

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'étude

Présenté par : OUMEDDOUR Yehya

Master

Option : Construction Mécanique

=====
**Application de la méthodologie de surface de réponse
et optimisation mono, multi-objective des paramètres
de coupe en tournage dur**
=====

Encadreur : Dr. BOUCHELAGHEM Hadjira

Co-encadreur : Dr. CHIHAOUI Salim

2020/2021

Remerciements

Je tiens à remercier tout premièrement mon encadreur Dr.

BOUCHELAGHEM Hadjira pour avoir d'abord proposé ce sujet et

de son suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon co-

encadreur Dr. CHIHAOUI Salim pour le grand support qui m'a

donné.

J'adresse le remerciement aussi à tous les membres du

laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) de l'Université de

Guelma et spécialement Pr. YALLESE Mohamed Athmane de m'avoir

apporté leur soutien pour réaliser ce travail.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à mes parents

A ma femme qui m'a encouragé pour faire la passerelle ;

A mon frère et mes sœurs, puisse Dieu vous donne santé,

bonheur, courage et surtout réussite ;

A tous mes amis ;

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

ملخص

شهدت عملية قطع المعادن توسعًا كبيرًا مع تزايد آلية ورش التصنيع واستخدام تكنولوجيا المعلومات لتحسين الأداء.

ومن الشواغل الرئيسية السعي إلى زيادة الإنتاجية في قطع المعادن. ويترتب على زيادة الإنتاجية من حيث الكمية أثر مباشر على جودة القطع التي يتم الحصول عليها والتي يجب أن تلبى تفاوتاتها الهندسية وأبعادها معايير معينة وتحترم حد خشونة مقبول للسماح باستخدامها

في هذا الإطار قمنا بهذا العمل من ناحية بنمذجة الخشونة السطحية باستخدام طريقة السطح المرجعي أثناء تشغيل الفولاذ باستعمال أدوات قطع من الخزف CC650 والمعدلة هندسيا CC650WG

من ناحية أخرى ، قمنا بإجراء دراسة تحسين باستخدام طريقة تاجوشي (أحادية الهدف) ، وبالطرق متعددة الأغراض (طريقة الرغبة والخوارزمية الجينية) من أجل التوصل إلى توازن بين خشونة السطح ومعدل المادة المختزلة.

الكلمات الرئيسية:

الخراطة الصلدة، مواد القطع، خشونة السطح، كمية المادة المنزوعة، تحليل التباين، التحسين، طريقة تاجوشي، الخوارزمية الجينية.

Résumé

La coupe des métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication et l'utilisation de l'outil informatique pour l'optimisation.

La recherche permanente d'une productivité meilleure de la coupe des métaux est une préoccupation majeure. En contrepartie l'augmentation de la productivité en termes de quantité a un impact direct sur la qualité des pièces obtenues, dont les tolérances géométriques et dimensionnelles doivent répondre à certains standards et respecter une limite admissible de rugosité pour permettre leur exploitation.

Dans ce sens nous avons réalisé ce travail qui concerne d'une part la modélisation de la rugosité de surface (R_a , R_z , R_q) en utilisant la méthodologie de surface de réponse, lors de tournage dur de l'acier 100Cr6 par deux types de plaquettes de coupe en céramique (CC650) et Wiper (CC650WG).

D'autre part, nous avons fait une étude d'optimisation par la méthode de Taguchi (mono-objective), et par les méthodes Multi-Objectives (la méthode de désirabilité et l'algorithme génétique *GA*) et cela dans le but d'obtenir un compromis entre la rugosité de surface R_a et le taux de la matière enlevé MRR.

Mots clé : Tournage dur, Matériaux de coupe, Rugosité (R_a), quantité de la matière enlevé (MRR), Analyse de variance (ANOVA), optimisation, méthode de Taguchi, *DF* et *GA*.

Abstract

Metal cutting, a machining process whose origin is very old, has undergone a great expansion with the increasing mechanization of manufacturing workshops and the use of computer tools for optimization.

The permanent search for better productivity in metal cutting is a major concern. On the other hand, the increase in productivity in terms of quantity has a direct impact on the quality of the parts obtained, whose geometric and dimensional tolerances must meet certain standards and respect an acceptable limit of roughness to allow their exploitation.

In this sense we have carried out this work which concerns on the one hand the modeling of the surface roughness (Ra, Rz, Rq) using the methodology of response surface, during the machining of 100Cr6 steel by two types of cutting inserts in ceramic (CC650) and Wiper (CC650WG).

On the other hand, we made an optimization study by the Taguchi method (mono-objective), and by the Multi-Objective methods (the desirability method and the GA genetic algorithm) with the aim of obtain a compromise between the surface roughness Ra and the rate of material removed MRR.

Keywords: Hard turning, Cutting materials, Roughness (Ra), Analysis of variance (ANOVA), Material removal rate (MRR), optimization, Taguchi method, *DF et GA*.

Liste des figures

Figure I-1 Copeau coupé	4
Figure I-2 Copeau gratté.....	5
Figure I-3 Plans et angles en main sur les outils courants : outil à charioter droit.....	7
Figure I-4 Angles de coupe d'un outil simple.....	8
Figure I-5 Exemple de l'évolution de l'angle de coupe avec les caractéristiques du matériau d'outil	8
Figure I-6 Incidence de l'angle de direction (X_r) sur la longueur de coupe (L), et sur l'épaisseur du copeau (h).....	9
Figure I-7 Représentation de la pointe de l'outil (plans et angles en main sur un outil de chariotage).....	10
Figure I-8 Matériaux de coupe	11
Figure I-9 Evolution de la diverse ténacité en fonction de la dureté.....	11
Figure I-10 Profondeur de passe a_p et l'avance f en tournage	14
Figure I-11 Avance en tournage f	15
Figure I-12 Rugosité de surface produite par les méthodes de production Tournage et rectification.....	15
Figure I-13 Écart de la moyenne arithmétique (R_a).....	16
Figure I-14 Écart de la moyenne quadratique (R_q)	16
Figure I-15 Hauteur maximale (R_z)	17
Figure I-16 Différents copeaux produits en usinage (a) continu ; (b) segmenté ; (c) festonné ; (d) discontinu	18
Figure I-17 Réduction du fer et production des fontes dans les hauts fourneaux	19
Figure I-18 Acier à l'oxygène	20
Figure I-19 Acier électrique	20
Figure I-20 Coulée continue de l'acier	21
Figure I-21 Coulée en lingotières	21
Figure I-22 Classification des aciers	22
Figure I-23 Le cycle thermique	23
Figure I-24 La Trempe	23
Figure I-25 Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la puissance et la rugosité.....	25
Figure II-1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40.....	30

Figure II-2 Éprouvette utilisée.....	33
Figure II-3 Plaquette CC650.	34
Figure II-4 Plaquette wiper CC650WG.....	34
Figure II-5 Porte-outil utilisé.....	35
Figure II-6 Rugosimètre Mitutoyo Surftest SJ-210.....	35
Figure III-1 Graphique des effets principaux pour R_{acc650}	46
Figure III-2 Diagramme des interactions pour R_{acc650}	47
Figure III-3 Diagramme de Pareto pour R_{acc650}	47
Figure III-4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de R_{acc650}	48
Figure III-5 Graphique des effets principaux pour R_{acc650WG}	50
Figure III-6 Diagramme des interactions pour R_{acc650WG}	50
Figure III-7 Diagramme de Pareto pour R_{acc650WG}	51
Figure III-8 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du R_{acc650WG}	52
Figure III-9 Graphique des effets principaux pour R_{zCC650}	53
Figure III-10 Diagramme des interactions pour R_{zCC650}	54
Figure III-11 de Pareto pour R_{zCC650}	54
Figure III-12 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du R_{zCC650}	55
Figure III-13 Graphique des effets principaux pour R_{zCC650WG}	57
Figure III-14 Diagramme des interactions pour R_{zCC650WG}	57
Figure III-15 Diagramme de Pareto pour R_{zCC650WG}	58
Figure III-16 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du R_{zCC650WG}	59
Figure III-17 Graphique des effets principaux pour R_{qCC650}	60
Figure III-18 Diagramme des interactions pour R_{qCC650}	61
Figure III-19 Diagramme de Pareto pour R_{qCC650}	61
Figure III-20 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du R_{qCC650}	62
Figure III-21 Graphique des effets principaux pour R_{qCC650WG}	64
Figure III-22 Diagramme des interactions pour R_{qCC650WG}	64
Figure III-23 Diagramme de Pareto pour R_{qCC650WG}	65
Figure III-24 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du R_{qCC650WG}	66
Figure III-25 Courbes de comparaison des critères de rugosité obtenues par les deux plaquettes.....	67
Figure IV-1 (a, b et c) Graphiques des effets principaux de (S/N) pour (R_{acc650} , R_{acc650WG} et MRR).	72

Figure IV-2 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (1 ^{er} cas et 2 ^{ème} cas).	76
Figure IV-3 Analogie avec la biologie	77
Figure IV-4 représentation d'un chromosome	78
Figure IV-5 codage réel.....	79
Figure IV-6 Organigramme de GA	80
Figure IV-7 Schéma de roulette	82
Figure IV-8 Croisement simple	83
Figure IV-9 Croisement multipoints	84
Figure IV-10 mutation.....	84
Figure IV-11 Les graphes de front de Pareto de (1 ^{er} cas et 2 ^{ème} cas).	87

Liste des tableaux

Tableau II-1 Désignation de l'acier 100Cr6 selon les normes	31
Tableau II-2 composition chimique de l'acier 100Cr6.....	31
Tableau II-3 Caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6.....	31
Tableau II-4 Traitements thermiques – températures approximatives.	32
Tableau II-5 Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.....	33
Tableau II-6 Caractéristiques des portes plaquettes utilisées	35
Tableau II-7 Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L16).....	40
Tableau III-1 Résultats des essais pour un plan de Taguchi L16.....	44
Tableau III-2 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_{aCC650}	45
Tableau III-3 Analyse de variance ANOVA pour $R_{acc650WG}$	49
Tableau III-4 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_{zCC650}	52
Tableau III-5 Analyse de variance ANOVA pour $R_{zCC650WG}$	56
Tableau III-6 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_{qCC650}	59
Tableau III-7 Analyse de variance ANOVA pour $R_{qCC650WG}$	63
Tableau IV-1 Résultats du rapport (S/N) pour (R_{aCC650} , $R_{acc650WG}$ et MRR)	71
Tableau IV-2 Contraintes pour les deux cas d'optimisations.....	75
Tableau IV-3 Solutions d'optimisation du 1 ^{er} et 2 ^{ème} cas.....	75
Tableau IV-4 Les résultats de l'optimisation par l'algorithme génétique de Ra et MRR pour CC650 (1 ^{er} cas)	88
Tableau IV-5 Les résultats de l'optimisation par l'algorithme génétique de Ra et MRR pour CC650WG (2 ^{ème} cas)	89

Sommaire

Nomenclature	1
Introduction générale.....	2
Chapitre I Etude Bibliographique	3
I.1. Problématique	4
I.2. Notion de l'usinage par enlèvement de matière	4
I.3. Tournage dur.....	5
I.3.1 Définition du tournage dur.....	5
I.3.2 Objectif du tournage dur.....	5
I.3.3 Avantages du tournage dur	6
I.4. Géométrie des outils de tournage	6
I.4.1 Définitions des principaux plans et angles de l'outil.....	6
I.4.1.1. Les plans de coupe.....	6
I.4.1.2. Les angles de l'outil de coupe	8
I.4.2 Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil.....	9
I.4.3 Rayon de bec et angle de taillant	10
I.5. Les matériaux de coupe	10
I.5.1 Les caractéristiques principales du matériau de fabrication des outils.....	11
I.6. Paramètres de coupe	13
I.6.1 Vitesse de coupe	13
I.6.2 Profondeur de passe	14
I.6.3 Avance f	14
I.7. Rugosité de surface usinée	15
I.7.1 Paramètres influençant la qualité de surface usinée	15
I.7.2 Écart de la moyenne arithmétique (Ra)	16
I.7.3 Écart de la moyenne quadratique (Rq)	16
I.7.4 Hauteur maximale (Rz).....	17
I.8. La quantité du copeau enlevée.....	17

I.9.	Etude des aciers	18
I.9.1	Elaboration des aciers	18
I.9.1.1.	À partir de la fonte liquide (fonte d'affinage): convertisseurs à l'oxygène	19
I.9.1.2.	À partir de ferrailles par refusion au four électrique.	20
I.9.2	Classification des aciers.....	22
I.9.3	Traitement thermique.....	22
I.9.3.1.	La Trempe (Quenching)	23
I.9.3.2.	Le Revenu (Tempering)	23
I.9.3.3.	Le Recuit (Annealing)	24
I.10.	Travaux de recherche	24
I.11.	Conclusion	28
Chapitre II	Procédure expérimentale.....	29
II.1.	Introduction	30
II.2.	Matériels utilisés.....	30
II.2.1	Machine-outil.....	30
II.2.2	Matériau de la pièce à usiner	31
II.2.2.1.	Définition de l'acier 100Cr6	31
II.2.2.2.	Désignation de l'acier 100Cr6	31
II.2.2.3.	Composition chimique	31
II.2.2.4.	Caractéristiques mécaniques	31
II.2.2.5.	Domaines d'application	32
II.2.2.6.	Traitements thermiques.....	32
II.3.	Plaquettes et porte outil	33
II.3.1	Plaquettes de coupe.....	33
II.3.1.1.	Plaquette en céramique CC650	34
II.3.1.2.	Géométrie Wiper CC650WG.....	34
II.3.2	Porte plaquette (<i>porte-outil</i>)	35
II.4.	Instruments de mesure utilisés.....	35
II.4.1	Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D.....	35
II.5.	Méthode multifactorielle	36
II.6.	Plans d'expériences adoptés	36
II.6.1	Définition.....	36

II.6.2	Terminologie.....	36
II.6.3	Différents types de facteurs	37
II.6.4	Méthodologie des plans d'expériences.....	38
II.6.5	Démarche et plan d'expérience adopté.....	39
II.6.6	Plan de Taguchi (L16)	39
II.7.	Conclusion.....	40
Chapitre III Modélisation de la Rugosité de surface		41
III.1.	Introduction.....	42
III.2.	Analyse de variance (ANOVA) et modélisation	42
III.2.1	Analyse de variance (ANOVA).....	42
III.2.2	Méthodologie de surface de réponse (MSR)	43
III.3.	Résultats et discussions.....	44
III.3.1	Analyse de variance et modélisation de la rugosité R_{aCC650}	45
III.3.1.1.	Analyse de variance ANOVA pour R_{aCC650}	45
III.3.1.1.1	Effets principaux et des interactions pour R_{aCC650}	46
III.3.1.1.2	Diagramme de Pareto des effets normalisés R_{aCC650}	47
III.3.1.2.	Analyse de régression pour R_{aCC650}	48
III.3.1.3.	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées R_{aCC650} .	48
III.3.2	Analyse de variance et modélisation de la rugosité $R_{aCC650WG}$	49
III.3.2.1.	Analyse de variance ANOVA pour $R_{aCC650WG}$	49
III.3.2.1.1	Effets principaux et des interactions pour $R_{aCC650WG}$	49
III.3.2.1.2	Diagramme de Pareto des effets normalisés $R_{aCC650WG}$	51
III.3.2.2.	Analyse de régression pour $R_{aCC650WG}$	51
III.3.2.3.	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées $R_{aCC650WG}$	51
III.3.3	Analyse de variance et modélisation de la rugosité R_{zCC650}	52
III.3.3.1.	Analyse de variance ANOVA pour R_{zCC650}	52
III.3.3.1.1	Effets principaux et des interactions pour R_{zCC650}	53
III.3.3.1.2	Diagramme de Pareto des effets normalisés R_{zCC650}	54
III.3.3.2.	Analyse de régression pour R_{zCC650}	55
III.3.3.3.	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées R_{zCC650} .	55
III.3.4	Analyse de variance et modélisation de la rugosité $R_{zCC650WG}$	56
III.3.4.1.	Analyse de variance ANOVA pour $R_{zCC650WG}$	56

III.3.4.1.1	Effets principaux et des interactions pour $R_{Z_{CC650WG}}$	57
III.3.4.1.2	Diagramme de Pareto des effets normalisés $R_{Z_{CC650WG}}$	58
III.3.4.2.	Analyse de régression pour $R_{Z_{CC650WG}}$	58
III.3.4.3.	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées $R_{Z_{CC650WG}}$	58
III.3.5	Analyse de variance et modélisation de la rugosité $R_{q_{CC650}}$	59
III.3.5.1.	Analyse de variance ANOVA pour $R_{q_{CC650}}$	59
III.3.5.1.1	Effets principaux et des interactions pour $R_{q_{CC650}}$	60
III.3.5.1.2	Diagramme de Pareto des effets normalisés $R_{q_{CC650}}$	61
III.3.5.2.	Analyse de régression pour $R_{q_{CC650}}$	62
III.3.5.3.	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées $R_{q_{CC650}}$.	62
III.3.6	Analyse de variance et modélisation de la rugosité $R_{q_{CC650WG}}$	62
III.3.6.1.	Analyse de variance ANOVA pour $R_{q_{CC650WG}}$	62
III.3.6.1.1	Effets principaux et des interactions pour $R_{q_{CC650WG}}$	63
III.3.6.1.2	Diagramme de Pareto des effets normalisés $R_{q_{CC650WG}}$	64
III.3.6.2.	Analyse de régression pour $R_{q_{CC650WG}}$	65
III.3.6.3.	Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées $R_{q_{CC650WG}}$	65
III.4.	Comparaison entre les résultats des critères de rugosité des deux plaquettes	
de coupe		66
III.5.	Conclusion	67
Chapitre IV	Optimisation des paramètres de coupe	68
IV.1.	Introduction.....	69
IV.2.	Optimisation mono-objective.....	69
IV.2.1	Méthode de Taguchi	69
IV.2.1.1.	La démarche de la méthode de Taguchi	69
IV.2.1.2.	Apport de la méthode Taguchi	70
IV.3.	Méthodes d'optimisation Multi-Objective.....	73
IV.3.1	L'approche de la fonction de désirabilité	73
IV.3.2	Résultats de l'optimisation par GA	76
IV.3.2.1.	Origines de la méthode GA	76
IV.3.2.2.	Analogie avec la biologie	77
IV.3.2.3.	Codage des chromosomes	78
IV.3.2.3.1	Codage binaire.....	78
IV.3.2.3.2	Codage réel	78
IV.3.2.3.3	Codage de Gray	79

IV.3.2.4. Principe	79
IV.3.2.4.1 La création de la population initiale	80
IV.3.2.4.2 L'évaluation des individus	81
IV.3.2.4.3 La création de nouveaux individus.....	81
IV.3.2.4.4 Réitération du processus.....	85
IV.3.2.5. Graphes de front de Pareto	86
IV.3.2.6. Régimes de coupe optimaux.....	87
Conclusion générale	90

Nomenclature

ANOVA : Analyse de variance.

ap : Profondeur de passe (mm).

DF : Fonction de désirabilité.

f : Avance par tour (mm/tr).

GA : Algorithme génétique

MSR : Méthodologie de surface de réponse.

Q (MRR) : La quantité de la matière enlevée ($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

R^2 : Coefficient de détermination.

R_a : Rugosité moyenne arithmétique (μm).

R_q : Rugosité moyenne quadratique (μm).

R_z : Hauteur maximale de la rugosité (μm).

SomCar ajust : Les sommes des carrés ajustés.

Terme SomCar séq : La somme des carrés séquentielle.

Valeur P : La valeur de p est la probabilité.

V_c : Vitesse de coupe (m/min).

Introduction générale

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur la géométrie ainsi que sur les dimensions du produit final impose la maîtrise globale et l'optimisation des procédés de fabrication.

Le travail réalisé et présenté dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Le premier chapitre porte sur une recherche bibliographique sur le procédé de tournage dur dans un premier temps permet de rappeler les principales notions de base de tournage dur, ensuite les différents matériaux de coupe, les paramètres de coupe, la rugosité de surface, la quantité de la matière enlevée ainsi qu'une étude sur les aciers et en fin de ce chapitre les travaux de recherche réalisés sur ce thème.

Le deuxième chapitre porte une présentation de l'ensemble du matériel exploité pour effectuer les essais, afin d'identifier le comportement du matériau usiné en évaluant la rugosité de surface (Ra , Rz , Rq) obtenue par rapport aux conditions de coupe. Nous présentons au même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et de leurs conditions de réalisation.

Il s'agit dans ce troisième chapitre, d'aborder l'analyse de variance et la modélisation des paramètres technologiques de sortie à savoir ; Ra , Rz et Rq en utilisant la méthodologie de surface de réponse, lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 par deux types de plaquettes de coupe.

Le quatrième chapitre porte sur l'optimisation de la rugosité de surface (Ra) et le taux de la matière enlevée (MRR) premièrement mono-objectif selon l'approche de Taguchi, puis optimisation multi-objectif en se basant sur l'approche de la fonction de désirabilité et l'algorithme génétique.

Chapitre I

Etude Bibliographique

I.1. Problématique

La coupe des métaux, procédé d'usinage dont l'origine est très ancienne, a connu une grande expansion avec la mécanisation de plus en plus poussée des ateliers de fabrication et l'utilisation de l'outil informatique pour l'optimisation.

La recherche permanente d'une productivité meilleure de la coupe des métaux est une préoccupation majeure. En contrepartie l'augmentation de la productivité en termes de quantité a un impact direct sur la qualité des pièces obtenues, dont les tolérances géométriques et dimensionnelles doivent répondre à certains standards et respecter une limite admissible de rugosité pour permettre leur exploitation.

Sur ceux un choix judicieux des paramètres et des conditions de coupe optimales est nécessaire, permettant de surmonter le défi productivité/qualité afin d'assurer une productivité avec la qualité requise des pièces mécaniques.

I.2. Notion de l'usinage par enlèvement de matière

L'usinage consiste à donner à une pièce brute sa forme finale par enlèvement de matière. Selon le type d'outils et la manière de travailler, on peut faire diverses classifications.

➤ Copeau coupé

L'outil a un ou plusieurs tranchants bien déterminés et dégage un copeau visible, c'est le cas en : Tournage, Fraisage, Perçage, Alésage

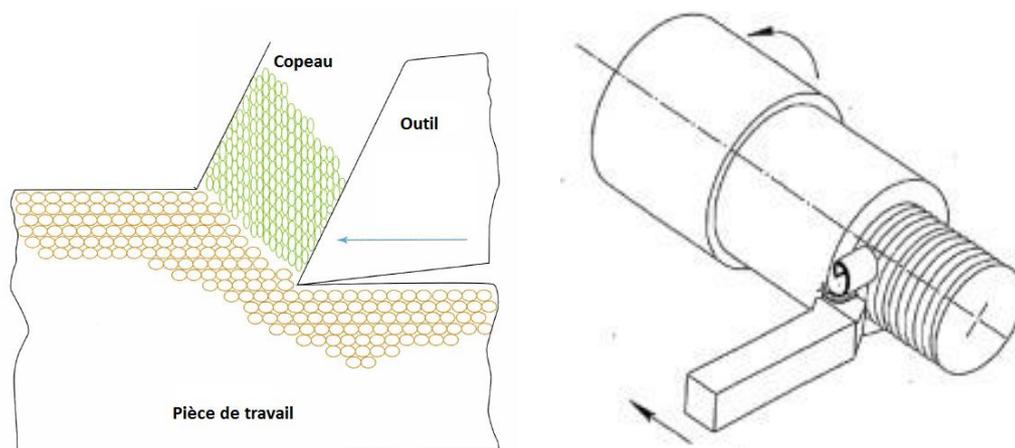


Figure I-1 Copeau coupé

➤ Copeau gratté

L'outil comporte un très grand nombre de tranchants, de géométrie éventuellement incertaine, chacun engendrant un micro copeau. C'est le cas du travail à la meule ou à la lime : Rectification, Affutage, Ebavurage. [1]

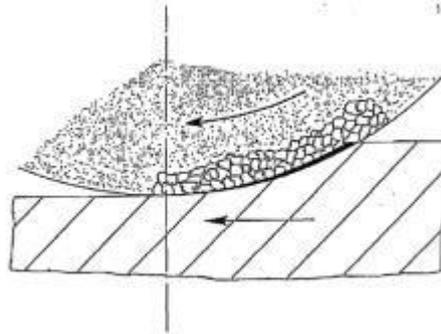


Figure I-2 Copeau gratté

I.3. Tournage dur

I.3.1 Définition du tournage dur

Il est défini comme une opération de tournage sur des aciers ayant subi des traitements thermiques de trempabilité et ayant une dureté supérieure à 45HRC.

Une seule opération de tournage dur peut remplacer plusieurs opérations de rectification consécutives (très coûteuse), ce qui lui offre un avantage économique.

Le tournage pendant est devenu un processus de fabrication intéressant pour la production en grande série, en particulier après le grand développement de matériaux de coupe super-durs tels que : le nitrure de bore cubique (CBN) et les céramiques à base d'oxyde d'aluminium, ainsi que des nouvelles machines plus efficaces [2].

I.3.2 Objectif du tournage dur

Le tournage dur (TD) a pour objectif de produire des pièces finies, avec bon état de surface, sans recours à la rectification.

Les premières appréciations montrent que la rugosité peut atteindre jusqu'à des valeurs ($R_a = 0,15 \mu\text{m}$), s'approchant des valeurs obtenues en rectification inférieures à ($R_a = 0,15 \mu\text{m}$). Les tolérances dimensionnelles peuvent atteindre des qualités 6 avec des tolérances géométriques très précises. Des défauts de circularité inférieure à $1 \mu\text{m}$ peuvent être observés. [2]

I.3.3 Avantages du tournage dur

Bien que le tournage dur ne soit pas une alternative pour toutes les opérations de meulage, les économies potentielles résultant des temps de configuration réduits, des temps de cycle plus rapides et des coûts d'équipement inférieurs sont trop importantes pour être ignorées. Partageant de nombreux principes fondamentaux avec les procédés de tournage standard, le tournage dur présente l'avantage supplémentaire de pouvoir être facilement assimilé dans la plupart des ateliers. Avec un peu d'aide pour choisir la bonne application, la bonne machine et le bon outillage, le tournage dur peut rapidement améliorer la rentabilité d'une variété d'applications à tolérances serrées. [2]

I.4. Géométrie des outils de tournage

Le choix des paramètres de coupe dépend directement de l'outil de coupe (nuances, géométries...), du matériau à usiner, de la nature de l'opération à réaliser et du produit final (état de surface, contraintes internes, changement de phase...). Dans ce qui suit, nous ne présenterons que les paramètres d'outils de coupe essentiels à cette étude. Pour les décrire, il est essentiel de donner les différents angles caractéristiques de l'outil.

I.4.1 Définitions des principaux plans et angles de l'outil

I.4.1.1. Les plans de coupe

- Plan de référence en travail, (Pr) : plan perpendiculaire au point considéré de l'arête, à la direction de la vitesse résultante de coupe, c'est-à-dire à la direction instantanée du mouvement résultant du mouvement de coupe et du mouvement d'avance simultanés en ce point ;
- Plan d'arête en travail, (Pse) : plan tangent à l'arête, au point considéré, et perpendiculaire sur le plan de référence en travail (Pr) Ce plan contient la direction de la vitesse résultante de coupe ;
- Plan de travail, (Pfe) : plan contenant la direction de la vitesse de coupe et la direction de la vitesse d'avance au point considéré de l'arête. Ce plan est perpendiculaire sur le plan de référence en travail (Pr) ;
- Plan vers l'arrière en travail, (Ppe) : plan perpendiculaire sur le plan de référence en travail (Pre) et sur le plan de travail (Pfe), au point considéré de l'arête [3].

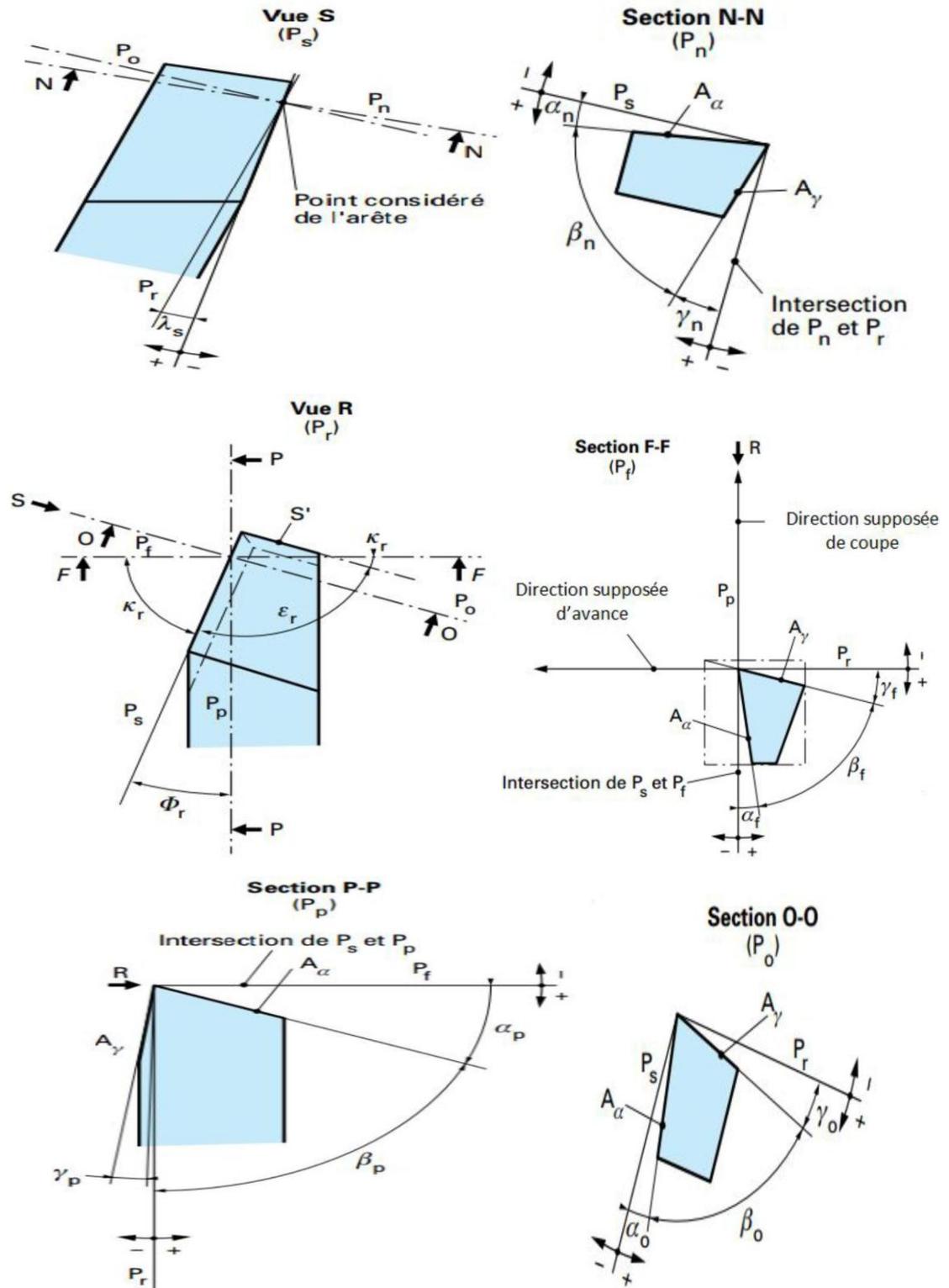


Figure I-3 Plans et angles en main sur les outils courants : outil à chariotier droit

I.4.1.2. Les angles de l'outil de coupe

Il est aussi important de comprendre l'influence des différents angles de taillage, de dévissage, ou d'attaque.

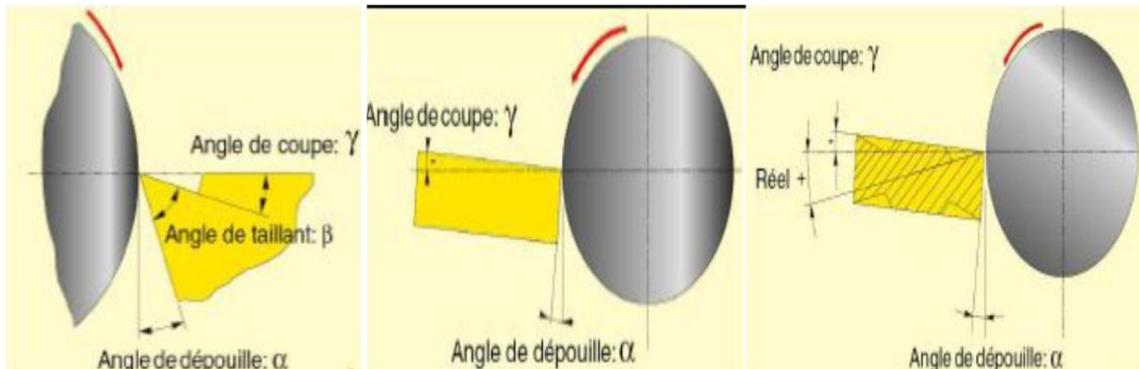


Figure I-4 Angles de coupe d'un outil simple

- Angle d'inclinaison d'arête (λ_s) : l'angle d'inclinaison d'arête est l'angle formé entre l'arête de coupe et le plan de référence (Pr) dans le plan (Ps).
- Angle d'attaque (Angle de coupe γ) : l'angle de coupe et l'angle de dévissage (α) sont liés à la géométrie de l'outil qui à son tour dépend fortement de la nature du couple outil matière et des conditions de coupe. L'angle de coupe, c'est l'angle qui se trouve entre la face de coupe et le plan de référence (Pr) dans le plan (Pf). Il est déterminant dans la formation du copeau. L'angle de coupe affecte la capacité de l'outil à cisailier le matériau à usiner. Il peut être positif, négatif ou nul. Les angles de coupe positifs réduisent les efforts de coupe, tandis que des angles de coupe négatifs apportent de la robustesse à l'arête de coupe de l'outil. Sa valeur se trouve généralement entre -5° et $+5^\circ$, quelquefois entre -10° et $+10^\circ$ et plus rarement entre -20° et $+20^\circ$.

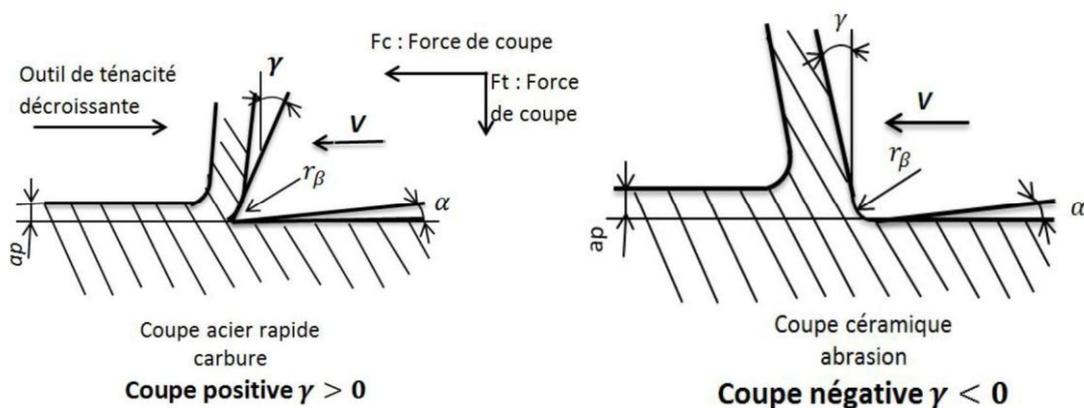


Figure I-5 Exemple de l'évolution de l'angle de coupe avec les caractéristiques du matériau d'outil

- L'angle de dépouille (α): l'angle de dépouille quant à lui est l'angle formé entre la face de dépouille de l'outil et le plan (Ps) perpendiculaire sur le plan de référence(Pr). Il intervient aussi dans le frottement entre la pièce et l'outil.
- Angle de taillant (β): c'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille. Ces angles sont définis selon le besoin dans un des plans de section suivants : (P0) : plan orthogonal de l'outil (orthogonal en travail), plan perpendiculaire au plan de référence (Pr) et au plan d'arête (Ps), au point considéré de l'arête ;
- Angle de direction principale (Xr): l'angle de direction d'arête est l'angle, projeté dans le plan de référence de l'outil (Pr), entre l'arête de coupe et la direction d'avance. Selon le type d'usinage, l'outil de coupe et/ou le porte outil, un angle de direction d'arête est imposé. Ces angles ont une influence conséquente sur la puissance consommée par la machine, sur la direction des efforts de coupe, sur l'écoulement des copeaux ainsi que sur les phénomènes d'usure.

L'illustration suivante montre que pour $X_r = 90^\circ$, la longueur sera égale à la profondeur de passe ($L = a_p$) et la valeur d'avance sera celle de l'épaisseur du copeau ($h = f$) pour ($X_r = 60$: $L = 1,15 \times a_p$ et $h = 0,86 \times f$ Avec $h = f \times \sin(X_r)$).

Cet angle est surtout influant en entrée et à la sortie de la passe. [4]

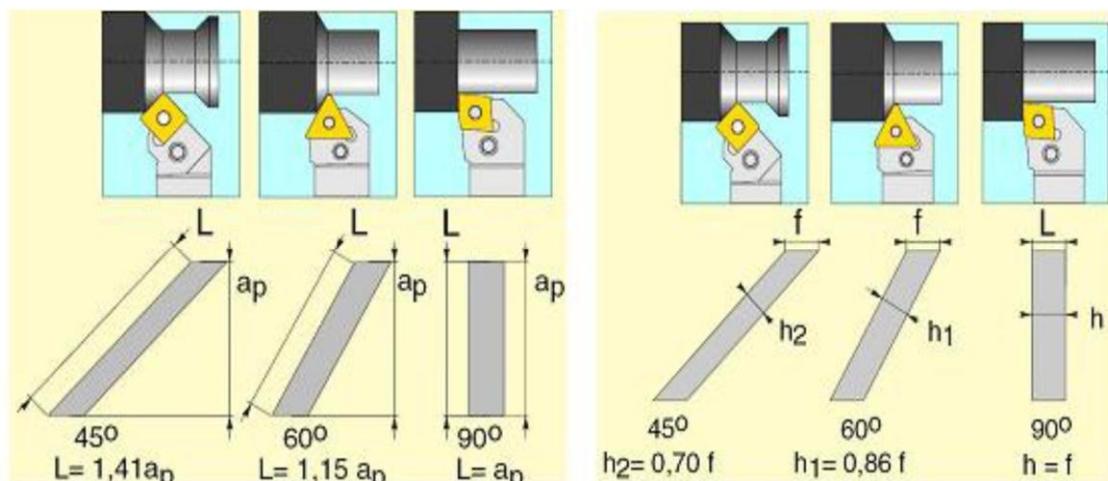


Figure I-6 Incidence de l'angle de direction (X_r) sur la longueur de coupe (L), et sur l'épaisseur du copeau (h)

I.4.2 Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil

La pointe de l'outil est la zone de contact avec la matière. Elle est ainsi la zone de l'outil de coupe la plus sollicitée mécaniquement et thermiquement. À cet effet, il est important de bien choisir les caractéristiques géométriques de la pointe de l'outil. Ces dernières sont définies

principalement par le rayon du bec de l'outil (r_z), l'angle de pointe (ϵ_r), l'arrondi d'arête (r_p), l'angle de coupe (γ) et l'angle de dépouille (α).

I.4.3 Rayon de bec et angle de taillant

La figure suivante représente un schéma d'une pointe d'outil dans les plans (Pf) et (Pr). Le rayon de bec (r_z) est essentiel dans le choix d'un outil de coupe, car il conditionne la rugosité de la surface à usiner et détermine la résistance du bec de l'outil (plus le rayon de bec est élevé, plus l'outil résiste aux efforts de coupe dans les limites admises par la géométrie), alors que l'angle de taillant (β) est l'angle reliant la face de coupe à la face de dépouille.

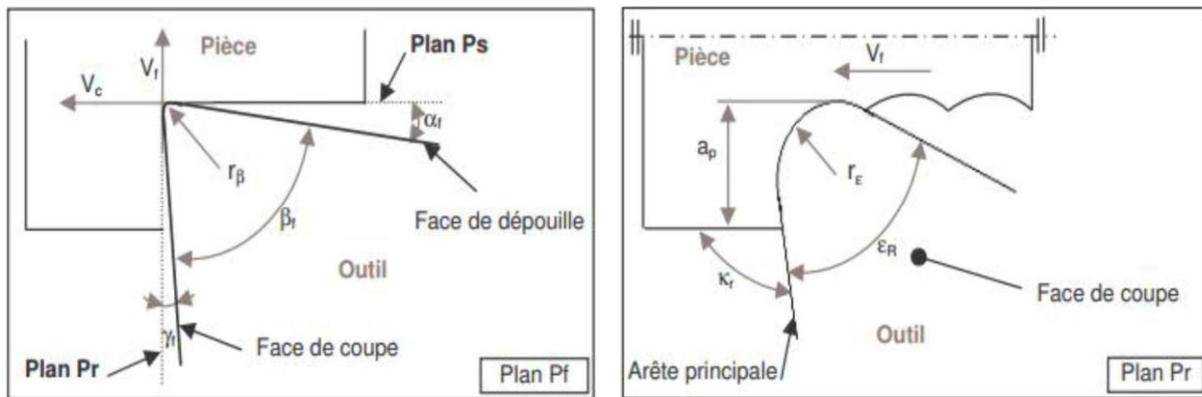


Figure I-7 Représentation de la pointe de l'outil (plans et angles en main sur un outil de chariotage)

I.5. Les matériaux de coupe

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandent une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. L'importance des matériaux à outil de coupe ne peut pas être surestimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe.

Les matériaux utilisés pour les outils de coupe peuvent être classés en trois catégories dont la première sont les aciers rapides, la deuxième les carbures et la troisième les céramiques et les matériaux ultra-durs. [5]



Figure I-8 Matériaux de coupe

I.5.1 Les caractéristiques principales du matériau de fabrication des outils

Afin d'assurer un enlèvement correct de la matière de la pièce à usiner, l'outil de coupe doit répondre aux certaines conditions :

- Dureté élevée des faces de coupe et dépouille afin d'assurer une pénétration de l'outil dans le matériau à usiner.
- Résistance élevée à l'abrasion élevée pour pouvoir résister à l'usure en cratère et en dépouille.
- Résistance élevée à la température (600° à 1000°) (il est bien à noter, qu'une température élevée diminue la dureté et la résistance à l'abrasion).
- Résistance élevée à la flexion et à la compression pour pouvoir résister aux contraintes de coupe pendant l'opération de l'usinage.
- Bonne état de surface, notamment la rugosité de surfaces de coupe et de dépouille ($R_a \leq 1,6 \mu\text{m}$). [6]

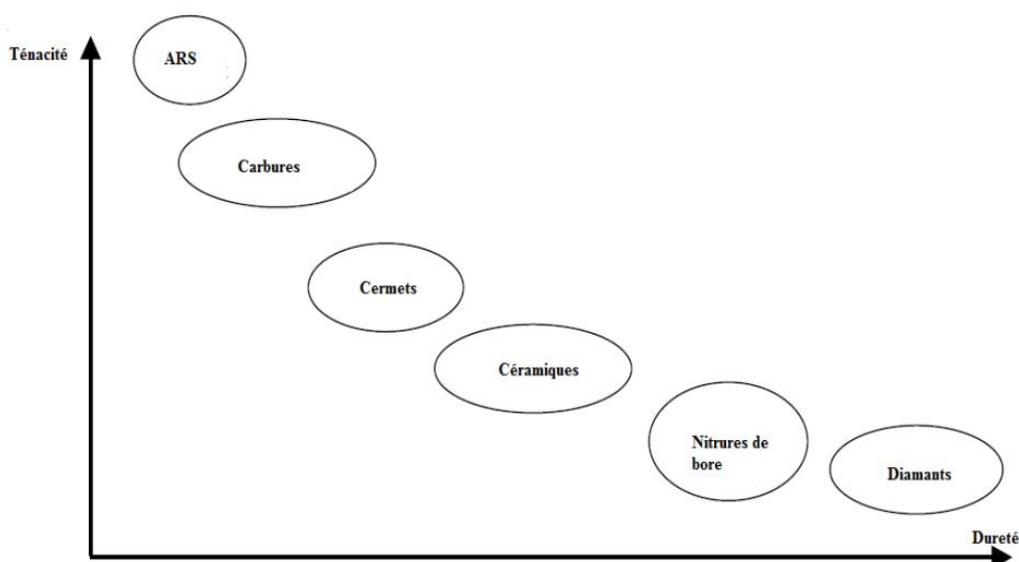


Figure I-9 Evolution de la diverse ténacité en fonction de la dureté

➤ **Les outils ARS (Acier Rapides Supérieurs)**

Ils sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique. Ils sont toujours utilisés pour certains types d'outils comme les forêts, ou dans le cas de la nécessiter d'un angle de tranchant très faible. Ils sont utilisés dans le cas d'une vitesse de coupe qui est faible car un échauffement trop important élimine la trempe de l'outil dans le cas d'une vitesse élevée, donc a tendance de créer un effondrement rapide de l'arête de coupe. Ils sont fabriqués par coulé en coquille ou par métallurgie des poudres. Sa composition : 0,7 % de Carbone minimum 4 % de Chrome environ • Tungstène, Molybdène, Vanadium . Cobalt pour les plus durs. Présente une dureté : de 63 à 66 HRC.

➤ **Carbure**

Vu les avantages présentés par les outils carbure, ces derniers sont devenus les plus utilisés. Il en existe de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage. Ils se présentent sous la forme d'une plaquette que l'on vient fixer sur un porte outil ce qui rend le changement de la plaquette très rapide. Ils sont souvent couverts par une couche protectrice en carbure plus dur. On obtient ainsi une plaquette dont le noyau est tenace et dont la surface extérieure est très dure. La fabrication de ces types des outils est assurée par frittage de poudre, puis revêtement. Ils sont composés par un noyau en carbure de tungstène (T° de fusion 2600°) Ou en carbure de titane (3100°), ou tantale (3780°) ou molybdène (3500°) Liant : cobalt : le plus courant ou nickel. Le revêtement le plus employé est en oxyde d'aluminium (céramique appelée corindon : Al_2O_3).

➤ **Cermets**

L'origine de ce mon est de céramique-métal. Ils représentent les carbures ayant des particules de Titane, de carbonitride de Titane ou de nitrure de Titane. Afin d'augmenter la ténacité de ces outils, ces derniers doivent être alliés à du carbure de Molybdène. Ils sont utilisés pour la finition, donc pour des grandes vitesses de coupe associées à de faibles avances. Le matériau étant fragile, il ne faut pas d'interruption de coupe (plan de joint...)

➤ **Céramique**

Pour la fabrication des outils de coupe, ce sont, les oxydes d'aluminium et les nitrures de silicium. Ils sont caractérisés par une dureté élevée avec une grande stabilité à haute température d'une part, et d'autre part, par l'absence d'une réaction avec la matière usinée. Les céramiques permettent un grand débit de matière et en parallèle nécessitent une grande stabilité

de la machine. Il est important de signaler qu'un strict respect des conditions de coupe et une méthode d'usinage doivent être adaptées (approche de l'outil).

➤ **Nitrure de Bore Cubique (CBN)**

L'avantage de ce type des matériaux et sa très grande dureté, il représente le matériau le plus dur après le diamant. Aussi, ne s'oxyde pas à haute température contrairement au diamant. Il est aussi utilisé pour usiner des pièces dures et la fabrication des meules de rectification. Son utilisation exige : une machine stable, une grande rigidité de la pièce et du porte pièce et un arrosage pour le refroidissement.

➤ **Diamant**

Il est utilisé essentiellement pour la fabrication des meules. Il n'exige pas un fort arrosage suite à son faible coefficient de frottement. Cependant, son principal inconvénient est sa non-stabilité à haute température. Une fois que le présent matériau sera soumis à une température de plus de 650 °C, ce dernier se transforme en un vulgaire morceau de graphite. A cet effet, on ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Par conséquent, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables

I.6. Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont les grandeurs qui sont définies lors d'une opération d'usinage. L'augmentation de la productivité en termes de qualité ou de quantité est obtenue par le choix judicieux des paramètres et des conditions de coupe.

Les trois paramètres de coupe principaux pour une opération de tournage dur sont :

I.6.1 Vitesse de coupe

La vitesse de coupe, ou « V_c », est le chemin circonférentiel (ou périmètre) parcouru par un point situé sur le diamètre extérieur de la pièce pendant une minute.

La vitesse de coupe notée V_c est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de la pièce.

La vitesse de rotation de la pièce est définie par :

Avec : V_c = vitesse de coupe, D = diamètre de la pièce et ω = vitesse de rotation en tour/min

$$V_c = \pi D \omega = \frac{\pi D N}{100} \dots\dots\dots(I-1)$$

Où : D est le diamètre final de la pièce en (mm).

I.6.2 Profondeur de passe

La profondeur de passe notée « a_p », correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage.

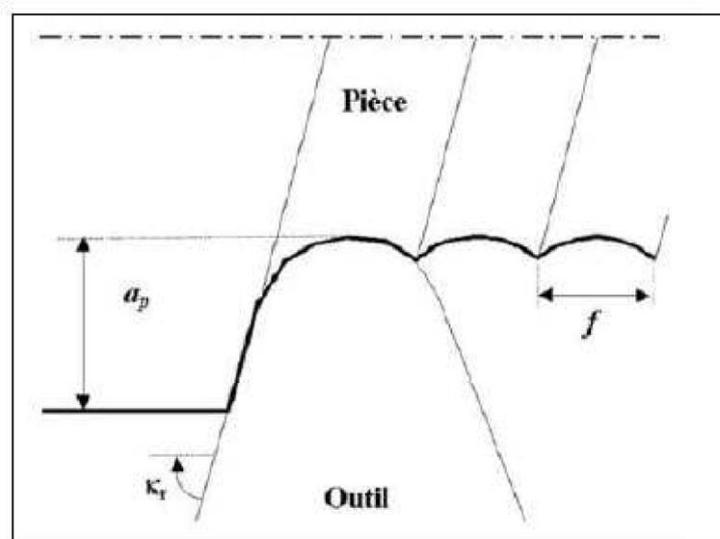


Figure I-10 Profondeur de passe a_p et l'avance f en tournage

I.6.3 Avance f

L'avance notée « f », correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage). La profondeur de passe et l'avance vont influencer aussi la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière.

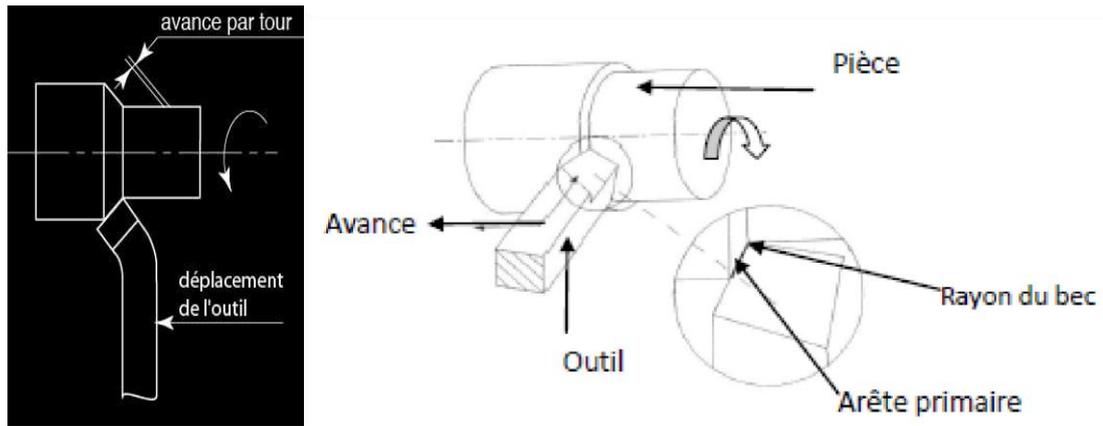


Figure I-11 Avance en tournage f

I.7. Rugosité de surface usinée

La rugosité est définie par les irrégularités plus fines et espacées de la texture de la surface qui résultent généralement de l'action inhérente au processus de production ou à la condition du matériau. [7]

Process	Ra – Micrometers μm (microinches $\mu\text{in.}$)												
	50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.80	0.40	0.20	0.10	0.05	0.025	0.012
	(2000)	(1000)	(500)	(250)	(125)	(63)	(32)	(16)	(8)	(4)	(2)	(1)	(0.5)
Tournage													
Rectification													

Figure I-12 Rugosité de surface produite par les méthodes de production Tournage et rectification

I.7.1 Paramètres influençant la qualité de surface usinée

La rugosité est influencée fondamentalement par les paramètres de coupe et la géométrie de l'outil.

Dans le cas du tournage, l'élément plus influent de la géométrie de l'outil est l'arrondi du nez et le paramètre plus important est l'avance.

Aussi en ce cas la rugosité due aux sillons est plus facilement prévisible de la rugosité selon la direction de la vitesse de coupe (V_c) car celle-ci est influencée par les vibrations de la machine.

L'établissement d'essais basés sur des plans d'expériences spécifiques pour la réduction de la rugosité et la création de modèles mathématiques-empiriques peuvent identifier les conditions optimales du point de vue de la rugosité. [8]

I.7.2 Écart de la moyenne arithmétique (Ra)

Représente la moyenne arithmétique de l'ordonnée absolue $Z(x)$ dans la longueur d'échantillonnage. L'un des paramètres les plus largement utilisés est la moyenne de la différence de hauteur moyenne pour la surface moyenne. Il fournit des résultats stables, car le paramètre n'est pas significativement influencé par les rayures, la contamination et le bruit de mesure. [9]

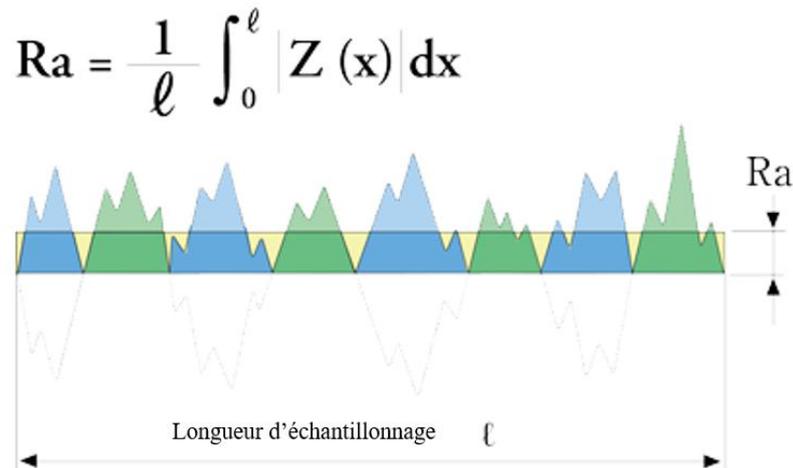


Figure I-13 Écart de la moyenne arithmétique (Ra)

I.7.3 Écart de la moyenne quadratique (Rq)

Représente la moyenne quadratique de $Z(x)$ dans la longueur d'échantillonnage. Il s'agit de l'un des paramètres les plus utilisés et est également appelé valeur RMS. Le paramètre Rq correspond à l'écart-type de la distribution des hauteurs. [9]

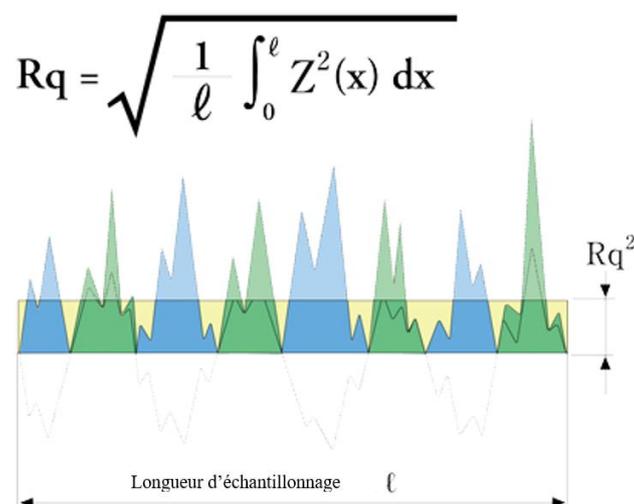


Figure I-14 Écart de la moyenne quadratique (Rq)

I.7.4 Hauteur maximale (Rz)

Représente la somme de la hauteur maximale de la crête Z_p et de la profondeur maximale de la vallée Z_v d'un profil dans la longueur de référence.

- Crête du profil : partie au-dessus (à partir de l'objet) de la ligne de profil moyenne (axe X).
- Vallée du profil : partie en dessous (à partir de l'espace environnant) de la ligne de profil moyenne (axe X).

Même si elle est fréquemment utilisée, cette hauteur maximale est fortement influencée par les rayures, la contamination et le bruit de mesure en raison de sa dépendance aux valeurs de crête. [9]

$$R_z = R_p + R_v$$

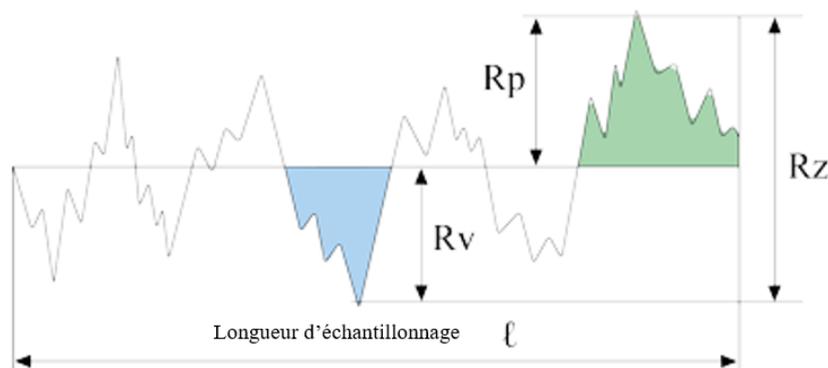


Figure I-15 Hauteur maximale (Rz)

I.8. La quantité du copeau enlevée

L'étude de la formation des copeaux a débuté au début du vingtième siècle avec les premiers travaux de (Taylor 1907) et de (Mallock 1881). Depuis, de nombreux travaux se sont succédés afin d'expliquer la formation des copeaux et classifier leurs types.

On retrouve les copeaux continus dans lesquels les sollicitations sont constantes (Figure 1 (a)); les copeaux segmentés qui sont des copeaux continus où apparaissent des bandes de cisaillement et dont l'épaisseur varie avec le temps (b); les copeaux festonnés formés dans un état de déformation plastique instable (c); et les copeaux discontinus obtenus quand chaque segment se brise (d). La norme ISO/DIS 3685 prévoit de classifier les copeaux en fonction de leurs morphologies. [10]

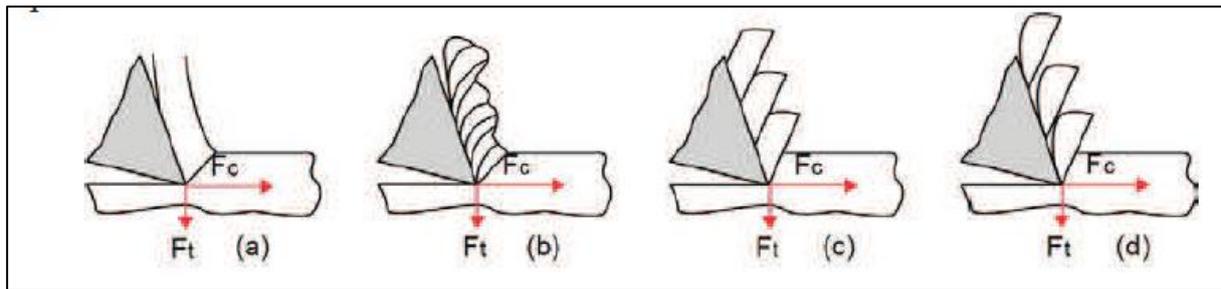


Figure I-16 Différents copeaux produits en usinage (a) continu ; (b) segmenté ; (c) festonné ; (d) discontinu

Le débit de matière global (Q) est un paramètre à optimiser afin d'améliorer la productivité.

Néanmoins, la variation de ce paramètre peut entraîner une augmentation des efforts de coupe, de la température de coupe, etc.

Cela peut également entraîner une usure prématurée ou bien même la rupture de l'arête de l'outil de coupe, et par là même, une dégradation qualitative du composant usiné. Il faut donc veiller à appliquer une démarche de caractérisation rigoureuse, à laquelle un compromis entre productivité, durée de vie et qualité d'usinage sera nécessaire.

Le débit de matière global (Q) s'exprime alors comme étant le volume de matière enlevée par l'outil et par unité de temps ($cm^3 \cdot min^{-1}$) :

$$Q = Vc \cdot f \cdot ap \dots \dots \dots (I-2)$$

Où Vc : Vitesse de coupe ; f : vitesse d'avance et ap : profondeur de passe. [11]

I.9. Etude des aciers

Les matériaux se distinguent en fonction de différentes caractéristiques qui leur confèrent des propriétés spécifiques. Celles-ci déterminent la fonction du matériau dans un assemblage.

I.9.1 Elaboration des aciers

La sidérurgie est le secteur industriel concerné par la métallurgie d'élaboration des alliages ferreux et par leur mise en forme visant à fournir des produits semi-finis aux diverses branches industrielles utilisatrices.

Bien qu'apparue au XIXe siècle la technologie sidérurgique est en perpétuelle évolution et intègre constamment les possibilités et les exigences conjoncturelles : économies d'énergie, gain de productivité, automatisation et informatisation des procédés sont constamment au centre de ses préoccupations.

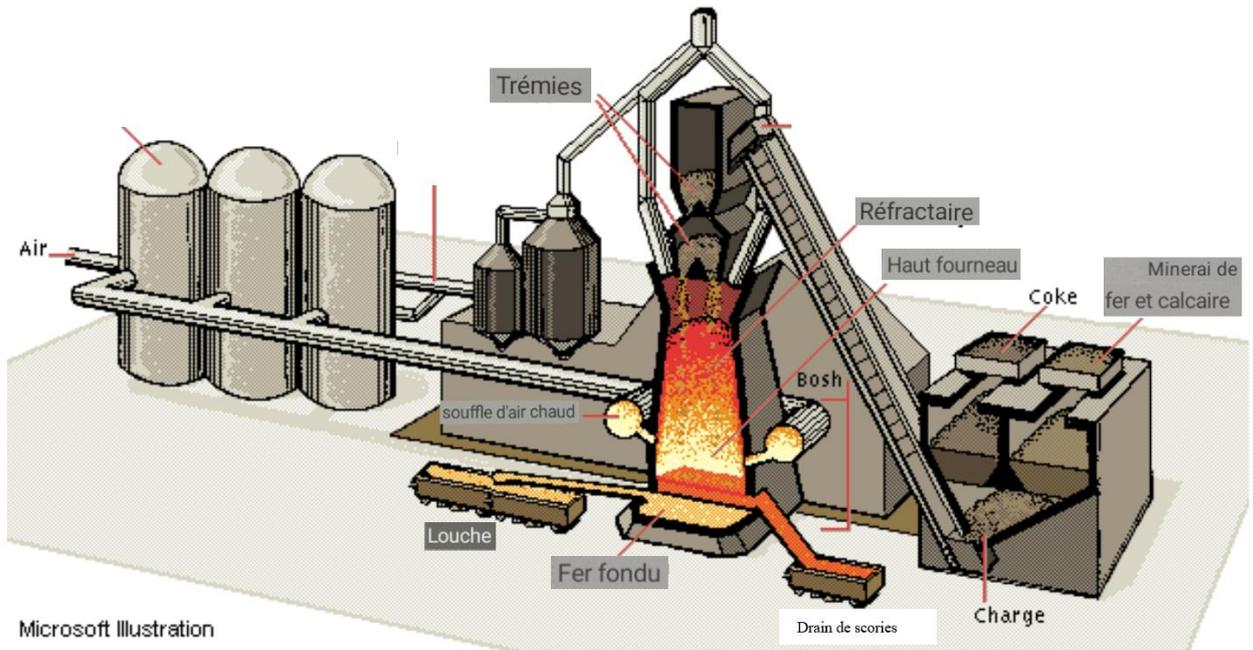


Figure I-17 Réduction du fer et production des fontes dans les hauts fourneaux

L'élaboration de l'acier se fait :

I.9.1.1. À partir de la fonte liquide (fonte d'affinage): convertisseurs à l'oxygène

Le passage de la fonte liquide à l'acier nécessite une diminution des teneurs de pratiquement tous les éléments comme le montre la comparaison ci-dessous :

	% C	% Si	% Mn	% P	% S
<i>Fontes</i>	3-4	0,5 à 2,5	1 à 2	2 à 0,1	0,05
<i>Aciers</i>	0,05-1,5	0 à 0,5	0,3 à 1,5	< 0,05	< 0,05

Ce procédé est basé sur l'insufflation d'oxygène pur dans un bain de fonte liquide.

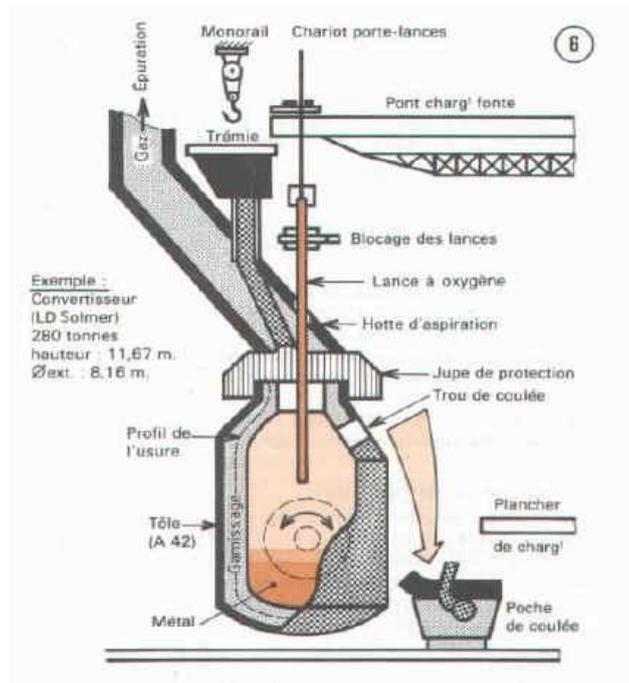


Figure I-18 Acier à l'oxygène

I.9.1.2. À partir de ferrailles par refusion au four électrique.

La filière de la refusion des ferrailles utilise un four à sole réfractaire sur laquelle sont placées les matières à refondre. L'énergie thermique est fournie par production d'arcs électriques entre trois électrodes et la charge. Le procédé électrique assure actuellement une part importante du tonnage des aciers courants.

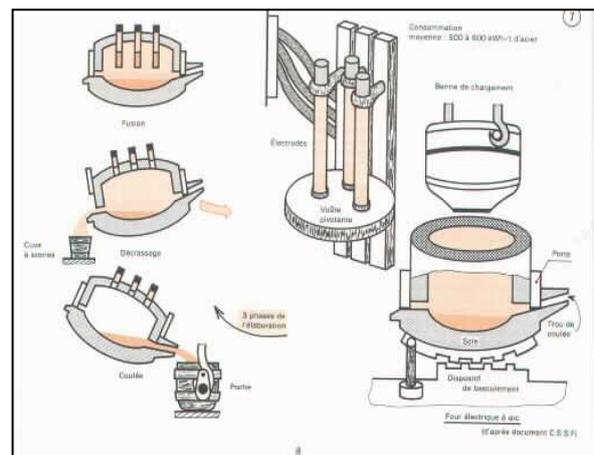


Figure I-19 Acier électrique

La coulée de l'acier liquide, si on excepte les aciers moulés, s'opère selon deux techniques différentes :

➤ **Coulée continue**

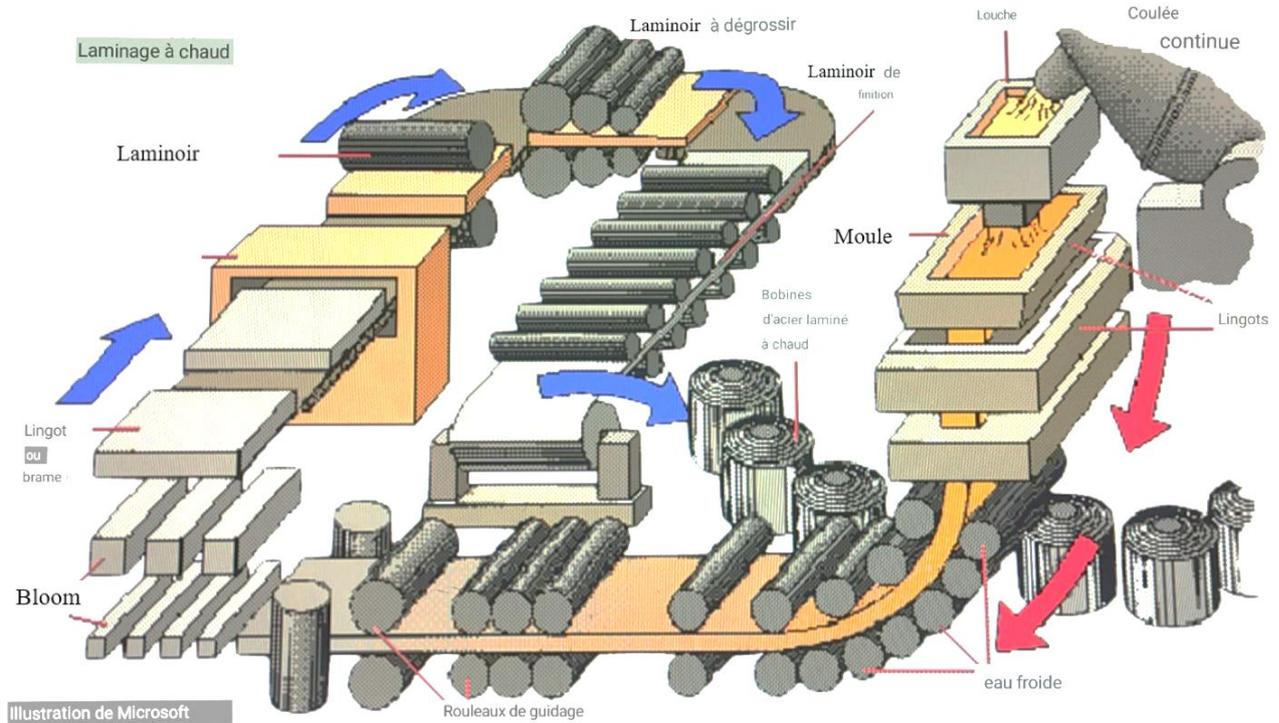


Figure I-20 Coulée continue de l'acier

➤ **Coulée en lingotières**

Acier fondu versé dans de grands moules (lingots), les lingots sont utilisés pour une transformation ultérieure.

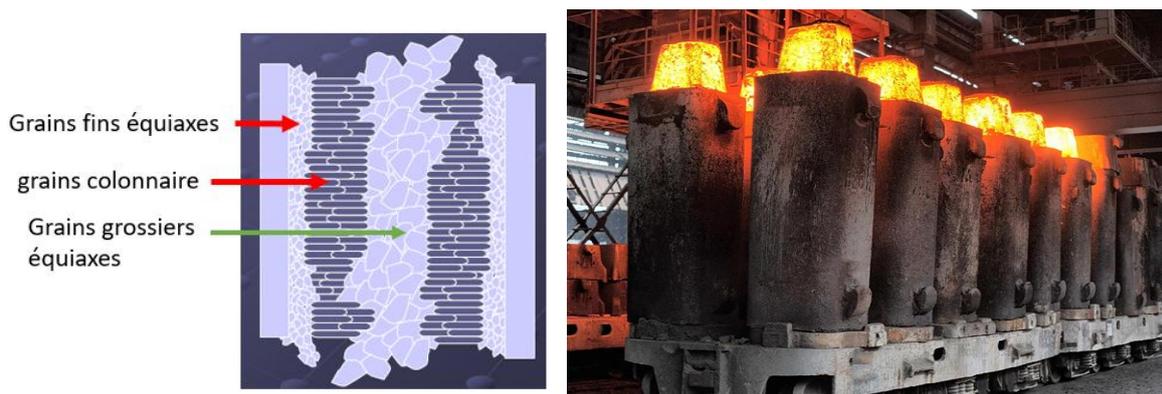


Figure I-21 Coulée en lingotières

I.9.2 Classification des aciers

Les alliages à base de fer, à de rares exceptions près, contiennent tous du carbone comme élément d'alliage et en proportions diverses. Ainsi, les aciers titrent moins de 2 % de carbone; les fontes, au contraire, contiennent plus de 2 % de carbone.

Dans ces deux cas peuvent être ajoutés d'autres éléments d'alliage en quantités très diverses, sous réserve que l'élément fer reste le plus important.

- ❖ Les fontes sont classées uniquement selon leur structure micrographique et plus précisément celle du carbone ou des carbures précipités : fonte à graphite lamellaire, à graphite sphéroïdal, fontes blanches, ...etc.
- ❖ Les différentes familles d'aciers ont été classées en fonction de deux critères, l'un de composition et l'autre de niveau de qualité.

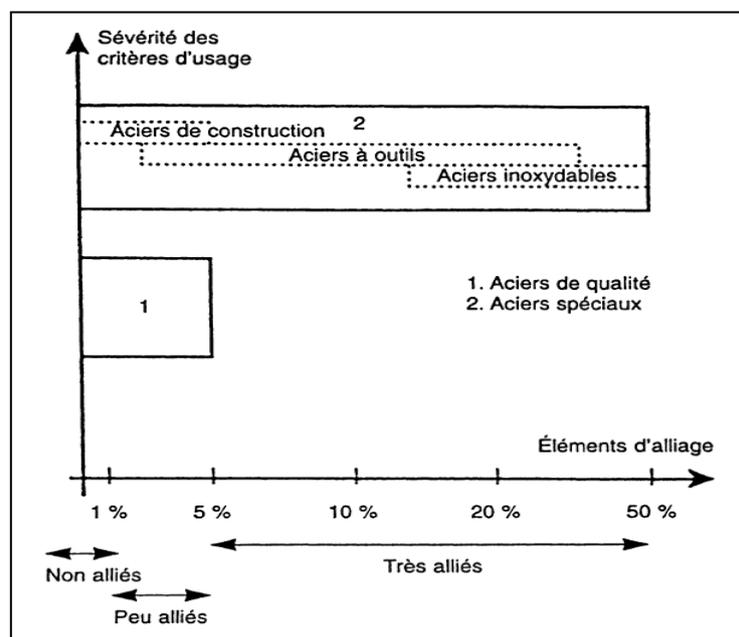


Figure I-22 Classification des aciers

La structure des aciers peut prendre trois formes solides de base:

- ✚ Ferrite
- ✚ Austénite ;
- ✚ Cémentite.

I.9.3 Traitement thermique

Un traitement thermique consiste en une série d'opérations de chauffage et de refroidissement, plus ou moins rapides, à des températures déterminées. Le but d'un tel

traitement est de donner au métal des qualités mécaniques appropriées à l'usage auquel on le destine.

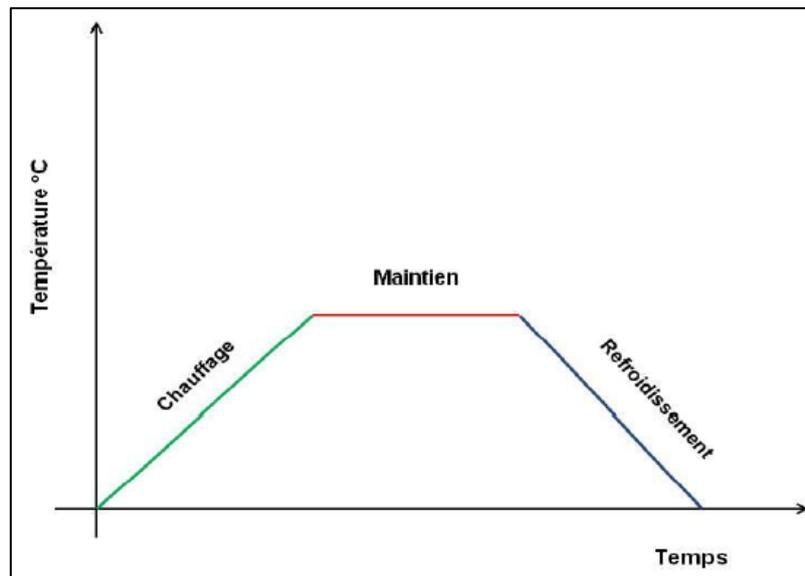


Figure I-23 Le cycle thermique

I.9.3.1. La Trempe (Quenching)

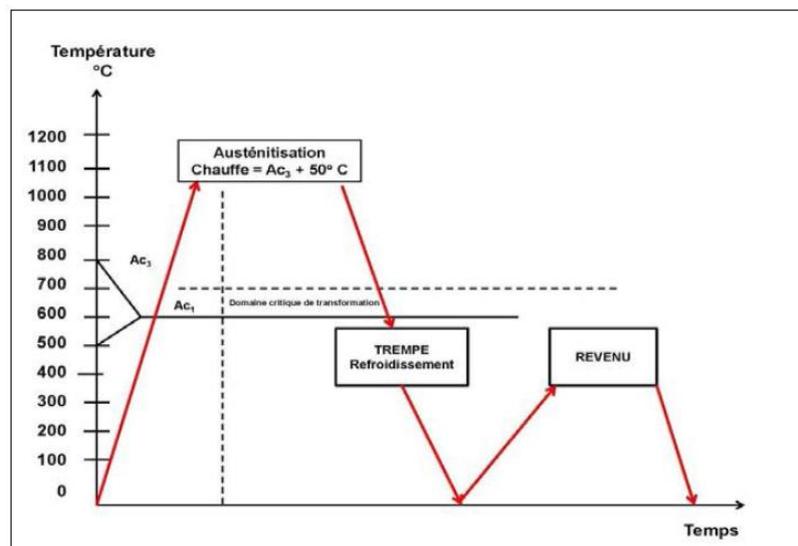


Figure I-24 La Trempe

I.9.3.2. Le Revenu (Tempering)

Le revenu est le traitement qui suit généralement la trempe. En effet, une pièce trempée est très dure et cassante. Le revenu permet alors de diminuer la fragilité de la pièce, tout en lui conservant sa dureté, et de réduire les tensions internes provoquées par le refroidissement rapide lors de la trempe. Le revenu permet donc de maintenir la dureté et d'augmenter la résistance

aux chocs de la pièce qui a été trempée. Ce traitement consiste à chauffer la pièce à des températures plus basses que celles de la trempe.

I.9.3.3. Le Recuit (Annealing)

Les recuits consistent en un traitement thermique visant la restauration des propriétés originales du matériau, c-à-d de supprimer les effets sur la structure : de la solidification ; d'une déformation plastique ; d'une soudure ; d'un traitement thermique antérieur.

Le traitement de recristallisation

Avant d'aller plus loin dans ce traitement, on doit différencier les notions de travail à chaud et de travail à froid.

➤ **Travail à froid**

Si le travail de la pièce se fait sous la température de recristallisation, on parle alors de travail à froid. Lors d'un travail à froid, la pièce subit un écrouissage (déformation permanente du grain).

➤ **Travail à chaud**

Par contre, si le travail est réalisé au-dessus de la température de recristallisation, on parle alors de travail ou de déformation à chaud. Dans ce cas, la déformation du grain n'est pas permanente.

Seules les pièces travaillées à froid peuvent subir un traitement de recristallisation.

La déformation plastique d'un matériau s'accompagne de la création de dislocations.

Lorsque la température est suffisante, les dislocations deviennent spontanément mobiles et provoquent une réorganisation de la structure cristalline, en deux étapes : restauration puis recristallisation. [12]

I.10. Travaux de recherche

Divers travaux de recherche ont été réalisés pour étudier le tournage dur des aciers et l'optimisation des paramètres d'usinage, en utilisant la méthode de Taguchi.

Gaitonde V.N et al. [13] Ont réalisé une étude sur les caractéristiques de l'usinabilité de l'acier à outil pour travail à froid à haute teneur en chrome AISI D2 en tournage avec les plaquettes en céramique (CC650, Wiper CC650WG et Wiper GC6050WH). Une tentative a été faite pour analyser les effets de la profondeur de passe et du temps d'usinage sur des aspects d'usinabilité tels que l'effort de coupe spécifique, la force d'usinage, la puissance, la rugosité de surface et l'usure de l'outil en utilisant les modèles mathématiques du deuxième degré. La

planification des expériences a été faite par un plan factoriel complet (FFD). D'après l'analyse paramétrique, il s'est avéré que la plaquette Wiper CC650WG est plus performante en termes de la rugosité de surface et de l'usure de l'outil de coupe.

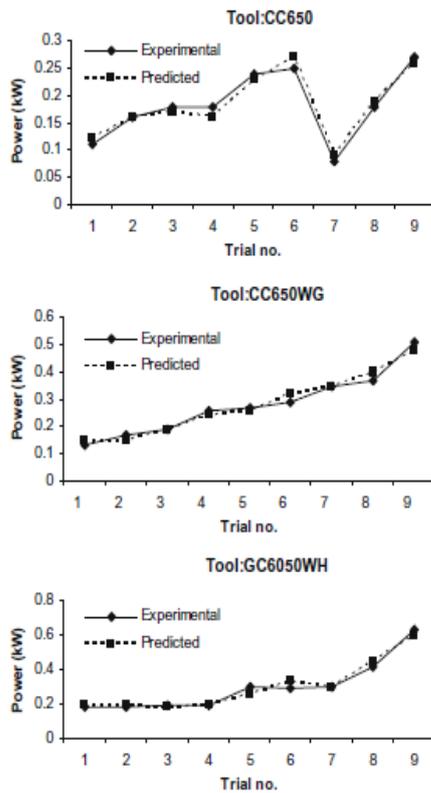


Fig. 3. Experimental and RSM predicted values of power.

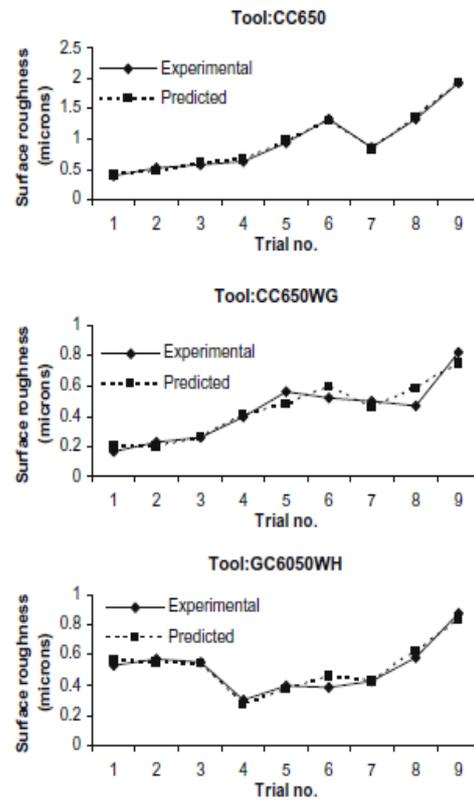


Fig. 5. Experimental and RSM predicted values of surface roughness.

Figure I-25 Effet de la profondeur de passe et le temps d'usinage sur la puissance et la rugosité

Gaitonde V.N et al. [14] Ont conduit une étude de comparaison des performances des plaquettes en céramique conventionnels et wiper en tournage dur grâce à la modélisation de réseaux neuronaux artificiels. Le tournage dur avec des outils en céramique offre une alternative à la rectification pour l'usinage de composants de haute précision et trempés. Cependant, les principales préoccupations sont le coût des matériaux d'outils onéreux et l'effet du processus sur l'usinabilité. Une mauvaise sélection des conditions de coupe peut entraîner une usure excessive de l'outil et une augmentation de la rugosité de surface de la pièce. Par conséquent, il est nécessaire d'étudier les effets des paramètres du processus sur les caractéristiques d'usinabilité en tournage dur. Dans ce travail, l'influence de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance et du temps d'usinage sur les aspects d'usinabilité tels que la force de coupe spécifique, la rugosité de surface et l'usure de l'outil dans le tournage dur d'acier à froid AISI D2 avec trois

plaquettes céramiques différentes, à savoir CC650, CC650WG et GC6050WH, a été étudiée. Un réseau neuronal artificiel (ANN) multicouche à avance, formé à l'aide de l'algorithme de formation par rétro propagation des erreurs, a été utilisé pour prédire l'usinabilité. Les modèles d'entrée-sortie requis pour la formation et le test du réseau ANN sont obtenus à partir des expériences de tournage planifiées par un plan factoriel complet. Les résultats de la simulation démontrent l'efficacité des modèles ANN pour analyser les effets des conditions de coupe ainsi que pour étudier les performances des plaquettes céramiques conventionnelles et wiper sur l'usinabilité.

Aouici et al. [15] ont décrit une comparaison entre les outils de coupe en céramique Wiper (multi rayons) et conventionnels en termes des efforts de coupe et l'usure en dépouille lors du tournage dur de l'acier AISI 4140 durcis (60 HRC), utilisant la méthodologie de surface de réponse. Dans ce cadre, plusieurs expériences d'usinage basées sur des conceptions d'expériences factorielles à trois facteurs (vitesse de coupe, avance et profondeur de coupe) à trois niveaux, complétées par une analyse statistique de la variance (ANOVA) ont été réalisées. L'analyse paramétrique montre que les céramiques non revêtues (Wiper CC650WG et CC650 conventionnelle) donnent des faibles efforts de coupe par rapport aux céramiques revêtues (Wiper CC6050WH et CC650 conventionnelles). Par contre, les outils de coupe en céramique Wiper (CC6050WH et CC650WG) sont plus performants par rapport à céramiques conventionnelles (CC6050 et CC650), en termes d'usure en dépouille.

Bensouilah et al. [16] La présente contribution traite de l'étude des effets de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de coupe sur la performance de l'usinage, traditionnellement appelée "machinabilité".

L'accent est mis sur l'effet des paramètres de coupe précités sur l'évolution de la rugosité de surface et des composantes de la force de coupe pendant le tournage dur d'un outil de travail à froid AISI D3, avec des plaquettes en céramique CC6050 et CC 650. De plus, pour les deux céramiques, une comparaison de l'évolution de leur usure avec le temps et son impact sur l'égalité de surface a été proposée. La planification des expériences a été basée sur le tableau orthogonal L16 de Taguchi. L'analyse de la variance (ANOVA), le rapport signal/bruit et la méthodologie de la surface de réponse (RSM) ont été adoptés.

Par conséquent, la validité du modèle de régression linéaire proposé a été vérifiée et les paramètres les plus importants affectant la rugosité de surface et les composantes de la force de coupe ont été déterminés. En outre, afin de déterminer les niveaux du régime de coupe qui conduisent à une rugosité de surface minimale et à une force d'usinage minimale, la relation entre les facteurs de coupe a été analysée. Les résultats ont révélé que la qualité de surface obtenue avec la plaquette céramique CC6050 revêtue est 1,6 fois meilleure que celle obtenue avec la plaquette céramique CC650 non revêtue. Cependant, la plaquette en céramique non revêtue a permis de réduire la force d'usinage.

Elbah et al. [17] Ont décrit une comparaison entre les outils de coupe en céramique Wiper (multi rayons) et conventionnels en termes des critères de rugosité de surface (R_a , R_z et R_t) lors du tournage dur de l'acier AISI 4140 durcis (60 HRC), utilisant la méthodologie de surface de réponse, pour un plan factoriel complet de (27 Essais).

L'analyse statistique révèle que la vitesse d'avance et la profondeur de coupe ont des effets significatifs sur la réduction de la rugosité de surface. Les conditions d'usinage optimales pour produire la meilleure rugosité de surface possible dans la gamme de cette expérience dans ces conditions expérimentales recherchées en utilisant l'approche de fonction de désirabilité pour l'optimisation des facteurs de réponse multiples. Les résultats indiquent que la qualité de surface obtenue avec la plaquette en céramique de la géométrie Wiper est significativement améliorée par rapport à la plaquette en céramique conventionnelle est de 2,5. Les mesures de rugosité révèlent une dépendance à l'usure de l'outil CC6050WH. Cependant, bien que l'usure atteigne la valeur admissible de 0,3 mm, la rugosité R_a n'a pas dépassé 0,9 μm .

I.11. Conclusion

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique les bases nécessaires à la compréhension de ce travail.

Nous avons présenté un résumé sur les différents travaux scientifiques réalisés ces dernières années en liaison avec notre travail. Le prochain chapitre présente l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale méthodique et scientifique.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter l'ensemble du matériel exploité pour effectuer cette étude expérimentale, afin d'identifier le comportement du matériau usiné en évaluant la rugosité de surface (R_a , R_z , R_q) obtenue par rapport aux conditions de coupe. Nous présentons au même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et de leurs conditions de réalisation.

Les essais de tournage dur sur l'acier **100Cr6** nécessaires à la réalisation de notre mémoire, ont été effectués au niveau du Laboratoire de Mécanique et de Structure (LMS) du département de génie Mécanique à l'Université 8 Mai 1945- Guelma.

II.2. Matériels utilisés

II.2.1 Machine-outil

Les expériences de tournage dur que nous avons effectuées lors de notre étude ont été réalisées à l'aide d'un tour conventionnel modèle SN40 de puissance sur la broche égale à 6,6 KW ayant une gamme de vitesse de rotation 45 à 2000 tr/min et d'avance de 0,08 à 6,4 mm/tr (figure II.1).



Figure II-1 Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

II.2.2 Matériau de la pièce à usiner

Le matériau utilisé dans notre étude est l'acier 100Cr6. Il est destiné généralement à la fabrication des roulements. Ces derniers sont des éléments souvent présents dans les systèmes mécaniques lorsqu'une fonction de rotation doit être assurée. Les alliages utilisés pour réaliser le roulement sont choisis en fonction de leurs caractéristiques de la dureté. C'est notamment le cas des structures martensitiques de l'acier 100Cr6, le plus utilisé dans l'industrie du roulement.

II.2.2.1. Définition de l'acier 100Cr6

Fait partie de famille des aciers faiblement alliés qui peuvent être forgés, acier à outil, au chrome à haute teneur en carbone.

II.2.2.2. Désignation de l'acier 100Cr6

Tableau II-1 Désignation de l'acier 100Cr6 selon les normes

Norme	Désignation de l'acier 100Cr6
AISI	52 100
NF A 35-573/4	100C6
EN 10027	100Cr6

II.2.2.3. Composition chimique

La composition chimique de l'acier 100Cr6 est représentée dans le tableau suivant :

Tableau II-2 composition chimique de l'acier 100Cr6

Eléments chimique	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
Pourcentage (%)	1.05	0.38	0.21	0.03	0.028	1.41	0.21

II.2.2.4. Caractéristiques mécaniques

Sensible aux chocs. Bonne ténacité, bonne résistance à l'usure. Leur module d'élasticité $E = 205000 \text{ N/mm}^2$.

Tableau II-3 Caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6

Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	Rr (N/mm ²)	A%	Dureté après trempe
550-850	750-850	850-1250	10-13%	63-65 HRC

II.2.2.5. Domaines d'application

Cet acier typique utilisé dans les roulements à billes, rouleaux ou à aiguilles, butées, cames, galets, très utilisé en mécanique d'outillage : goupilles, poinçons, colonnes de guidage, limes, forets, alésoirs

II.2.2.6. Traitements thermiques

Le principe du traitement thermique de l'acier à roulement est de lui donner une structure martensitique qui lui confère :

- La dureté requise (62HRC environ) ;
- La résistance à la fatigue ;
- La stabilité dimensionnelle ;
- La résistance à l'usure.

Le traitement thermique habituellement pratiqué sur le 100Cr6 pour confère à l'acier la dureté et la stabilité indispensables au roulement, est constitué d'une austénitisation entre 830°C et 850°C, d'une trempe à l'huile, puis d'un revenu de détente. Le choix de revenu permet d'obtenir un compromis dureté-stabilité dimensionnelle qui dépend de l'application visée.

Tableau II-4 Traitements thermiques – températures approximatives.

Recuit °C	Trempe °C	Revenu °C
720-800	830-870 à l'huile	150-300

L'éprouvette utilisée pour la réalisation des essais est de forme ronde (de 60 mm de diamètre et de 400 mm de longueur), avec un trou de centrage pour fixer la pièce à usiner.

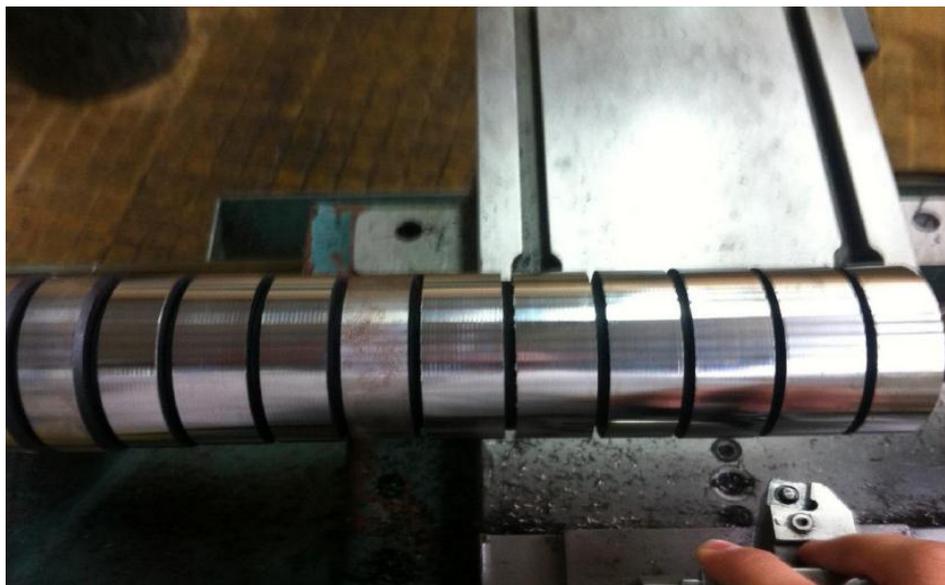


Figure II-2 Éprouvette utilisée.

II.3. Plaquettes et porte outil

II.3.1 Plaquettes de coupe

Le matériau des plaquettes de coupe utilisées est la céramique conventionnel (CC650) et Wiper (CC650WG) sans revêtement. Ces plaquettes sont amovibles de forme : rhombique d'une géométrie Wiper et non Wiper, comportant 4 arêtes de coupe par plaquette de marque SANDVIK, avec une fixation par trou central.

Tableau II-5 Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Composition
Céramique CC650	CC650 SANDVIK	CNGA 12 04 12 T01020	(70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC) (Al ₂ O ₃ +TiC)
Céramique Wiper CC650	CC650WG SANDVIK	CNGA 12 04 12 T01020 WG	70% Al ₂ O ₃ + 30% TiC) (Al ₂ O ₃ +TiC)

Descriptif des plaquettes CNGA 12 04 12 T01020 :

- **C** : Indique la forme de la plaquette (ici rhombique) ;
- **N** : Valeur de l'angle de dépouille ;
- **G**: Tolérances dimensionnelles ;
- **A**: Type de fixation de la plaquette sur le corps d'outil ;
- **12**: Indication de la longueur d'arête de coupe;
- **04**: Indication de l'épaisseur de la plaquette;
- **12**: Rayon du bec de l'outil ici égal à 1,2 mm;

- **010**: la largeur du chanfrein;
- **20**: l'angle du chanfrein;
- **WG** : géométrie Wiper pour usinage générale convient bien pour la finition des fontes grise autorise des avances élevées.

II.3.1.1. Plaquette en céramique CC650

La plaquette CC650 est une nuance de céramique mixte à base d'alumine, additionnée de carbure de titane (70% Al_2O_3 + 30% TiC).

Principalement recommandée pour l'usinage de finition des aciers trempés et des superalliages réfractaires, requérant une bonne résistance à l'usure associée à de bonnes propriétés thermiques.

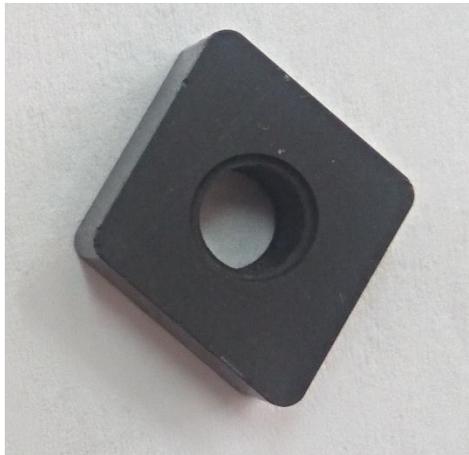


Figure II-3 Plaquette CC650.

II.3.1.2. Géométrie Wiper CC650WG

Les plaquettes céramiques s'utilisent notamment pour la finition des surfaces selon des spécifications très élevées. Sandvik Corament a adapté sa technologie Wiper mondialement réputée aux plaquettes en matériaux de haute technologie afin d'améliorer considérablement la productivité de ce type d'opération.

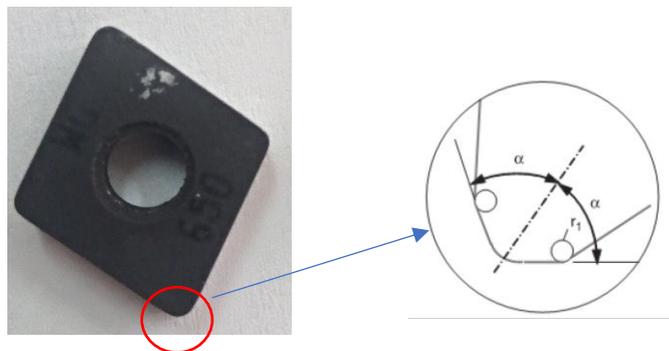


Figure II-4 Plaquette wiper CC650WG

II.3.2 Porte plaquette (*porte-outil*)

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé le porte outil suivant :

Tableau II-6 Caractéristiques des portes plaquettes utilisées

Désignation	Marque	α	γ	ξ_r	λ
PCLNR 25×25 M12	P MAX	6°	-6°	95°	-6°



Figure II-5 Porte-outil utilisé

II.4. Instruments de mesure utilisés

II.4.1 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité 2D

Lors de nos expériences nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.

Les critères de la rugosité de surface (Ra , Rz , et Rq) ont été mesuré instantanément après chaque passage de l'outil (essai) au moyen d'un appareil de rugosité **Mitutoyo Surftest SJ-210** muni d'une pointe en diamant de 5 μm et se déplaçant linéairement sur la surface usinée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, les mesures de la rugosité ont été effectuées directement sur la pièce à trois reprises à 120 degrés sans avoir recours à la démonter.



Figure II-6 Rugosimètre Mitutoyo Surftest SJ-210

II.5. Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre de sortie.

Y_i est une relation qui a la forme :

$$Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \dots \dots \dots \text{II-1}$$

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité et le taux d'enlèvement de la matière). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

$$N = q^k \dots \dots \dots \text{II-2}$$

Où :

N : nombre d'essais,

q : nombre de niveaux de variations des facteurs de base,

k : nombre de facteurs de base.

II.6. Plans d'expériences adoptés

L'approche expérimentale est adoptée en vue d'étudier les effets des différents facteurs et de leur interaction sur les réponses en les changeant d'une façon commandée.

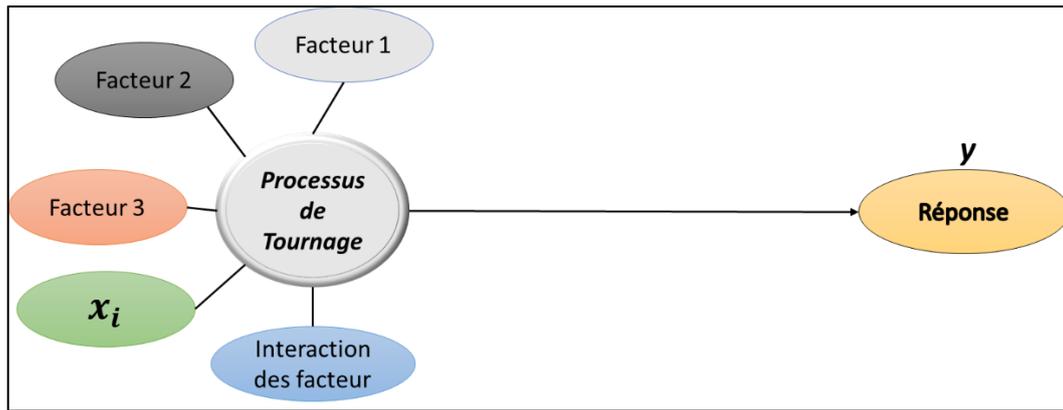
II.6.1 Définition

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.

II.6.2 Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

Le diagramme ci-dessous résume de manière plus simple cette définition :



II.6.3 Différents types de facteurs

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens.

Chaque facteur peut être :

- Continu : la pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.
- Facteurs discrets : au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.
- Facteurs ordonnables : il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.
- Facteurs booléens : les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

II.6.4 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 sont 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.6.5 Démarche et plan d'expérience adopté

Les éléments du régime de coupe (V_c, f, ap) sont considérés comme paramètres d'entrée. La rugosité de surface et taux d'enlèvement de la matière représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences. Nous nous servons des plans d'expériences pour quantifier les influences des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Toutes les planifications des expériences et l'analyse statistique des résultats sont faites avec le logiciel Minitab (version 16), c'est un logiciel spécialisé pour la planification et l'analyse statistique des expériences.

Pour chaque type d'étude, nous adopterons la démarche suivante :

- Etablissement du but et des objectifs des essais ;
- Sélection des variables d'entrées (facteurs) et de sortie (réponses) ;
- Choix du type de plan d'expérience ;
- Conduite des essais ;
- Détermination des facteurs influents ;
- Modélisation rapide des réponses ;
- Recherche des paramètres optimaux ;
- Validation des résultats.

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

Dans notre cas, le plan d'expériences a été adopté : le Plan de Taguchi (L16).

II.6.6 Plan de Taguchi (L16)

Nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur à quatre niveaux de variation. Nous avons alors :

$$N = 4^3 = 64 \dots \dots \dots \text{II-3}$$

Mais nous allons travailler dans cette étude seulement avec un plan de 16 essais qui représente un plan de Taguchi (L16), car il minimise les essais

Les essais ont été numérotés de 1 à 16. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau II-7 Matrice de planification pour un plan de Taguchi (L16).

N° d'essai	Vc m/min	f mm/tr	ap mm
1	150	0,08	0,1
2	150	0,12	0,2
3	150	0,16	0,3
4	150	0,2	0,4
5	190	0,08	0,2
6	190	0,12	0,1
7	190	0,16	0,4
8	190	0,2	0,3
9	300	0,08	0,3
10	300	0,12	0,4
11	300	0,16	0,1
12	300	0,2	0,2
13	380	0,08	0,4
14	380	0,12	0,3
15	380	0,16	0,2
16	380	0,2	0,1

Dans notre travail les trois critères de la rugosité de surface (Ra , Rz et Rq) ont été testés pour chacun des deux matériaux de plaquette en céramique CC650 et CC650WG.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements de travail et de mesures utilisées (machine-outil, éprouvettes, plaquettes de coupe, porte-outil et rugosimètre), la planification des expériences et les conditions de coupe ont été également présentées. Dans le chapitre qui suit, nous allons exposer les résultats du chapitre II.

Chapitre III

Modélisation de la Rugosité de surface

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de la modélisation des paramètres technologiques de sortie à savoir ; R_a , R_z et R_q en utilisant la méthodologie de surface de réponse, lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 par deux types de plaquettes de coupe. Les modèles développés par la méthodologie de surface de réponse sont obtenus à partir d'un plan de Taguchi L_{16} (16 essais). Les paramètres du processus de coupe choisis comme variables, sont la vitesse de coupe V_c , l'avance f et la profondeur de passe ap .

III.2. Analyse de variance (ANOVA) et modélisation

III.2.1 Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (ANOVA) est une technique statistique qui est couramment utilisée pour déterminer l'importance des variables indépendantes sur les réponses de sortie [18]. Elle n'analyse pas les données directement, mais détermine le pourcentage de contribution de chaque facteur dans la détermination de la variabilité (variance) des données. Le tableau ANOVA est composée de :

- Les sommes des carrés (SC) par rapport aux moyennes sont calculées par l'équation III.1.

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \dots \dots \dots (III.1)$$

Où, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses, \bar{y}_i la réponse moyenne observée dans les

expériences où le facteur f prend son niveau $i^{\text{ème}}$, N nombre total d'expériences, N_{nf} niveau de chaque facteur f.

- Les degrés de liberté (DF) utilisés pour calculer la valeur F.
- Les carrés moyens (MC) sont calculés en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \dots \dots \dots (III.2)$$

➤ La valeur F est calculée par l'équation (III.3)

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \dots \dots \dots (III.3)$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

- La colonne de P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude ont pu se produire par hasard.
 - Si $P > 0,05$, le paramètre est insignifiant
 - Si $P < 0,05$, le paramètre est significatif
- La dernière colonne du tableau d'ANOVA (Cont. %), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$\text{Cont. \%} = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \dots\dots\dots (III.4)$$

III.2.2 Méthodologie de surface de réponse (MSR)

La méthodologie de la surface de réponse (RSM) est un ensemble de techniques mathématiques et statistiques basées sur des résultats expérimentaux dont le but est de développer des relations appropriées entre les paramètres d'entrée indépendants, représentés dans le cas présent par les conditions de coupe (Vc), (f) et (ap), et les paramètres de sortie, c'est-à-dire les réponses du processus illustrées par les critères de la rugosité de surface (Ri). Les éléments les plus importants sont exploités pour formuler un modèle polynomial qui sera ensuite appliqué pour optimiser ces paramètres de processus et par conséquent obtenir les réponses souhaitées.

Pour une réponse particulière (Ri), les modèles polynomiaux mathématiques peuvent être exprimés comme suit :

$$Ri = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i X_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \dots\dots\dots (III.5)$$

où :

- X_i : représente les conditions de coupe, c'est-à-dire Vc , f ou ap .
- a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} : représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, les termes représentant les interactions entre les variables et les termes quadratiques.

III.3. Résultats et discussions

Le (Tableau III-1) présente les résultats expérimentaux obtenus suite aux différentes combinaisons des conditions de coupe lors de tournage dur de notre éprouvette en acier **100Cr6**.

Tableau III-1 Résultats des essais pour un plan de Taguchi L16.

N°	Facteurs			Rugosité						MRR cm ³ /min
	Vc m/min	f mm/tr	ap mm	Ra CC650	Ra CC650 WG	Rz CC650	Rz CC650 WG	Rq CC650	Rq CC650 WG	
1	150	0,08	0,1	0,64	0,33	2,52	1,23	0,6	2,52	1,2
2	150	0,12	0,2	0,88	0,34	3,36	1,41	0,83	3,36	3,6
3	150	0,16	0,3	0,9	0,35	4,55	1,61	1,06	4,55	7,2
4	150	0,2	0,4	1,08	0,37	4,69	1,67	1,64	6,38	12
5	190	0,08	0,2	0,52	0,29	2,73	1,19	0,5	2,41	3,04
6	190	0,12	0,1	0,6	0,31	3,77	1,4	0,71	3,72	3,8
7	190	0,16	0,4	0,78	0,33	5,25	1,71	1,37	5,25	12,16
8	190	0,2	0,3	1,07	0,35	6,25	1,81	1,8	6,25	11,4
9	300	0,08	0,3	0,46	0,26	2,83	1,77	0,57	2,83	7,2
10	300	0,12	0,4	0,68	0,28	4,52	1,89	0,82	3,75	14,4
11	300	0,16	0,1	0,75	0,31	5,97	2,07	1,6	4,52	4,8
12	300	0,2	0,2	0,94	0,32	6,57	2,13	1,81	6,57	12
13	380	0,08	0,4	0,32	0,23	4,64	2,66	1,14	4,64	12,16
14	380	0,12	0,3	0,5	0,27	4,77	2,71	1,21	4,77	13,68
15	380	0,16	0,2	0,68	0,29	5,57	2,84	1,89	4,79	12,16
16	380	0,2	0,1	0,85	0,3	6,06	2,86	1,97	6,06	7,6

L'analyse des résultats de ce tableau montre que la valeur minimale de la rugosité de surface Ra, elle a été observée lors de tournage avec l'outil CC650WG, l'essai N°13 qui correspond aux paramètres de coupe (380 m/min ; 0,08 mm/min ; 0.4 mm) et pour la valeur minimale de Rz, elle a été trouvée avec l'essai N°05 avec (190 m/min ; 0,08 mm/min ; 0.2 mm et CC650WG) pour la valeur minimale de Rq, elle a été trouvée aussi à l'essai N°05 avec (190 m/min ; 0,08 mm/min ; 0.2 mm et CC650) et le maximum pour MRR a été observée à l'essai N°10 (300 m/min ; 0,12 mm/min ; 0.4 mm).

La valeur maximale de la rugosité de surface R_a a été observée à l'essai N°4 de (150 m/min ; 0,2 mm/min ; 0.4 mm et CC650). Le maximum de la valeur de la rugosité de surface R_z a été observée à l'essai N°12 c-à-d (300 m/min ; 0,2 mm/min ; 0.2 mm et CC650), le maximum de la valeur pour R_q a été observée à l'essai N°12 (300 m/min ; 0,2 mm/min ; 0.2 mm et CC650WG), et finalement le maximum de la valeur pour MRR a été observée à l'essai N°10 (300 m/min ; 0,12 mm/min ; 0.4 mm)

III.3.1 Analyse de variance et modélisation de la rugosité R_{aCC650}

III.3.1.1. Analyse de variance ANOVA pour R_{aCC650}

Le (Tableau III-2) présente l'analyse de variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_a concernant l'outil de coupe CC650. On remarque que l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c) ont un impact significatif sur R_a . L'avance (f) vient en première position avec une contribution de (72,34) % et en deuxième lieu on trouve la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution de 20,56 %.

En outre le paramètre ap et les interactions (V_c*f , V_c*ap et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité R_{aCC650} .

Tableau III-2 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité R_{aCC650} .

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	6	0,674224	93,79%	0,674224	0,112371	22,67	0,000
Linéaires	3	0,667811	92,90%	0,262476	0,087492	17,65	0,000
V_c	1	0,147768	20,56%	0,059353	0,059353	11,97	0,007
f	1	0,520031	72,34%	0,191146	0,191146	38,55	0,000
ap	1	0,000011	0,00%	0,003545	0,003545	0,72	0,420
Interaction à 2 facteurs	3	0,006413	0,89%	0,006413	0,002138	0,43	0,736
V_c*f	1	0,003396	0,47%	0,004903	0,004903	0,99	0,346
V_c*ap	1	0,002329	0,32%	0,002329	0,002329	0,47	0,510
$f*ap$	1	0,000687	0,10%	0,000687	0,000687	0,14	0,718
Erreur	9	0,044620	6,21%	0,044620	0,004958		
Total	15	0,718844	100,00%				

III.3.1.1.1 Effets principaux et des interactions pour R_{acc650}

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la (Figure III-1). À partir de cette figure, on peut visualiser et comparer le degré d'influence de divers facteurs sur la réponse étudiée. La courbe qui a la pente la plus élevée signifie que le facteur a la plus grande influence sur la réponse. Il apparaît clairement que l'avance (f) affecte fortement la rugosité R_{acc650} ainsi que la vitesse de coupe (V_c) a une influence sur la rugosité R_{acc650} . D'autre part la profondeur de passe (ap) n'a pas une influence sur la rugosité R_{acc650} . La (Figure III-2) montre le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe V_c , f et ap . on remarque que les interactions n'ont pas un effet sur R_{acc650} .

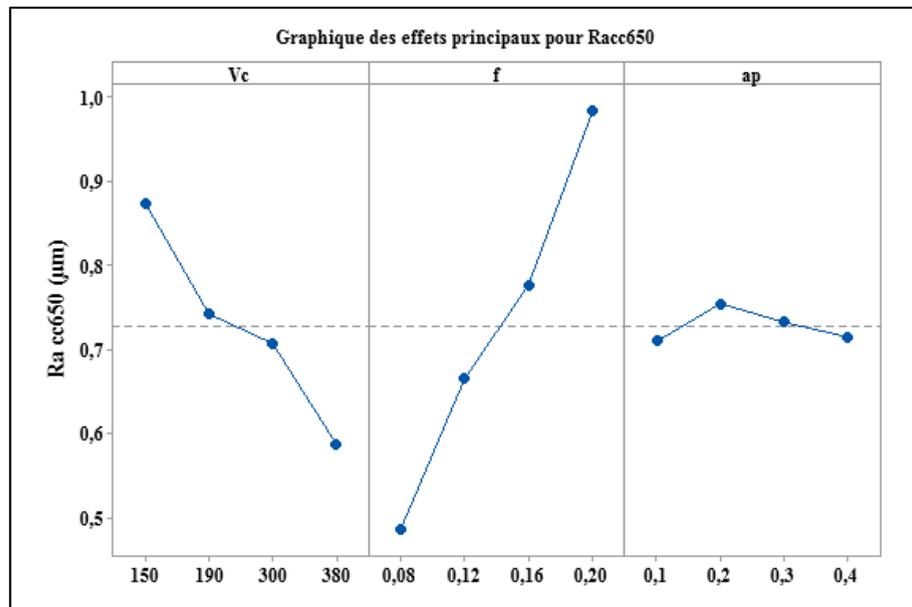


Figure III-1 Graphique des effets principaux pour R_{acc650}

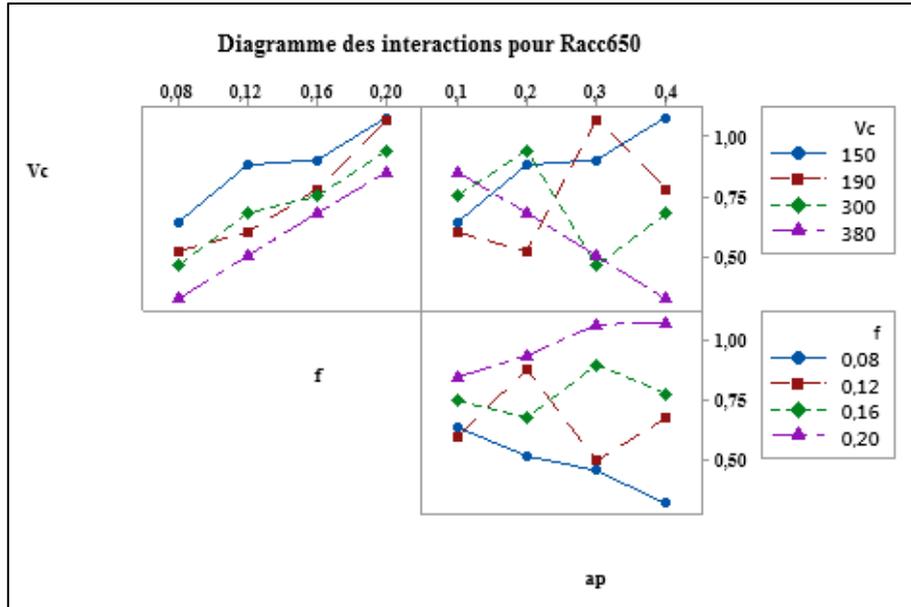


Figure III-2 Diagramme des interactions pour **Racc650**

III.3.1.1.2 Diagramme de Pareto des effets normalisés Racc650

L'analyse de graphe de Pareto la (Figure III-3) nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur le facteur étudié. Le diagramme de Pareto classe par ordre décroissants l'importance des paramètres et leurs interactions sur les facteurs de la rugosité. Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur le plus dominant est l'avance par tour suivie de la vitesse de coupe. La profondeur de passe n'a pratiquement aucun effet sur la rugosité **Racc650**.

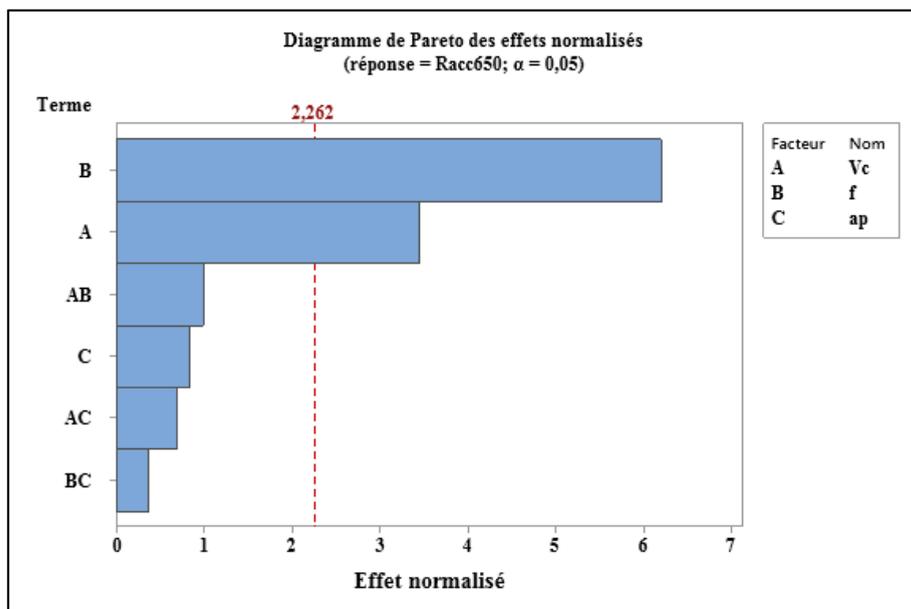


Figure III-3 Diagramme de Pareto pour **Racc650**

III.3.1.2. Analyse de régression pour Ra_{CC650}

Le traitement statistique des résultats nous a permis de proposer des modèles mathématiques de régression qui lient les variables indépendantes appelées les conditions de coupe (Vc, f et ap) et le paramètre de sortie (Ra_{CC650}).

Le modèle complet avec leur coefficient de corrélation de (Ra_{CC650}) en fonction de (Vc, f et ap) sont présentés dans l'équation (III-6). Pour la validité du modèle, si le coefficient de détermination (R^2) approche à la valeur de l'unité (1), donc le modèle est compatible avec les valeurs expérimentales.

$$Ra_{CC650} = 0,685 - 0,00280 Vc + 3,00 f - 0,01 ap + 0,00782 Vc*f + 0,00216 Vc*ap - 2,27 f*ap \dots \text{ (III-6)}$$

L'équation (III-6) exprime le modèle de la rugosité arithmétique Ra_{CC650} avec tous les facteurs principaux et leurs interactions.

Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination ($R^2 = 93,79\%$) est proche de l'unité.

III.3.1.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées Ra_{CC650}

La (Figure III-4) présente la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) de la rugosité Ra_{CC650} et celles prédites par le modèle (III-6). L'analyse des résultats montre clairement que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches, ce qui veut dire, que les équations proposées représentent d'une manière satisfaisante le phénomène étudié.

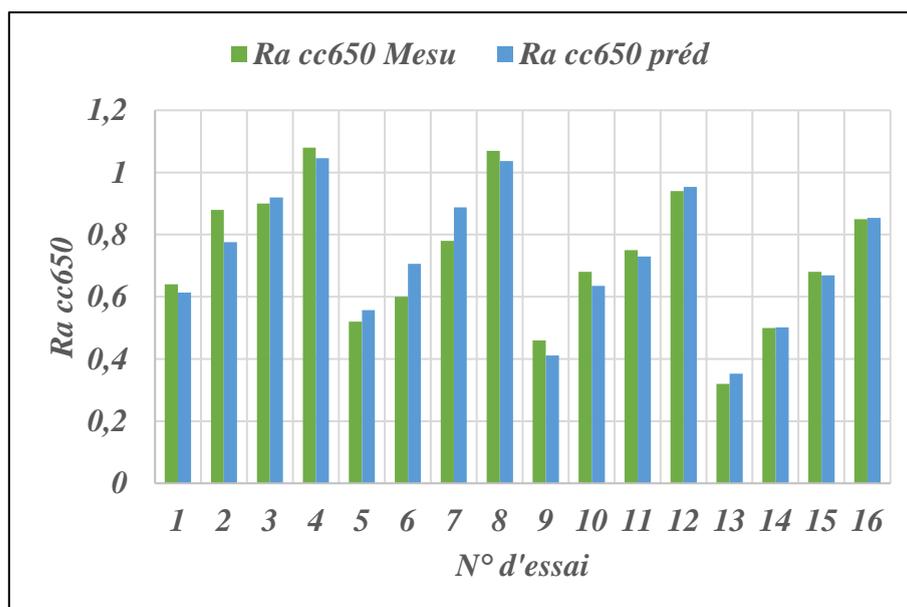


Figure III-4 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites de Ra_{CC650}

III.3.2 Analyse de variance et modélisation de la rugosité $Ra_{CC650WG}$

III.3.2.1. Analyse de variance ANOVA pour $Ra_{CC650WG}$

Le (Tableau III-3) présente l'analyse de variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Ra concernant l'outil de coupe CC650WG. On remarque que l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) ont un impact significatif sur Ra . La vitesse de coupe (Vc) vient en première position avec une contribution de (**59,06 %**) et en deuxième lieu on trouve l'avance (f) avec une contribution de **35,56 %**.

En outre le paramètre ap et les interactions ($Vc*f$, $Vc*ap$ et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité $Ra_{CC650WG}$.

Tableau III-3 Analyse de variance ANOVA pour $Ra_{CC650WG}$

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	6	0,020192	96,88%	0,020192	0,003365	46,50	0,000
Linéaires	3	0,019933	95,63%	0,005539	0,001846	25,51	0,000
Vc	1	0,012311	59,06%	0,002651	0,002651	36,63	0,000
F	1	0,007411	35,56%	0,002325	0,002325	32,13	0,000
Ap	1	0,000211	1,01%	0,000018	0,000018	0,25	0,629
Interaction à 2 facteurs	3	0,000259	1,24%	0,000259	0,000086	1,19	0,366
$Vc*f$	1	0,000017	0,08%	0,000019	0,000019	0,26	0,623
$Vc*ap$	1	0,000002	0,01%	0,000002	0,000002	0,03	0,877
$f*ap$	1	0,000241	1,15%	0,000241	0,000241	3,33	0,102
Erreur	9	0,000651	3,12%	0,000651	0,000072		
Total	15	0,020844	100,00%				

III.3.2.1.1 Effets principaux et des interactions pour $Ra_{CC650WG}$

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la (Figure III-5). À partir de cette figure, on peut visualiser et comparer le degré d'influence de divers facteurs sur la réponse étudiée. Il apparaît clairement que la vitesse de coupe (Vc) affecte fortement la rugosité

R_{acc650WG} ainsi que l'avance (*f*) a une influence sur la rugosité R_{acc650WG}. D'autre part la profondeur de passe *ap* n'a pas une influence sur la rugosité R_{acc650WG}.

La (Figure III-6) montre le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe *Vc*, *f* et *ap*. on remarque que les interactions n'ont pas un effet sur R_{acc650WG}.

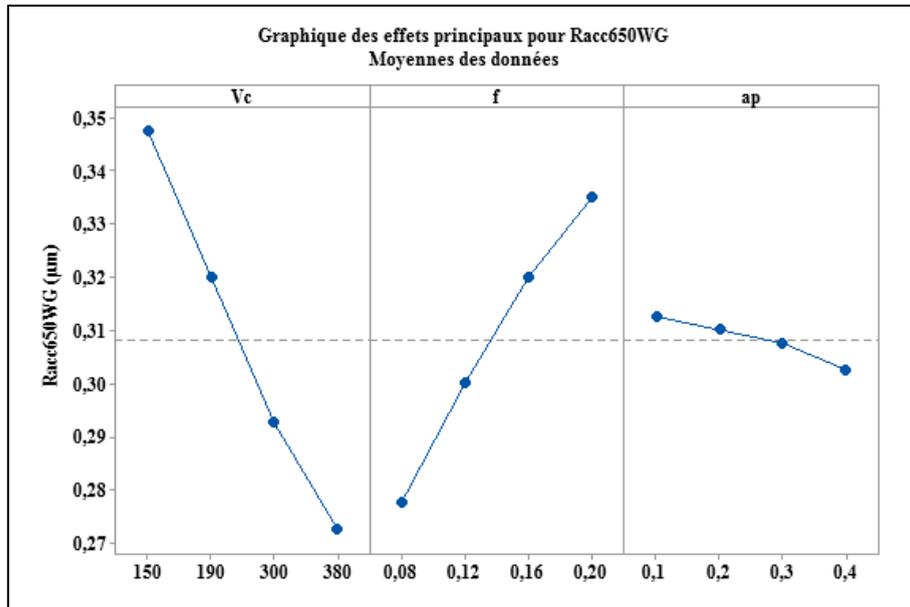


Figure III-5 Graphique des effets principaux pour R_{acc650WG}

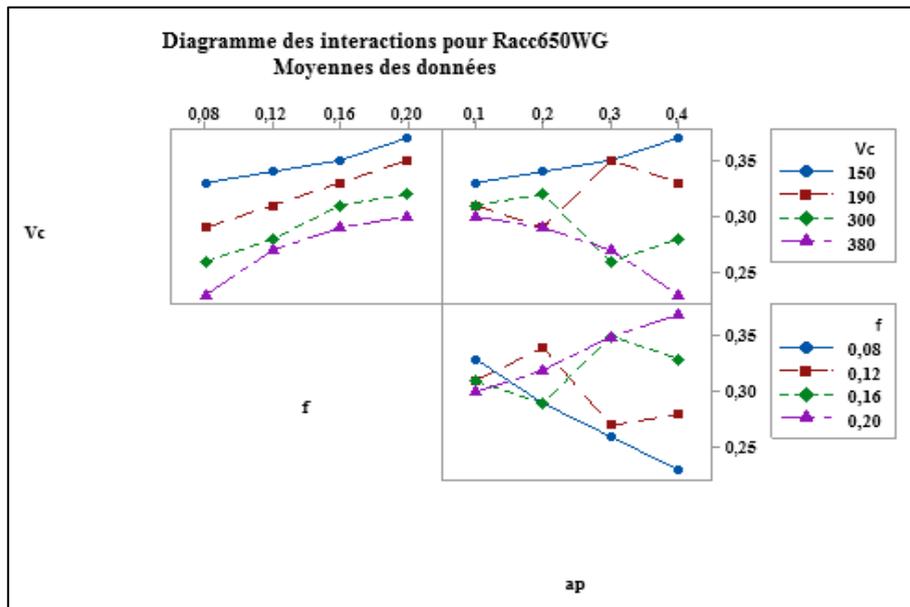


Figure III-6 Diagramme des interactions pour R_{acc650WG}

III.3.2.1.2 Diagramme de Pareto des effets normalisés $R_{aCC650WG}$

L'analyse de graphe de Pareto la (Figure III-7) nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur $R_{aCC650WG}$. Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur le plus dominant est la vitesse de coupe suivie de l'avance par tour. La profondeur de passe n'a pratiquement aucun effet sur la rugosité $R_{aCC650WG}$.

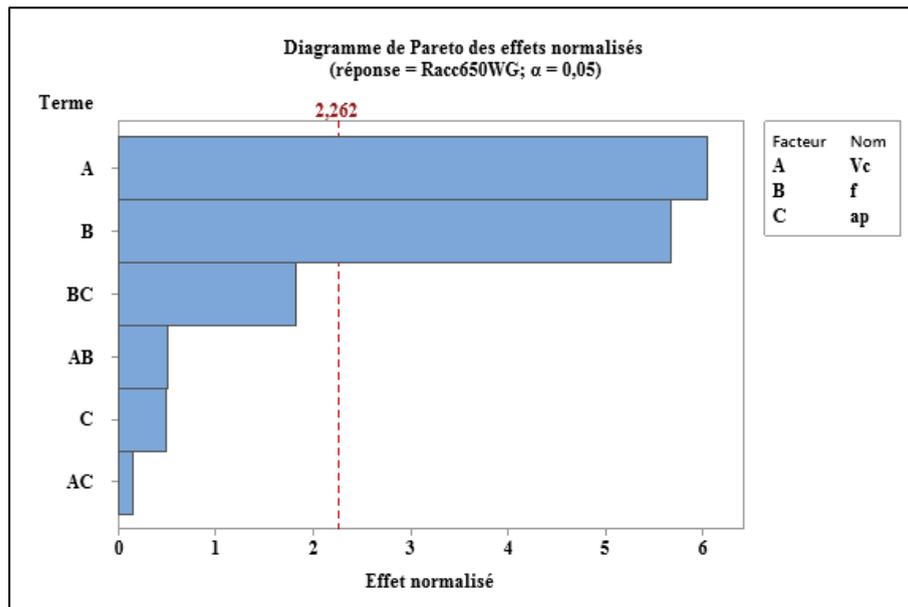


Figure III-7 Diagramme de Pareto pour $R_{aCC650WG}$

III.3.2.2. Analyse de régression pour $R_{aCC650WG}$

Le modèle complet avec les coefficients de corrélation de ($R_{aCC650WG}$) en fonction de (V_c , f et ap) est présenté dans l'équation (III-7).

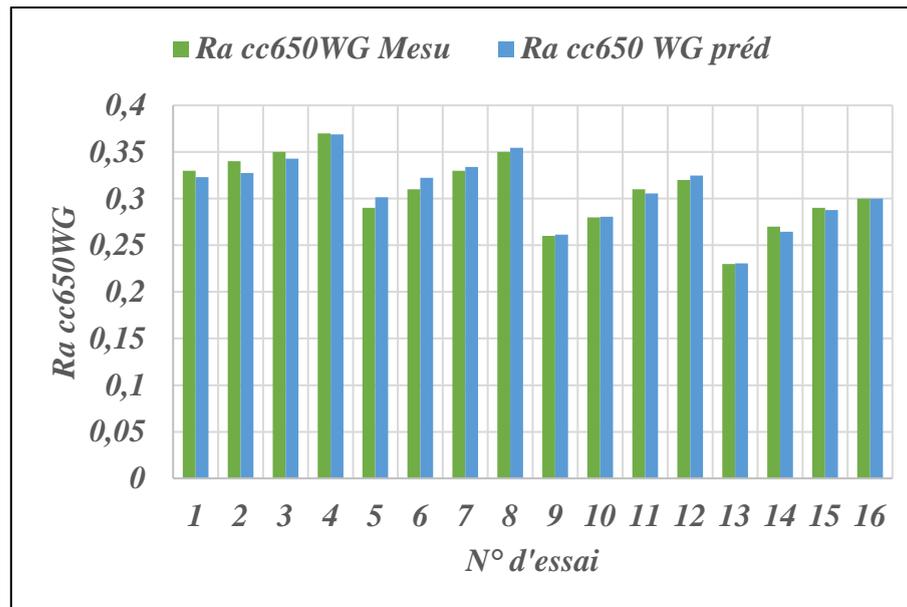
$$R_{aCC650WG} = 0,3744 - 0,000328 V_c + 0,034 f - 0,221 ap + 0,000484 V_c * f + 0,000060 V_c * ap + 1,342 f * ap \dots \text{(III-7)}$$

=

Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination ($R^2 = 96,88\%$) est proche de l'unité.

III.3.2.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées $R_{aCC650WG}$

La (Figure III-8) montre une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites de la rugosité (R_a) pour les 16 essais réalisés par le modèle (III-7). La (Figure III-8) met en évidence que les valeurs prédites et celles mesurées de $R_{aCC650WG}$ sont très proches ce qui prouve que le modèle est fiable.

Figure III-8 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $Ra_{cc650WG}$

III.3.3 Analyse de variance et modélisation de la rugosité Rz_{CC650}

III.3.3.1. Analyse de variance ANOVA pour Rz_{CC650}

Tableau III-4 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Rz_{CC650} .

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	6	23,2358	92,23%	23,2358	3,87263	17,81	0,000
Linéaires	3	22,1043	87,74%	10,5553	3,51842	16,18	0,001
<i>Vc</i>	1	4,4755	17,77%	0,7589	0,75891	3,49	0,095
<i>f</i>	1	17,5500	69,66%	8,7183	8,71834	40,09	0,000
<i>ap</i>	1	0,0788	0,31%	0,0154	0,01538	0,07	0,796
Interaction à 2 facteurs	3	1,1315	4,49%	1,1315	0,37715	1,73	0,229
<i>Vc*f</i>	1	0,1868	0,74%	0,0233	0,02334	0,11	0,751
<i>Vc*ap</i>	1	0,7586	3,01%	0,7586	0,75863	3,49	0,095
<i>f*ap</i>	1	0,1860	0,74%	0,1860	0,18598	0,86	0,379
Erreur	9	1,9571	7,77%	1,9571	0,21745		
Total	15	25,1928	100,00%				

Le (Tableau III-4) présente l'analyse de variance (ANOVA) pour R_z concernant l'outil de coupe CC650. On remarque que l'avance (f) a l'impact majeur sur R_{zCC650} avec une contribution de **69,66 %**.

En outre la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (ap) et les interactions (V_c*f , V_c*ap et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité R_{zCC650} .

III.3.3.1.1 Effets principaux et des interactions pour R_{zCC650}

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la (Figure III-9). Il apparaît clairement que l'avance (f) affecte fortement la rugosité R_{zCC650} . D'autre part la vitesse de coupe V_c et la profondeur de passe ap n'ont pas une influence sur la rugosité R_{zCC650} . La (Figure III-10) montre le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe V_c , f et ap . on remarque que les interactions n'ont pas un effet sur R_{zCC650} .

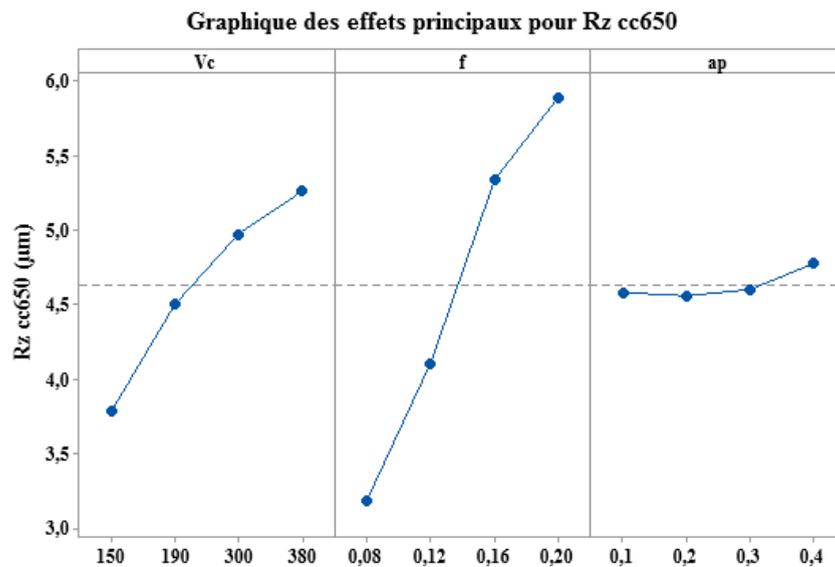


Figure III-9 Graphique des effets principaux pour R_{zCC650}

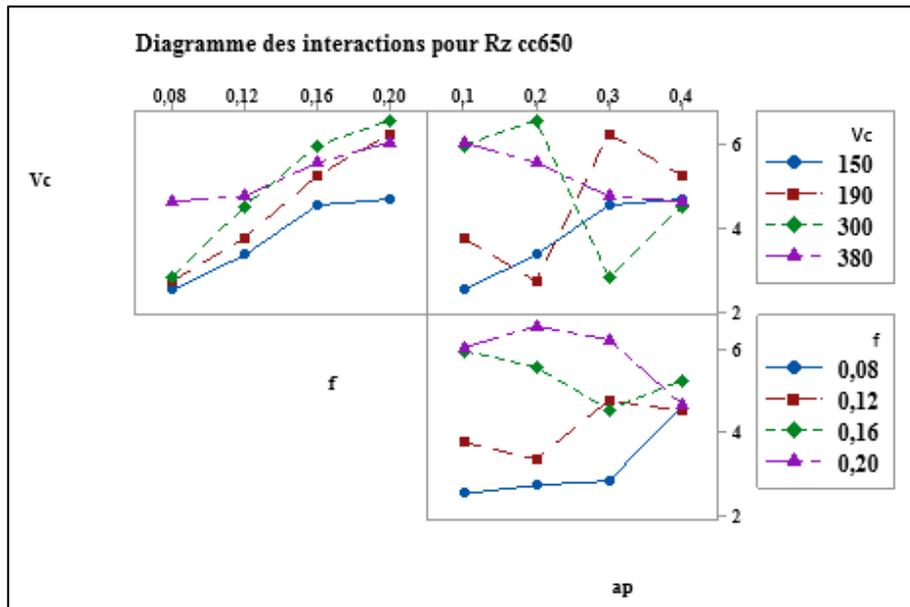


Figure III-10 Diagramme des interactions pour Rz_{CC650}

III.3.3.1.2

Diagramme de Pareto des effets normalisés Rz_{CC650}

L'analyse de graphe de Pareto la (Figure III-11) nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur Rz_{CC650}. Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur le plus dominant est l'avance par tour. La vitesse de coupe et la profondeur de passe n'ont pratiquement aucun effet sur la rugosité Rz_{CC650}.

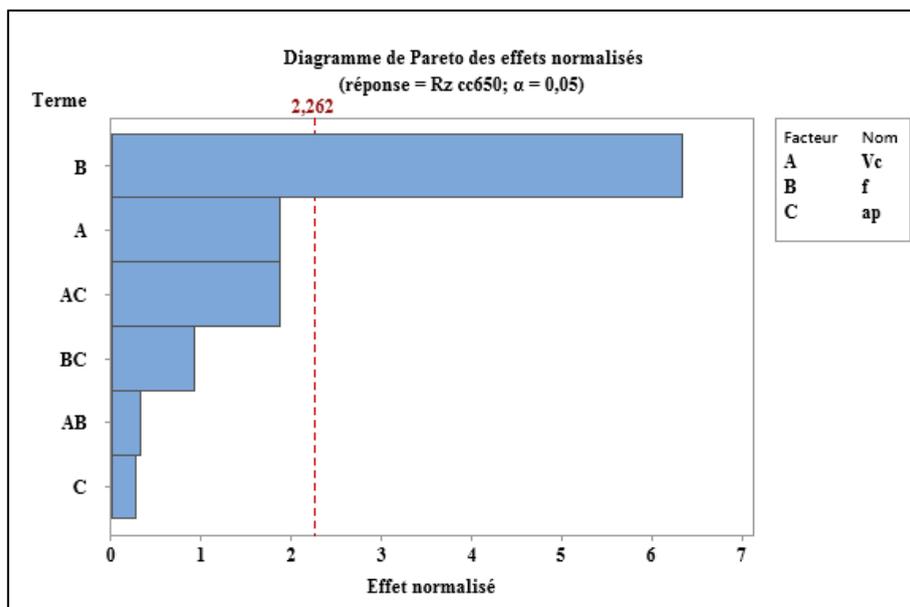


Figure III-11 de Pareto pour Rz_{CC650}

III.3.3.2. Analyse de régression pour Rz_{CC650}

Le modèle complet avec les coefficients de corrélation de (Rz_{CC650}) en fonction de (Vc , f et ap) est présenté dans l'équation (III-8).

$$Rz_{CC650} = -0,18 - 0,0032 Vc + 44,3 f - 4,58 ap - 0,0171 Vc*f + 0,0389 Vc*ap - 37,3 f*ap \dots\dots (III-8)$$

Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination ($R^2 = 92,23\%$) est proche de l'unité.

III.3.3.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées Rz_{CC650}

La (Figure III-12) montre une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites de la rugosité (Rz_{CC650}) pour les 16 essais réalisés par le modèle (III-8). La (Figure III-12) met en évidence que les valeurs prédites et celles mesurées de Rz_{CC650} sont très proches. Ce qui indique que le modèle (III-8) est capable de représenter le système dans le domaine expérimental donné.

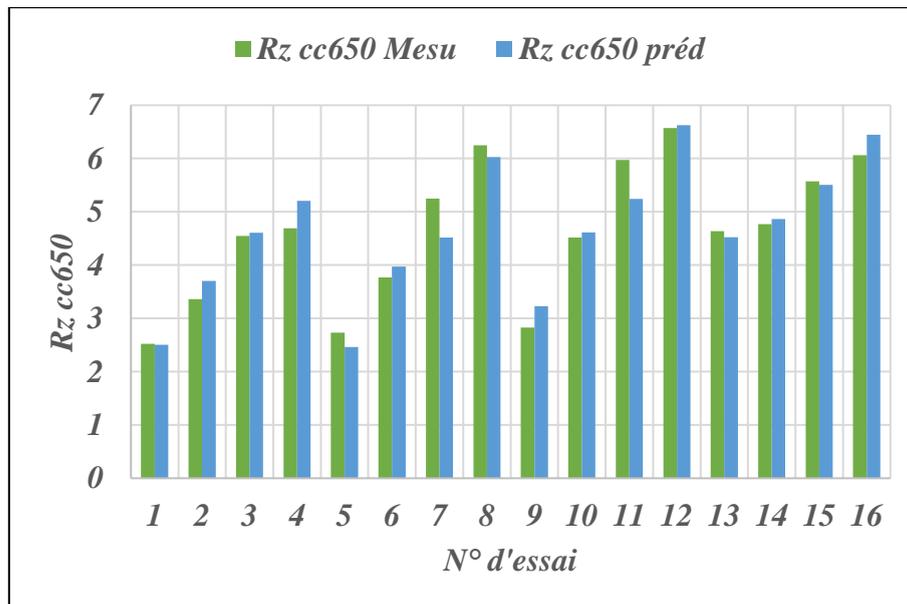


Figure III-12 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Rz_{CC650}

III.3.4 Analyse de variance et modélisation de la rugosité $Rz_{CC650WG}$

III.3.4.1. Analyse de variance ANOVA pour $Rz_{CC650WG}$

Le Tableau III-5 présente l'analyse de variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Rz concernant l'outil de coupe CC650WG. On remarque que la vitesse de coupe (Vc) a l'effet majeur sur $Rz_{CC650WG}$ avec une contribution de (82,76 %).

En outre l'avance (f), la profondeur de passe ap et les interactions ($Vc*f$, $Vc*ap$ et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité $Rz_{CC650WG}$.

Tableau III-5 Analyse de variance ANOVA pour $Rz_{CC650WG}$

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	6	4,37197	92,19%	4,37197	0,72866	17,70	0,000
Linéaires	3	4,35420	91,81%	1,61775	0,53925	13,10	0,001
<i>Vc</i>	1	3,92500	82,76%	1,47342	1,47342	35,80	0,000
<i>F</i>	1	0,40328	8,50%	0,13034	0,13034	3,17	0,109
<i>Ap</i>	1	0,02592	0,55%	0,00054	0,00054	0,01	0,911
Interaction à 2 facteurs	3	0,01777	0,37%	0,01777	0,00592	0,14	0,931
<i>Vc*f</i>	1	0,00968	0,20%	0,00710	0,00710	0,17	0,688
<i>Vc*ap</i>	1	0,00104	0,02%	0,00104	0,00104	0,03	0,877
<i>f*ap</i>	1	0,00705	0,15%	0,00705	0,00705	0,17	0,689
Erreur	9	0,37043	7,81%	0,37043	0,04116		
Total	15	4,74240	100,00%				

III.3.4.1.1 Effets principaux et des interactions pour $Rz_{CC650WG}$

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la (Figure III-13). Il apparaît clairement que la vitesse de coupe (V_c) affecte fortement la rugosité $Rz_{CC650WG}$. D'autre part l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) n'ont pas une influence sur la rugosité $Rz_{CC650WG}$. La (Figure III-14) montre le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe V_c , f et ap . on remarque que les interactions n'ont pas un effet sur $Rz_{CC650WG}$.

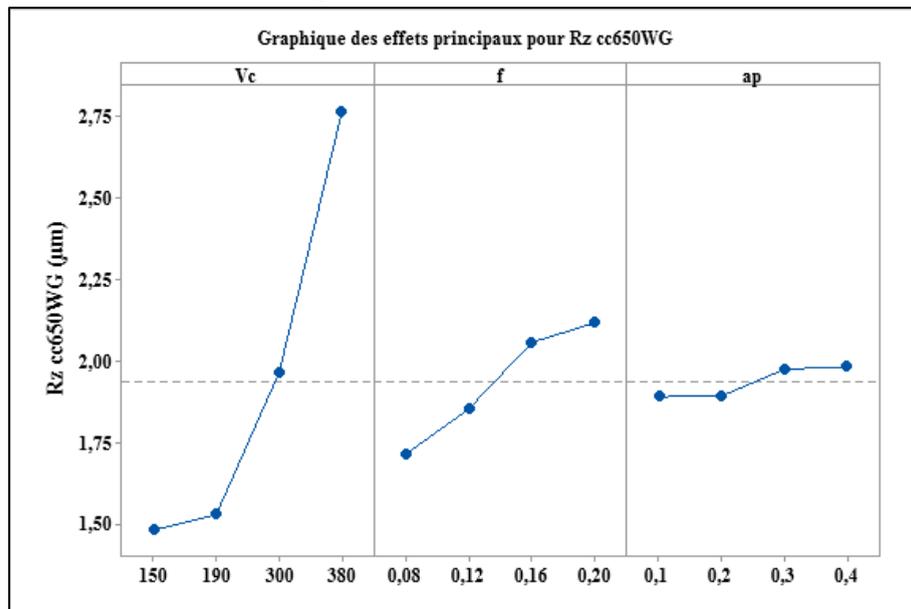


Figure III-13 Graphique des effets principaux pour $Rz_{CC650WG}$

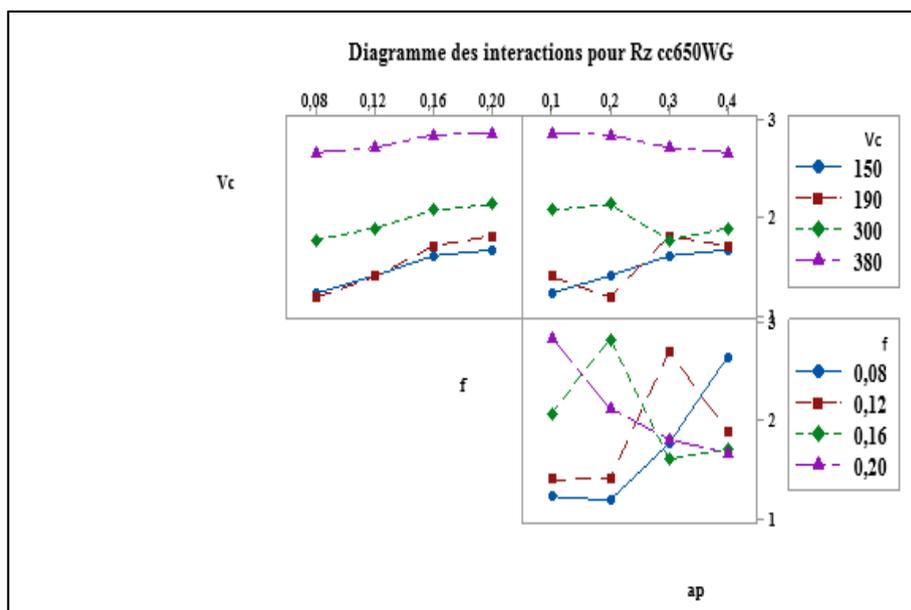


Figure III-14 Diagramme des interactions pour $Rz_{CC650WG}$

III.3.4.1.2 Diagramme de Pareto des effets normalisés $Rz_{CC650WG}$

L’analyse de graphe de Pareto la (Figure III-15) nous permet d’évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur $Rz_{CC650WG}$. Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur dominant est la vitesse de coupe. L’avance par tour et la profondeur de passe n’ont pratiquement aucun effet sur la rugosité $Rz_{CC650WG}$.

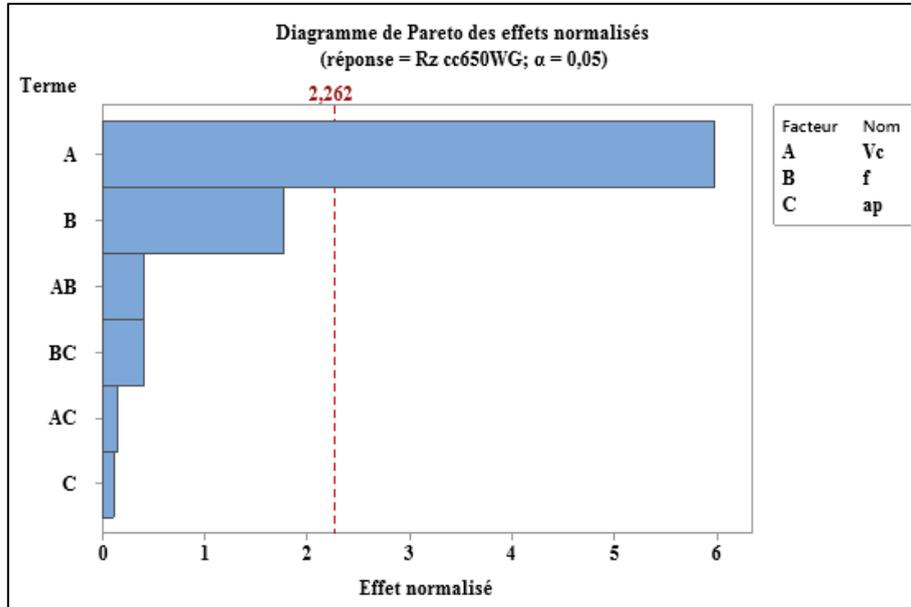


Figure III-15 Diagramme de Pareto pour $Rz_{CC650WG}$

III.3.4.2. Analyse de régression pour $Rz_{CC650WG}$

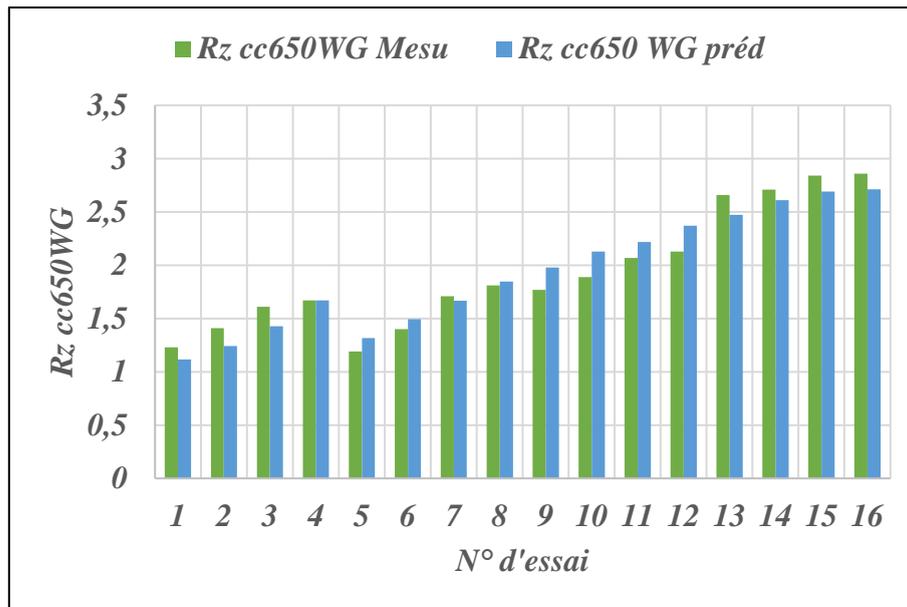
Le modèle complet avec les coefficients de corrélation de ($Rz_{CC650WG}$) en fonction de (Vc, f et ap) est présenté dans l’équation (III-9).

$$Rz_{CC650WG} = -0,83 + 0,00463 Vc + 11,85 f + 0,89 ap - 0,0103 Vc*f + 0,0026 Vc*ap - 9,5 f*ap \dots\dots(III-9)$$

Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination ($R^2 = 92,19\%$) est proche de l’unité.

III.3.4.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées $Rz_{CC650WG}$

La (Figure III-16) montre une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites de la rugosité ($Rz_{CC650WG}$) pour les 16 essais réalisés et par le modèle (III-9). La (Figure III-16) met en évidence que les valeurs prédites et celles mesurées de $Rz_{CC650WG}$ sont très proches. Ce qui indique que les modèle (III-9) est capables de représenter le système dans le domaine expérimental donné.

Figure III-16 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du $Rz_{CC650WG}$

III.3.5 Analyse de variance et modélisation de la rugosité Rq_{CC650}

III.3.5.1. Analyse de variance ANOVA pour Rq_{CC650}

Tableau III-6 Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité Rq_{CC650} .

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	6	3,65134	92,00%	3,65134	0,608556	17,25	0,000
Linéaires	3	3,60445	90,82%	1,47848	0,492827	13,97	0,001
<i>Vc</i>	1	0,57007	14,36%	0,33541	0,335407	9,51	0,013
<i>F</i>	1	3,03420	76,45%	0,91413	0,914133	25,92	0,001
<i>Ap</i>	1	0,00018	0,00%	0,00848	0,008480	0,24	0,636
Interaction à 2 facteurs	3	0,04688	1,18%	0,04688	0,015627	0,44	0,728
<i>Vc*f</i>	1	0,01544	0,39%	0,01206	0,012056	0,34	0,573
<i>Vc*ap</i>	1	0,00087	0,02%	0,00087	0,000874	0,02	0,878
<i>f*ap</i>	1	0,03056	0,77%	0,03056	0,030562	0,87	0,376
Erreur	9	0,31746	8,00%	0,31746	0,035274		
Total	15	3,96880	100,00%				

Le (Tableau III-6) présente l'analyse de variance (ANOVA) pour Rq concernant l'outil de coupe CC650. On remarque que l'avance (f) a un impact significatif sur Rq_{CC650} avec une contribution de 76,45 %, en deuxième lieu on trouve la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 14,36 %.

En outre le paramètre (ap) et les interactions ($Vc*f$, $Vc*ap$ et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité Rq_{CC650} .

III.3.5.1.1 Effets principaux et des interactions pour Rq_{CC650}

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la (Figure III-17). Il apparaît clairement que l'avance (f) affecte fortement la rugosité Rq_{CC650} ainsi que la vitesse de coupe (Vc) a une influence sur la rugosité Rq_{CC650} . D'autre part la profondeur de passe (ap) n'a pas une influence sur la rugosité Rq_{CC650} . La (Figure III-18) montre le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe Vc , f et ap . on remarque que les interactions n'ont pas un effet sur Rq_{CC650} .

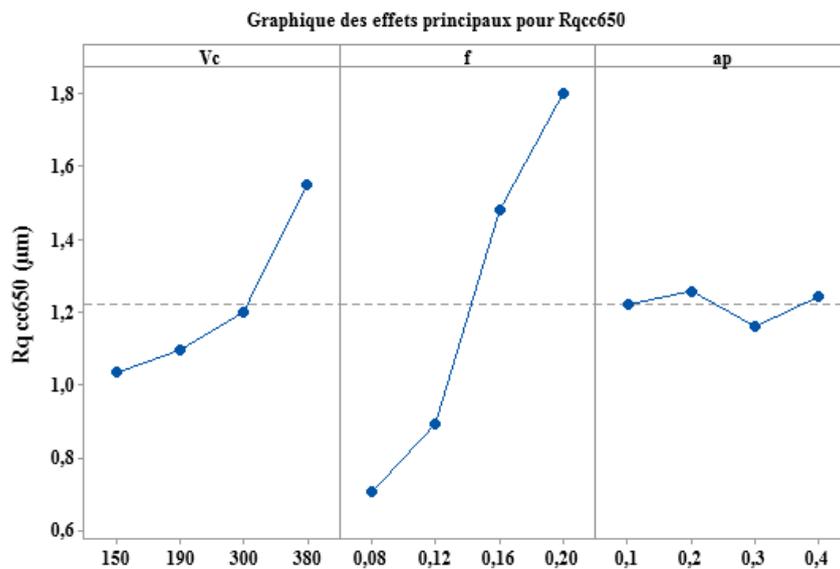


Figure III-17 Graphique des effets principaux pour Rq_{CC650}

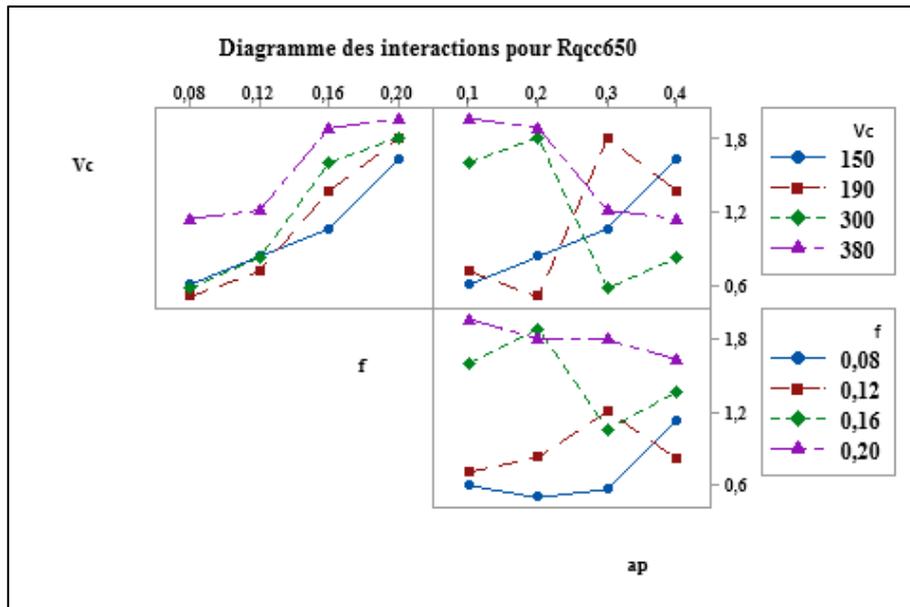


Figure III-18 Diagramme des interactions pour Rq_{CC650}

III.3.5.1.2 Diagramme de Pareto des effets normalisés Rq_{CC650}

L'analyse de graphe de Pareto la (Figure III-19) nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur Rq_{CC650}. Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur le plus dominant est l'avance par tour suivie de la vitesse de coupe. La profondeur de passe n'a pratiquement aucun effet sur la rugosité Rq_{CC650}.

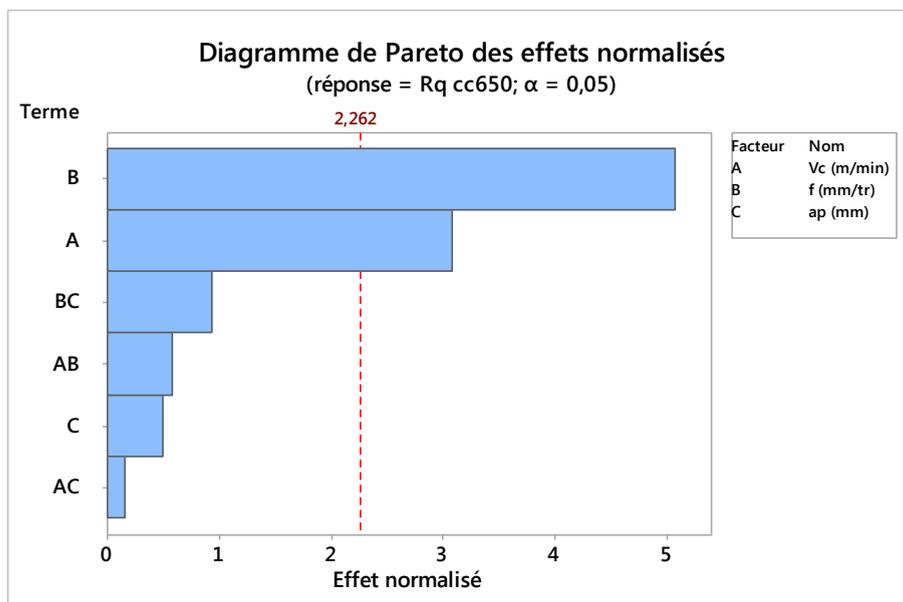


Figure III-19 Diagramme de Pareto pour Rq_{CC650}

III.3.5.2. Analyse de régression pour Rq_{CC650}

Le modèle complet avec les coefficients de corrélation de (Rq_{CC650}) en fonction de (Vc , f et ap) est présenté dans l'équation (III-10).

$$Rq_{CC650} = -0,608 + 0,00415 Vc + 9,33 f - 2,85 ap - 0,0123 Vc*f + 0,00132 Vc*ap + 15,1 f*ap \dots\dots\dots (III-10)$$

Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination ($R^2 = 92,00\%$) est proche de l'unité.

III.3.5.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées Rq_{CC650}

La (Figure III-20) montre une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites de la rugosité (Rq_{CC650}) pour les 16 essais réalisés et par le modèle (III-10). La (Figure III-20) met en évidence que les valeurs prédites et celles mesurées de Rq_{CC650} sont très proches. Ce qui indique que les modèle (III-10) est capables de représenter le système dans le domaine expérimental donné.

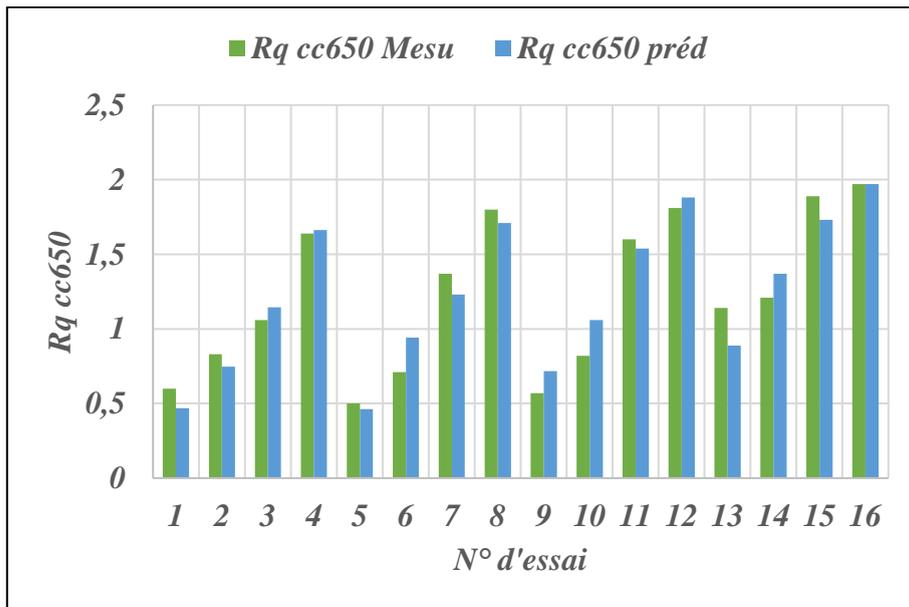


Figure III-20 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Rq_{CC650}

III.3.6 Analyse de variance et modélisation de la rugosité $Rq_{CC650WG}$

III.3.6.1. Analyse de variance ANOVA pour $Rq_{CC650WG}$

Le (Tableau III-7) présente l'analyse de variance (ANOVA) pour la rugosité de surface Rq concernant l'outil de coupe $CC650WG$. On remarque que l'avance (f) a l'effet majeur sur $Rq_{CC650WG}$ avec une contribution de (80,24 %).

En outre la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (ap) et les interactions (V_c*f , V_c*ap et $f*ap$) n'ont pas un effet significatif sur la rugosité $Rq_{CC650WG}$.

Tableau III-7 Analyse de variance ANOVA pour $Rq_{CC650WG}$

Source	DL	SomCar séq	Contribution	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	6	25,9134	93,90%	25,9134	4,31889	23,09	0,000
Linéaires	3	24,9407	90,38%	10,6890	3,56301	19,05	0,000
V_c	1	1,3191	4,78%	0,5163	0,51629	2,76	0,131
F	1	22,1446	80,24%	9,5493	9,54927	51,05	0,000
Ap	1	1,4770	5,35%	0,1647	0,16474	0,88	0,372
Interaction à 2 facteurs	3	0,9727	3,52%	0,9727	0,32422	1,73	0,230
V_c*f	1	0,4375	1,59%	0,1714	0,17138	0,92	0,363
V_c*ap	1	0,5307	1,92%	0,5307	0,53074	2,84	0,126
$f*ap$	1	0,0045	0,02%	0,0045	0,00447	0,02	0,881
Erreur	9	1,6834	6,10%	1,6834	0,18704		
Total	15	27,5967	100,00%				

III.3.6.1.1 Effets principaux et des interactions pour $Rq_{CC650WG}$

Les graphiques des effets principaux sont montrés dans la (Figure III-21). Il apparaît clairement que l'avance f affecte fortement la rugosité $Rq_{CC650WG}$. D'autre part la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe ap n'ont pas une influence sur la rugosité $Rq_{CC650WG}$. La (Figure III-22) montre le diagramme des interactions entre les paramètres de coupe V_c , f et ap . on remarque que les interactions n'ont pas un effet sur $Rq_{CC650WG}$.

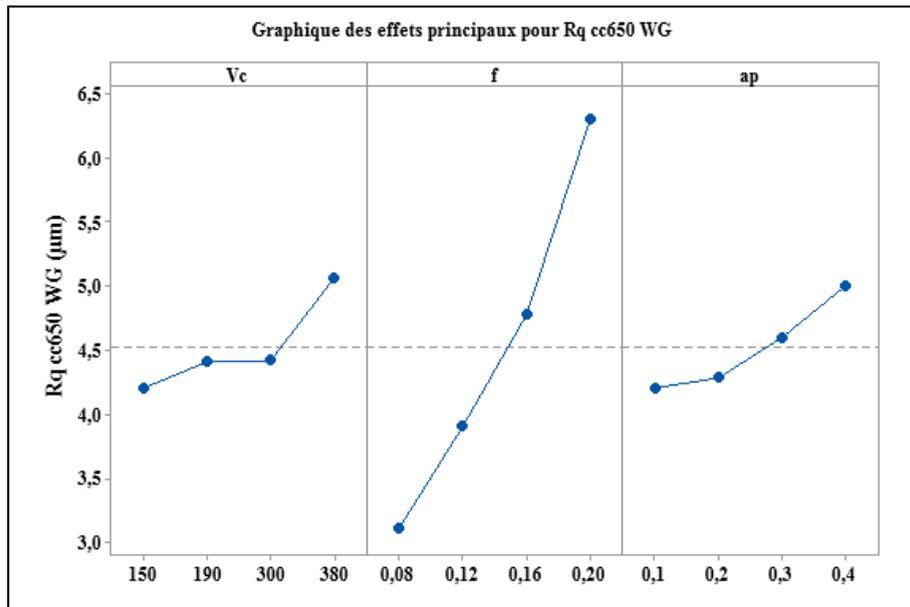


Figure III-21 Graphique des effets principaux pour Rq_{CC650WG}

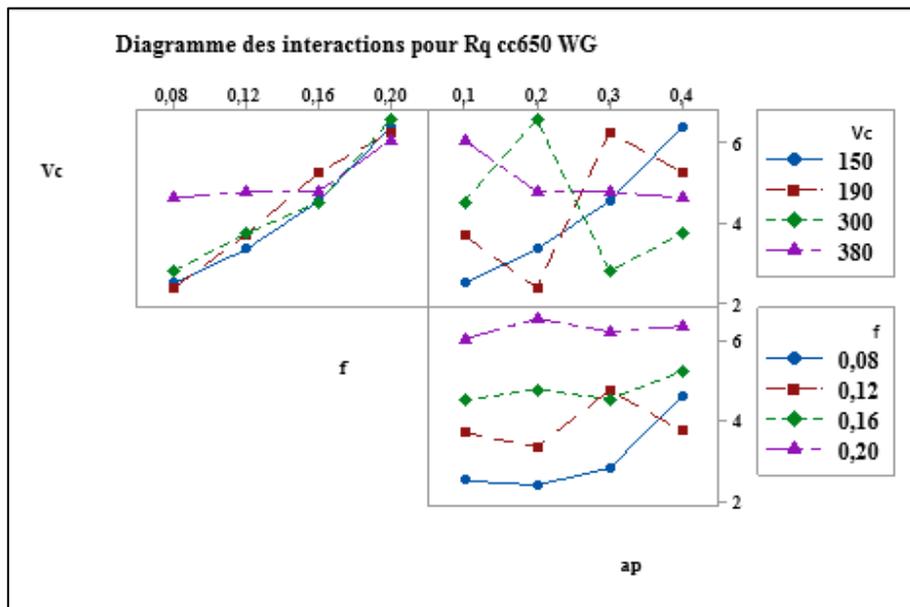


Figure III-22 Diagramme des interactions pour Rq_{CC650WG}

III.3.6.1.2 Diagramme de Pareto des effets normalisés Rq_{CC650WG}

L'analyse de graphe de Pareto la (Figure III-23) nous permet d'évaluer les effets principaux des paramètres ainsi que ceux de leurs interactions sur Rq_{CC650WG}. Le graphe de Pareto correspondant montre que le facteur dominant est l'avance par tour. La vitesse de coupe et la profondeur de passe n'ont pratiquement aucun effet sur la rugosité Rq_{CC650WG}.

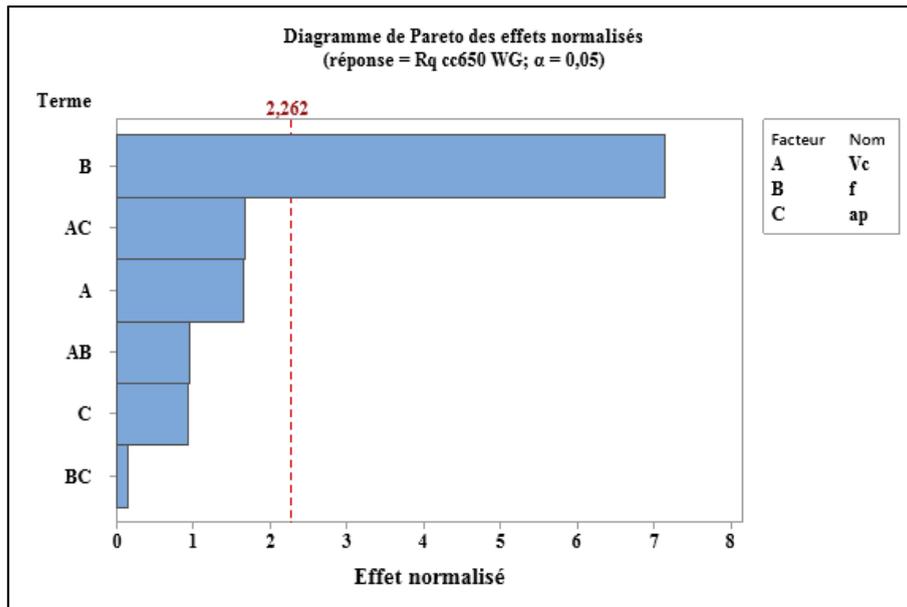


Figure III-23 Diagramme de Pareto pour Rq_{CC650WG}

III.3.6.2. Analyse de régression pour Rq_{CC650WG}

Le modèle complet avec les coefficients de corrélation de (Rq_{CC650WG}) en fonction de (Vc, f et ap) est présenté dans l'équation (III-11).

$$Rq_{CC650WG} = -0,59 + 0,00176 Vc + 42,7 f - 7,76 ap - 0,0462 Vc*f + 0,0326 Vc*ap + 5,8 f*ap \dots\dots (III-11)$$

Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination ($R^2 = 93,90\%$) est proche de l'unité.

III.3.6.3. Comparaison entre les valeurs expérimentales et estimées Rq_{CC650WG}

La (Figure III-24) montre une comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites de la rugosité (Rq_{CC650WG}) pour les 16 essais réalisés et par le modèle (III-11). La (Figure III-24) met en évidence que les valeurs prédites et celles mesurées de Rq_{CC650WG} sont très proches. Ce qui indique que le modèle (III-11) est capable de représenter le système dans le domaine expérimental donné.

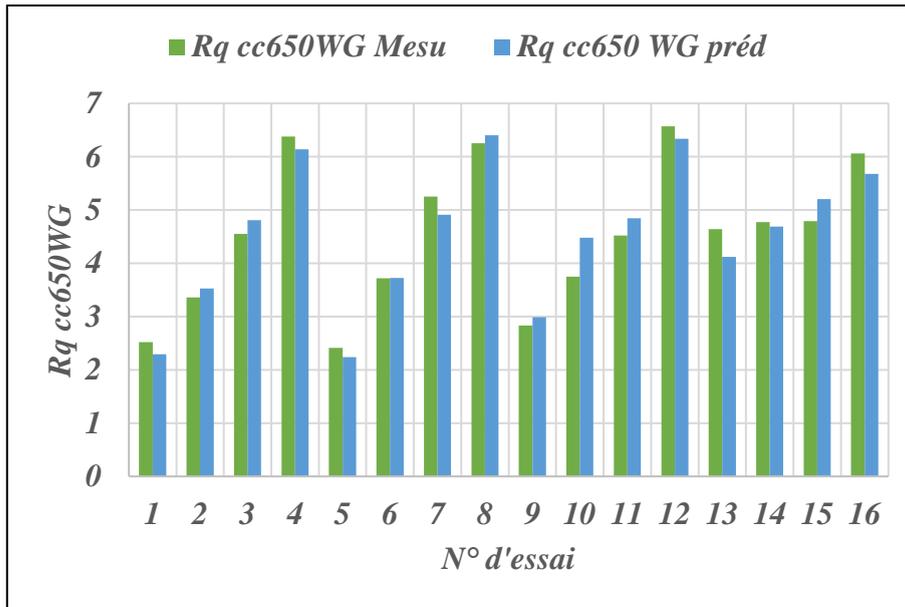
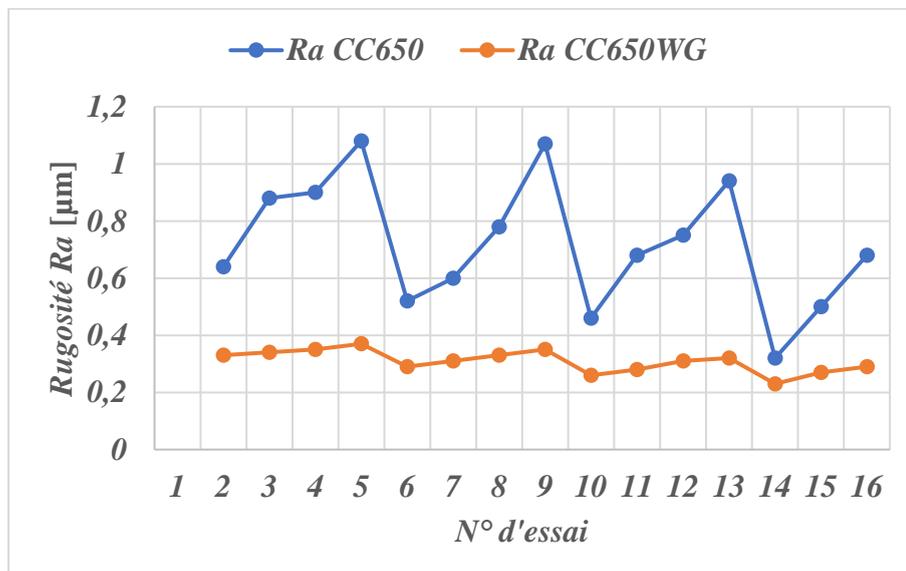


Figure III-24 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du Rq_{CC650WG}

III.4. Comparaison entre les résultats des critères de rugosité des deux plaquettes de coupe

La comparaison entre les valeurs mesurées des trois critères de rugosité (Ra, Rz et Rq) obtenus par les deux plaquettes de coupe CC650WG et CC650 lors de tournage dur de l'acier **100Cr6**, Figure III-25, on constate que les courbes des critères de rugosité (Ra et Rz) obtenus par les plaquettes céramiques en Wiper sont inférieures à ceux des céramiques non Wiper pendant tous les essais (16 essais).

Cependant, la courbe du critère de rugosité (Rq) de la Figure III-25 montre que la plaquette en Wiper donne des valeurs pour Rq supérieure à ceux de la plaquette conventionnelle.



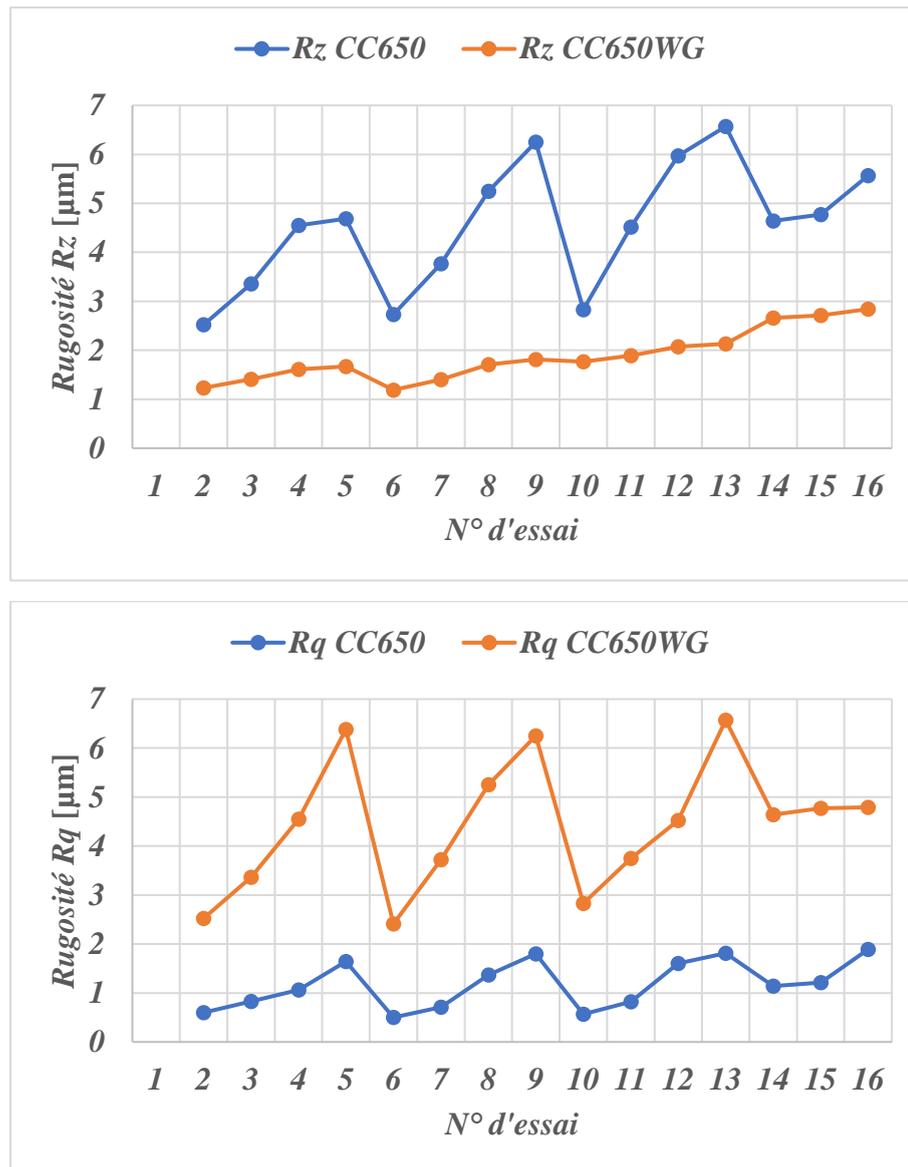


Figure III-25 Courbes de comparaison des critères de rugosité obtenues par les deux plaquettes

III.5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer les coefficients de détermination et les modèles mathématiques qui nous permettent de mieux connaître le degré d'influence des différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe) sur la rugosité de la surface usinée lors de l'usinage de l'acier de haute dureté (100Cr 6) avec deux types de plaquettes, une en céramique conventionnelle CC650 et l'autre en Wiper CC650WG. Ces modèles présentent une grande importance économique dans le milieu industriel, car ils permettent de prédire les paramètres technologiques étudiés et aussi d'optimiser le processus de coupe.

Chapitre IV
Optimisation des paramètres de
coupe

IV.1. Introduction

IV.2. Optimisation mono-objective

IV.2.1 Méthode de Taguchi

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/N). Le signal représente la variable principale à l'entrée du procédé et le bruit représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie. Le rapport (S/N) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées. L'intérêt de la conception de Taguchi est que de multiples facteurs peuvent être considérés à la fois.

Dans cette étude, La plus faible rugosité de surface (Ra) et la plus élevée quantité de copeau enlevé d'autre part sont souhaitables. La caractéristique (S/N) la plus petite est la meilleure (smaller-the-better) a été utilisé pour la rugosité de surface (Ra) et la plus grande est la meilleure (larger-the-better) a été utilisé pour le débit du copeau enlevé (MRR).

IV.2.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes :

Etape 1 : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.

Etape 2 : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif.

Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.

Etape 3 : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais.

Etape 4 : réaliser les essais en reproduisant sur le produit ou le processus chaque combinaison du plan et en consignait les réponses dans un tableau.

Etape 5 : Calculer le rapport S/N et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).

Etape 6 : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.).

IV.2.1.2. Apport de la méthode Taguchi

➤ Le ratio signal / bruit

La méthode classique fait intervenir pour chaque essai. La valeur moyenne des différentes mesures faite et ne tient pas directement compte de la dispersion des mesures. La supériorité de la méthode Taguchi, par rapport à la méthode classique des plans d'expériences, résulte de l'utilisation d'un indicateur de performance : le ratio signal / bruit. Il prend simultanément en compte : d'une part : l'objectif recherché (le signal), d'autre part, la dispersion de cette valeur (le bruit).

Les caractéristiques de qualité S/N, la plus petite est mieux et la plus grande est mieux sont calculées avec les équations suivantes :

- Nominale est le meilleur :

$$\frac{S}{N} = 10 * \log \left(\frac{\bar{y}}{S_y^2} \right) \dots \dots \dots \text{IV-1}$$

- Plus grand est le meilleur :

$$\frac{S}{N} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \dots \dots \dots \text{IV-2}$$

- Plus petit est le meilleur :

$$\frac{S}{N} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \dots \dots \dots \text{IV-3}$$

Où \bar{y} est la moyenne des données observées, S_y^2 est la variance de y, n est le nombre de tests et y_i est la valeur mesurée.

Le tableau suivant expose les résultats pour le calcul de rapport (S/N). L'équation (IV-2) est appliquée pour maximiser le (MRR) et l'équation (IV.3) pour minimiser les paramètres de sortie (Racc650 et Racc650WG).

Tableau IV-1 Résultats du rapport (S/N) pour (R_{acc650} , $R_{acc650WG}$ et MRR)

N° d'essai	R_{acc650}	$R_{acc650WG}$	MRR
	S/N (dB)	S/N (dB)	S/N (dB)
1	3,876401	9,629721	1,583625
2	1,110347	9,370422	11,12605
3	0,91515	9,118639	17,14665
4	-0,66848	8,635966	21,58362
5	5,679933	10,75204	9,657472
6	4,436975	10,17277	11,59567
7	2,158108	9,629721	21,69867
8	-0,58768	9,118639	21,1381
9	6,744843	11,70053	17,14665
10	3,349822	11,05684	23,16725
11	2,498775	10,17277	13,62482
12	0,537443	9,897	21,58362
13	9,897	12,76544	21,69867
14	6,0206	11,37272	22,72172
15	3,349822	10,75204	21,69867
16	1,411621	10,45757	17,61627

Les figures IV.1 (a, b et c) illustrent les graphes des effets principaux du rapport (S/N) pour chaque paramètre de sortie (R_{acc650} , $R_{acc650WG}$) et (MRR) respectivement. On constate d'après ces figures que le régime mono-objectif optimal pour le paramètre (R_{acc650}) est : **Vc4, f1, ap4**, ce qui correspond à une vitesse de coupe $Vc=380$ m/min, la plus faible avance $f=0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $ap=0.4$ mm. Pour la ($R_{acc650WG}$), le régime optimal obtenu par la méthode de Taguchi est **Vc4, f1, ap4**, ce qui correspond à une vitesse de coupe $Vc=380$ m/min, la plus faible avance $f=0.08$ mm/tr et une profondeur de passe $ap=0.4$ mm. Enfin, le régime optimal pour la productivité (MRR) est donné par la combinaison suivante (**Vc4, f4, ap4**), qui correspond aux valeurs les plus élevées des paramètres de coupe ($Vc=380$ m/min, $f=0.2$ mm/tr, et $ap=0.4$ mm). Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence par des carrés en rouge (Figure IV.1).

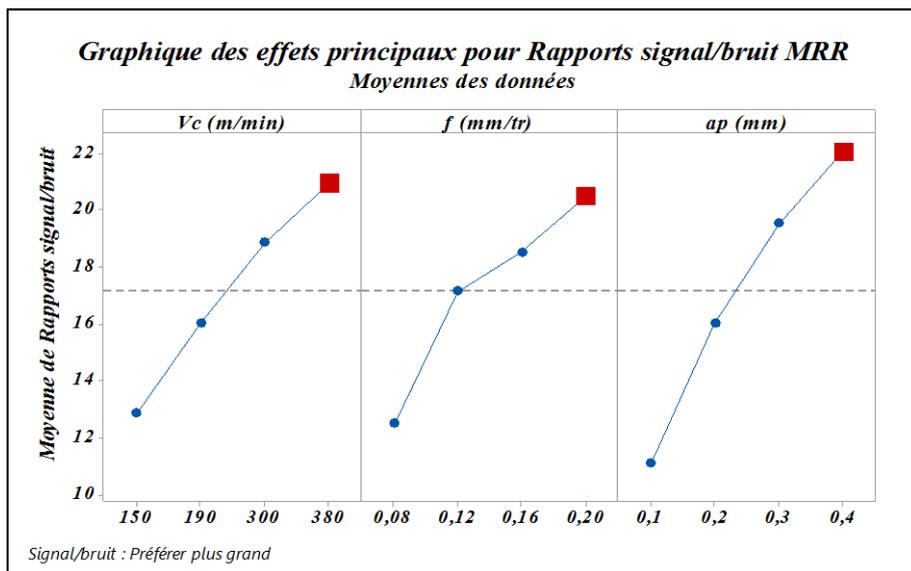
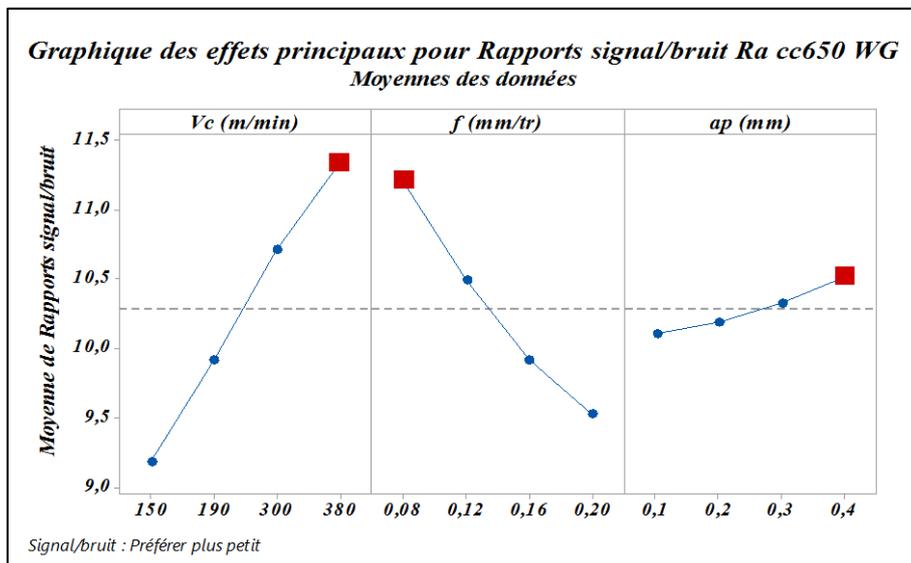
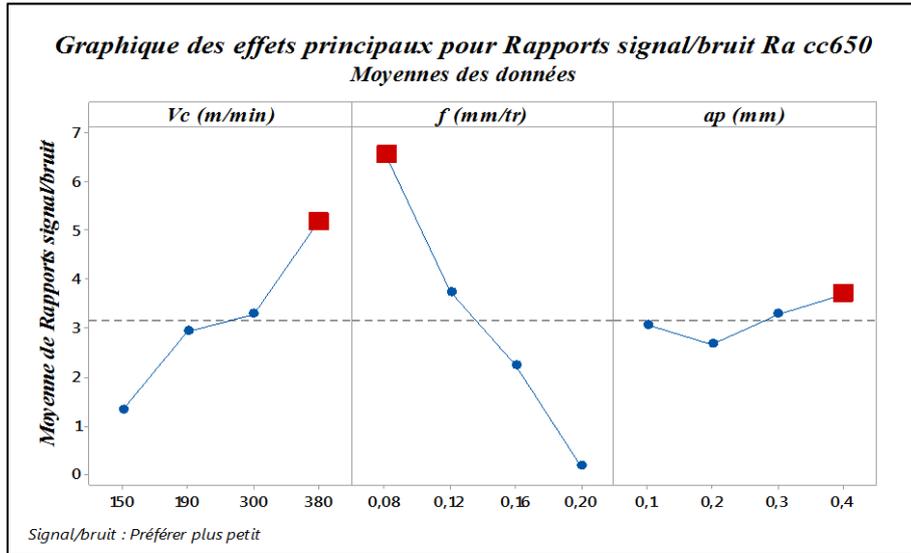


Figure IV-1 (a, b et c) Graphiques des effets principaux de (S/N) pour (Ra_{CC650}, Ra_{CC650WG} et MRR).

IV.3. Méthodes d'optimisation Multi-Objective

IV.3.1 L'approche de la fonction de désirabilité

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du champ expérimental, un ajustement des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Afin d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre de la méthodologie de la surface de réponse a été étudié à quatre niveaux différents. Le choix de quatre niveaux pour chaque variable est requis par cette planification afin d'explorer la région de la surface de réponse proche de l'optimum. L'optimisation de la réponse (MSR) permet d'identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrée qui optimise une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire les conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble.

L'optimisation des réponses multiples est une méthode favorisant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes à travers la fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur zéro, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, tandis qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas optimal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface avec les deux outils de coupe, la productivité (MRR) souhaités avec les paramètres de coupe optimaux. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la fonction de désirabilité pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface (R_a), et aussi maximiser la productivité (MRR) en semble.

Pour obtenir des solutions de ce type aux problèmes de planification des paramètres, une fonction objectif $F(x)$, est définie comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right) \\ F(x) = -DF \end{array} \right. \dots\dots\dots (IV.4)$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \\ d_i = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{T_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i \\ d_i = \left[\frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} \right] \text{ Si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i \\ d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i \end{array} \right. \dots\dots\dots(IV.5)$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est donnée comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \\ d_i = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \\ d_i = 1 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i \end{array} \right. \dots\dots\dots(IV.6)$$

Pour un objectif de rechercher un minimum la désirabilité peut être définie par les formules suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} d_i = 1 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \\ d_i = \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \\ d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i \end{array} \right. \dots\dots\dots(IV.7)$$

Dans la présente étude on cherche à optimiser simultanément le critère de rugosité (R_a) et la productivité (MRR) avec une approche d'optimisation de DF . En effet, le but est de trouver les conditions de coupes optimales lors du tournage dur de l'acier 100Cr6. Deux cas d'optimisation ont été considérés, à savoir :

*1^{er} cas : Un compromis entre les deux paramètres (minimisation de (R_{acc650}) et maximisation de (MRR)) en même temps est le but du premier cas d'optimisation, on donne la même importance pour les deux paramètres considérés.

*2^{ème} cas : Un compromis entre les deux paramètres (minimisation de ($R_{acc650WG}$) et maximisation de (MRR)) en même temps est le but du deuxième cas d'optimisation, on donne la même importance pour les deux paramètres considérés.

Tableau IV-2 Contraintes pour les deux cas d'optimisations.

Nom	But	Limite inf.	Limite Sup.	Poids inf.	Poids sup.	Importance
Vc (m/min)	dans l'intervalle	150	380	1	1	3
f (mm/rev)	dans l'intervalle	0,08	0,2	1	1	3
ap (mm)	dans l'intervalle	0,1	0,4	1	1	3
1^{er} cas						
R_{acc650} (µm)	minimiser	0,32	1,08	1	1	5
MRR (cm³/min)	maximiser	1,2	14,4	1	1	5
2^{ème} cas						
R_{acc650WG} (µm)	minimiser	0,23	0,37	1	1	5
MRR (cm³/min)	maximiser	1.2	14.4	1	1	5

Dans notre cas, le logiciel Design Expert 10 a été utilisé afin de trouver les régimes optimaux. Les résultats trouvés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV-3 Solutions d'optimisation du 1^{er} et 2^{ème} cas.

Cas d'optimisation	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ra (µm)	MRR (cm ³ /min)	Désirabilité
1^{er} cas	380	0,091	0,4	0,409	14,4	0,939
2^{ème} cas	380	0,091	0,4	0,239	14,4	0,967

Le tableau IV.3 rassemble les résultats des deux cas d'optimisation qui concerne la minimisation de (R_{acc650}) et maximisation de (MRR) avec le même degré d'importance et aussi la minimisation de (R_{acc650WG}) et maximisation de (MRR) avec le même degré d'importance. On voit que les résultats optimaux du 1^{er} cas et du 2^{ème} cas sont les mêmes, avec une diminution des valeurs de (Ra) pour le deuxième cas (R_{acc650WG}).

Les figures IV.4 a et b, illustrent les graphiques des bars de désirabilité pour les deux cas d'optimisation.

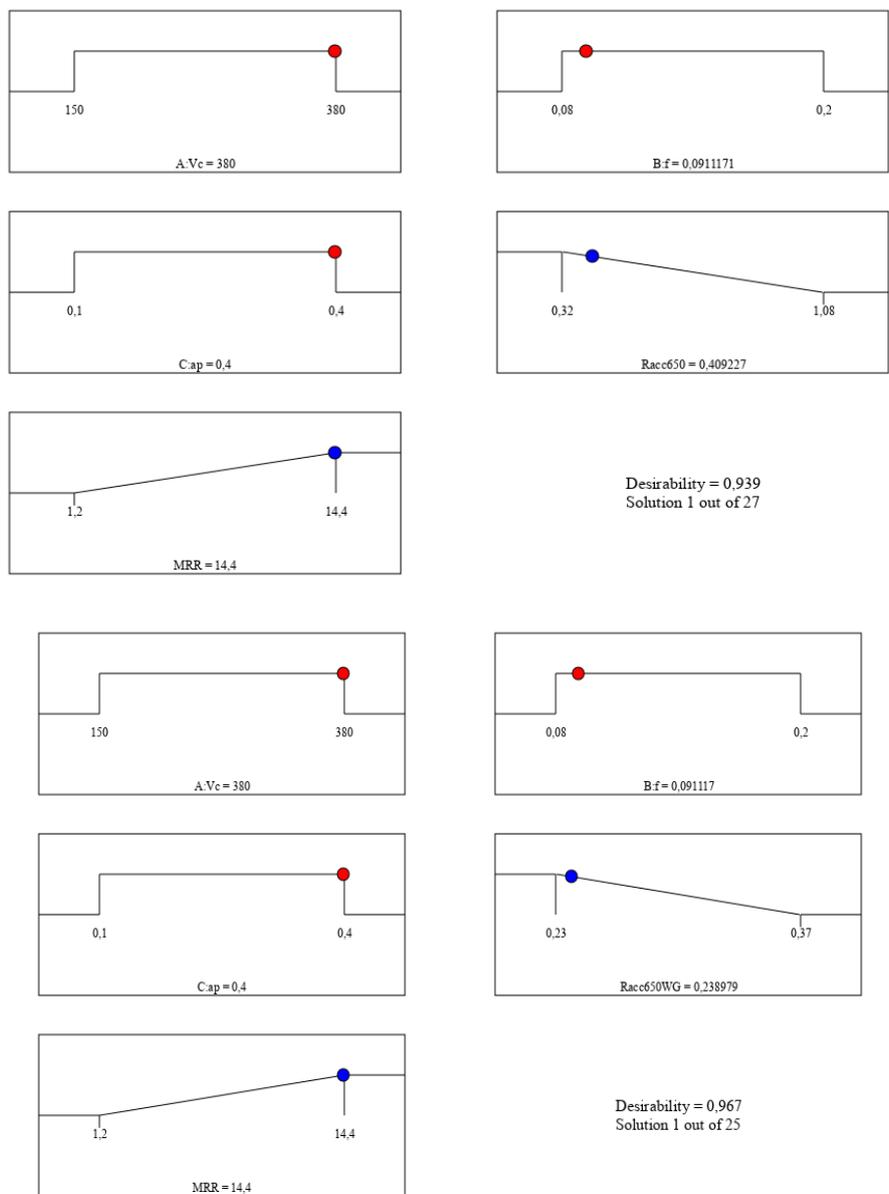


Figure IV-2 Diagramme d'optimisation de réponses multiples de (1^{er} cas et 2^{ème} cas).

IV.3.2 Résultats de l'optimisation par GA

IV.3.2.1. Origines de la méthode GA

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle tels que croisements, mutations, sélection. [19]

Ces algorithmes ont déjà une histoire relativement ancienne puisque les premiers travaux de John Holland [20] sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962.

Holland a étudié les systèmes évolutifs et, en 1975, il a introduit le premier modèle formel des algorithmes génétiques (the canonical genetic algorithm AGC) dans son livre *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [21]. Il expliqua comment ajouter de l'intelligence dans un programme informatique avec les croisements (échangeant le matériel génétique) et la mutation (source de la diversité génétique). Ce modèle servira de base aux recherches ultérieures et sera plus particulièrement repris par Goldberg [22] qui publiera en 1989, un ouvrage de vulgarisation des algorithmes génétiques, et a ajouté à la théorie des algorithmes génétiques les idées suivantes :

- Un individu est lié à un environnement par son code d'ADN.
- Une solution est liée à un problème par son indice de qualité.

IV.3.2.2. Analogie avec la biologie

Puisque les algorithmes génétiques ont une inspiration biologique [23], il convient de rappeler au préalable quelques termes de génétique. Les organismes vivants sont constitués de cellules, dont les noyaux comportent des chromosomes qui sont des chaînes d'ADN comme montré à la Figure IV-3. L'élément de base de ces chromosomes (le caractère de la chaîne d'ADN) est un gène. Sur chacun de ces chromosomes, une suite de gènes constitue une chaîne qui code les fonctionnalités de l'organisme (la couleur des yeux, . . .). La position d'un gène sur le chromosome est son locus comme il est représenté dans la Figure IV-4. L'ensemble des gènes d'un individu est son génotype et l'ensemble du patrimoine génétique d'une espèce est le génome. Les différentes versions d'un même gène sont appelées allèles [24] [23] [25] [21].

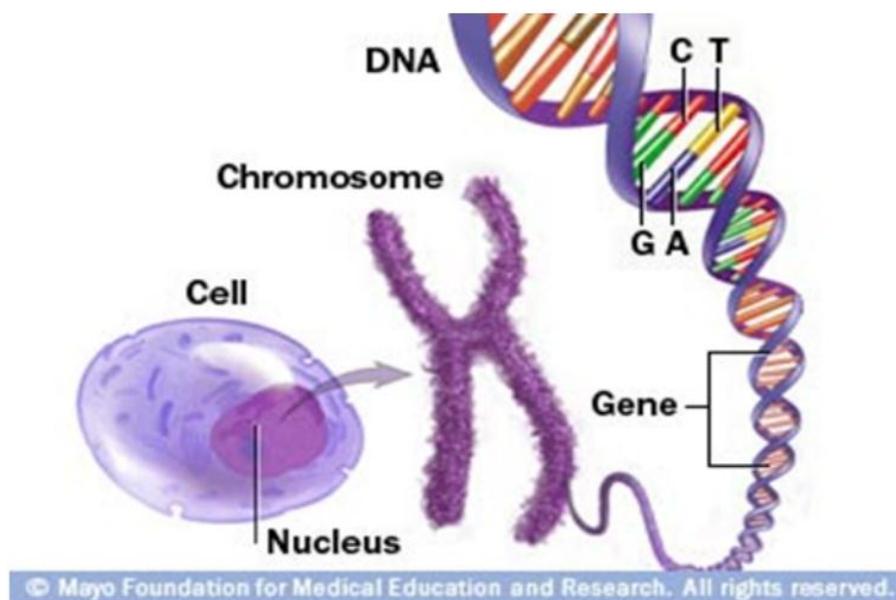


Figure IV-3 Analogie avec la biologie

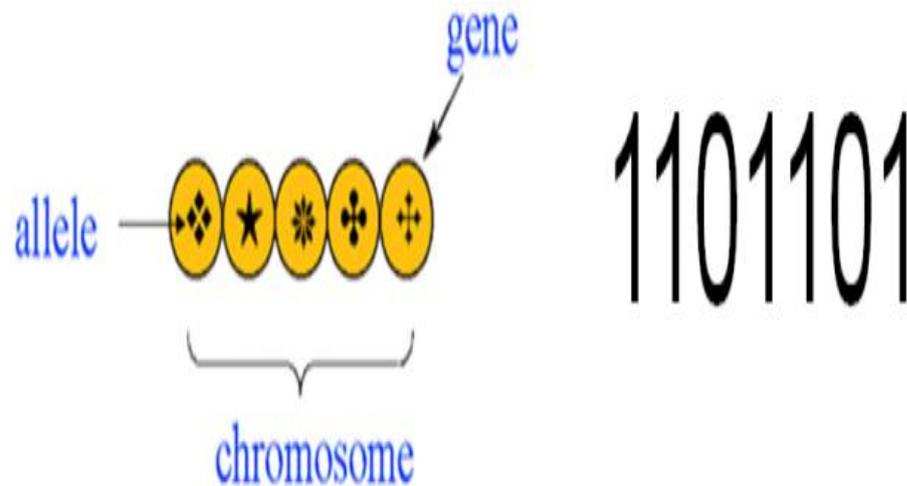


Figure IV-4 représentation d'un chromosome

On trouve aussi, dans les algorithmes génétiques, une analogie avec la théorie de l'évolution qui propose qu'au fil du temps, les gènes conservés au sein d'une population donnée soient ceux qui sont le plus adaptés aux besoins de l'espèce vis-à-vis de son environnement [23] [26] [25] [27] [21].

IV.3.2.3. Codage des chromosomes

Pour les algorithmes génétiques, un des facteurs importants est la façon dont les solutions sont codées, c'est-à-dire les structures de données qui représentent les gènes [26]. Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement :

IV.3.2.3.1 Codage binaire

C'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire 0, 1, les raisons pour lesquelles ce type de codage est le plus utilisé sont tout d'abord historiques. En effet, lors des premiers travaux de Holland, les théories ont été élaborées en se basant sur ce type de codage [25], de plus ce type de codage a pour intérêt de permettre de créer des opérateurs de croisement et de mutation simples [25].

IV.3.2.3.2 Codage réel

Ce codage peut être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle (Figure IV-5).

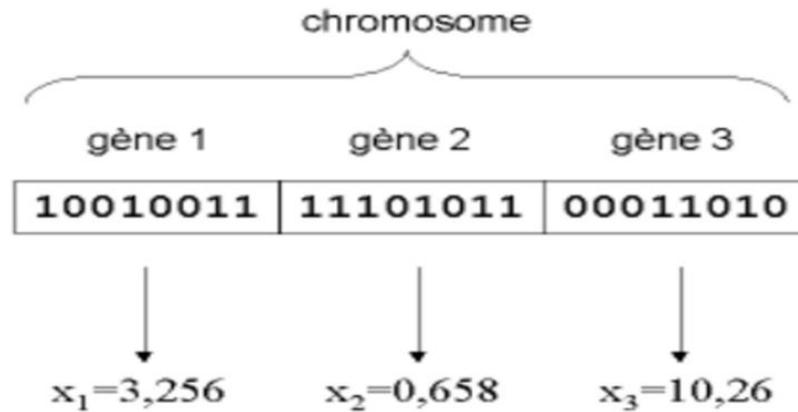


Figure IV-5 codage réel

IV.3.2.3.3 Codage de Gray

Dans le cas d'un codage binaire, on utilise souvent la "distance de Hamming" comme mesure de la dissimilarité entre deux éléments de population [25], cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences. Et c'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites [27]. En effet, deux éléments voisins en termes de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray". Le codage de Gray est un codage, qui a comme propriété qu'entre un élément n et un élément $n + 1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère [27].

IV.3.2.4. Principe

Les algorithmes génétiques fournissent des solutions aux problèmes n'ayant pas de solutions calculables en temps raisonnable de façon analytique ou algorithmique [21]. Selon cette méthode, des milliers de solutions (génotypes) plus ou moins bonnes sont créés au hasard [27], puis sont soumises à un procédé d'évaluation de la pertinence de la solution mimant l'évolution des espèces [27]. Les plus "adaptés", c'est-à-dire, les solutions au problème qui sont les plus optimales survivent davantage que celles qui le sont moins, et la population évolue par générations successives en croisant les meilleures solutions entre elles et en les faisant muter, puis en relançant ce procédé, un certain nombre de fois, afin d'essayer de tendre vers la solution optimale. Le déroulement d'un algorithme génétique peut être découpé en quatre parties [25] : 1. La création de la population initiale, 2. L'évaluation des individus, 3. La création de nouveaux individus, 4. Réitération du processus. On peut représenter ces étapes dans l'organigramme de la Figure IV-6:

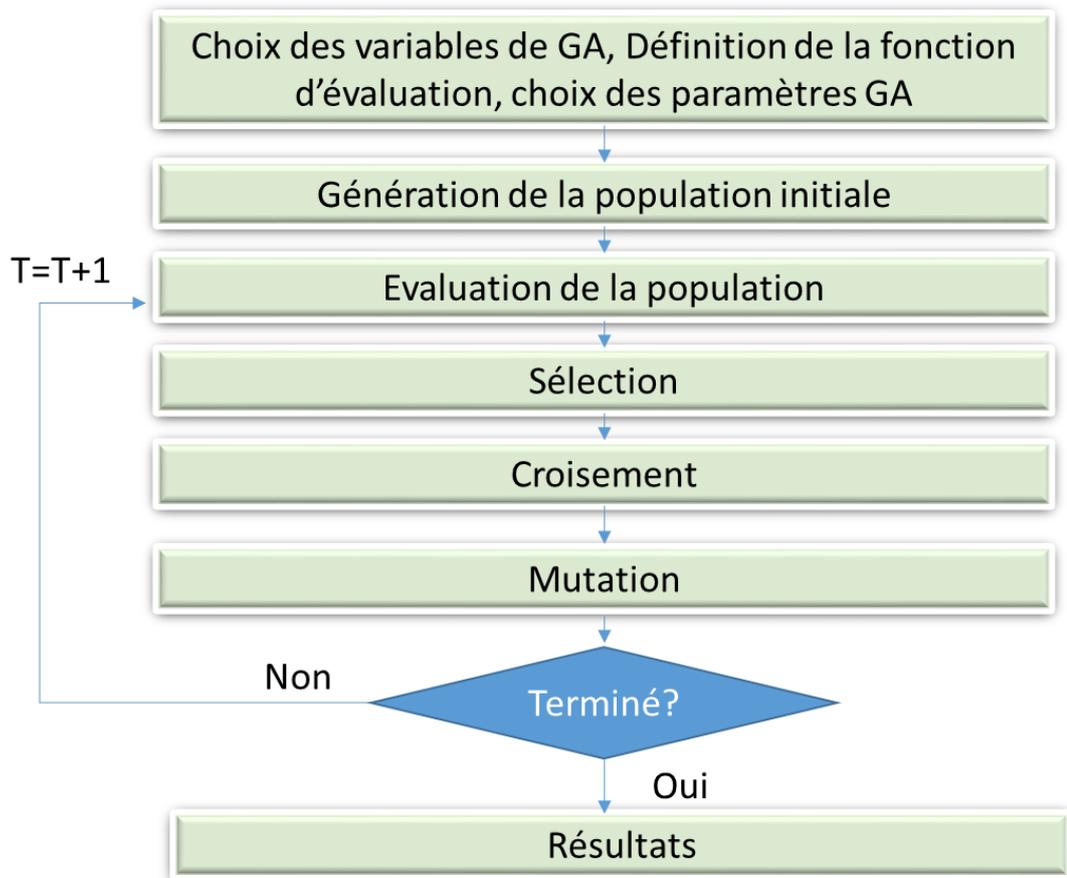


Figure IV-6 Organigramme de GA

IV.3.2.4.1 La création de la population initiale

Pour démarrer un algorithme génétique, il faut lui fournir une population à faire évoluer [27] [25]. La manière dont le programmeur va créer chacun des individus de cette population est entièrement libre [19]. Il suffit que tous les individus créés soient de la forme d'une solution potentielle, et il n'est nullement besoin de songer à créer de bons individus. Ils doivent juste fournir une réponse, même mauvaise, au problème posé. Et le hasard dans tout cela ? Il est tout à fait possible de créer les individus de manière aléatoire. Cette méthode amène un concept très utile dans les algorithmes génétiques : la diversité [19] [21]. Plus les individus de la population de départ seront différents les uns des autres, plus nous aurons de chance d'y trouver, non pas la solution parfaite, mais de quoi fabriquer les meilleures solutions possibles.

IV.3.2.4.2 L'évaluation des individus

Une fois que la population initiale a été créée, nous allons en sortir les individus les plus prometteurs, ceux qui vont participer à l'amélioration de notre population [19]. Nous allons donc attribuer une 'note' ou un indice de qualité à chacun de nos individus appelés fitness. La méthode d'évaluation des individus est laissée au programmeur en fonction du problème qu'il a à optimiser ou à résoudre. Cette étape intermédiaire d'évaluation peut même devenir une étape importante du processus d'amélioration de notre population. En effet, les différents individus ne sont pas toujours comparables, il n'est pas toujours possible de dire qu'un individu est meilleur ou moins bon qu'un autre. C'est le cas des problèmes multicritères, lorsqu'une solution dépend de plusieurs paramètres. On peut toujours dire qu'un nombre est supérieur ou non à un autre, mais on ne peut pas dire si un vecteur est supérieur ou non à un autre. La notion de supériorité pour les vecteurs n'existe pas [27].

IV.3.2.4.3 La création de nouveaux individus

La sélection

Cet opérateur est très important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. On trouve essentiellement trois types de méthodes de sélection différentes :

- La méthode de la roulette
- La sélection par tournois
- La méthode d'élitisme

La roulette « Roulette wheel selection » [22] La sélection des individus par le système de la roulette s'inspire des roues de loterie (Figure IV-7), ce principe consiste à associer à chaque individu un segment dont la longueur est proportionnelle à sa fitness [24] [28]. On reproduit ici le principe de tirage aléatoire utilisé dans les roulettes de casinos avec une structure linéaire. Ces segments sont ensuite concaténés sur un axe que l'on normalise entre 0 et 1. On tire alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1, puis on "regarde" quel est le segment sélectionné. Avec ce système, les grands segments, c'est-à-dire les bons individus, seront plus souvent adressés que les petits [28].

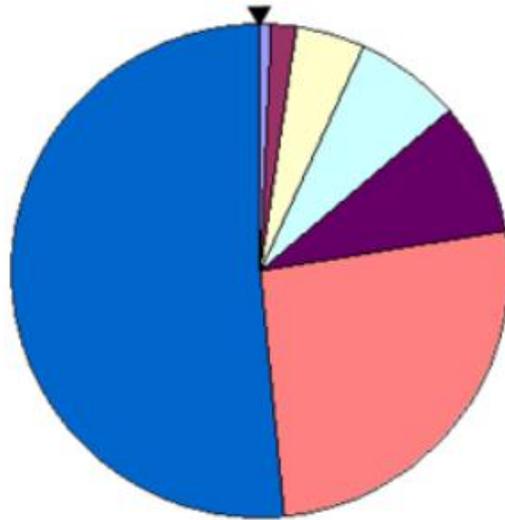


Figure IV-7 Schéma de roulette

La sélection par tournoi [24] [28] [30] Le principe de la sélection par tournoi augmente les chances pour les individus de piètre qualité de participer à l'amélioration de la population. Le principe est très rapide à implémenter. Un tournoi consiste en une rencontre entre plusieurs individus pris au hasard dans la population. Le vainqueur du tournoi est l'individu de meilleure qualité. Comme on peut choisir aussi de conserver les 2 meilleurs individus ou les 3 meilleurs, selon la stratégie de tournois, on peut créer beaucoup de tournois, créer des tournois avec beaucoup de participants ou bien mettre en avant ceux qui gagnent les tournois haut la main. On peut faire participer un même individu à plusieurs tournois. Une fois de plus, on est totalement libre quant à la manière d'implémenter cette technique de sélection.

L'élitisme [26] Cette méthode de sélection permet de mettre en avant les meilleurs individus de la population. Ce sont donc les individus les plus prometteurs qui vont participer à l'amélioration de notre population. Cette méthode a l'avantage de permettre une convergence (plus) rapide des solutions, mais au détriment de la diversité des individus.

On prend en effet le risque d'écarter des individus de piètre qualité, mais qui auraient pu apporter de quoi créer de très bonnes solutions dans les générations suivantes. Cette méthode est extrêmement sensible à la présence des optimums locaux, c'est-à-dire à la présence de solutions paraissant optimales tant que l'on ne s'en éloigne pas trop - le véritable optimum pouvant alors être situé dans une tout autre partie du domaine de recherche.

Une autre possibilité relevant aussi du domaine de l'élitisme, pour s'assurer que les meilleurs individus feront effectivement partie de la prochaine génération, est tout simplement de les sauvegarder pour pouvoir les rajouter à coup sûr dans la population suivante. Le nombre d'individus à sélectionner en vue d'un croisement ou d'une mutation est encore une fois laissé à l'appréciation de l'utilisateur. Cependant, il n'est pas nécessaire (et pas recommandé non plus) de modifier tous les individus d'une population.

Le croisement

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants [22]. Pour effectuer l'opérateur de croisement sur des chromosomes constitués de M gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents. On échange ensuite les deux sous-chaines terminales de chacun des deux chromosomes, ce qui produit deux enfants C_1 et C_2 [27] [30] [28] [24] (Figure IV-8). On peut étendre ce principe en découpant le chromosome non pas en 2 sous-chaines, mais en 3, 4, etc... [27] [31] (Figure IV-9).

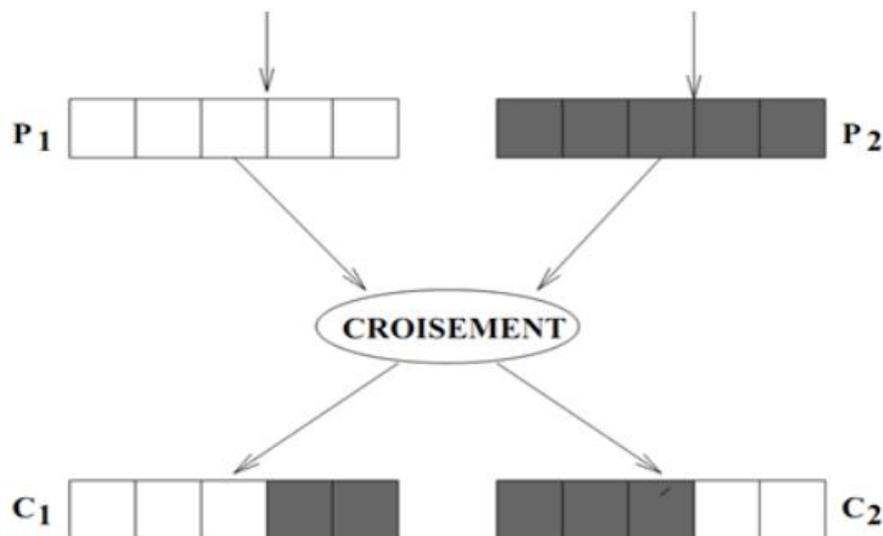


Figure IV-8 Croisement simple

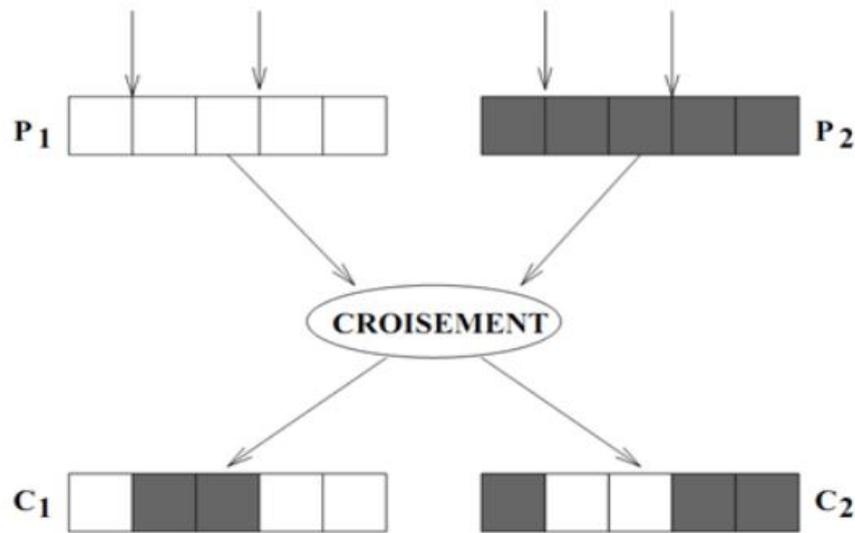


Figure IV-9 Croisement multipoints

La mutation

Une autre solution que le croisement pour créer de nouveaux individus est de modifier ceux déjà existants. Une fois de plus, le hasard va être d'une grande utilité. Il peut s'avérer efficace de modifier aléatoirement quelques individus de la population en modifiant un gène ou un autre [28] comme il est montré dans la figure 8. Rien ne dit que l'individu muté sera meilleur ou moins bon, mais il apportera des possibilités supplémentaires qui pourraient bien être utiles pour la création de bonnes solutions [22]. De même que pour les croisements, il n'est pas recommandé de faire muter tous les individus. Il est possible de faire muter un individu de plusieurs manières. Une seule contrainte : l'individu muté doit être de la forme d'une solution potentielle. Cet opérateur dispose de 4 grands avantages :

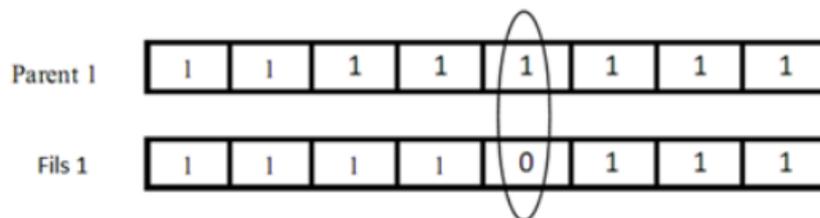


Figure IV-10 mutation

a- Il garantit la diversité de la population, ce qui est primordial pour les algorithmes génétiques [30] [26].

b- Il permet d'éviter un phénomène connu sous le nom de dérive génétique. On parle de dérive génétique quand certains gènes favorisés par le hasard se répandent au détriment des autres et sont ainsi présents au même endroit sur tous les chromosomes. Le fait que l'opérateur de mutation puisse entraîner de manière aléatoire des changements au niveau de n'importe quel locus permet d'éviter l'installation de cette situation défavorable [28].

c- Il permet de limiter les risques d'une convergence prématurée [22] [24] causée par exemple par une méthode de sélection élitiste imposant à la population une pression sélective trop forte. En effet, dans le cas d'une convergence prématurée on se retrouve avec une population dont tous les individus sont identiques, mais ne sont que des optimums locaux. Tous les individus étant identiques, le croisement ne changera rien à la situation. En effet, l'échange d'informations par le croisement entre des individus strictement identiques est bien sûr totalement sans conséquence ; on aura beau choisir la méthode de croisement qu'on veut, on se retrouvera toujours à échanger des portions de chromosomes identiques et la population n'évoluera pas. L'évolution se retrouvant bloquée, on n'atteindra jamais l'optimum global. La mutation entraînant des inversions de bits de manière aléatoire permet de réintroduire des différences entre les individus [26] [24]. 4- L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité de parcours d'espace [24]. Cette propriété indique que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'état, sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. Ainsi en toute rigueur, l'algorithme génétique peut converger sans croisement, et certaines implantations fonctionnent de cette manière. Grâce à cette propriété, on est donc sûr de pouvoir atteindre l'optimum global [32] [24]. Les propriétés de convergence des algorithmes génétiques sont donc fortement dépendantes de cet opérateur sur le plan théorique.

IV.3.2.4.4 Réitération du processus

Dans cette étape, si un critère d'arrêt est atteint, l'algorithme s'arrête et là, les meilleurs individus sont sélectionnés. Dans le cas contraire, on recommence le processus depuis l'étape de l'évaluation [32]. Plusieurs procédures peuvent être employées pour terminer l'exécution d'un AG et sont étudiées dans [28].

IV.3.2.5. Graphes de front de Pareto

L'optimisation des problèmes d'ingénierie est très complexe et assez difficile pour l'approcher. Ils sont en général multi objectifs et ont des paramètres ou charges qui se comportent d'une manière aléatoire. La principale difficulté d'un problème multi objectif est qu'il n'existe pas de définition de la solution optimale et qu'elle n'est pas unique. Il est simplement possible d'exprimer le fait qu'une solution est préférable à une autre, mais il n'y a pas de solution meilleure que toutes les autres.

De ce fait, résoudre un problème multi objectif ne consiste pas à chercher la solution optimale, mais l'ensemble des solutions satisfaisantes. La principale qualité d'une optimisation multi-objective est donc de rendre les décisions plus faciles et moins subjectives.

Pour les problèmes multi objectifs, la solution peut être présentée comme un front de Pareto et l'ingénieur doit faire un compromis entre les différents critères d'optimisation.

La figure suivante présente les graphes de front de Pareto pour notre cas d'optimisation. Dans cette figure, les étoiles violettes représentent les solutions optimales de Pareto. Elles sont indifférentes les unes des autres car on remarque les valeurs minimales de la rugosité de la surface correspond à des petites valeurs de taux d'enlèvement de matière. Donc il n'y a pas une seule solution optimale mais plutôt un ensemble de compromis optimaux. Aucun d'eux ne peut être identifié comme étant meilleur que les autres sans qu'une information de préférence ne soit incluse (contrainte). Donc, contrairement aux résultats de la fonction de désirabilité, il existe une variété de solutions et le choix du régime optimal est dû à l'ingénieur (utilisateur).

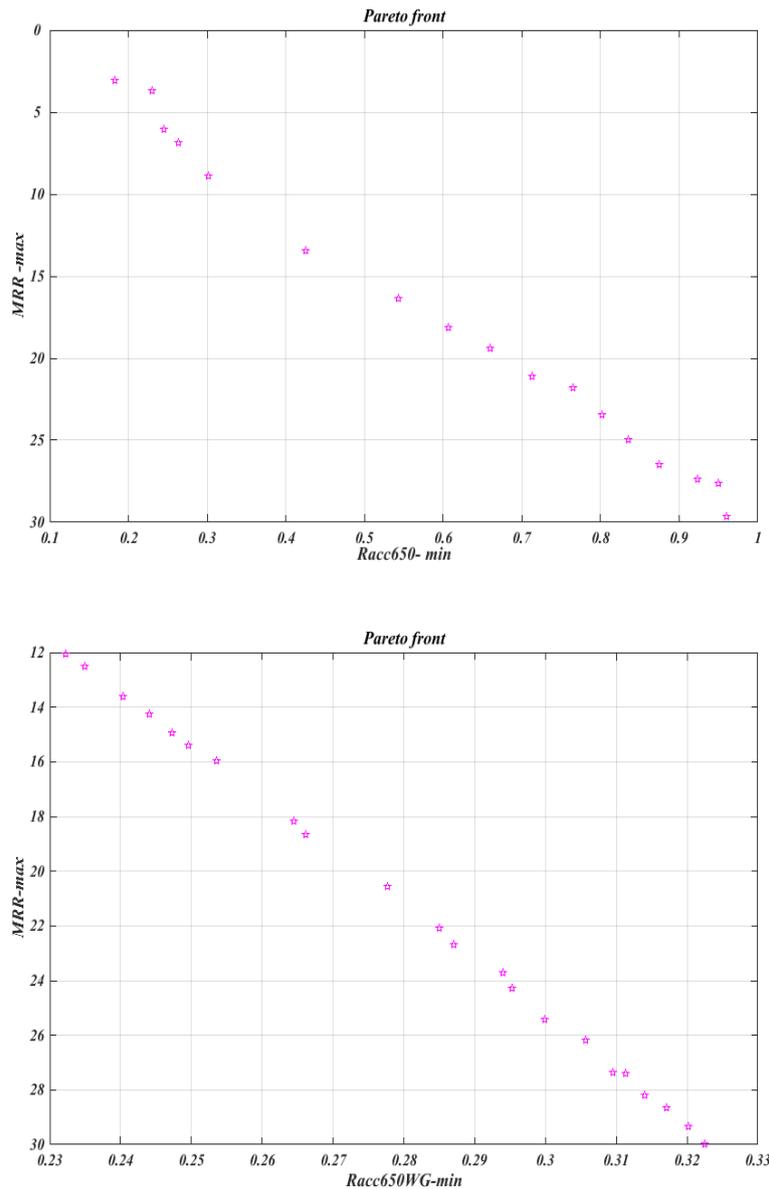


Figure IV-11 Les graphes de front de Pareto de (1^{er} cas et 2^{ème} cas).

IV.3.2.6. Régimes de coupe optimaux

Les deux tableaux suivants présentent les résultats de l'optimisation par l'algorithme génétique de Ra et MRR pour les deux plaquettes de coupe. On remarque que les régimes de coupe adoptés pour l'obtention d'un compromis entre les valeurs de Ra et MRR, correspondent aux plages des conditions de coupe suivantes : V_c (de 371,354 à 375,681) m/min, f (de 0,08 à 0,2) mm/tr et ap (de 0,101 à 0,4) mm pour les deux céramiques. Les valeurs optimales de Ra et MRR sont comme suite : pour la céramique CC650, Ra entre (0,183 et 0,96) μm et MRR entre (3,042 et 29,632) cm^3/min .

Pour la céramique CC650WG les valeurs sont les suivantes : Ra entre (0,232 et 0,323) μm et MRR entre (12,06 et 29,967) cm^3/min .

Tableau IV-4 Les résultats de l'optimisation par l'algorithme génétique de Ra et MRR pour CC650 (1^{er} cas)

	Ra_{CC650}	MRR	Vc	f	ap
1	0,835	24,974	371,530	0,176	0,381
2	0,183	3,042	372,188	0,081	0,101
3	0,263	6,894	372,141	0,082	0,227
4	0,659	19,379	371,586	0,143	0,365
5	0,183	3,042	372,188	0,081	0,101
6	0,607	18,103	372,123	0,132	0,368
7	0,301	8,873	372,083	0,081	0,294
8	0,874	26,490	371,425	0,183	0,389
9	0,425	13,480	371,843	0,095	0,382
10	0,949	27,654	371,662	0,200	0,373
11	0,230	3,712	372,028	0,088	0,114
12	0,764	21,793	371,746	0,164	0,357
13	0,544	16,370	371,881	0,120	0,367
14	0,923	27,398	371,635	0,194	0,380
15	0,245	6,016	372,173	0,081	0,198
16	0,713	21,113	371,936	0,153	0,371
17	0,802	23,433	371,833	0,171	0,369
18	0,960	29,632	371,354	0,200	0,399

Tableau IV-5 Les résultats de l'optimisation par l'algorithme génétique de Ra et MRR pour CC650WG (2^{ème} cas)

	$Ra_{CC650WG}$	MRR	V_c	f	A_p
1	0,294	23,717	374,436	0,162	0,390
2	0,278	20,577	374,200	0,140	0,392
3	0,287	22,695	374,910	0,153	0,396
4	0,285	22,082	374,699	0,150	0,392
5	0,323	29,967	374,729	0,200	0,400
6	0,264	18,162	374,557	0,123	0,396
7	0,320	29,327	374,688	0,197	0,397
8	0,247	14,940	375,283	0,100	0,398
9	0,250	15,402	375,091	0,103	0,398
10	0,240	13,600	374,960	0,091	0,399
11	0,314	28,182	374,500	0,189	0,399
12	0,300	25,426	374,750	0,170	0,399
13	0,235	12,526	375,096	0,084	0,400
14	0,306	26,184	374,263	0,178	0,393
15	0,253	15,981	374,853	0,108	0,395
16	0,244	14,274	375,225	0,096	0,398
17	0,311	27,388	373,896	0,185	0,396
18	0,310	27,365	374,993	0,183	0,399
19	0,266	18,675	374,862	0,125	0,398
20	0,295	24,298	374,812	0,164	0,395
21	0,232	12,060	375,681	0,080	0,400
22	0,317	28,651	374,684	0,193	0,396

Conclusion générale

Les opérations de tournage dur pratiqués sur l'acier 100Cr6 par des outils de coupe en céramique conventionnel CC650 et wiper CC650WG nous ont permis d'évaluer les performances de ces outils de coupe en termes de la rugosité de surface et de la productivité.

- D'après notre étude, les états de surfaces usinées par la céramique Wiper (CC650WG) sont meilleurs que ceux obtenus par l'autre plaquette (CC650) et cela pour toutes les conditions de coupe testées (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe), ceci est dû à l'effet de la géométrie du bec de l'outil.
- Les plaquettes racleuses, aussi appelées Wiper, sont conçues pour "adoucir" les stries laissées sur les surfaces tournées. En fait, elles améliorent le fini de surface. Comparé au tournage avec des plaquettes standard, le tournage avec des plaquettes Wiper peut améliorer le fini de surface par un facteur plus de deux, ou bien assurer le maintien d'un fini constant en usinant avec une avance plus deux fois plus grande. Pour conclure, elles permettent d'accroître la qualité ou la productivité.
- Pour les résultats de l'ANOVA de rugosité de surface ont dévoilé que (f) et (V_c) ont un effet significatif sur (R_a , R_z et R_q). D'autre part, (ap) a un impact très faible sur les trois critères.
- Les modèles mathématiques développés par la méthode RSM sont très utiles pour la prédiction. Une corrélation étroite entre les valeurs prédites et mesurées a été trouvée, avec des valeurs (R^2) allant de (92 à 96) %.
- Selon l'approche de Taguchi, le régime mono-objectif optimal de la réponse (R_{aCC650} et $R_{aCC650WG}$) correspond aux niveaux (**$Vc4$, $f1$, $ap4$**), et le régime optimal mono-objectif de la productivité (MRR) correspond aux niveaux (**$Vc4$, $f4$, $ap4$**), qui correspond aux valeurs les plus élevées des paramètres de coupe.
- Selon l'approche de la fonction de désirabilité (DF), le régime optimal de l'optimisation multi objectif obtenu pour les deux cas est le même ($V_c=380$ m/min, $f=0,091$ mm/tr, $ap=0,4$ mm) qui correspond à une valeur de $MRR= 14,4$ cm³/min pour les deux cas avec une différence dans la rugosité de surface où ($R_{aCC650}= 0,409$ μm et $R_{aCC650WG}=0,239$ μm).
- Selon l'approche de l'algorithme génétique (GA) et contrairement aux résultats de la fonction de désirabilité, il existe une variété de solutions, un front de Pareto, et le choix du régime optimal est dû à l'ingénieur (utilisateur)

Références

- [1] J.-P. Gauthier, *Machiniste sur machine-outil conventionnelle*, Québec: CEMEQ International inc, 2012.
- [2] C. Koepfer, "Production Machining," *Production Machining*, 22 01 2010. [Online]. Available: <https://www.productionmachining.com/articles/hard-turning-as-an-alternative-to-grinding>. [Accessed 05 06 2021].
- [3] C. Bedrin and B. Roumesy, *Usinage par outil coupant Fascicule*, Lyon: INSA, 1989.
- [4] L. Benoist, B. Dupont and J. P. Trotignon, *Productique organisation et technologie des systèmes de production*, Paris, 1998.
- [5] N. Belhamra, "Réalizations et caractérisations de revêtements durs à base de nitrures et de carbures : Applications à l'usinage des métaux," Université Mohamed Khider, Biskra, 2014.
- [6] R. Nciri, "Etude de la coupe," institue des études supérieur technologique, Gafsa, 2014.
- [7] ASME, *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay) B46.1*, New York: ASME, 2009.
- [8] CaravelCut, "CaravelCut," [Online]. Available: http://www.caravelcut.com/index.php?page=rugosite_home&view=description. [Accessed 2021 06 05].
- [9] "OLYMPUS solution microscopie," OLYMPUS, [Online]. Available: <https://www.olympus-ims.com/fr/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>. [Accessed 2021 06 05].
- [10] V. Wagner, A. Vissio, H. Chanal and E. Duc, "Etude de la relation entre les conditions de coupe et la morphologie des copeaux en fraisage de l'aluminium 2050," Saint Etienne, France, 2012.

- [11] J. TTHIL, "Contribution à l'étude expérimentale et à la modélisation de l'usinage des matériaux difficiles pour le procédé de forage profond avec système BTA," Université de Lorraine, 2013.
- [12] le Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication, Guide d'auto-apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique, Québec: PERFORM, 2015.
- [13] V. N. Gaitonde, L. Figueira, J. Davim and S. Karnik, "Analysis of machinability during hard turning of cold work tool steel (type: AISI D2)," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 24, no. 12, pp. 1373-1382, 2009.
- [14] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, L. Figueira and P. Davim, "Performance comparison of conventional and wiper ceramic inserts in hard turning through artificial neural network modeling," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 52, p. 101–114, 2011.
- [15] H. Aouici et M. Elbah, «Performance comparison of wiper and conventional ceramic inserts in hard turning of AISI 4140 steel: analysis of machining forces and flank wear,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, p. 2221–2244, 2016.
- [16] H. Bensouilah, H. Aouici, I. Meddour, M. A. Yallese, T. Mabrouki and F. Girardin, "Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process," *Measurement*, vol. 82, pp. 1-18, 2016.
- [17] M. Elbah, M. A. Yallese, H. Aouici, T. Mabrouki and J.-F. Rigal, "Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel," *Measurement*, vol. 46, no. 9, pp. 3041-3056, 2013.
- [18] K. M. e. A. DESAI, "Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in fermentation media optimization: Case study of fermentative production of scleroglucan," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 41, no. 3, pp. 266-273, 2008.
- [19] M. T. Jones and D. Pallai, *AI Application Programming*, Course Technology. Apprentissage Cengage, 2003.

- [20] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, 1975.
- [21] S. N. Sivanandam and S. N. Deepa, *Introduction to Genetic Algorithms*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [22] D. E. Goldberg., *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, 1989.
- [23] C. Gregg, *Genetic Algorithms in Autonomous Embedded Systems, Embedded Systems*, 2009.
- [24] M. Affenzeller, S. Winkler and S. Wagner, *Genetic Algorithms and Genetic Programming (Modern Concepts and Practical Applications)*, Taylor Francis Group, 2009.
- [25] R. Leardi, "Nature-inspired Methods in Chemometrics : Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks," *ELSEVIER B.V.*, 2003.
- [26] O. KAZAR and L. FRECON, *MANUEL D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE*, METIS Lyon Tech, 2009.
- [27] R. L. Haupt and S. E. Haupt, *PRACTICAL GENETIC ALGORITHMS*, New Jersey: John Wiley Sons, 2004.
- [28] F. G. Lobo, C. F. Lima and Z. Michalewicz, *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [29] M. L. Lamali, "Approches évolutives pour la classification non supervisée de données," ESI, Alger, 2009.
- [30] le Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication, *guide d'auto-apprentissage en usinage*, Québec: CSMOFMI, 2010.
- [31] N. Fabris, *Materials And Processes*, COLUMBUS USA: ASNT, 2016.
- [32] B. H. Topping, J. Sziveri, A. Bahreinejad, J. P. Leite and B. Cheng, "Parallel processing,neural networks and genetic algorithms," *Elsevier Science*, vol. 29, pp. 763-786, 1998.

Annex I

Premier cas

27 Solutions found

Number	Vc	f	ap	Racc650	MRR	Desirability	
1	380,000	0,091	0,400	0,409	14,400	0,939	Selected
2	380,000	0,091	0,400	0,406	14,323	0,939	
3	379,999	0,091	0,399	0,410	14,400	0,939	
4	380,000	0,090	0,400	0,401	14,202	0,938	
5	379,092	0,091	0,400	0,412	14,400	0,938	
6	380,000	0,090	0,399	0,405	14,254	0,938	
7	379,999	0,092	0,397	0,412	14,400	0,937	
8	380,000	0,089	0,400	0,396	14,073	0,937	
9	380,000	0,093	0,395	0,414	14,400	0,936	
10	380,000	0,088	0,400	0,393	13,988	0,936	
11	380,000	0,093	0,394	0,416	14,400	0,935	
12	377,426	0,092	0,400	0,417	14,400	0,934	
13	380,000	0,085	0,400	0,378	13,610	0,932	
14	380,000	0,093	0,400	0,420	14,683	0,932	
15	376,041	0,093	0,400	0,421	14,400	0,931	
16	379,968	0,095	0,386	0,423	14,400	0,930	
17	374,393	0,093	0,400	0,426	14,400	0,927	
18	379,999	0,099	0,377	0,433	14,400	0,922	
19	370,274	0,095	0,400	0,439	14,400	0,918	
20	364,365	0,097	0,400	0,457	14,400	0,905	
21	380,000	0,106	0,357	0,459	14,400	0,904	
22	380,000	0,116	0,330	0,498	14,400	0,875	
23	380,000	0,095	0,322	0,382	11,692	0,855	
24	380,000	0,134	0,292	0,570	14,400	0,819	
25	380,000	0,086	0,290	0,318	9,548	0,795	
26	380,000	0,166	0,228	0,714	13,892	0,681	
27	279,060	0,138	0,391	0,728	14,400	0,680	

Deuxième cas
25 Solutions found

Number	<i>V_c</i>	<i>f</i>	<i>ap</i>	<i>R_{aCC650WG}</i>	MRR	Desirability	
1	380,000	0,091	0,400	0,239	14,400	0,967	Selected
2	380,000	0,090	0,400	0,238	14,315	0,966	
3	380,000	0,092	0,398	0,239	14,400	0,966	
4	378,895	0,092	0,400	0,240	14,400	0,965	
5	380,000	0,089	0,400	0,237	14,131	0,963	
6	378,904	0,092	0,398	0,240	14,400	0,963	
7	377,267	0,092	0,400	0,240	14,400	0,962	
8	379,633	0,093	0,395	0,241	14,400	0,961	
9	379,731	0,093	0,400	0,241	14,692	0,961	
10	380,000	0,088	0,399	0,237	13,966	0,960	
11	375,709	0,093	0,400	0,241	14,400	0,959	
12	380,000	0,097	0,400	0,244	15,199	0,950	
13	370,968	0,094	0,400	0,244	14,400	0,949	
14	380,000	0,098	0,380	0,245	14,400	0,944	
15	364,651	0,097	0,400	0,247	14,400	0,936	
16	363,710	0,097	0,400	0,248	14,400	0,935	
17	379,999	0,103	0,396	0,248	15,725	0,934	
18	380,000	0,101	0,371	0,248	14,400	0,933	
19	351,491	0,102	0,400	0,254	14,400	0,909	
20	350,396	0,103	0,399	0,255	14,400	0,905	
21	380,000	0,110	0,347	0,256	14,400	0,904	
22	380,000	0,111	0,342	0,257	14,400	0,898	
23	380,000	0,080	0,360	0,234	11,495	0,870	
24	379,999	0,140	0,280	0,277	14,400	0,815	
25	380,000	0,176	0,222	0,296	14,400	0,725	