la revue : **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** sous le DOI : **10.1007/s00170-018-2984-8**.

Auteurs: **Abderrahmen ZERTI**, Mohamed Athmane YALLESE , Ikhlas MEDDOUR, Salim BELHADI, Abdelkrim HADDAD, Tarek MABROUKI.