

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



**Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention d'un diplôme
de Master**

**Option : Construction Mécanique
Présenté par : ABERKANE Nassir**

***Modélisation des conditions de coupe lors de
l'usinage de l'acier AISI 420 en utilisant les
méthodes RMS, Taguchi et ACP***

**Sous la direction de :
Dr. BENSOUILAH Hamza**

Année universitaire 2019/2020

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

Mes parents ;

Mes frères et ma sœur ;

Toutes mes amies ;

Tous mes collègues ;

Tous ceux qui me sont chers.

Remerciement

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

Je tiens à exprimer m'a profonde gratitude à Dr. BENSOUILAH Hamza pour toute la confiance qu'il m'a témoignée, les encouragements, les conseils et l'aide qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de cette période.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

J'adresse également mes chaleureux remerciements et ma gratitude à mes chers parents, Mes frère et sœurs, et mes amis.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'examiner les différents paramètres intervenants lors de l'usinage de l'acier inoxydable martensitique (AISI 420) tels que, la rugosité de surface, l'effort de coupe, l'effort spécifique de coupe et la puissance de coupe. L'usinage est réalisé avec un outil en carbure revêtu (GC2015) suivant un plan d'expérience Taguchi de 16 essais. La modélisation des paramètres technologiques d'usinage (R_a , F_c , K_c et P_c) par l'emploi de la méthodologie de surface de réponse (MSR), l'analyse de variance (ANOVA) nous a permis de savoir la contribution de chaque facteur, les modèles issus de l'MSR ont été utilisés pour tracer les graphiques en 3-D, les résultats ont montré que l'avance est le facteur dominant dans le cas (R_a) et (K_c) avec une contribution de 77.48% et 53.89%, respectivement. Pour (F_c) et (P_c) la profondeur de passe est le facteur le plus significatif avec une contribution de 66.49% et 57.85%, respectivement. L'optimisation par deux méthodes, Taguchi et ACPP, a donné des régimes employables dans le cas mono-objective et multi-objective.

Mots-clés : Tournage, Aciers inoxydables, ANOVA, MSR, Taguchi, ACPP.

Abstract

The objective of this work is to examine the different parameters involved in the machining of martensitic stainless steel (AISI 420) such as, surface roughness, cutting force, specific cutting force and cutting power.

The machining is carried out with a coated carbide tool (GC2015) following a Taguchi test plan of 16 tests. Modelling of machining technology parameters (Ra, Fc, Kc and Pc) using the response surface methodology (MSR), variance analysis (ANOVA) allowed us to know the contribution of each factor, the models from the MSR were used to plot the 3-D charts, the results showed that advance is the dominant factor in the case (Ra) and (Kc) with a contribution of 77.48% and 53.89%, respectively.

For (Fc) and (Pc) the pass depth is the most significant factor with a contribution of 66.49% and 57.85%, respectively.

Optimization by two methods, Taguchi and ACPP, gave workable schemes in the mono-objective and multi-objective case.

Keywords : Turning, Stainless steel, ANOVA, MSR, Taguchi, ACPP.

Index des figures

Chapitre I : Généralités et état de l'art sur les aciers inoxydables

Figure I-1 Mouvements relatifs entre la pièce et l'outil.

Figure I-2 Différentes méthodes d'enlèvement de matière par un outil coupant.

Figure I-3 Les opérations usuelles en tournage.

Figure I-4 Matériaux de coupe.

Figure I-5 Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe.

Figure I-6 Classification des matériaux de coupe.

Figure I-7 Exemple d'usure des outils.

Figure I-8 Profile théorique de la rugosité

Figure I-9 Composantes de l'effort de coupe

Figure I-10 Couche de surface auto-régénérante

Figure I-11 Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale.

Figure I-12 Conductivité thermique des aciers inoxydables.

Figure I-13 Tracé de Ra en (3D) en fonction des paramètres de coupe.

Figure I-14 Tracé des composantes de l'effort de coupe (3D) en fonction des paramètres de coupe.

Figure I-15 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites des composantes de l'effort de coupe.

Figure I-16 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra.

Figure I-17 Evolution d'usure d'outil (VB) en fonction du temps de coupe sous les conditions: Sec, Lubrifié et Quantité Minimum de Lubrifiant (MQL) à $V_c=120$ et 180 m/min.

Figure I-18 Rugosité de surface en fonction du temps de coupe sous conditions:

Figure I-19 Comparaison entre les valeurs expérimentales de Ra avec les deux modèles RMS et ANN, pour $V_c = 150$ m/min avec lubrification.

Figure I-20 changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure non revêtu

Figure I-21 changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure revêtu

Figure I-22 Photographie MEB pour un outil revêtu pour le perçage d'AISI 420 (55 HRC) avec lubrification pour 6 m. Une défaillance catastrophique apparue à 5m de longueur de coupe.

Figure I-23 Influence de la géométrie de l'outil de coupe sur la rugosité de surface :

Figure I-24 Tenue d'outil en wiper pour différentes vitesses et avances de coupe

Figure I-25 Comparaison de Ra expérimentale et théorique obtenue par des plaquettes wiper à des différentes vitesses et avances de coupe.

Figure I-26 Effet de la vitesse de coupe sur l'énergie spécifique de coupe à des différents angles de coupe

Figure I-27 Effet du largeur de coupe sur la composante de l'effort tangentiel à des différents angles de coupe

Figure I-28 Effet du largeur de coupe sur la composante de l'effort axial à des différents angles de coupe

Figure I-29 Configuration expérimentale pour mesurer la force de coupe

Figure I-30 Acquisition des composantes de de la force de coupe.

Figure I-31 Régimes optimaux pour les deux méthodes d'optimisations

Chapitre II : Procédure expérimentale

Figure II-1 Tour parallèle modèle SN 40 C.

Figure II-2 Eprouvettes pour différents essais.

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

Figure II-4 Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015).

Figure II-5 Porte outil utilisé.

Figure II-6 Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

Figure II-7 Capteur d'effort de coupe **KISTLER**.

Figure II-8 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

Figure II-9 Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

Chapitre III : Modélisation par la méthode MSR

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

Figure III-2 Surface de réponse pour R_a

Figure III-3 Valeurs expérimentales et prédites de l'effort de coupe.

Figure III.4 Surface de réponse pour F_c

Figure III-5 Les valeurs expérimentales et prédites de l'effort spécifique.

Figure III-6 Surface de réponse pour K_c

Figure III-7 Les valeurs expérimentales et prédites de la puissance de coupe.

Figure III-8 Surface de réponse pour P_c

Chapitre IV : Optimisation par la méthode Taguchi et ACP

Figure IV-1 Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p pour la rugosité de surface (R_a)

Figure IV-2 Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p pour l'effort de coupe (F_c)

Figure IV-3 Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p pour L'effort de coupe spécifique (K_c)

Figure IV-4 Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p pour la puissance de coupe (P_c)

Figure IV-5 Graphique des effets principaux de l'indice de performance à réponse multiples IPM.

Index des tableaux

Chapitre II : Procédure expérimentale

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

Tableau II.2 Caractéristiques physico-mécaniques de l'acier X20Cr13.

Tableau II.3 Informations relatives à la plaquette de coupe.

Tableau II.4 Caractéristiques de porte plaquette utilisé.

Tableau II.5 Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan Taguchi L₁₆ essais.

Chapitre II : Procédure expérimentale

Tableau III.1 Plan orthogonal de Taguchi L₁₆ pour les différentes réponses.

Tableau III.2 Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

Tableau III.3 Analyse de la variance (ANOVA) pour Fc

Tableau III.4 Analyse de la variance (ANOVA) pour Kc

Tableau III.5 Analyse de la variance (ANOVA) pour Pc

Chapitre IV : Optimisation par la méthode Taguchi et ACP

Tableau IV.1 Signal / Bruit des paramètres de sorties.

Tableau IV.2 Moyenne des ratios S/B de (Ra) pour chaque niveau des facteurs

Tableau IV.3 Moyenne des ratios S/B de (Fc) pour chaque niveau des facteurs.

Tableau IV.4 Moyenne des ratios S/B de (Kc) pour chaque niveau des facteurs

Tableau IV.5 Moyenne des ratios S/B de (Pc) pour chaque niveau des facteurs

Tableau IV.6 Rapport signal sur bruit

Tableau IV.7 Matrice de corrélation R_{nn} :

Tableau IV.8 Composantes principale et l'IPM.

Tableau IV.9 Vecteurs propres de la matrice corrélation R_{nn} :

Tableau IV.10 Valeurs propres de la matrice corrélation R_{nn} :

Tableau IV.11 Moyenne des ratios de l'IPM pour chaque niveau des facteurs

Liste des abréviations

Vc	Vitesse de coupe [m/min]
f	Avance par tour [mm/tr]
ap	Profondeur de passe [mm]
Pc	Puissance [w]
HRC	Dureté Rockwell [HRC]
Fc	Composante de l'effort de coupe dans la direction de coupe [N]
Kc	Effort spécifique tangentiel (N/mm ²)
Ra	Rugosité moyenne arithmétique [μ m]
R²	Coefficient de détermination
RSM	Méthodologie de surface de réponse
ANOVA	Analyse de la variance
Con%	Pourcentage de contribution [%]
ACPP	la méthode d'analyse de composantes principales pondérées

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités et état de l'art sur les aciers inoxydables	
Partie I	
I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur la coupe des métaux	3
I.3 Généralités sur l'usinage	4
I.3.1 Procédé de tournage	5
I.4 Principe du tournage	6
I.4.1 Opérations de base	6
I.5 Matériaux de coupe	7
I.5.1 Introduction	7
I.5.2 Caractéristiques d'un matériau de coupe	8
I.5.3 Classification des matériaux des outils de coupe	8
I.6 Endommagement des outils de coupe	9
I.7 Usure des outils	9
I.8 Rugosité	10
a) Définition	10
b) Critères de rugosité	10
I.9 Efforts de coupe	11
I.10 Aciers inoxydables	13
I.10.1 Introduction	13
I.10.2 Définition	14
I.10.3 Classification des aciers inoxydables	14
a) Aciers martensitiques	14
b) Aciers ferritiques	14
c) Aciers austénitiques	15

d) Aciers inoxydables austéno-ferritiques ou duplex	15
I.10.4 Rôle des éléments d'addition	15
I.10.5 Influence des propriétés physiques	16
a) Effet de la conductivité thermique	16
b) Rôle du coefficient de dilatation	17
c) Influence du coefficient de frottement	17

Partie II

I.11 Etat de l'Art sur les travaux de recherche réalisés dans le domaine du tournage des aciers inoxydables	18
I.12 Conclusion	32

Chapitre II : Procédure expérimentale

II.1 Introduction	33
II.2 Matériels utilisés	33
II.2.1 Machine-outil	33
II.2.2 Matériaux utilisés pour les essais d'usinage	34
II.2.3 Plaquette de coupe	35
II.2.4 Plaquette en carbure revêtu GC2015	36
II.2.5 Porte plaquette	37
II.3 Instruments de mesure utilisée	38
II.3.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	38
II.4 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	40
II.5 Planification des expériences	41
II.5.1 Méthode de planification des expériences	41
II.5.2 Conditions de coupe choisie pour la modélisation	41
II.6 Conclusion	42

Chapitre III : Modélisation par la méthode MSR

III.1 Introduction	43
III.2 Analyse de variance ANOVA	43
III.2.1 Analyse de régression	45

III.2.2 Résultats des expériences par la méthode de surface de réponse pour l'acier inoxydable X20Cr13	46
III.3 Critère de rugosité Ra	47
III.3.1 Analyse de la variance ANOVA	47
III.3.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination	47
III.3.3 Comparaison entre les résultats prévus et expérimentaux	48
III.3.4 Analyse de la surface de réponse 3D	48
III.4 Effort de coupe Fc	50
III.4.1 Analyse de la variance ANOVA	50
III.4.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination	51
III.4.3 Comparaison entre les résultats prévus et expérimentaux	51
III.4.4 Analyse de la surface de réponse 3D	51
III.5 Effort spécifique Kc	53
III.5.1 Analyse de la variance ANOVA	53
III.5.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination	54
III.5.3 Comparaison entre les résultats prévus et expérimentaux	54
III.5.4 Analyse de la surface de réponse 3D	55
III.6 Puissance de coupe Pc	57
III.6.1 Analyse de la variance ANOVA	57
III.6.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination	57
III.6.3 Comparaison entre les résultats prévus et expérimentaux	58
III.6.4 Analyse de la surface de réponse 3D	58
III.7 Conclusion	61
Chapitre IV : Optimisation par la méthode Taguchi et ACPP	
IV.1 Introduction	62
IV.2 Optimisation par la méthode de Taguchi	62
IV.2.1 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs	64
IV.2.1.1 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (Ra)	64

IV.2.1.2 Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (Fc)	65
IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur la pression de coupe spécifique (Kc)	66
IV.3 Optimisation par la méthode d'analyse des composantes principales pondérées (ACPP)	67
IV.3.1 Histoire et applications	68
IV.3.2 Etapes de la méthode d'analyse en composantes principales pondérées (ACPP)	69
IV.3.3 Analyse des effets principaux sur l'IPM	69
IV .4 Conclusion	75
Références Bibliographiques	

Introduction générale

Dans l'industrie moderne, l'objectif est de fabriquer des produits de haute qualité à faible coût avec une productivité maximale en un temps moindre. Le tournage est la méthode la plus courante pour la coupe des métaux et surtout pour la finition des pièces usinées.

En outre, afin de produire avec la qualité désirée et la productivité maximale de l'usinage, les paramètres de coupe doivent être sélectionnés correctement. Dans le processus de tournage, les paramètres tels que : les matériaux de coupe, la géométrie de l'outil et les conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de coupe) ont un impact sur le taux d'enlèvement des matériaux et par la suite la qualité de surface obtenue (rugosités de surface).

La mise en évidence de l'influence du chrome sur la résistance des aciers à la corrosion a fortement placé l'acier inoxydable comme un des matériaux majeurs ; l'automobile, le bâtiment, la décoration, le nautisme, l'électroménager sont autant de débouchés qui contribuent au développement et à la large utilisation des aciers inoxydables

Notre travail consiste à mener une étude expérimentale suivie d'une analyse statistique du procédé de tournage de l'acier inoxydable martensitique (AISI 420) d'une dureté de 45 HRC avec une plaquette en céramique mixte revêtue (CG2015), le but est d'identifier l'influence des paramètres de coupe sur certains paramètres technologiques tels que les critères de rugosité, la composante tangentielle de l'effort de coupe, l'effort spécifique de coupe, la puissance de.

La rédaction de ce mémoire est structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique. En premier lieu on présente des notions sur la coupe des métaux tels que la définition de la coupe des métaux, l'usinabilité, les paramètres technologiques d'usinage ; en deuxième lieu, un état de l'art sur les différents travaux de recherche réalisés en relation avec notre sujet d'étude.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les équipements utilisés et les conditions expérimentales pour mener cette recherche. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec les détails nécessaires pour une étude expérimentale des phénomènes de la coupe.

Dans le troisième chapitre, nous exposons les résultats expérimentaux des essais réalisés pour un plan de Taguchi (L_{16}) et cela dans le but de déterminer les modèles mathématiques des différentes réponses étudiées, ces modèles expriment la relation

entre les paramètres de sortie tels que : la rugosité de surface, effort de coupe, effort spécifique de coupe, puissance de coupe (R_a ; F_c ; K_c ; P_c) et les paramètres d'entrée (V_c , f et a_p).

Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse RSM et l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f , et a_p) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé deux logiciels de statistique appelé «Matlab» et «Minitab-18» Pour le calcul des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse.

Dans le quatrième chapitre, nous appliquons deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objectif, en utilisant la méthode de Taguchi et cela par l'analyse du signal/ bruit pour les paramètres technologiques d'usinage (R_a ; F_c ; K_c ; P_c), et l'optimisation par la méthode d'analyse de composantes principales pondérées (ACPP).

Ainsi, les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs d'optimisation ont été calculées pour chacun des paramètres technologiques d'usinage qui sont : rugosité de surface, effort de coupe, effort spécifique de coupe, puissance de coupe.

Finalement, nous avons terminé notre étude par une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques utilisées.

Chapitre I

Généralités et état de l'art sur les aciers inoxydables

Partie I

I.1 Introduction :

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

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

I.2 Généralités sur la coupe des métaux :

Le mode est en évolution perpétuelle et par conséquent le domaine de la fabrication mécanique n'échappe pas à l'exception.

Les procédés de fabrication par enlèvement de matière par ses nouveaux techniques et techniques d'usinage ont permis de prendre le pas avec les autres domaines de fabrications comme : la déformation à froid, la déformation à chaud, le moulage, l'ajout de matière, etc.

L'enlèvement de matière nécessite l'emploi d'un élément physique permettant d'extraire de la matière d'un volume de base appelé brut (bloc, barre, plaque, ...) dans le but d'obtenir une pièce finie ou semi-finie.

Dans cette catégorie d'opérations plusieurs techniques sont à citer :

- Le tournage,
- Le fraisage,
- La rectification,
- L'électro-érosion,
- La découpe sciage, oxycoupage, plasma, laser, jet d'eau,

L'enlèvement de matière ou usinage par les procédés classiques comme le tournage, le fraisage et la rectification ont recours très souvent à des éléments tranchants (outil de coupe) dont la résistance et la géométrie sont spécifiques et l'interaction entre la pièce et l'outil de coupe en mouvement relatif produit par arrachement du copeau. [1]

I.3 Généralités sur l'usinage :

L'usinage est une famille de procédés de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux (matière), le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil, par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision avec des états de surface de l'ordre du micron (μm).

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe, V_c en (m/min)) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance, f en (mm/tr)), Figure I-1.

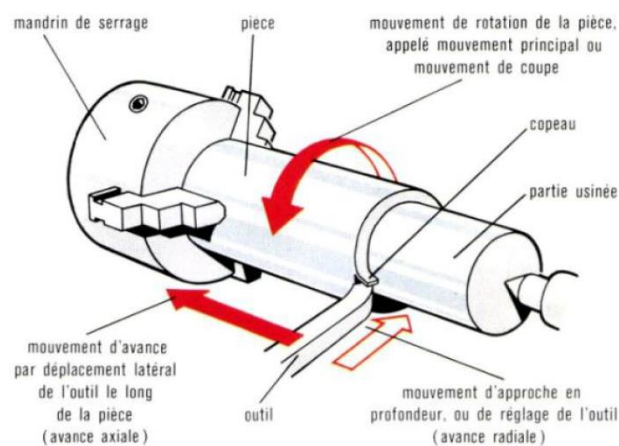


Figure I-1 : Mouvements relatifs entre la pièce et l'outil.

Les techniques d'usinage sont nombreuses, la plupart pouvant être appliquées aux aciers de différentes nuances, nous les diviserons dans les catégories suivantes :

Ces méthodes sont classées en fonction des mécanismes physiques mis en jeu :

- Usinages par des méthodes non traditionnelles ;
- Méthodes thermiques, utilisant : les faisceaux d'électron, le plasma, le laser ;
- Méthodes chimiques, entre autres la dissolution chimique, l'usinage électrochimique ;
- Méthodes mécaniques, à savoir les jets liquides avec abrasifs, les ultrasons.
- Usinages par outils coupants (méthodes traditionnelles)

L'enlèvement de matière par un outil coupant peut être obtenu par diverses méthodes, principalement fonction des caractéristiques géométriques de la pièce à réaliser : tournage, fraisage, filetage, perçage, alésage, taraudage, opérations de décolletage (chariotage, fonçage, tronçonnage, perçage, ... etc.), figure I-2.

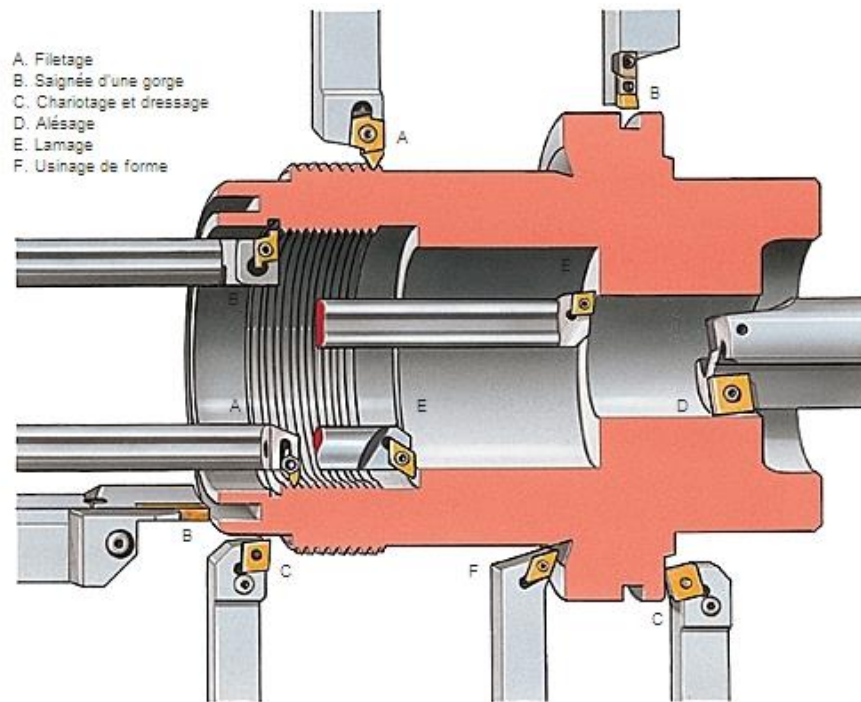


Figure I-2 : Différentes méthodes d'enlèvement de matière par un outil coupant.

Dans notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière par tournage. La productivité, la qualité des surfaces générées, le temps et les coûts de fabrication sont les critères qui décident le choix de procédé de fabrication le plus adéquat.

I.3.1 Procédé de tournage :

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique.

La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, figure I-1.

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes).

Bien que la cinématique du procédé et les outils soient assez simples, ce procédé a fait l'objet d'une grande optimisation à cause de l'importance de ses applications.

Cette optimisation a porté sur les machines à commandes numérique (tours CN), sur les outils (les vitesses de coupe industrielles ayant pratiquement été multipliées par 10 en 50 ans), sur les porte-pièces, sur le chargement/déchargement qui s'est automatisé, et même sur les pièces dont les matériaux peuvent parfois être améliorés sur le plan de l'usinabilité.

Par exemple, une opération de tournage qui prenait 100 min en 1990 avec un Outil en acier était réduite à 1 min en 1980, avec un outil en carbure revêtu.

I.4 Principe du tournage :

I.4.1 Opérations de base :

En tournage, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, plusieurs opérations de base, figure I-3. [2]

- Tournage longitudinal, ou chariotage ;
- Dressage ;
- Tournage de cônes ;
- Contournage.
- Chariotage ;
- Dressage ;

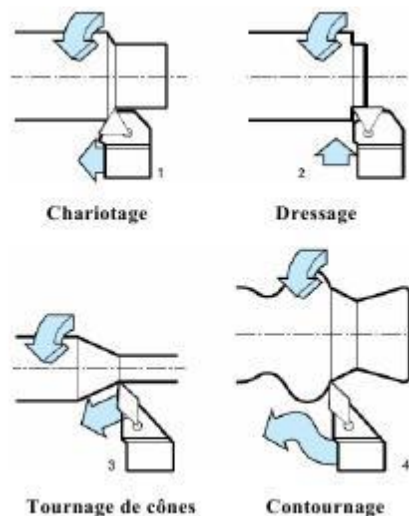


Figure I-3 : Les opérations usuelles en tournage.

I.5 Matériaux de coupe :

I.5.1 Introduction :

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 sous-estimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe, figure I-4.

Pour choisir un outil de coupe convenable, il faut prendre en compte plusieurs facteurs comme :

- La nature de l'opération de coupe (ébauche ou finition, précision demandée, coupe continue ou intermittente),
- La forme et la matière de la pièce (structure, dureté, résistance, état de couche superficielle, affinité chimique, inclusions),
- Le type de machine-outil (puissance, rigidité, capacité),
- Les conditions de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe),
- L'état de surface demandé (rugosité, contraintes résiduelles) et les coûts associés à cette opération.

Étant donné le nombre de facteurs à considérer et la difficulté de les définir précisément, le choix d'un outil de coupe devient un problème très complexe [2, 3].

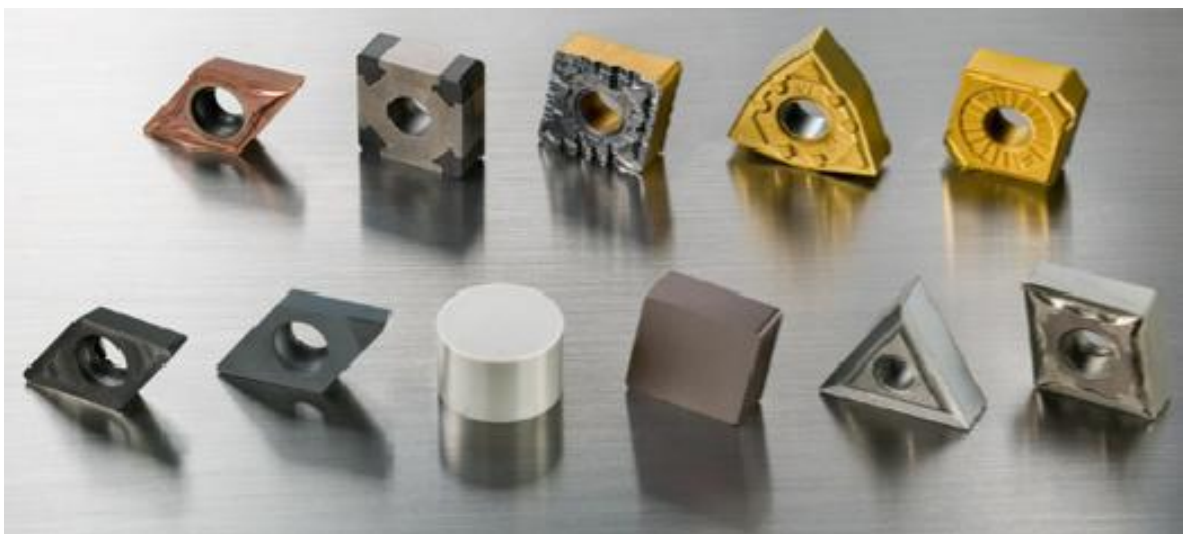


Figure I-4 : Matériaux de coupe.

I.5.2 Caractéristiques d'un matériau de coupe :

Les caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe peuvent être résumées comme suit [2]:

- Posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, même à une température élevée, figure I-5,
- Posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture,
- Être chimiquement inerte vis à vis du matériau usiné,
- Être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution,
- Offrir une bonne conductibilité thermique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

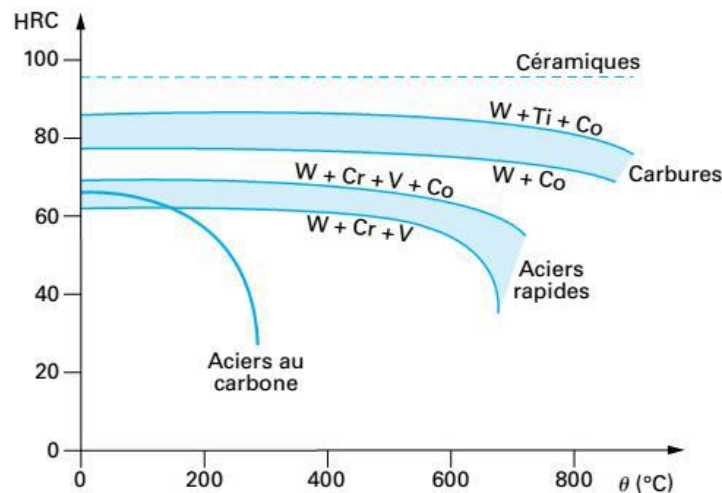


Figure I-5 : Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe [4].

I.5.3 Classification des matériaux des outils de coupe :

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure, figure I-6 ; ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes :

- Dureté : résistance à l'usure en dépouille et à la déformation ;
- Ténacité : résistance à la rupture ;
- Neutralité chimique : absence de réaction chimique avec la matière à usiner ;
- Stabilité chimique : résistance à l'oxydation et à la diffusion ;
- Résistance aux variations thermiques brusques [5].

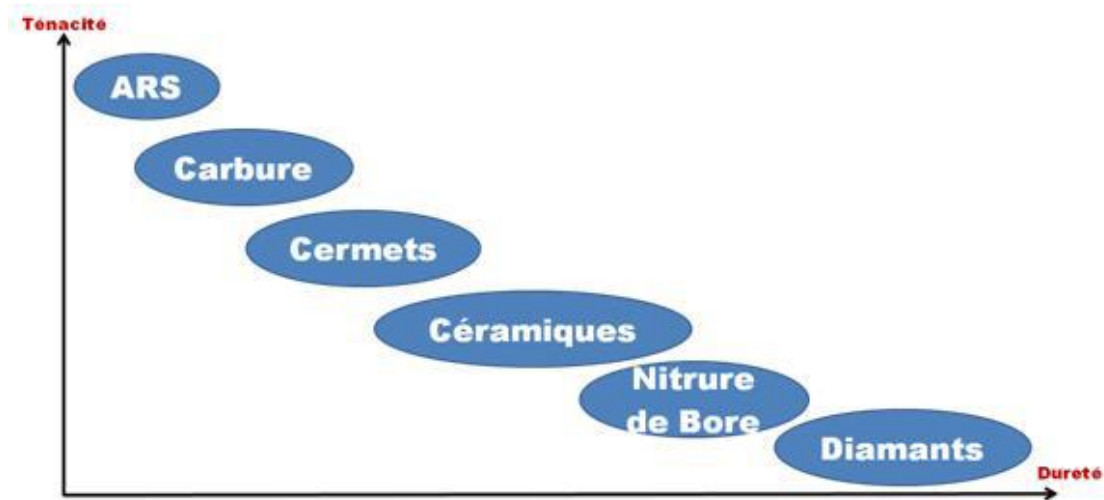


Figure I-6 : Classification des matériaux de coupe.

Les matériaux de coupe utilisés en tournage peuvent être classés en plusieurs groupes : les aciers rapides, les aciers rapides revêtus, les aciers rapides frittés, les carbures métalliques, les carbures micro-grains, les cermets, les céramiques, le Nitruure de Bore Cubique (CBN) et les diamants [2, 6, 7].

I.6 Endommagement des outils de coupe :

Les outils de coupe ont une géométrie généralement complexe qui résulte assez souvent de mises au point d'atelier purement empiriques, quelquefois d'études plus analytiques à partir de divers critères (résistance à l'endommagement ou qualité de la surface générée), rarement d'une véritable optimisation qui nécessiterait une modélisation de l'écoulement du ou des copeaux. [8]

I.6.1 Usure des outils :

L'usure est une caractéristique utilisée souvent pour décrire l'état d'un système mécanique, elle est une conséquence due au frottement entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre, figure I-7.

Les deux principaux mécanismes de l'usure sont l'adhésion et l'abrasion. Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurales par une augmentation des jeux fonctionnels (arrête rapportée), [9].

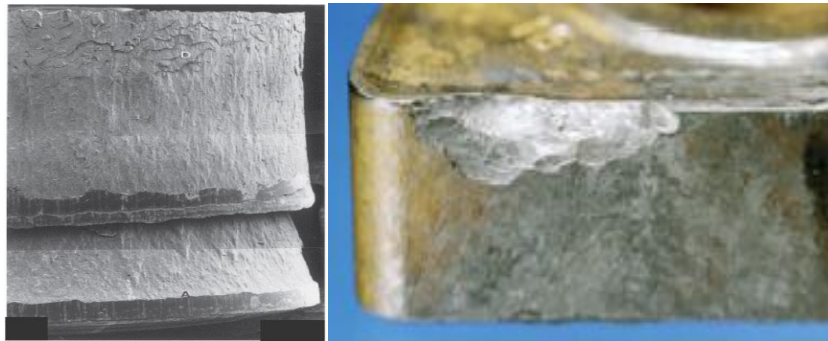


Figure I-7 : Exemple d'usure des outils.

I.7 Rugosité :

a) Définition :

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide.

b) Critères de rugosité :

- **Hauteur des irrégularités sur dix points R_z :**

Moyenne des valeurs absolues des hauteurs, des cinq saillies du profil les plus hautes et des profondeurs des cinq creux du profil les plus bas, à l'intérieur de la longueur de base.

$$R_z = \frac{1}{5} [(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})]$$

- **Hauteur maximale du profil R_t :**

Distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux à l'intérieur de la longueur de base.

- **Écart moyen arithmétique du profil R_a :**

Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil dans les limites de la longueur de base.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_A^B |y_i|$$

à rugosité définissent les caractéristiques micro-géométriques de la surface.

Les trois critères de rugosité sont définis par comme suit (**Figure I-8**):

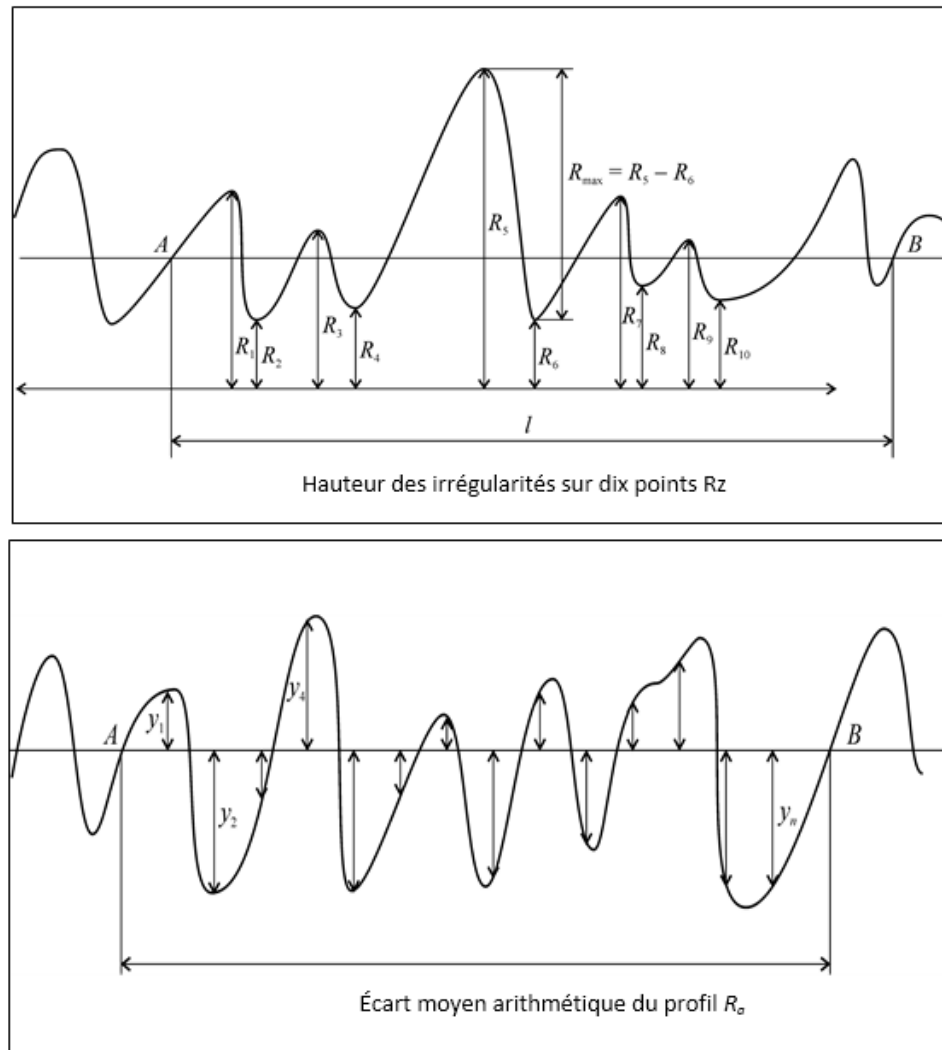


Figure I-8: Profile théorique de la rugosité

I.8 Efforts de coupe :

Pendant le processus de coupe la pièce agit sur l'outil avec certaine force dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe figure I-9. La résultante de coupe ($F_{rés}$) est la somme de trois composantes suivantes :

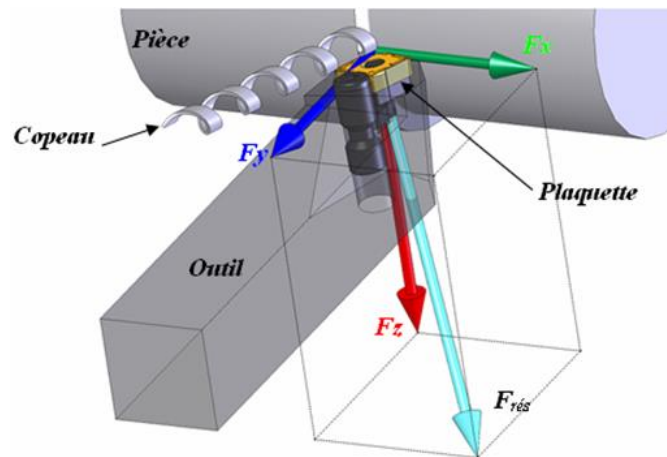


Figure I-9 : Composantes de l'effort de coupe

- **Fz** ou **Ft** : composante dans le sens de vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. C'est la composante qui a la plus grande valeur absolue, dans ce qui suit on lui donne la notation **Fc**.
- **Fx** ou **Fa** : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- **Fy** ou **Fr** : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale.

En plus des informations concernant les phénomènes régissant le processus de coupe comme l'usure des outils et la rugosité de surface, les efforts de coupe sont également un bon indicateur de l'usinabilité.

La connaissance des efforts nous renseigne sur les déformations plastiques et la puissance mécanique fournie nécessaire à l'enlèvement de la matière, de plus, elle permet de délimiter la zone de coupe en choisissant des valeurs des efforts acceptables pour l'outil.

La plage de fonctionnement autorisée est établie essentiellement en considérant l'évolution de la l'effort spécifique de coupe K_c (tournage) en fonction de la variation de la vitesse de coupe, pour des conditions d'avance et de profondeur de passe correspondant à celles du domaine de validité de l'outil coupant.

L'effort spécifique de coupe K_c (exprimé en N/mm^2) peut être calculée grâce par exemple à des mesures de puissance ou d'efforts de coupe en cours d'usinage en utilisant l'équation **I.1**

$$Kc = \frac{Fc}{S} = \frac{Fc}{f.ap} \quad \mathbf{I.1}$$

La puissance de coupe (P_c (Watt)) est calculée sur la base de l'acquisition de F_c , comme suit :

$$P_c = \frac{Fc \times Vc}{60} \quad \mathbf{I.2}$$

F_c Composante de l'effort de coupe dans la direction de coupe [N]

K_c L'effort spécifique de coupe (N /mm²)

P_c puissance de coupe [W]

S est la surface du plan de coupe (mm²).

- **Intérêt de mesure des efforts de coupe :**

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe (P_c). Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe.

La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage.

I.9 Aciers inoxydables :

I.9.1 Introduction :

L'acier inoxydable (inox), est un matériau relativement récent dont l'usage ne s'est développé qu'à partir des années 1920. Le principe d'allier fer et chrome remonte à 1821, mais ce n'est qu'en 1904 que l'on s'aperçoit que la présence de carbone inhibe la résistance à la corrosion.

L'inox, jouent un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agroalimentaire, chimie, transports, médecine, chirurgie, etc.

Ce sont des aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome (couche passive) qui confère à ces aciers leur inoxydabilité, figure **I-10**.

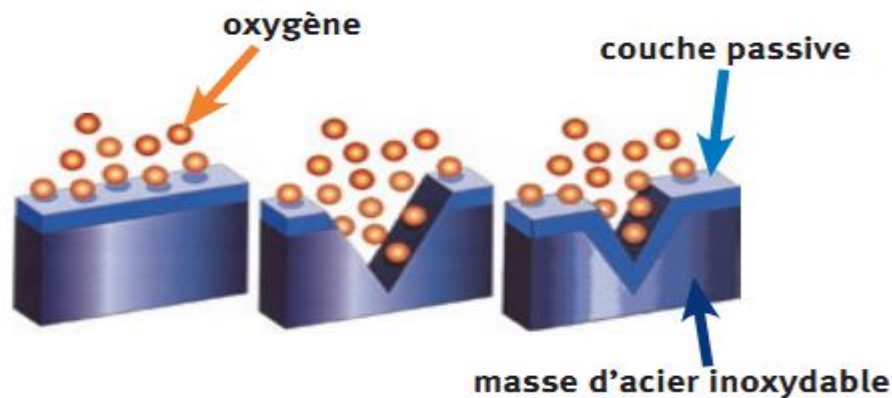


Figure I-10 : Couche de surface auto-régénérante

I.9.2 Définition :

Un acier inoxydable est un acier fortement allié dont la teneur en chrome doit être supérieure à 10% ce qui lui assure une résistance aux agents oxydants (résistance à la corrosion) [1].

I.9.3 Classification des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables peuvent être classés en quatre familles :

- **Aciers martensitiques :**

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

- **Aciers ferritiques :**

Ils ne prennent pas la trempe, on trouve dans cette catégorie des aciers réfractaires à haute teneur en chrome (jusqu'à 27 %), particulièrement intéressants en présence de soufre. Les aciers ferritiques sont parfois utilisés comme barrière de résistance à la corrosion (tôles plaquées, tôle revêtues, protégées (dites « claddées », de « cladding »)) des parois d'équipements sous pression en acier utilisés dans les industries pétrochimique et chimique. Ces aciers sont souvent utilisés en lieu et place des aciers austénitiques pour la réalisation d'ustensiles de cuisine bon marché et de qualité médiocre (plats et couteaux par exemple).

- **Aciers austénitiques :**

Ce sont de loin les plus nombreux, en raison de leur résistance chimique très élevée, de leur ductilité comparable à celle du cuivre, et leurs caractéristiques mécaniques élevées. Les teneurs en éléments d'addition sont d'environ 18 % de chrome et 10 % de nickel. La teneur en carbone est très basse et leur stabilité peut être améliorée par des éléments tels que le titane ou le niobium. De par leur excellente ductilité, ces aciers ont aussi un domaine d'utilisation aux basses températures (jusqu'à moins 200 °C) et sont en compétition avec les alliages légers et l'acier à 9 % de nickel pour la réalisation d'équipements destinés à la cryogénie [1].

- **Aciers inoxydables austéno-ferritiques ou duplex :**

Les aciers duplex présentent des parts presque égales de ferrite et d'austénites. Cette fusion permet d'avoir des métaux dont les caractéristiques mécaniques sont supérieures à celles des aciers inoxydables austénitiques ou ferritiques. Les aciers duplex ont un allongement à la rupture qui avoisine les 40 %. On les utilise généralement dans des environnements où la température est inférieure à 300 °C.

I.9.4 Rôle des éléments d'addition :

C'est au **chrome** et à lui seul que l'on doit la résistance des aciers inoxydables aux agents oxydants.

Le **nickel** favorise la formation des structures homogènes de type austénitique, intéressantes pour éviter la corrosion mais à éviter soigneusement dans le domaine du frottement.

Le **molybdène** et le **cuivre** améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation.

Le **tungstène** améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

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

I.9.5 Influence des propriétés physiques :

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

a) Effet de la conductivité thermique :

Nous pouvons retenir que les sources de chaleur lors de la formation du copeau sont localisées dans les zones de cisaillement primaire et cisaillement secondaire (Figure I-11), Une conductivité thermique élevée évite un échauffement trop important dans la zone de coupe grâce à une bonne évacuation de la chaleur produite à l'interface outil-copeau dans toute l'épaisseur du copeau.

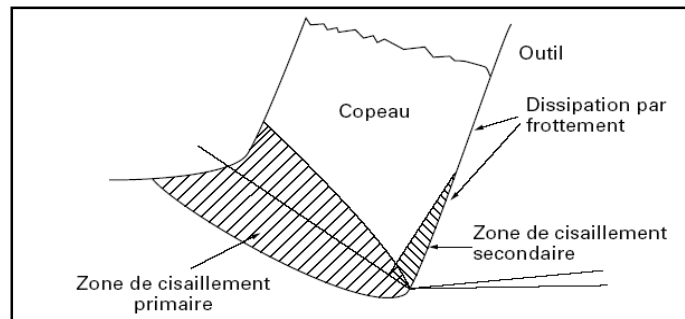


Figure I-11 : Distribution des sources de chaleur en coupe orthogonale.

Il s'avère que les aciers inoxydables présentent des conductivités thermiques beaucoup plus faibles que les aciers peu alliés (1.5 à 3 fois plus faibles). Les austénitiques sont de loin les plus défavorisés (figure I-12), même si une augmentation de la température diminue leur handicap.

Les martensitiques sont les moins pénalisés, mais leur conductivité reste tout de même environ 1.5 fois plus faibles que les aciers peu alliés. Cette mauvaise conductivité a alors pour conséquences :

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

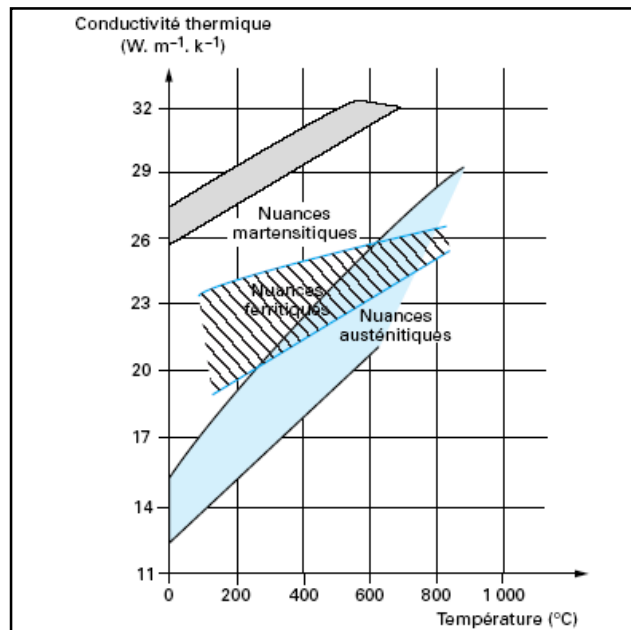


Figure I-12 : Conductivité thermique des aciers inoxydables. [1]

b) Rôle du coefficient de dilatation :

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

c) Influence du coefficient de frottement :

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

En conséquence, les aciers inoxydables, et tout particulièrement les austénitiques, ont des propriétés physiques qui les pénalisent lors de l'usinage. Ceci rend l'usinage des aciers inoxydables très particulier et conduit à des solutions bien spécifiques, que ce soit dans l'amélioration des matériaux ou dans le choix des outils.[1].

Partie II

I.10 Etat de l'Art sur les travaux de recherche réalisés dans le domaine du tournage des aciers inoxydables :

Dans cette partie, on cite quelques travaux théoriques et expérimentaux sur le tournage des aciers inoxydables, le but de cette synthèse est de focaliser notre étude sur des points qui n'ont pas été étudiés auparavant, c'est-à-dire, de ramener un apport scientifique plus au moins signifiant, et de s'intégrer dans le domaine du tournage par la voie des résultats publiés par des chercheurs bien connus.

Plusieurs chercheurs ont adopté l'utilisation de la planification expérimentale dans le but de modéliser et d'optimiser par la suite les paramètres technologiques.

Plusieurs études ont été entreprises pour étudier l'optimisation des conditions de coupe et l'usinage.

Les résultats obtenus par **Bouzid, L. et al [10]**, peuvent être résumés dans les points suivants :

- L'analyse statistique par ANOVA, a montré que f a une importante contribution (81.69%) sur la qualité de surface (R_a), dans la deuxième position viennent les paramètres (V_c^2) and (f^2) avec (6.071%) et (6.071%), respectivement, par contre la profondeur de coupe a une influence minimale comparée à l'avance de coupe, la figure **I-13** présente les tracés de (R_a) en trois dimensions.

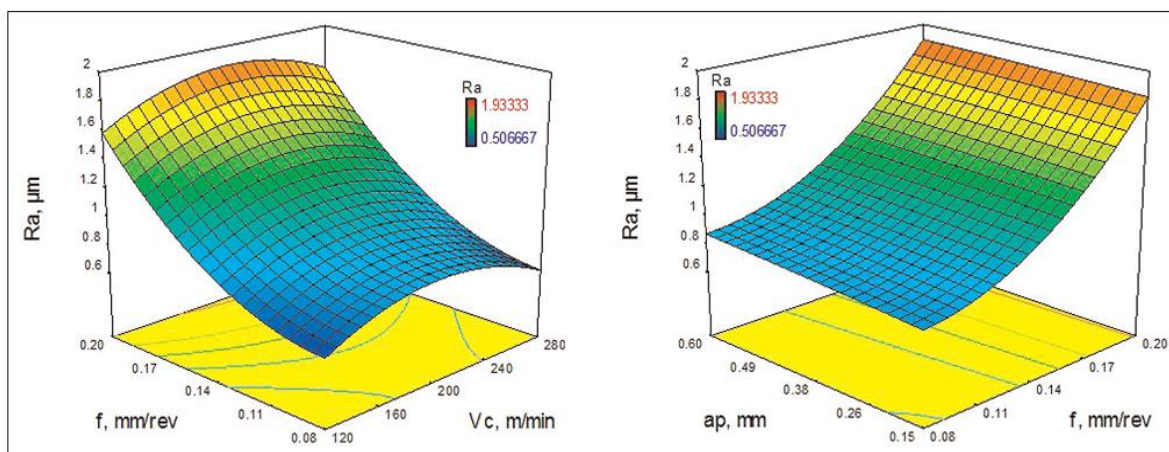


Figure I-13 : Tracé de R_a en (3D) en fonction des paramètres de coupe.

- L'analyse par ANOVA des valeurs expérimentales a confirmé que la profondeur de coupe (a_p) a une influence considérable sur la force de coupe avec les pourcentages de contribution pour les trois composantes (F_x : 86.6%, F_y : 58.5% and F_z : 65.2%), par contre l'avance de coupe (f) a une influence moins importante sur l'effort de coupe (4.92%, 29.57% and 24.60%), par contre l'effort de coupe augmente avec l'augmentation simultanée des deux paramètres (f) et (a_p). A des grandes vitesses on obtient des petites valeurs de l'effort de coupe, la figure I-14 présente les tracés des composantes de la force d'usinage en trois dimensions.

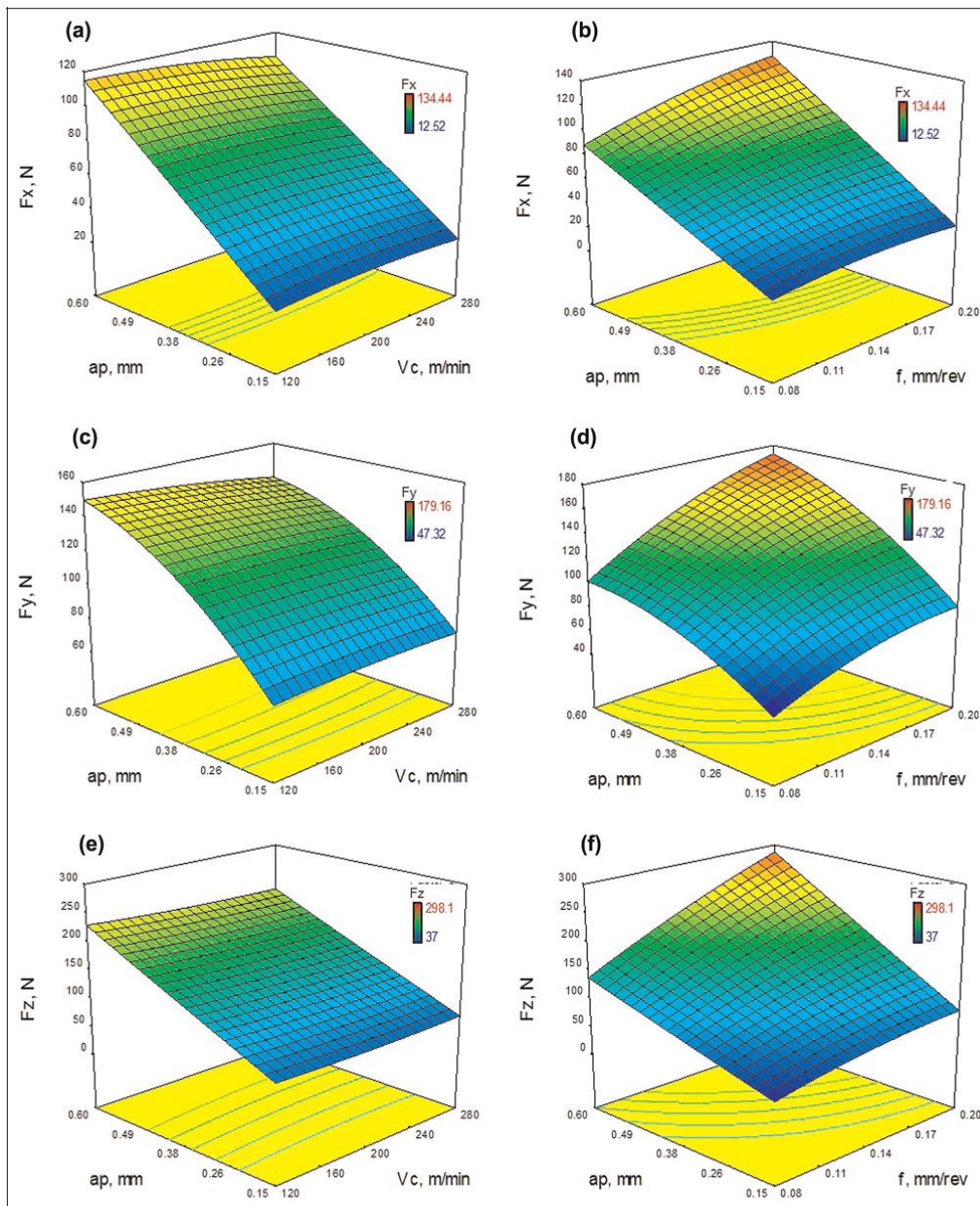


Figure I-14 : Tracé des composantes de l'effort de coupe (3D) en fonction des paramètres de coupe.

- La diminution en effort de coupe est due probablement à l'augmentation en température dans le plan de cisaillement, résultant d'une réduction de la résistance au cisaillement du matériau.
- Pour obtenir une bonne qualité de surface il faut adopter, des basses vitesses, avance et profondeur de coupe
- La Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites des composantes de l'effort de coupe et de la rugosité de surface montrent une bonne concordance, figure I-15 et I-16.

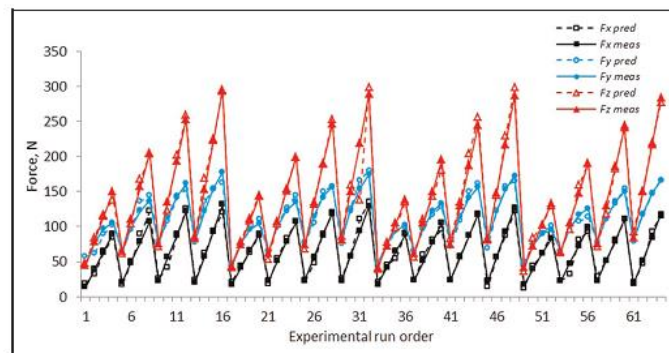


Figure I-15 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites des composantes de l'effort de coupe.

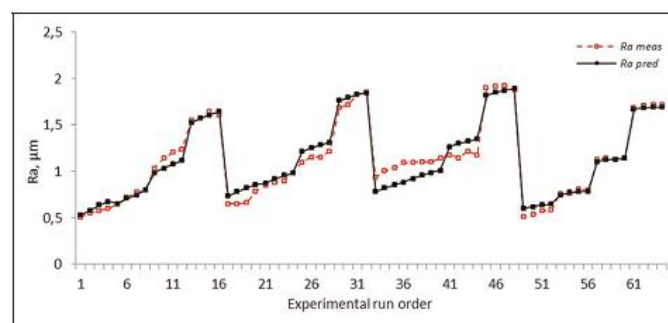


Figure I-16 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra.

Bruni et al [11] ont étudié largement l'effet de lubrification sur la rugosité de surface (R_a) et l'usure de l'outil (VB) dans les opérations de fraisage.

Le fraisage de l'acier inoxydable AISI 420 a été réalisé sous différentes vitesses de coupes (V_c) et des conditions de lubrification (sec, lubrifié et Quantité minimum de lubrification (MQL)) par des plaquettes en carbure revêtue en (TiN et TiAlN)

Les auteurs ont pris deux types de modélisation qui ont, modélisation par RMS et ANN, ils ont trouvé que :

- L'emploi d'un lubrifiant lors de l'usinage améliore la qualité de surface et diminue l'usure de l'outil, figure **I-17** et **I-18**.
- Les deux modèles élaborés, RMS et ANN, permettent une bonne prédiction du comportement à la fois de R_a et VB , figure **I-19**.

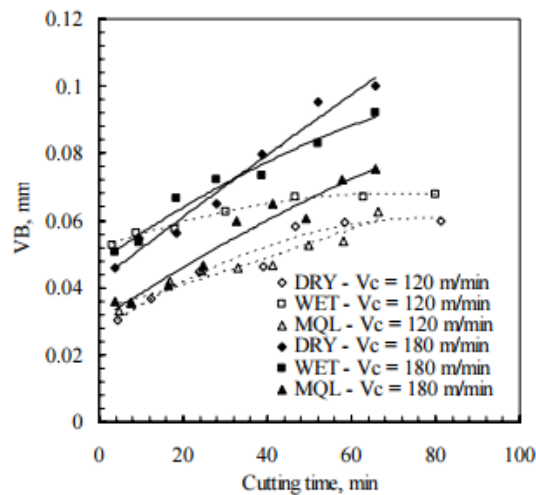
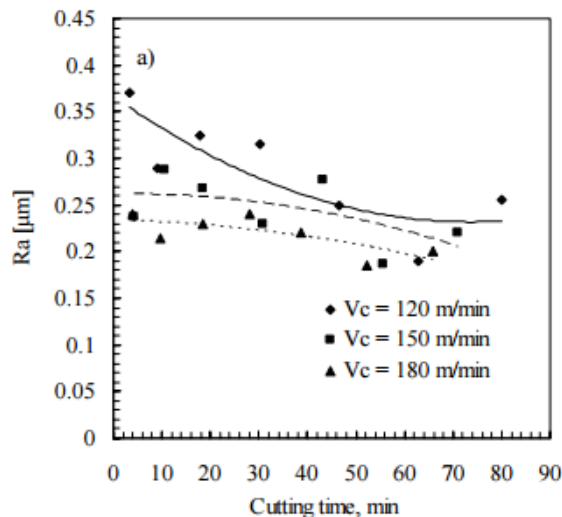


Figure I-17 : Evolution d'usure d'outil (VB) en fonction du temps de coupe sous les conditions : Sec, Lubrifié et Quantité Minimum de Lubrifiant (MQL) à $V_c=120$ et 180 m/min.



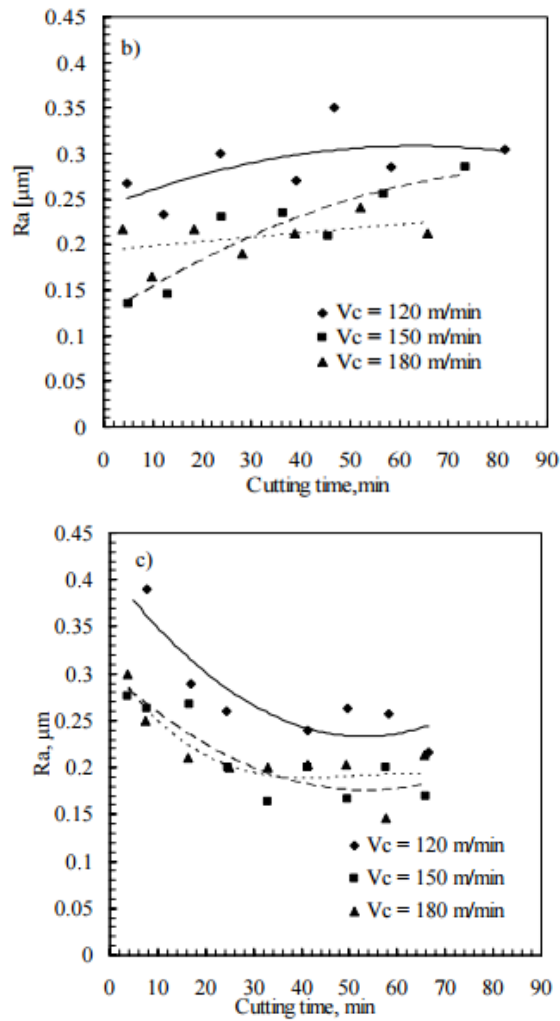


Figure I-18 : Rugosité de surface en fonction du temps de coupe sous conditions : a) lubrifié, b) sec et c) quantité minimum de lubrifiant (MQL) à des $V_c = 120, 150$ et 180 m/min.

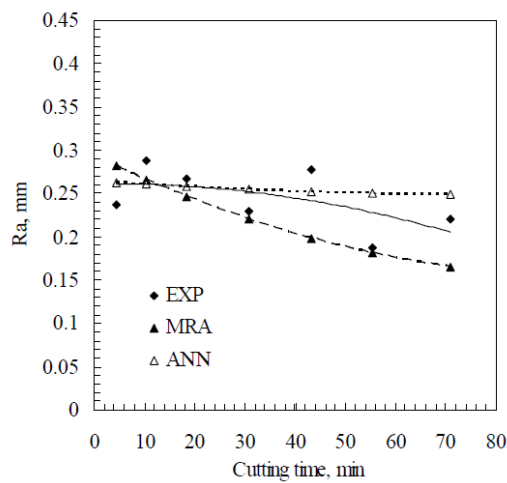


Figure I.19 : Comparaison entre les valeurs expérimentales de R_a avec les deux modèles RMS et ANN, pour $V_c = 150$ m/min avec lubrification.

Liew et al [12] ont étudié la rugosité de surface et l'usure d'outils en carbure avec et sans revêtement *TiAlN* PVD, dépôt physique en phase vapeur, pendant l'opération de perçage du STAVAX (AISI 420 modifié) pour des faibles vitesses. Les auteurs ont utilisé deux vitesses de coupe 25 à 50 m/min et plusieurs dureté du matériau allant de 35 à 55 HRC, avec lubrification.

Les auteurs ont abouti aux conclusions suivantes :

- Aucun changement significatif de l'usure de l'outil a été observé lorsque la vitesse de coupe augmente de 25 à 50 m / min.
 - Il a été constaté que l'augmentation de la dureté de la pièce de 35 à 55 HRC a provoqué une augmentation remarquable de l'usure en dépouille et une modification du mécanisme d'usure dominant (usure en cratère, en dépouille, fissure et fracture), figure **I-20 et I-21**.
 - Usiner avec une dureté de 35 HRC et 40, l'outil revêtu est principalement soumis à une usure par abrasion pendant toute la durée de l'essai
 - L'usinage de l'AISI 420 à dureté de 35 à 40 HRC provoque une usure par abrasion durant l'essai, dans le cas d'un outil revêtu.
- Pendant l'usinage à une dureté de 55 HRC par un outil revêtu l'AISI 420 passe par trois principales étapes :
- (I) usure initial par abrasion suivi par (II) détérioration par fissure, (III) la formation des surfaces de fissure individuelle qui vont se fusionner l'une à l'autre pour former une grande surface de rupture.
- L'outil revêtu a montré une résistance de rupture beaucoup plus élevée que l'outil non revêtu.
 - La résistance élevée de rupture montrée par l'outil revêtu pourrait être expliquée par l'efficacité du revêtement qui empêche la formation des fissures.
 - Les résultats expérimentaux prouvent aussi que le revêtement empêche la détérioration de l'arrêt de l'outil par phénomène d'écaillage et augmente la résistance à l'usure par abrasion.
 - L'utilisation du liquide lubrifiant empêchant la rupture catastrophique de l'outil

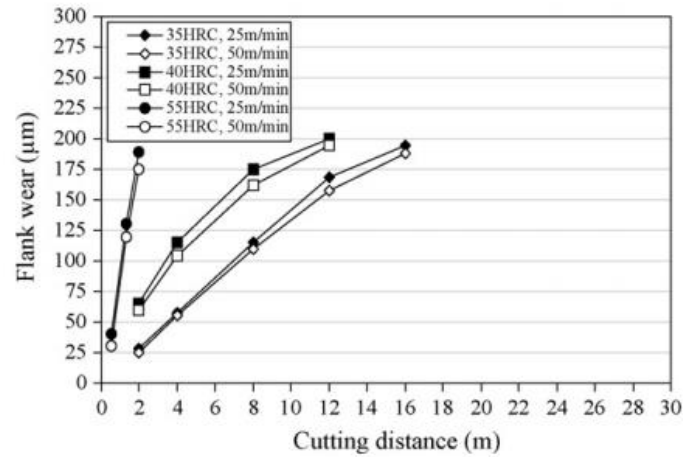


Figure I-20 : changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure non revêtu

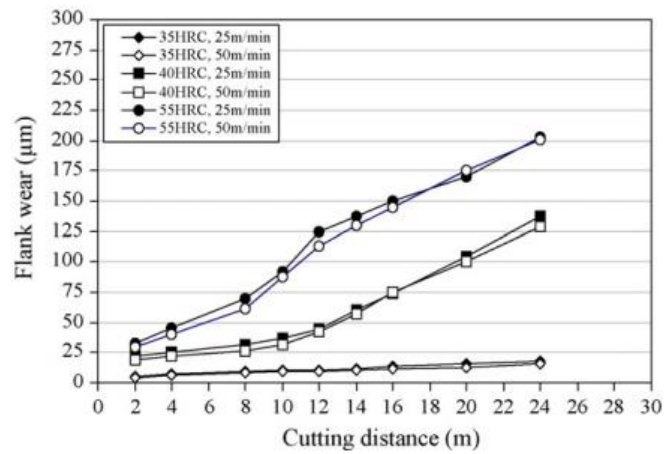


Figure I-21 : changement d'usure en dépouille de l'outil pour carbure revêtu

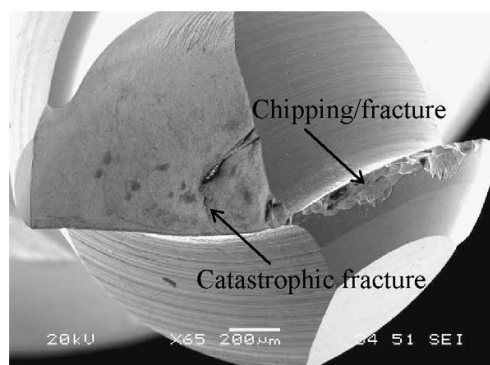


Figure I-22 : Photographie MEB pour un outil revêtu pour le perçage d'AISI 420 (55 HRC) avec lubrification pour 6 m. Une défaillance catastrophique apparue à 5m de longueur de coupe.

Noordin et autres [13] ont conduit une étude sur les performances de la géométrie wiper des plaquettes en carbure revêtue utilisées dans le tournage avec la prise en considération d'un critère d'arrêt sur l'usure admissible de 0.14 mm ou bien un état de surface qui ne doit pas dépasser 1.6 μm , figure **I-23**

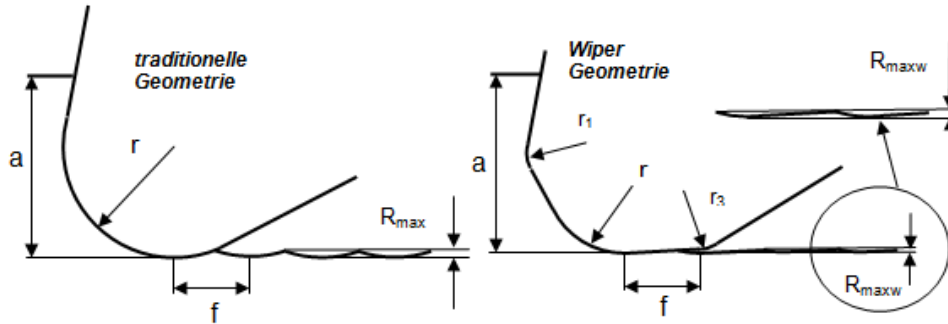


Figure I-23 : Influence de la géométrie de l'outil de coupe sur la rugosité de surface :
a) géométrie conventionnelle, b) géométrie wiper

L'acier inoxydable *AISI 420* d'une dureté de 47 – 48 HRC a été usiné à des diverses vitesses de coupe et d'avance, les résultats ont prouvé que la durée de vie maximum d'outil est de 18 minutes, elle est sensiblement affectée par l'augmentation des vitesses et des avances, c.-à-d., pour augmenter la teneur de l'outil on doit usiner à des basses vitesses et avances, figure **I-24**.

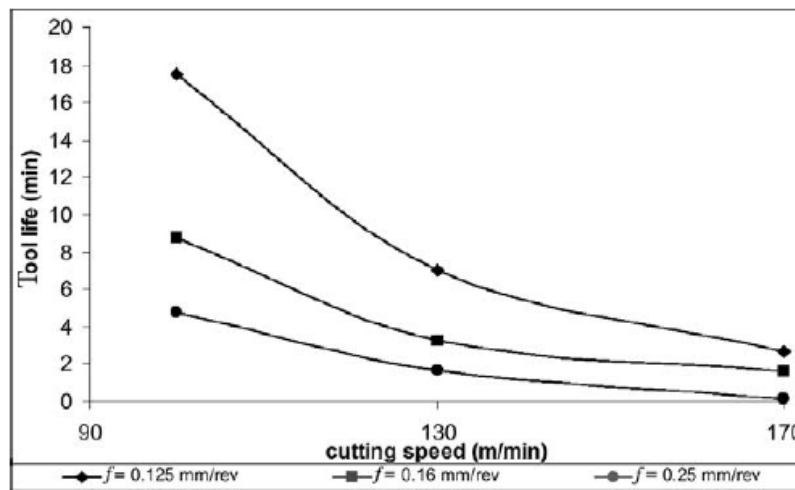


Figure I-24 : Tenue d'outil en wiper pour différentes vitesses et avances de coupe

L'emploi d'un outil en carbure revêtu avec une géométrie wiper a comme conséquence une bonne qualité de surface comparés aux outils conventionnels, les résultats obtenus expérimentalement sont proches à la réalité si on les compare avec ceux obtenus théoriquement par le modèle de Armarego and Brown présenté en 1969, figure I-25.

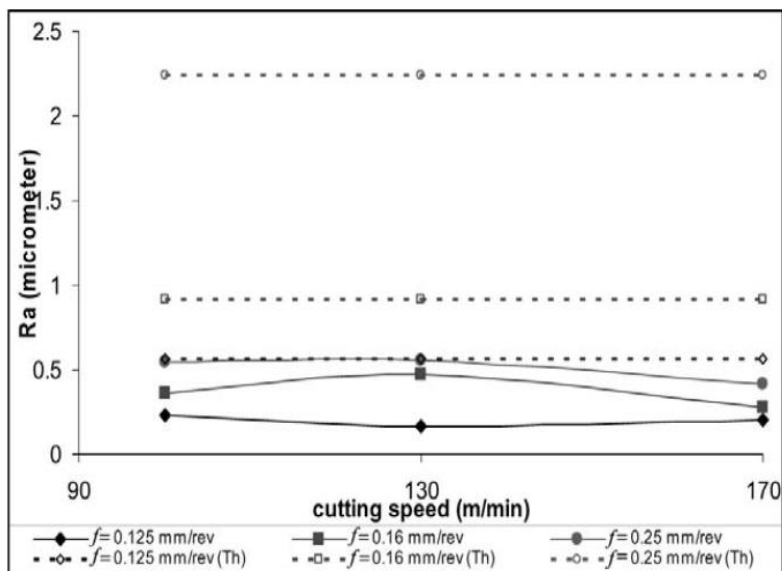


Figure I-25 : Comparaison de Ra expérimentale et théorique obtenue par des plaquettes wiper à des différentes vitesses et avances de coupe.

El-Tamimi al. [14] ont étudié les caractéristiques d'usinage des matériaux à haute résistance en utilisant des outils de coupe en carbure de type *P10* à trois angles de coupe (-6, 0, +6) et à différentes conditions de coupe.

Des essais d'usinage ont été effectués en utilisant la coupe orthogonale pour étudier les caractéristiques d'usinage de l'acier inoxydable à haute résistance *AISI 420* dans différents conditions de coupe et angles d'attaque d'outil.

Cette évaluation est réalisée en étudiant l'effet des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, et la géométrie d'outil) sur les paramètres de sorties qui sont : les efforts de coupe, la pression spécifique de coupe, l'angle de cisaillement, coefficient de frottement, contrainte de cisaillement et la déformation en cisaillement.

Des équations empiriques et des corrélations de comportement de chacune des réponses ont été étudiées en fonction des variables indépendants.

Les résultats trouvés par les auteurs montrent, quand la vitesse de coupe atteint une valeur de 60m/min, les composantes de l'effort de coupe et la pression spécifique de coupe augmentent pour atteindre des valeurs critiques maximum.

D'autre part l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à 100m/min réduit les composantes de l'effort de coupe et la pression spécifique de coupe graduellement. Un accroissement ultérieur de vitesse de coupe (au-dessus de 100m/min) garde la pression spécifique de coupe et les composantes de l'effort de coupe presque constante, figure I-26.

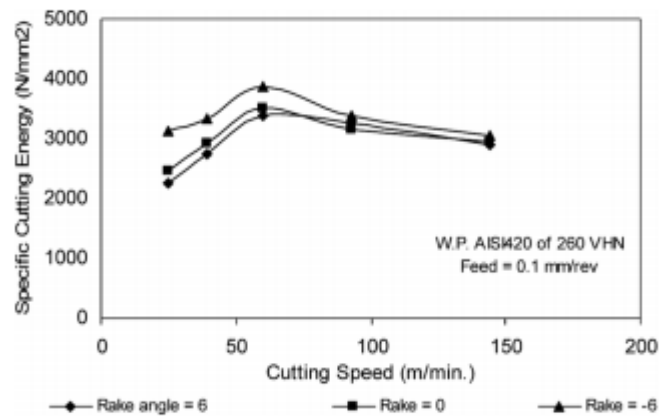


Figure I-26 : Effet de la vitesse de coupe sur l'énergie spécifique de coupe à des différents angles de coupe

Il est clair également que les composantes de l'effort de coupe (tangentielle et axiale) diminuent à mesure que la valeur de l'angle d'attaque augmente, figure II-27 et II-28.

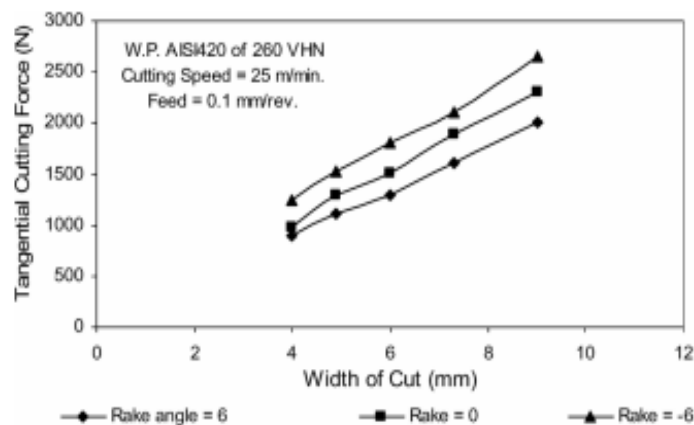


Figure I-27 : Effet du largeur de coupe sur la composante de l'effort tangentielle à des différents angles de coupe

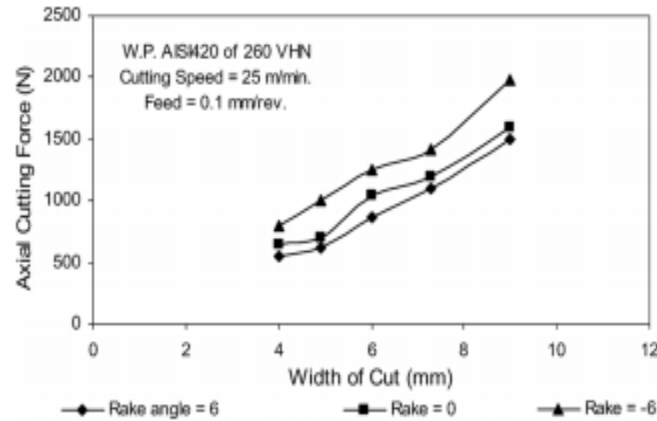


Figure I-28 : Effet du largeur de coupe sur la composante de l'effort axial à des différents angles de coupe

Berkani et al [15], a étudié l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 pour modéliser et optimiser les paramètres technologiques qui sont : la force de coupe (F_c), de la puissance de coupe (P_c), de la force de coupe spécifique (K_c) et de la rugosité de surface (R_a).

La machine utilisée dans les travaux en cours est le tour TOS TRENCIN; modèle SN40C, son étudié est basé sur un plan d'expérience complet L_{16} afin d'obtenir des équations empiriques caractérisant l'usinabilité du matériau en fonction des paramètres de coupe telles que la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p), ces paramètres ont été mis en relation avec les variables technologiques de sortie d'usinage (R_a , F_c , K_c et P_c).

Le montage technologique employé par les autres montrant le processus de coupe (éprouvette – outil de coupe) est présenté sur la figure **I-29**,

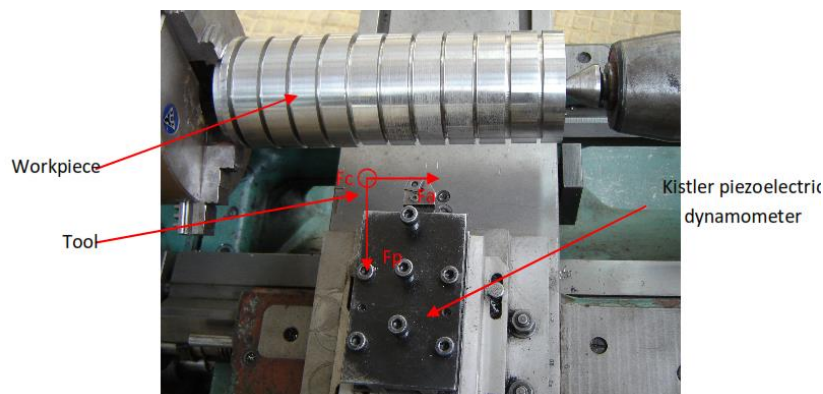


Figure I.29 Configuration expérimentale pour mesurer la force de coupe

Les auteurs ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (MSR) pour la modélisation et l'analyse des paramètres d'usinage lors du tournage pour analyser les performances d'usinabilité, et déterminer les pourcentage de contribution de chaque paramètres par l'analyse de variance (ANOVA) en termes de rugosité de surface (R_a) et de force de coupe (F_c), figure I-30, et d'en déduire la puissance de coupe (P_c) et la force de coupe spécifique (K_c) à partir des équations mathématiques.

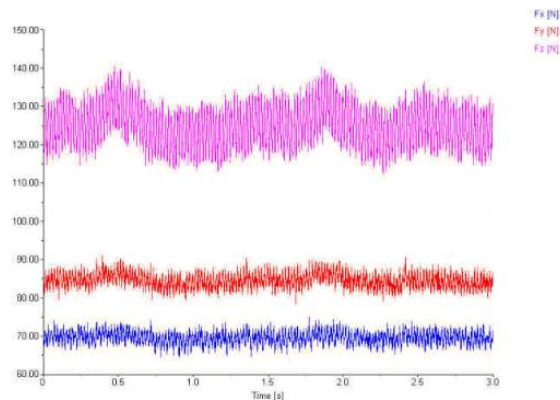


Figure I-30 : Acquisition des composantes de de la force de coupe.

Les conclusions trouvées par les auteurs sont comme suit :

- L'avance (f) est le facteur le plus significatif affectant la rugosité de surface avec une contribution de 71,04%, suivie par de la profondeur de coupe avec 2,17% et une contribution de 0,97% pour la vitesse de coupe.
- La force de coupe (F_c) est fortement affectée par la profondeur de coupe. Sa contribution était de 60,74%, suivie par l'avance (f) avec contribution de 24,95%. La vitesse de coupe à contribution de 12,34%, ils ont remarqué aussi que la force de coupe augmente initialement avec l'augmentation de la profondeur de coupe et de l'avance simultanément.
- La vitesse de coupe a la plus forte influence sur la force de coupe spécifique (K_c), avec une contribution de 41,43% suivie par l'avance 28,77% et d'une contribution de 10,62% pour la profondeur de coupe. À des vitesses de coupe élevées et des petites avances, la force de coupe (F_c) prend des valeurs minimales, cette dernière diminue la force de coupe spécifique.
- L'analyse montre que la profondeur de coupe a un effet significatif sur la consommation énergétique (P_c) avec une contribution de 67,11% suivie par l'avance avec un pourcentage de 14,23% et la vitesse de coupe, 9,91%.

- L'optimisation par la fonction désirabilité des modèles montre que la combinaison optimale des paramètres d'usinage est ($V_c = 104,54$ m / min, $f = 0,080$ mm / tr et $a_p = 0,295$ mm) avec des valeurs estimées de ($R_a = 0,57$ μ m, $F_c = 69,36$ N, $K_c = 3267,20$ MPa et $P_c = 95,13$ watt).
- Les essais de confirmation indiquent que les erreurs entre les modèles théoriques et expérimentaux pour la rugosité de surface R_a et la force de coupe F_c ont des valeurs comprises entre 5,81% et 8,57%, et de 0,16% jusqu'à 11,02%, respectivement.

Bouزيد et al [16], a étudié l'optimisation des paramètres de tournage pour l'acier inoxydable X20 Cr13 afin de minimiser la rugosité de surface (R_a) et de maximiser simultanément le taux d'enlèvement de matière (MRR).

Dans ce travail, les étapes d'optimisation par la méthode Grey sont :

Une recherche statistique des résultats expérimentaux basés sur l'ANOVA pour quantifier les effets des paramètres de coupe sur la (R_a) et (MRR) ;

Modélisation basée sur l'analyse de régression pour l'obtention des modèles théoriques ;

Optimisations mono et multi objectif pour minimiser les réponses par le rapport signal / bruit (S/N) de Taguchi et la relation Grey, respectivement, la figure **I-31**.

Finalement, les réponses ont été optimisées simultanément en utilisant la relation Grey.

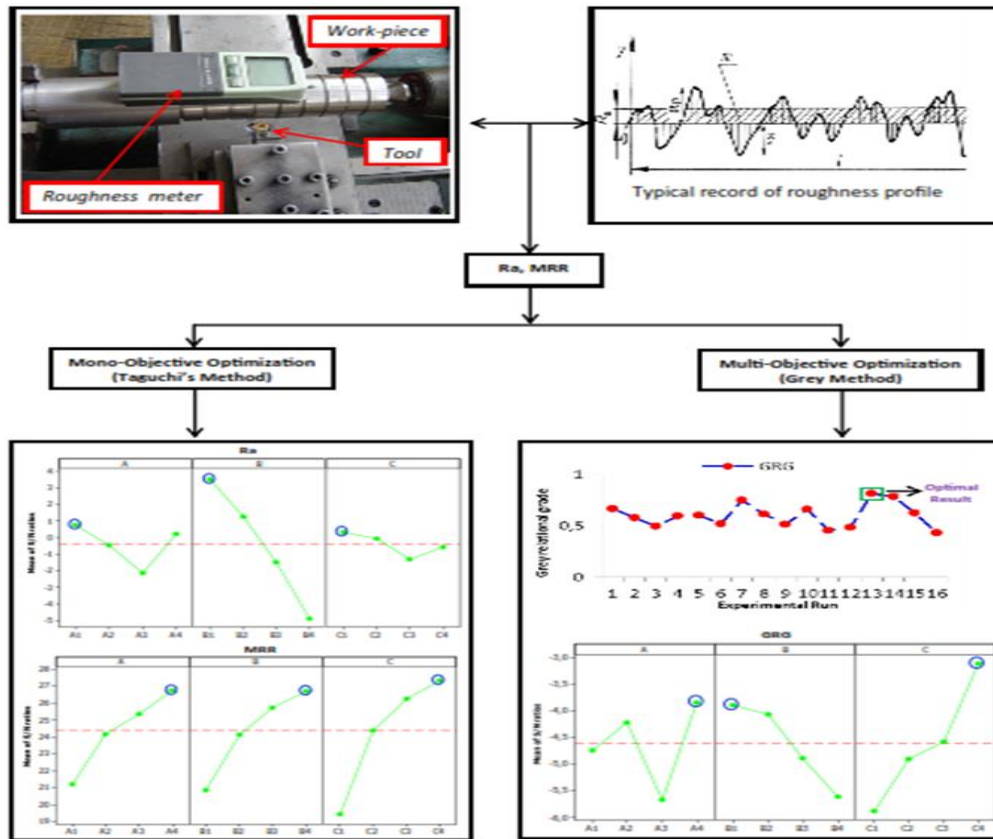


Figure I-31 Régimes optimaux pour les deux méthodes d'optimisations

Les conclusions présentées par les auteurs sont :

- Les valeurs optimales pour minimiser la (Ra) sont une vitesse de coupe de 120 m / min, une avance de 0,08 mm / tr et une profondeur de coupe de 0,15 mm.
- La vitesse de coupe et la profondeur de coupe ont une influence moindre sur Ra, tandis qu'une augmentation d'avance augmente Ra.
- Les valeurs optimales pour maximiser le MRR sont : une vitesse de coupe de 280 m / min, une avance de 0,2 mm / t et une profondeur de coupe de 0,6 mm.
- Les meilleures valeurs de combinaison pour minimiser (Ra) et (MRR) sont : une vitesse de coupe de 280 m / min, une avance de 0,08 mm / t et une profondeur de coupe de 0,6 mm.
- Le pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites pour (Ra) et (MRR) utilisant la relation Grey est respectivement de 3,27 et 0,01%.

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude bibliographique sur l'usinage des pièces et les outils de coupes est présentée pour bien comprendre le mécanisme du tournage, cette étude bibliographique est suivie par une recherche sur les travaux antécédents réalisés par des chercheurs dans le domaine du tournage des aciers inoxydables, le but de tout ça est de présenter un travail original, d'un intérêt économique et industriel certains.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les principaux équipements qui ont servis pour la réalisation des expériences, il s'agit d'un rugosimètre pour la mesure des critères de rugosité de la surface usinée, d'une plateforme de mesure des composantes de l'effort de coupe. En fin nous présentons le plan choisi ainsi que les conditions de réalisation des expériences.

Les essais d'usinage de l'acier inoxydable martensitique X20Cr13 sont réalisés sur un tour universel SN40C au sein du Laboratoire de coupe des métaux à l'université 8 Mai 1945 de Guelma.

II.2 Matériels utilisés :

II.2.1 Machine-outil :

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «TOS TRENCIN», modèle SN 40 C de puissance sur la broche égale à 6.6KW, figure II-1.

Ce tour est équipé d'une boîte de vitesses qui nous permet d'avoir les fréquences de rotation suivantes :(750, 1000, 1400, 2000) tr/min. Il est équipé aussi d'une boîte d'avance qui permet d'obtenir les avances suivantes : (0.08, 0.12, 0.14, 0.16, 0.20) mm/tr.



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

II.2.2 Matériaux utilisés pour les essais d'usinage :

On a fait notre étude sur un acier inoxydable, de type X20Cr13 (AISI 420), le tableau II.1 présente la composition chimique de l'acier X20Cr13. Ce dernier est un acier inoxydable martensitique, il est utilisé lorsque les caractéristiques mécaniques sont importantes parce que cette nuance accepte la trempe, sa dureté atteint jusqu'à 55HRC après trempe.

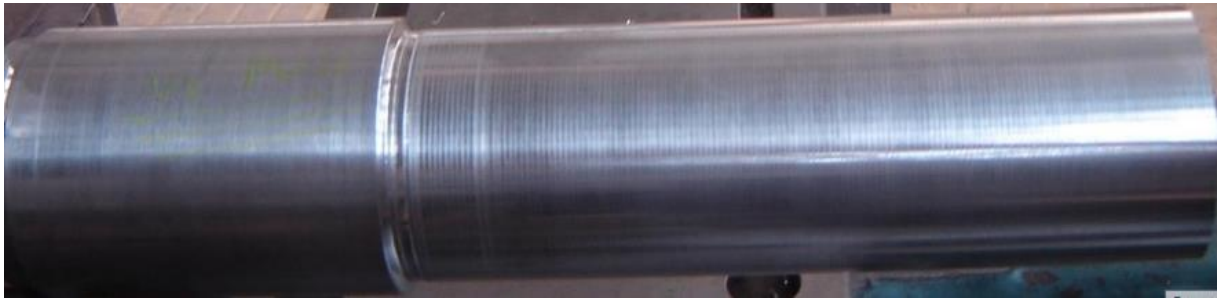
Ces caractéristiques physico-mécaniques sont présentées dans le tableau II.2. De point de vue usinage cette nuance s'usine pratiquement de la même manière que les aciers de construction classiques de même dureté, il est conseillé cependant de réduire légèrement la vitesse de coupe.

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

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

Tableau II.2 : Caractéristiques physico-mécaniques de l'acier X20Cr13.

	Conductivité thermique ; λ	Coefficient de dilatation à 100°C, α	Module d'élasticité à 20 C, E	Allongement de rupture	Dureté Vickers
	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[10 ⁻⁶ °C ⁻¹]	[GPa]	[%]	[HV]
X20Cr13	30	10.5	220	15	175-240



a) Epreuve utilisée pour les essais de longue durée



b) Epreuve utilisée pour les essais de courte durée

Figure II-2 : Epreuves pour différents essais.

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

II.2.3 Plaquette de coupe :

La plaquette est amovible de forme carrée (figure II-3), à fixation par trou central. Toutes les informations qui concernent la plaquette de coupe sont regroupées dans le tableau II.3.

Ce dernier est GC2015 (HC) – M15 (M05-M25) Nuance carbure à revêtement CVD pour finition et ébauche légère des aciers inoxydables. Combinaison d'un substrat capable de supporter des températures élevées et d'un revêtement résistant à l'usure. Choix de base pour la coupe continue avec des vitesses de coupe modérées à élevées.[19]



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

Tableau II.3 : Informations relatives à la plaquette de coupe.

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

II.2.4 Plaquette en carbure revêtu GC2015 :

Triple revêtement CVD (TiN/TiCN/Al₂O₃) sur un substrat de carbure cémenté. Le revêtement CVD est composé d'une déposition en phase vapeur de la température épaisse et modérée (MTCVD) de TiN, pour une résistance élevée avec un coefficient du frottement réduit. TiCN pour la résistance à l'usure et la stabilité thermique. Al₂O₃ pour la haute température et la résistance de l'usure en cratère, figure II-4. [20]

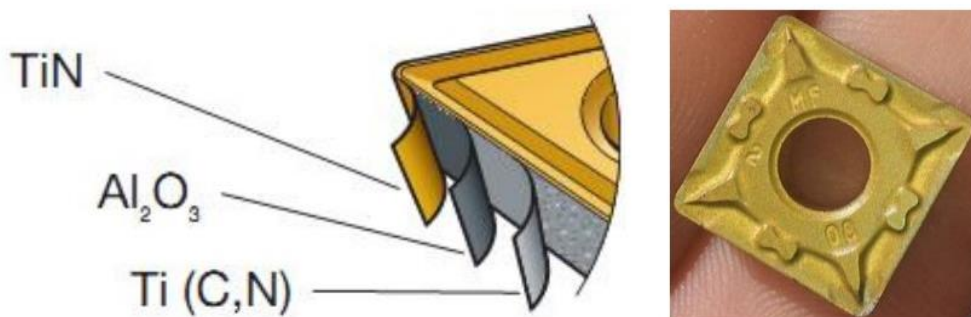


Figure II-4 Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015).

II.2.5 Porte plaquette :

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la désignation est indiquée au tableau II.6. La désignation du porte-outil selon la norme ISO est PSBNR2525K12 avec une géométrie de la partie active de l'outil matérialisée par les angles suivants : $\chi_r = +75^\circ$, $\alpha = +6^\circ$, $\gamma = -6^\circ$ et $\lambda = -6^\circ$.

La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la plaquette.

Tableau II.4 : Caractéristiques de porte plaquette utilisé.

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

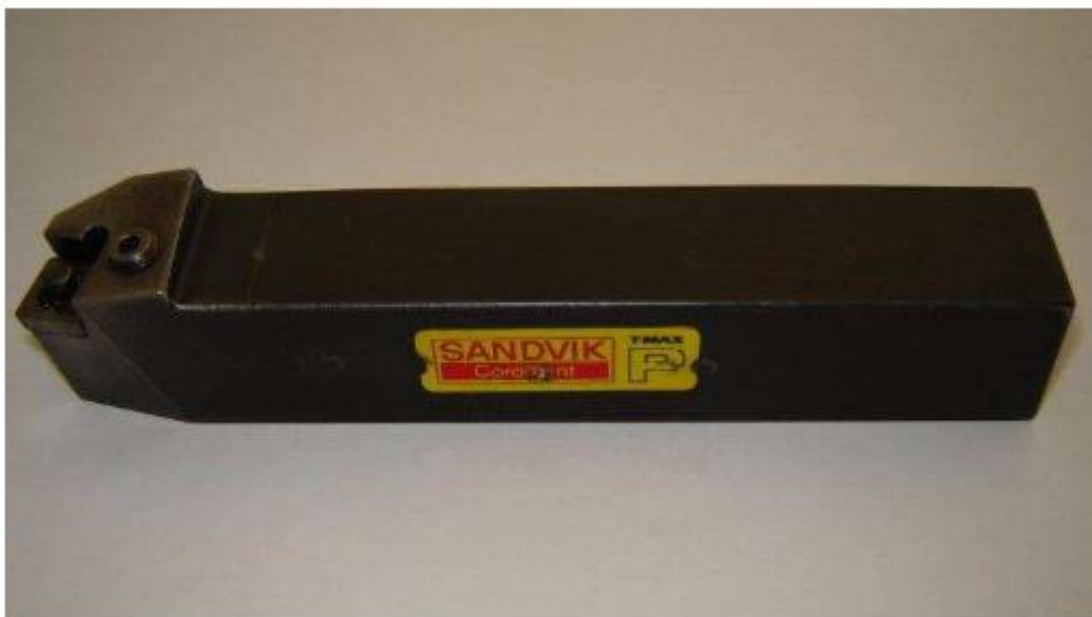


Figure II-5 : Porte outil utilisé.

II.3 Instruments de mesure utilisés :

Lors de nos expériences nous avons utilisé plusieurs instruments de mesure. Un dynamomètre **KISTLER 9257B** pour la mesure des efforts de coupe, un rugosimètre 2D pour la mesure des différents critères de la rugosité de surface.

II.3.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe :

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

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation (figure II-6). La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (figure II-7).

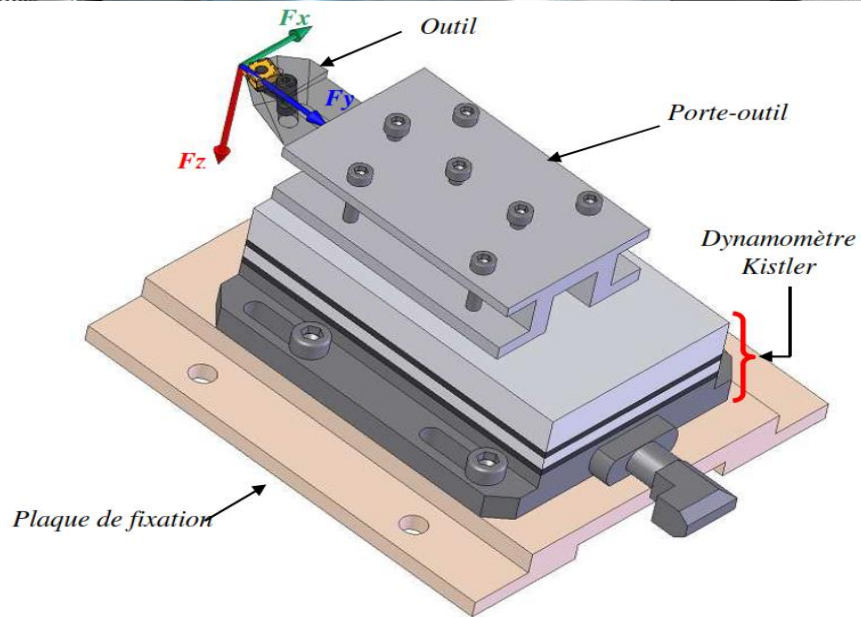


Figure II-6 : Montage du dynamomètre sur la table de la machine.

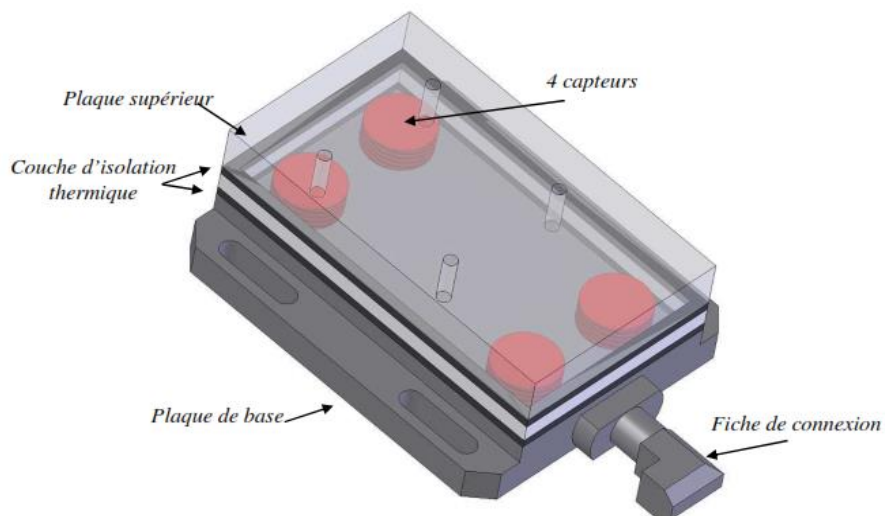


Figure II-7 : Capteur d'effort de coupe KISTLER.

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

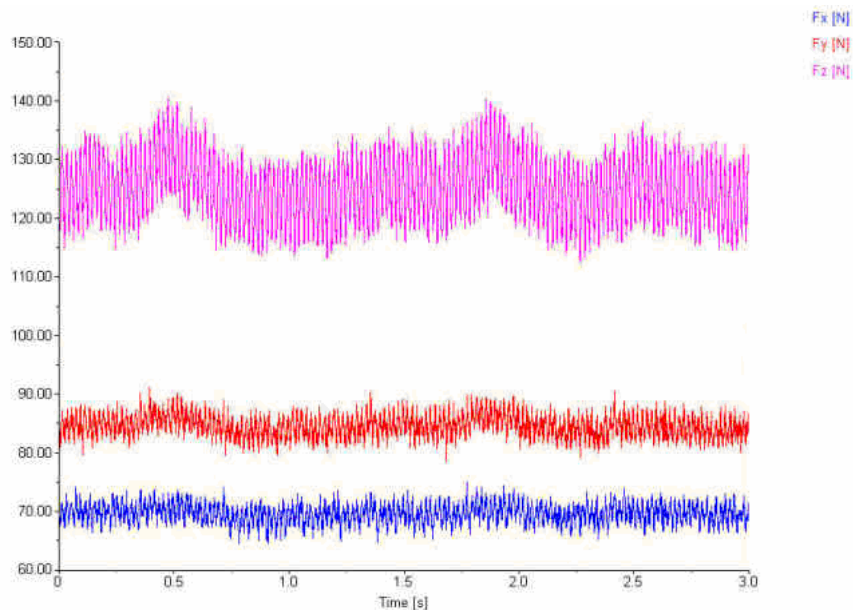


Figure II-8 : Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE ».

II.4 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité :

Pour la mesure du critère de rugosité (R_a), nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo) (figure II-9).

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



Figure II-9 : Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.

II.5 Planification des expériences :

Les paramètres de coupe (V_c , f , a_p), sont considérés comme paramètres d'entrée. La rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe tangentiel (F_c), l'effort spécifique de coupe tangentiel (K_c) et la puissance de coupe (P_c), représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

II.5.1 Méthode de planification des expériences :

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

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

II.5.2 Conditions de coupe choisies pour la modélisation :

Les différents niveaux choisis pour les paramètres d'entrées (V_c , f et a_p) sont présentés dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Conditions de coupe et leurs niveaux pour le plan Taguchi L₁₆ essais.

Paramètres de coupe	Unité	Symbole	Niveaux			
			Niveaux 1	Niveaux 2	Niveaux 3	Niveaux 4
Vitesse de coupe (Vc)	m/min	<i>Vc</i>	60	90	120	150
Avance (f)	mm/tr	<i>f</i>	0.08	0.12	0.16	0.20
Profondeur de passe (ap)	mm	<i>ap</i>	0.25	0.50	0.75	1.00

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. Les compositions chimiques de l'acier utilisé et les caractéristiques de l'outil de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées.

Chapitre III

Modélisation par la méthode

MSR

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude statistique issue des résultats expérimentaux de l'influence de certains facteurs tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) ainsi que la profondeur de passe (a_p), qui ont la possibilité d'influencer les paramètres technologiques de sortie, tels que : la rugosité de surface et la composante tangentielle de l'effort de coupe, l'effort spécifique et la puissance spécifique.

Des modèles mathématiques sont déduits, décrivant la relation qualitative et quantitative entre les paramètres de coupe considérés et les paramètres technologiques étudiés.

Pour cela nous avons réalisé l'usinage de l'acier inoxydable AISI 420 traité, avec un outil en céramique revêtue (G2015), suivant un plan d'expérience orthogonal de Taguchi du type L_{16} .

Les résultats expérimentaux sont traités à l'aide du logiciel d'analyse MINITAB 16 qui permet de donner les modèles mathématiques ainsi que d'établir l'analyse de la variance ANOVA, le but de cette analyse est de déterminer et quantifier le pourcentage de contribution des facteurs et de leurs interactions et les termes carrés sur les paramètres étudiés.

Les différents modèles déduits ont servis à une étude d'optimisation du processus de coupe pour déterminer le régime d'usinage optimal.

III.2 Analyse de variance ANOVA :

L'analyse de variance ANOVA est utile pour comprendre l'influence des paramètres d'entrée donnés à partir d'une série de résultats expérimentaux, par la méthode des plans d'expériences pour le processus d'usinage, et elle permet également de fournir une interprétation des données de sortie.

Elle consiste essentiellement à partitionner la variation totale d'une expérience en éléments attribuables aux facteurs contrôlés et les erreurs générées. La signification statistique des modèles quadratiques de prédiction est évaluée par *P-value* et *F-value* d'ANOVA.

Dans le tableau d'ANOVA, *P-value* est la probabilité (allant de 0 à 1) des résultats observés dans une étude on peut fixer le seuil de tolérance au début de l'analyse, par exemple :

- Si $P > 0,05$, le paramètre *est insignifiant*.
- Si $P < 0,05$, le paramètre *est significatif*.

La somme des carrés (SC) est utilisée pour estimer le carré de la déviation de la moyenne générale.

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

$$\text{Où : } \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \text{III.2}$$

\bar{y} est la moyenne des réponses, 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 .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad \text{III.3}$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice F-value est utilisé avec la base que les valeurs de F-calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F-table.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad \text{III.4}$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

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.

$$\text{Cont. \%} = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad \text{III.5}$$

III.2.1 Analyse de régression :

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une, ou plusieurs variables indépendantes. Cette relation entre l'entrée, appelé les conditions de coupe (vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (f), la profondeur de passe (ap) et la sortie (Y)), défini comme un des aspects d'usinabilité (paramètres technologiques d'usinage) est donnée par :

$$Y = \varphi(Vc, f, ap, t) \quad \text{III.6}$$

Où : φ est la fonction de réponse.

L'approximation des Y est proposé au moyen d'un modèle mathématique non-linéaire (quadratique), qui est approprié pour l'étude des effets d'interaction des paramètres de coupe. Le modèle mathématique du second ordre basé sur la méthode de régression générale est donné par :

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \varepsilon_{ij} \quad \text{III.7}$$

$$(\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij}) \quad \text{III.8}$$

Où : b_0 est le terme constant de l'équation de régression, les coefficients $b_1, b_2 \dots b_k$ et b_{11}, b_{22}, b_{kk} sont les termes linéaires et quadratiques respectivement, tandis que b_{12}, b_{13}, b_{k-1} sont les termes d'interaction. X_i représente les paramètres d'entrée (Vc, f et ap), ε_{ij} présente l'erreur d'ajustement pour le modèle de régression. y_{ij} est l'observation correspondante des essais, et \bar{y}_{ij} est la valeur ajusté.

Le coefficient de détermination R^2 est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation :

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{(\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad \text{III.9}$$

Avec

- y valeur de la réponse calculée à la i^{eme} expérience ;
- \bar{y} valeur mesurée à la i^{eme} expérience ;
- \bar{y}_i valeur moyenne des réponses mesurées.

Afin de tester la validité du modèle, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour examiner la signification et l'adéquation du modèle. Le modèle est adéquat dans un intervalle de confiance de 95%, à chaque fois que la valeur de F -calculée est supérieure à la valeur de F -table. Lorsque les valeurs de P sont inférieures à 0,05 (ou 95% de confiance), les modèles obtenus sont considérées statistiquement significatives. En d'autres termes, plus le R^2 approche à la valeur 1, le modèle est compatible avec les valeurs réel (expérimentaux).

III.2.2 Résultats des expériences par la méthode de surface de réponse pour l'acier inoxydable X20Cr13 :

Les valeurs des paramètres de réponse (R_a , F_c , K_c et P_c) en fonction des paramètres de sortie tels que ,vitesse de coupe ,avance et profondeur de passe lors de l'usinage de l'acier X20Cr13 est présentée sont présentées dans le tableau III.1, ces résultats sont obtenus suivant le plan d'expérience de Taguchi à 16 essais avec l'adoption de 3 facteurs chacun d'eux varie 4 fois, c.-à-d., 4 niveaux.

Tableau III.1 : Plan orthogonal de Taguchi L_{16} pour les différentes réponses.

N°Test	Paramètres d'entrées			Paramètres de sorties			
	Vc,(m/min)	f,(mm/tr)	ap,(mm)	R_a , (μm)	F_c , (N)	K_c , (MPa)	P_c , (W)
1	60	0,08	0,25	0,85	77,44	3872,00	77,44
2	60	0,12	0,50	1,23	194,75	3245,38	194,75
3	60	0,16	0,75	1,63	336,64	2805,33	336,64
4	60	0,20	1,00	2,72	476,47	2382,35	476,47
5	90	0,08	0,50	0,96	144,89	3622,25	217,34
6	90	0,12	0,25	1,07	97,55	3251,67	146,33
7	90	0,16	1,00	1,65	412,59	2578,69	618,89
8	90	0,20	0,75	2,05	414,73	2764,87	622,10
9	120	0,08	0,75	0,77	176,63	2943,83	353,26
10	120	0,12	1,00	1,10	312,14	2601,17	624,28
11	120	0,16	0,25	1,38	113,45	2836,25	226,90
12	120	0,20	0,50	2,06	246,77	2467,70	493,54
13	150	0,08	1,00	1,02	238,53	2981,63	596,33
14	150	0,12	0,75	1,95	246,59	2739,89	616,48
15	150	0,16	0,50	1,58	223,83	2797,88	559,58
16	150	0,20	0,25	2,16	130,21	2604,20	325,53

III.3 Critère de rugosité Ra :

III.3.1 Analyse de la variance ANOVA :

Le tableau III.2 présente l'analyse de la variance de l'effet de chaque condition de coupe sur la rugosité Ra. On peut noter que l'avance présente la majorité de la contribution que est 77.48% suivie par une profondeur de passe par une contribution de 3.57%, la vitesse de coupe affecte Ra par une contribution de 0.05%, les termes Vc^2 et $f*ap$ influent sur la réponse par des contributions de 5.87% et 3.57%, respectivement.

Tableau III.2 : Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra

Source	DL	Seq SS	Adj MS	CM ajust	F-value	P-value	Cont. %
Vc	1	0,00221	0,0442	0,044201	0,79158	0,407878	0,05
f	1	3,63804	0,00712	0,007124	0,12758	0,733187	77,48
ap	1	0,16745	0,01005	0,010049	0,17997	0,686187	3,57
Vc*Vc	1	0,27563	0,27563	0,275625	4,9361	0,068035	5,87
f*f	1	0,0625	0,0625	0,0625	1,1193	0,330793	1,33
ap*ap	1	0,0049	0,0049	0,0049	0,08775	0,777039	0,10
Vc*f	1	0,02818	0,02818	0,028182	0,50471	0,504102	0,60
Vc*ap	1	0,01456	0,01456	0,014564	0,26082	0,627795	0,31
f*ap	1	0,16748	0,16748	0,167477	2,9993	0,134012	3,57
Erreur	6	0,33503	0,33503	0,055839			7,13
Total	15	4,69597					100

III.3.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination :

Ce modèle permet de décrire la relation entre le critère de rugosité (Ra) et les éléments du régime de coupe. Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

$$Ra = 1,77557 - 0,0161439 Vc - 4,8608 f - 0,849545 ap + 0,000145833 Vc^2 + 39,0625 f^2 - 0,28 ap^2 - 0,0471591 Vc*f - 0,00542424 Vc*ap + 13,7955 f*ap$$

$$R \text{ carré} = 92,87 \%$$

III.3.3 Comparaison entre les résultats prévus et expérimentaux :

La figure III-1 montre qu'en général il y a une bonne concordance entre les résultats prévus et expérimentaux.

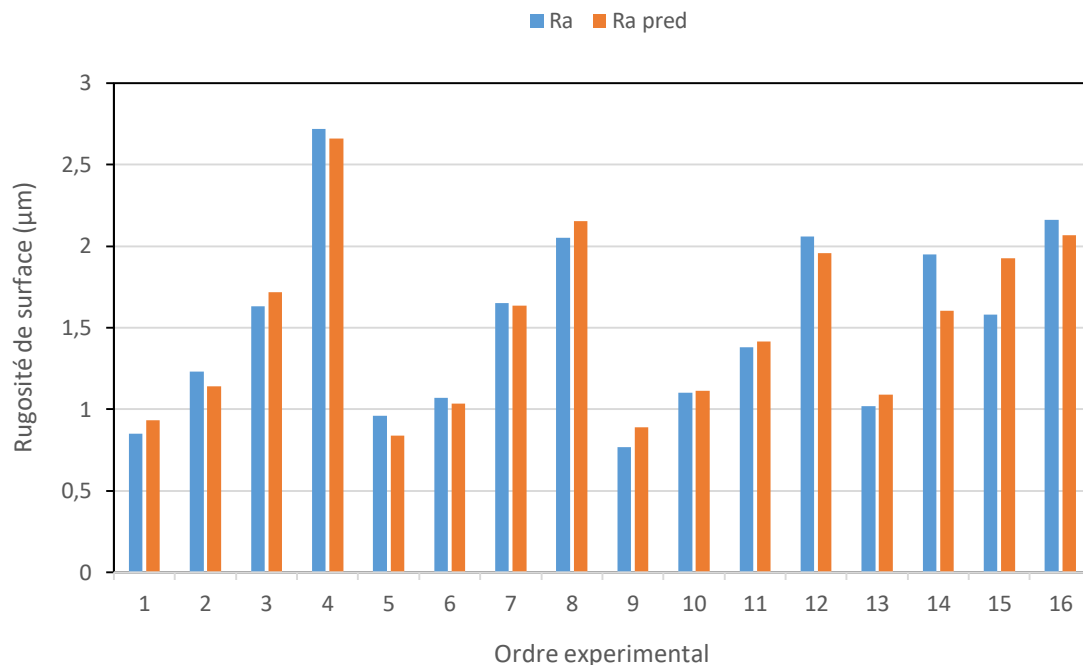
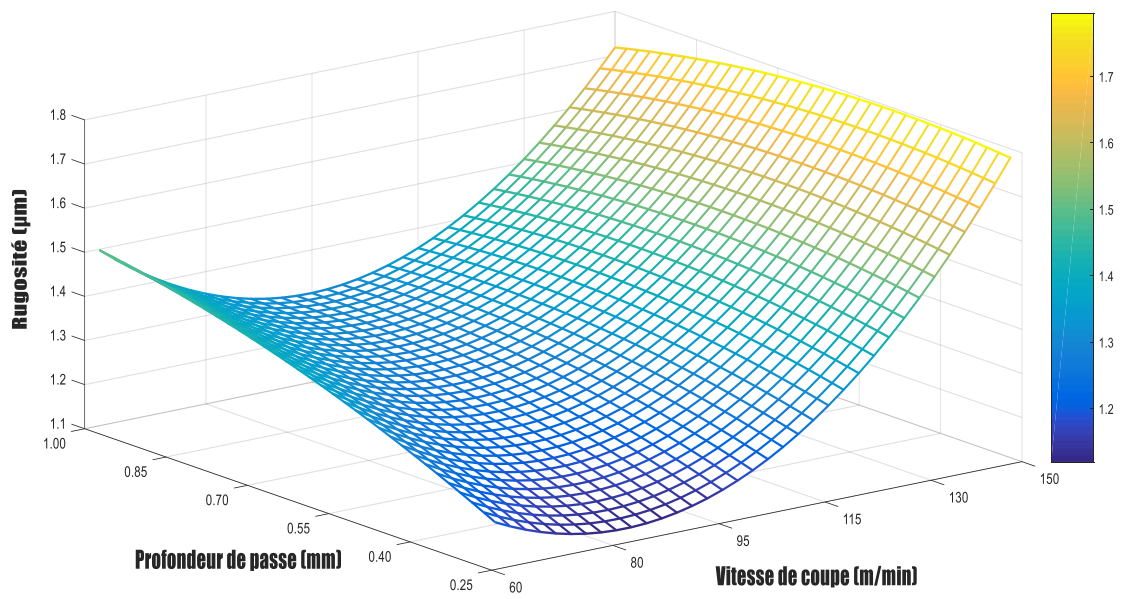
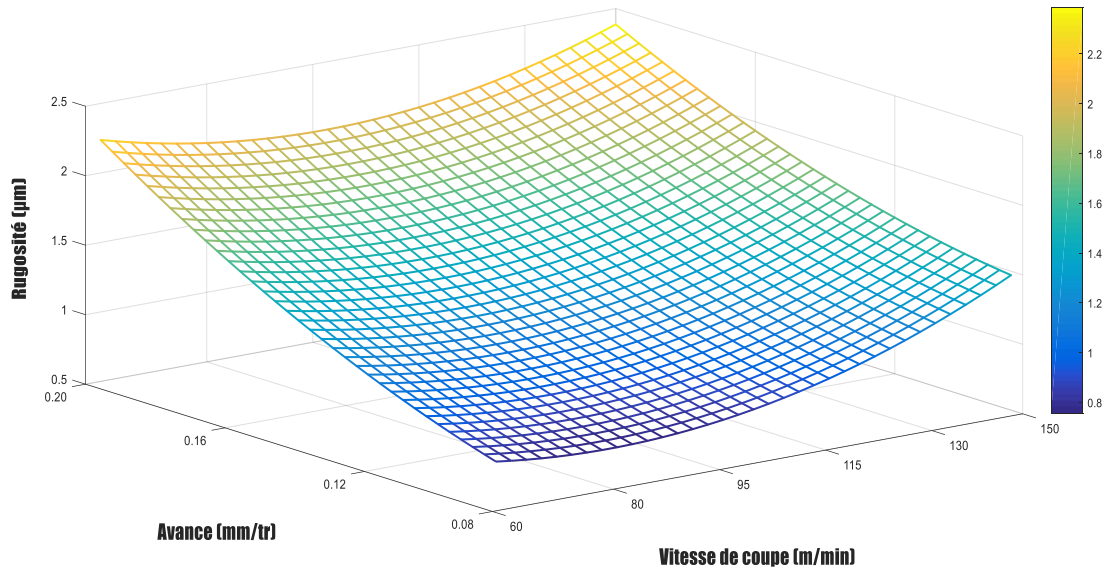


Figure III-1 : Les valeurs expérimentales et prédites de la rugosité de surface.

III.3.4 Analyse de la surface de réponse 3D :

Les graphes en 3D qui montrent la variation de la rugosité de la surface avec les différents paramètres de coupe sont présentés dans la figure III-2. On peut remarquer que l'évolution de Ra avec l'avance et la profondeur de passe est presque linéaire.

Donc, avec l'augmentation de f et a_p la rugosité augmente, on peut conclure du graphe qui présente le changement de Ra avec la vitesse de coupe que l'augmentation de la vitesse de coupe (à $V_c = 100$ m/min) provoque une diminution de Ra, à des vitesses de coupe supérieures à 100 m/min on a remarqué une augmentation des valeurs de la rugosité de la surface usinée ceci peut être dû au phénomène du copeau adhérent sur la surface usinée de la pièce.



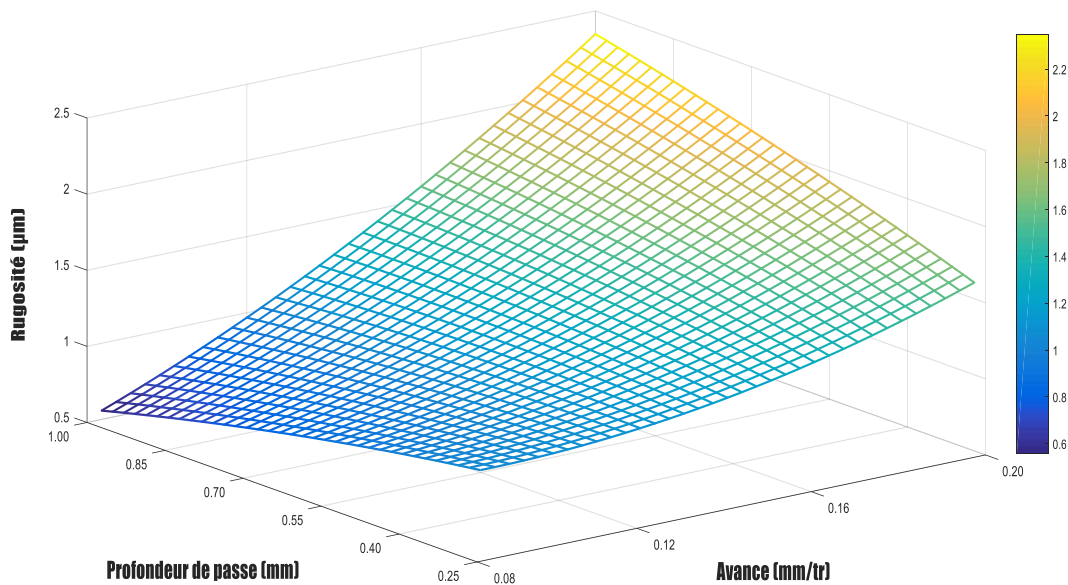


Figure III-2 : Surface de réponse pour Ra

III.4 Effort de coupe F_c :

III.4.1 Analyse de la variance ANOVA :

Le tableau III.3 illustre les résultats de l'analyse ANOVA de l'effort de coupe (F_c), l'analyse des résultats montre que la profondeur de passe est le plus influant sur l'effort de coupe tangentiel avec une contribution de 66.44%, la vitesse de coupe et l'avance influent sur (F_c) par une contribution de 5.20% et 25.60%, respectivement.

Tableau III.3 : Analyse de la variance (ANOVA) pour F_c

Source	DL	Seq SS	Adj MS	CM ajust	F-value	P-value	Cont. %
Vc	1	11501	83	83,4	0,2937	0,60741	5,20
f	1	56581	114	114,2	0,4019	0,549496	25,60
ap	1	146855	404	404,1	1,4226	0,278006	66,44
Vc*Vc	1	2	2	2	0,0072	0,935257	0,00
f*f	1	63	63	63,5	0,2235	0,653106	0,02
ap*ap	1	999	999	999,4	3,5181	0,109812	0,45
Vc*f	1	0	0	0,1	0,0003	0,987492	0
Vc*ap	1	198	198	197,6	0,6955	0,436244	0,09
f*ap	1	3124	3124	3124,5	10,9995	0,016073	1,41
Erreur	6	1704	1704	284,1			0,77
Total	15	221027					100

III.4.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination :

Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort de coupe tangentiel (F_c) et les éléments du régime de coupe. Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

$$F_c = -2,63119 - 0,701318 V_c + 615,349 f + 170,355 ap + 0,000396528 V_c^2 - 1244,92 f^2 - 126,45 ap^2 - 0,0773674 V_c * f + 0,631742 V_c * ap + 1884,28 f * ap$$

$$R \text{ carré} = 99,23 \%$$

III.4.3 Comparaison entre les résultats prévus et expérimentaux :

La figure III-3 montre qu'en général il y a une bonne concordance entre les résultats prévus et expérimentaux.

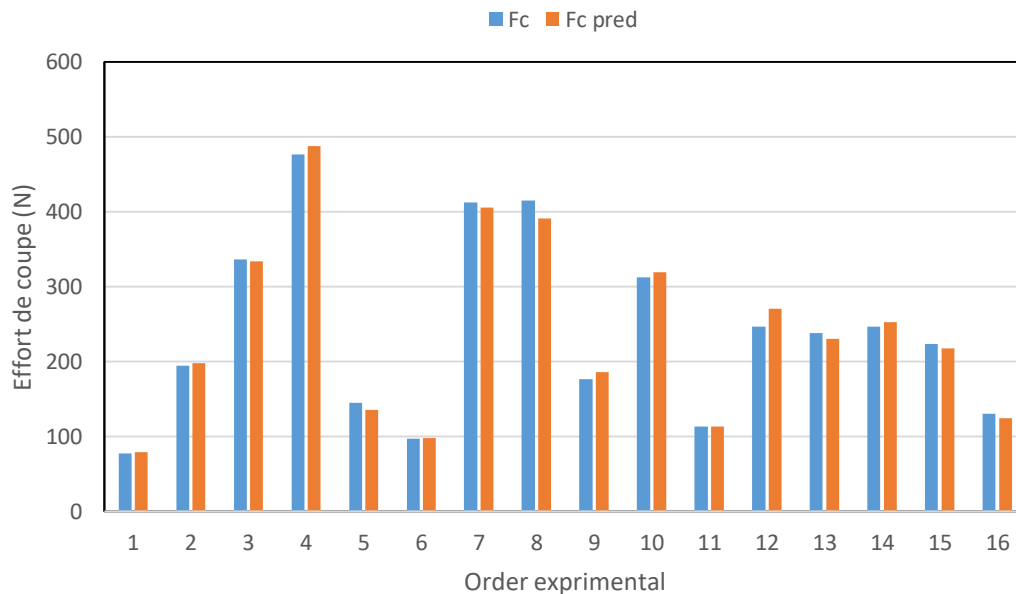


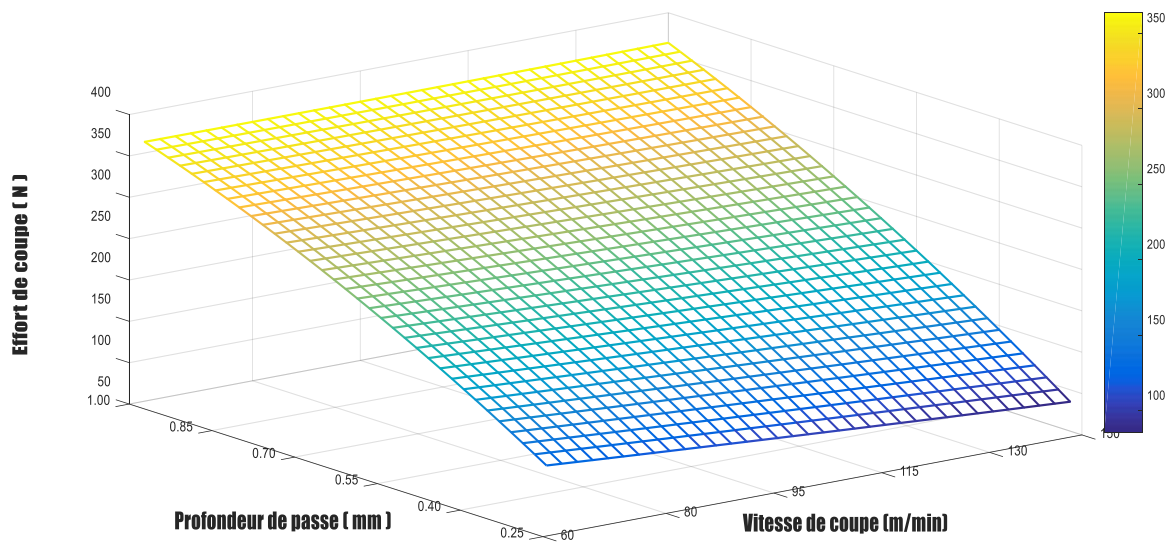
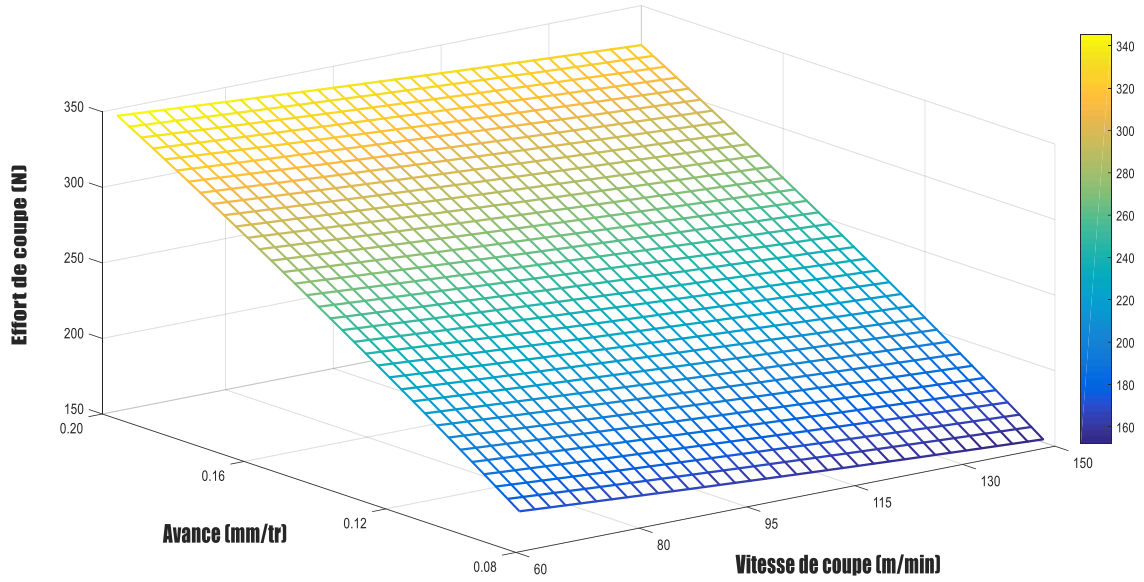
Figure III-3 : Valeurs expérimentales et prédites de l'effort de coupe.

III.4.4 Analyse de la surface de réponse de l'effort de coupe :

L'impact de différents paramètres de régime de coupe sur l'effort de coupe tangentiel est présent sur la figure III-4.

La première remarque qui nous pouvons tirer est que l'évolution de F_c est presque linéaire avec toutes les conditions de coupe. D'abord, la vitesse de coupe a un effet inverse sur l'effort de coupe sur toute la plage étudiée.

Ensuite, l'augmentation de f et a_p conduit à l'augmentation de l'effort de coupe, enfin, la figure montre que la profondeur de passe affect considérablement F_c , car sa pente est la plus grande.



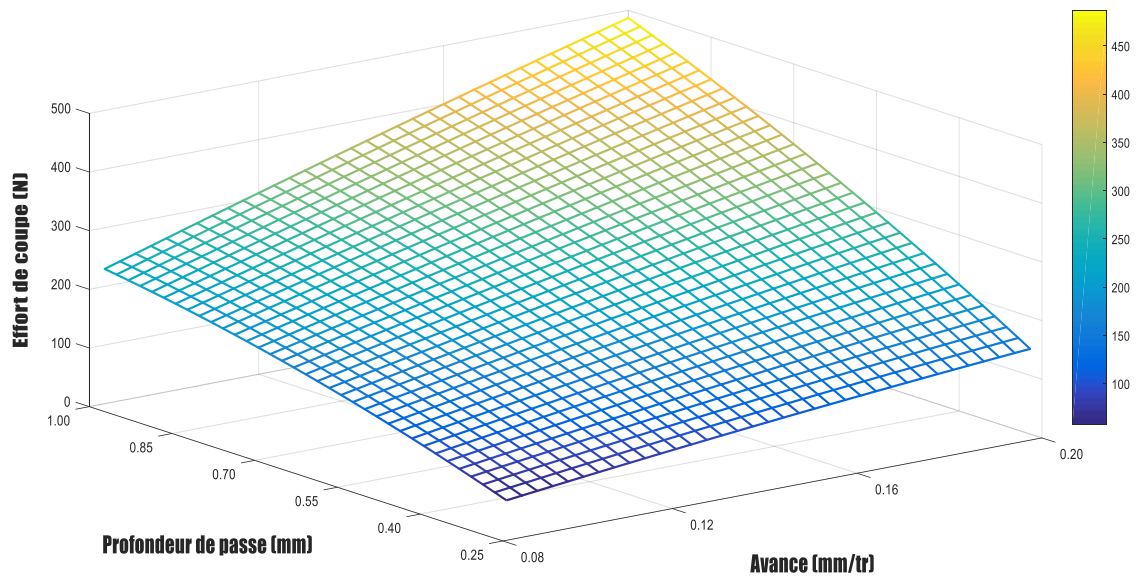


Figure III-4 : Surface de réponse pour F_c

III.5 Effort spécifique K_c :

III.5.1 Analyse de la variance ANOVA :

Les résultats de l'analyse de la variance de l'effort spécifique sont enregistrés dans le tableau III.4. L'analyse ANOVA montre que l'avance est le facteur le plus prépondérant qui affecte K_c , sa contribution est de 53.89%. Le deuxième paramètre qui influence sur K_c est la profondeur de passe avec une contribution d'environ 23.90%.

Tableau III.4 : Analyse de la variance (ANOVA) pour K_c

Source	DL	Seq SS	Adj SM	CM ajust	F-value	P-value	Cont. %
Vc	1	301709	41942	41942	1,6553	0,245643	11,98
f	1	1357656	117293	117293	4,6292	0,074944	53,89
ap	1	602068	39299	39299	1,551	0,259412	23,90
Vc*Vc	1	8201	8201	8201	0,3237	0,590063	0,32
f*f	1	38276	38276	38276	1,5106	0,265053	1,52
ap*ap	1	4871	4871	4871	0,1922	0,676402	0,20
Vc*f	1	8036	8036	8036	0,3171	0,593735	0,32
Vc*ap	1	23993	23993	23993	0,9469	0,368081	0,95
f*ap	1	22807	22807	22807	0,9001	0,379383	0,90
Erreur	6	152025	152025	25338			6,03
Total	15	2519640					100

III.5.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination :

Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort spécifique (K_c) et les éléments du régime de coupe. Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

$$K_c = 6260,97 - 15,7261 V_c - 19723,9 f - 1680 ap + 0,0251549 V_c^2 + 30569,1 f^2 - 279,17 ap^2 + 25,1817 V_c * f + 6,96211 V_c * ap + 5090,83 f * ap$$

R carré = 93,97 %

III.5.3 Comparaison entre les résultats prévues et expérimentaux :

La figure III-5 montre qu'en général il y a une bonne concordance entre les résultats prévues et expérimentaux.

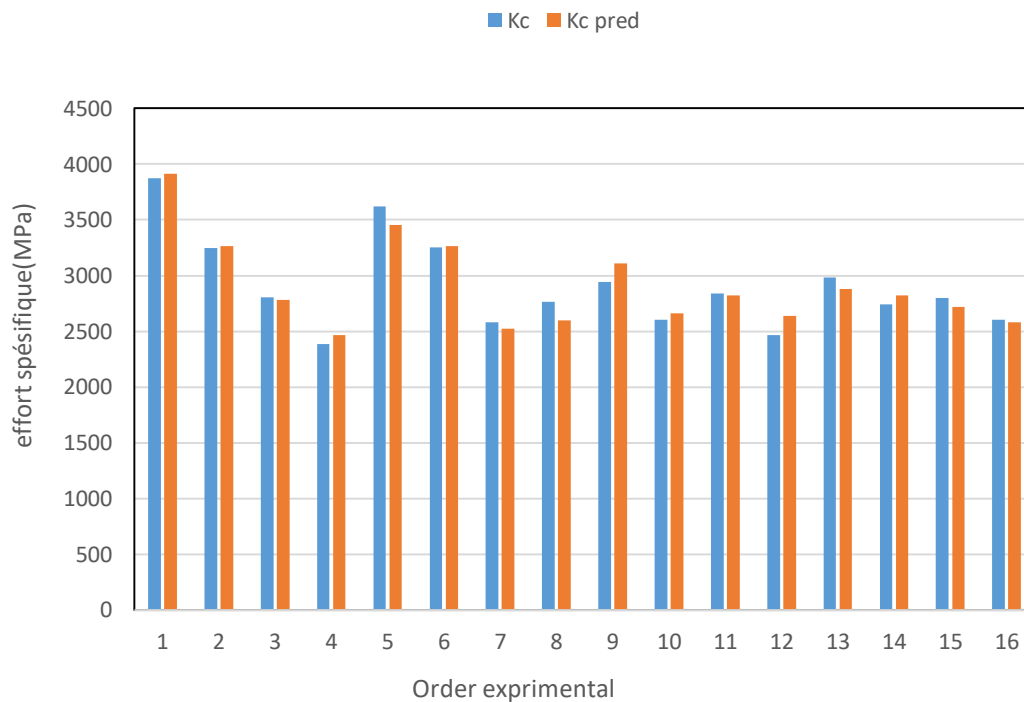


Figure III-5 : Les valeurs expérimentales et prédites de l'effort spécifique.

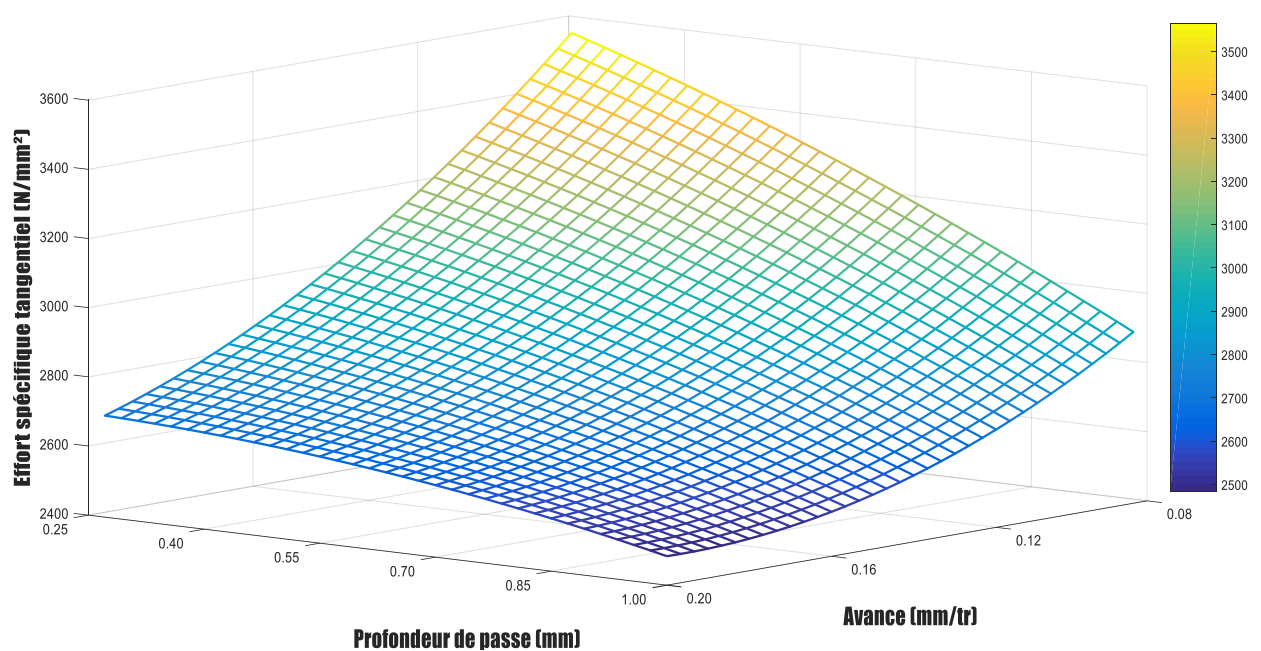
III.5.4 Analyse de la surface de réponse de l'effort spécifique :

L'impact de différents paramètres de régime de coupe sur l'effort spécifique est présent sur la figure (III-6).

Les tracés des réponses en 3D par la méthode de la surface de réponse qui illustrent l'évolution de l'effort spécifique de coupe en fonction de différents paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sont présentés dans les figure(III-6).

On remarque que K_c est inversement proportionnel aux différents paramètres de régime de coupe (V_c , f et a_p).

L'analyse des graphes montre aussi que les pentes de l'avance et la profondeur de passe sont les plus grandes comparativement à la vitesse de coupe.



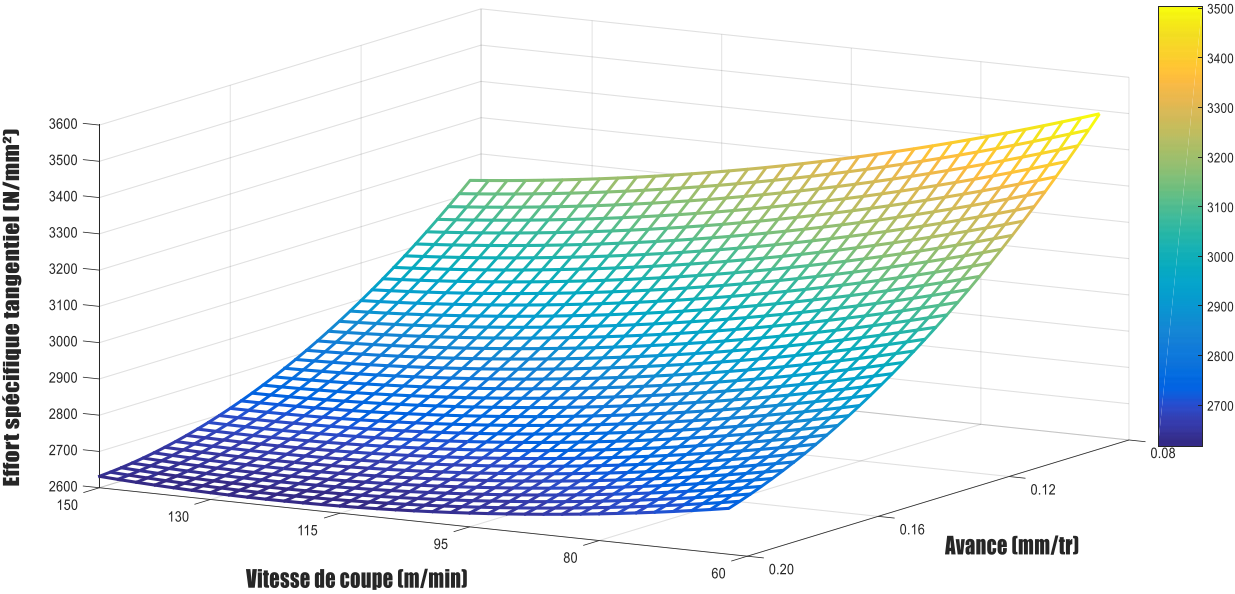
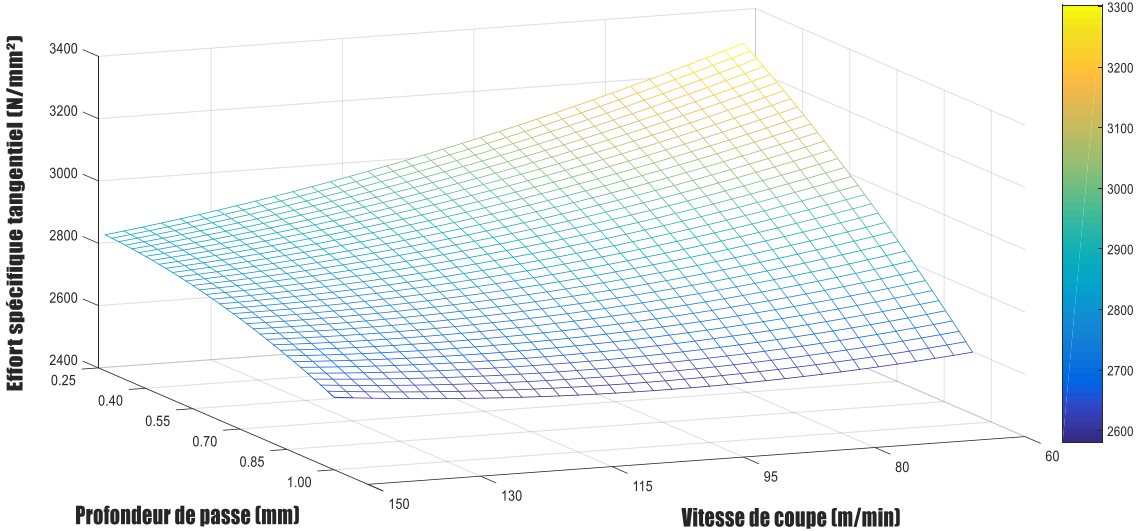


Figure III-6 : Surface de réponse pour K_c

III.6 Puissance de coupe P_c :

III.6.1 Analyse de la variance ANOVA :

Les résultats de l'analyse de la variance de la puissance de coupe sont enregistrés dans le tableau III.5. L'analyse ANOVA montre le premier facteur qui influe sur la puissance de coupe est la profondeur de passe, sa contribution est 57.85% suivie par la vitesse de coupe avec une contribution de 21.96% et en dernier lieu, l'avance par une contribution de 10.64%.

Tableau III.5 : Analyse de la variance (ANOVA) pour P_c

Source	DL	Seq SS	Adj SM	CM ajust	F-value	P-value	Cont.%
Vc	1	122554	350	350,4	0,4906	0,509878	21,96
F	1	59404	43	42,8	0,06	0,814688	10,64
Ap	1	322908	1072	1071,6	1,5005	0,266505	57,85
Vc*Vc	1	891	891	891,3	1,2481	0,30665	0,16
f*f	1	1637	1637	1637	2,2922	0,180795	0,30
ap*ap	1	5682	5682	5682,1	7,9564	0,030326	1,02
Vc*f	1	5258	5258	5258	7,3625	0,034948	0,94
Vc*ap	1	21610	21610	21610,3	30,2597	0,001514	3,87
f*ap	1	13919	13919	13919,3	19,4904	0,004496	2,49
Erreur	6	4285	4285	714,2			0,77
Total	15	558148					100

III.6.2 Modèle mathématique et le coefficient de détermination :

Ce modèle permet de décrire la relation entre la puissance de coupe (P_c) et les éléments du régime de coupe. Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

$$P_c = 80,0535 - 1,43739 V_c - 376,929 f - 277,413 ap - 0,00829306 V_c * V_c + 20,3699 V_c * f + 6,60736 V_c * ap - 6321,88 f * f + 3977,11 f * ap - 301,52 ap * ap$$

$$R \text{ carré} = 99,23 \%$$

III.6.3 Comparaison entre les résultats prévus et expérimentaux :

La figure III-7 montre qu'en général il y a une bonne concordance entre les résultats prévus et expérimentaux.

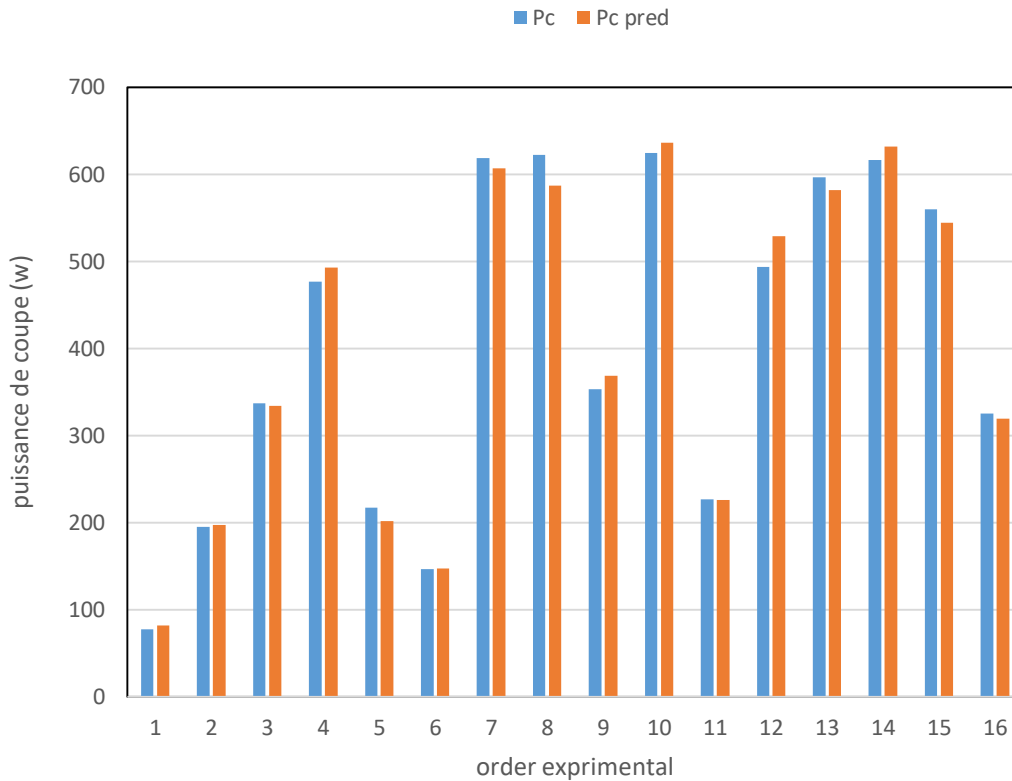


Figure III-7 : Les valeurs expérimentales et prédites de la puissance de coupe.

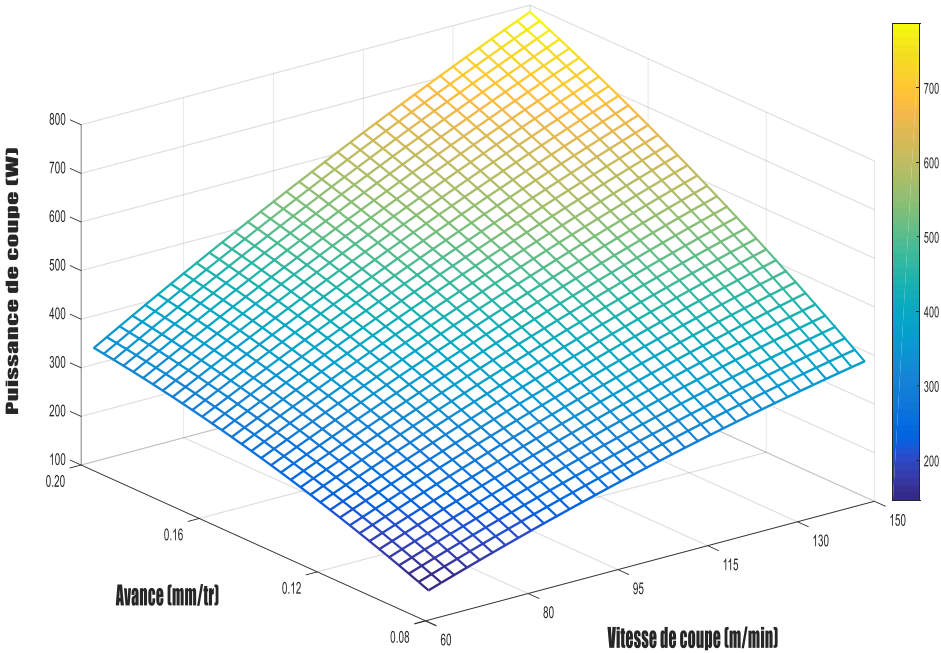
III.6.4 Analyse de la surface de réponse de la puissance de coupe :

L'impact de différents paramètres de régime de coupe sur la puissance de coupe est présent sur la figure III-7.

Les tracés des réponses en 3D par la méthode de la surface de réponse qui illustrent l'évolution de la puissance de coupe en fonction de différents paramètres de coupe (V_c , f et a_p) sont présentés dans la figure III-7.

On remarque que la puissance de coupe augmente avec l'augmentation des différents facteurs de coupe (V_c , f et a_p).

L'analyse des graphes montre aussi que les pentes des trois paramètres (avance, profondeur de passe et vitesse de coupe) sont d'une amplitude importante.



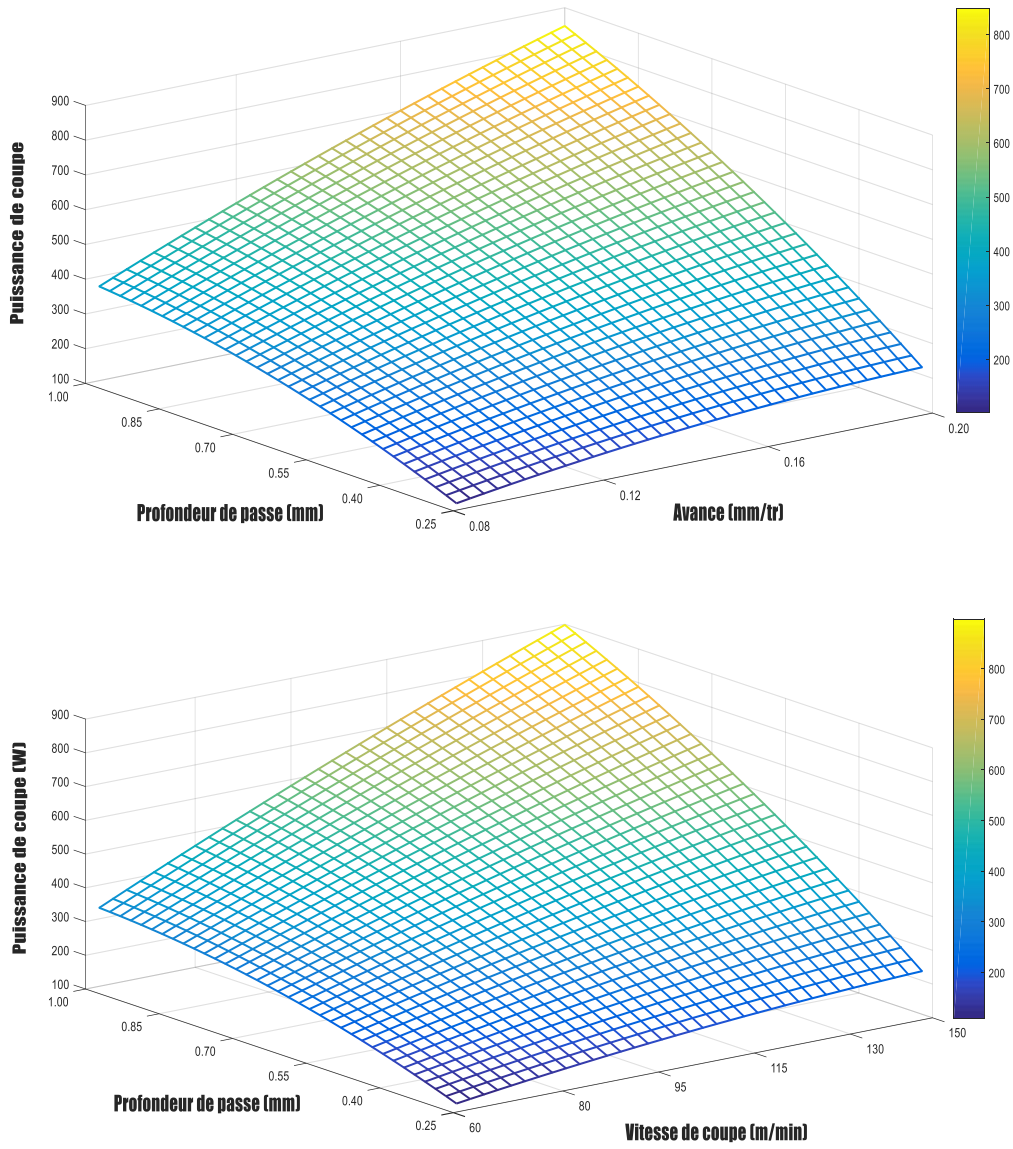


Figure III-7 : Surface de réponse pour Pc

III.6 Conclusion :

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

- L'analyse a montré que l'avance est le facteur le plus influant sur la rugosité de la surface ;
- L'effort de coupe tangentiel est fortement affecté par la profondeur de passe ;
- L'analyse a montré que l'avance est le facteur le plus influant sur l'effort spécifique;
- La profondeur de passe est le facteur signifiant pour la puissance de coupe ;
- Les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse ont permis le tracé des courbes en 3D ;
- Puisque les coefficients de détermination pour les paramètres de sortie sont proches de l'unité les modèles sont jugés acceptables.

Chapitre IV

Optimisation par la méthode

Taguchi et ACP

IV.1 Introduction :

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que les méthodes Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc... [19-20]. Elle permet le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus.

Ce qui a généralement un impact économique direct sur la production tel que : le temps technologique d'usinage ou le coût global d'opération. L'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

Deux types d'optimisation ont été utilisés dans ce chapitre :

1. Optimisation mono-objectif en utilisant la méthode de Taguchi ;
2. Optimisation par la méthode d'analyse de composantes principales pondérées (ACPP).

IV.2 Optimisation par la méthode de Taguchi :

Dans le but de fabriquer des pièces de haute qualité avec une productivité maximale, un coût minimum et dans un bref délai, les paramètres de coupe devraient être correctement choisis. Le but de notre travail est : d'optimiser les paramètres technologiques, la rugosité de surface (R_a), l'effort de coupe (F_c), l'effort spécifique de coupe (K_s) et la puissance de coupe (P_c) lors du tournage à sec de l'acier inoxydable martensitique X13 Cr20 avec des plaquettes en carbure revêtu GC2015, en fonction de la variation des paramètres de coupe (vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p)), la matrice de Taguchi $L_{16} (4^3)$ a été utilisée.

L'optimisation par la méthode de Taguchi compte beaucoup sur le calcul du rapport signal/bruit (S/B). Le premier terme de ce rapport (signal), représente la variable principale à l'entrée du procédé et le second terme (bruit), représente les variations indésirables causant la dégradation de la fonction ou l'effet indésirable de la caractéristique de sortie [21]. Le rapport (S/B) mesure les caractéristiques de qualité provenant des valeurs désirées.

Selon le cas étudié, le rapport (S/B) qu'il soit le plus faible ou le plus élevé est le paramètre décisif du niveau optimal des paramètres du processus de coupe. Dans cette étude, la plus faible rugosité de surface, effort de coupe, pression spécifique de coupe et puissance de coupe sont souhaitables.

La caractéristique (S/B) la plus faible est meilleur (**smaller the better**) a été utilisée pour (Ra, Fc, Kc et Pc), tableau (IV.1). Les caractéristiques de qualité (S/B) sont calculées avec l'équation suivante [22] :

L'optimum est une valeur minimale (plus petit c'est meilleur), la valeur cible (m) est égale à zéro, on vise la minimisation de la caractéristique de performance. La caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Taguchi recommande l'utilisation de la fonction représentée par l'équation (IV-1) :

$$\frac{S}{B} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad \text{IV-1}$$

Où : y_i : valeur mesurée de la réponse, avec : $i=1, 2, \dots, n$

n : nombre de mesure effectuée.

Tableau IV.1 : Signal / Bruit des paramètres de sorties.

N°	S/B Ra (db)	S/B Fc (db)	S/B Kc (db)	S/B Pc (db)
1	1,41162	-37,7793	-71,7587	-37,7793
2	-1,79810	-45,7895	-70,2253	-45,7895
3	-4,24375	-50,5433	-68,9597	-50,5433
4	-8,69138	-53,5607	-67,5401	-53,5607
5	0,35458	-43,2208	-71,1796	-46,7428
6	-0,58768	-39,7845	-70,2421	-43,3067
7	-4,34968	-52,3104	-68,2280	-55,8323
8	-6,23508	-52,3553	-68,8335	-55,8772
9	2,27019	-44,9413	-69,3783	-50,9619
10	-0,82785	-49,8870	-68,3034	-55,9076
11	-2,79758	-41,0961	-69,0549	-47,1167
12	-6,27734	-47,8458	-67,8458	-53,8664
13	-0,17200	-47,5509	-69,4891	-55,5097
14	-5,80069	-47,8395	-68,7547	-55,7984
15	-3,97314	-46,9984	-68,9366	-54,9572
16	-6,68908	-42,2929	-68,3135	-50,2518

IV.2.1 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs :

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios (S/B) des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des trois paramètres d'usinage (V_c , f et a_p).

La moyenne des ratios (S/B) pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios (S/B) pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur.

Les valeurs relatives du rapport (S/B) les plus grandes permettent d'identifier les facteurs optimaux. On peut estimer l'effet de chaque facteur sur le rapport (S/B) en effectuant une analyse de la variance. On peut donc ainsi identifier les facteurs les plus importants. De plus on peut déterminer la modalité optimale de chaque facteur [23].

IV.2.1.1 Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (R_a) :

Du tableau (IV.2) et de la figure (IV-1), on remarque que les paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) présentent des effets différents sur la rugosité de surface (R_a). La plus importante influence correspond à l'avance (f) avec un effet de 7.93 suivie par la profondeur de passe (a_p) avec un effet de 1.34 et en dernier lieu vient la vitesse de coupe (V_c) avec 2.25 d'effet.

Tableau IV.2 Moyenne des ratios S/B de (R_a) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	V_c	f	a_p
1	-3,3304	0,9661	-2,1657
2	-2,7045	-2,2536	-2,9235
3	-1,9081	-3,8410	-3,5023
4	-4,1587	-6,9732	-3,5102
Delta	2,2506	7,9393	1,3446
Rang	2	1	3

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (R_a) correspond aux niveaux V_{c3} , f_1 et a_{p1} . Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (R_a) sont : $V_c=120$ m/min, $f= 0.08$ mm/tr et $a_p= 0.25$ mm, figure IV-1.

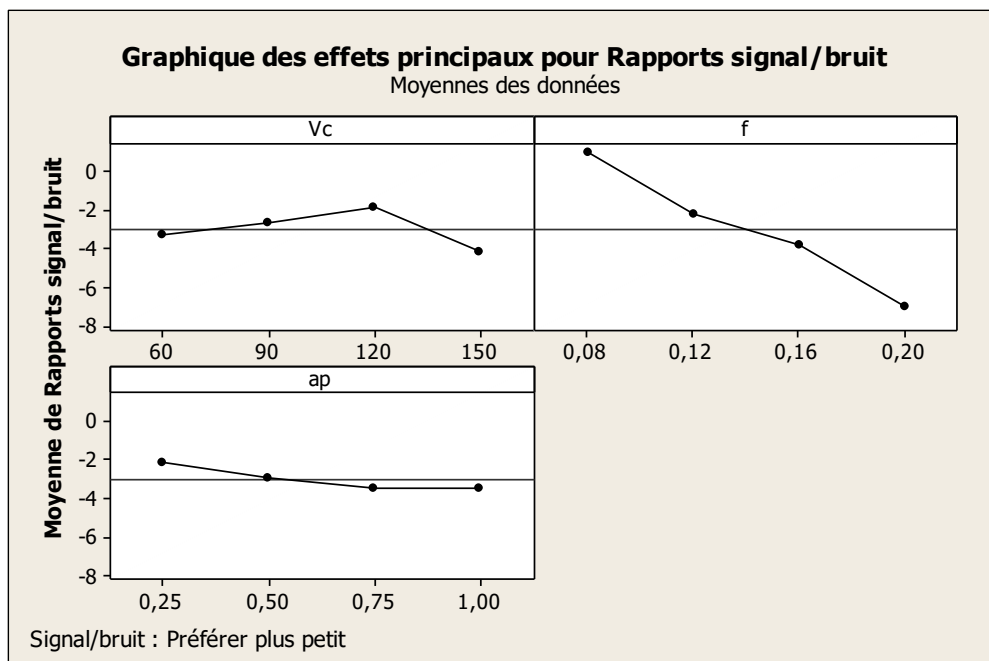


Figure IV-1 Graphique des effets principaux de Vc, f et ap pour la rugosité de surface (Ra)

IV.2.1.2 Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (Fc) :

A partir du tableau (IV.3) et la figure (IV-2), en remarque que les paramètres d'entrée (Vc, f et ap) montrent des effets différents sur l'effort de coupe (Fc). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 10.59 suivie par l'avance (f) avec un effet de 5.64 et en dernier rang la vitesse de coupe (Vc) avec un effet de 0.98.

Tableau IV.3 Moyenne des ratios S/B de (Fc) pour chaque niveau des facteurs.

Niveau	Vc	f	Ap
1	-46,92	-43,37	-40,24
2	-46,92	-45,83	-45,96
3	-45,94	-47,74	-48,92
4	-46,17	-49,01	-50,83
Delta	0,98	5,64	10,59
Rang	3	2	1

Selon Taguchi, l'optimum de la réponse (Fc) correspond aux niveaux Vc3, f1 et ap1. Les niveaux des paramètres attendus sous conditions optimales de l'effort de coupe (Fc) sont donc : Vc= 120 m/min, f= 0.08 mm et ap= 0.25 mm, figure IV-2.

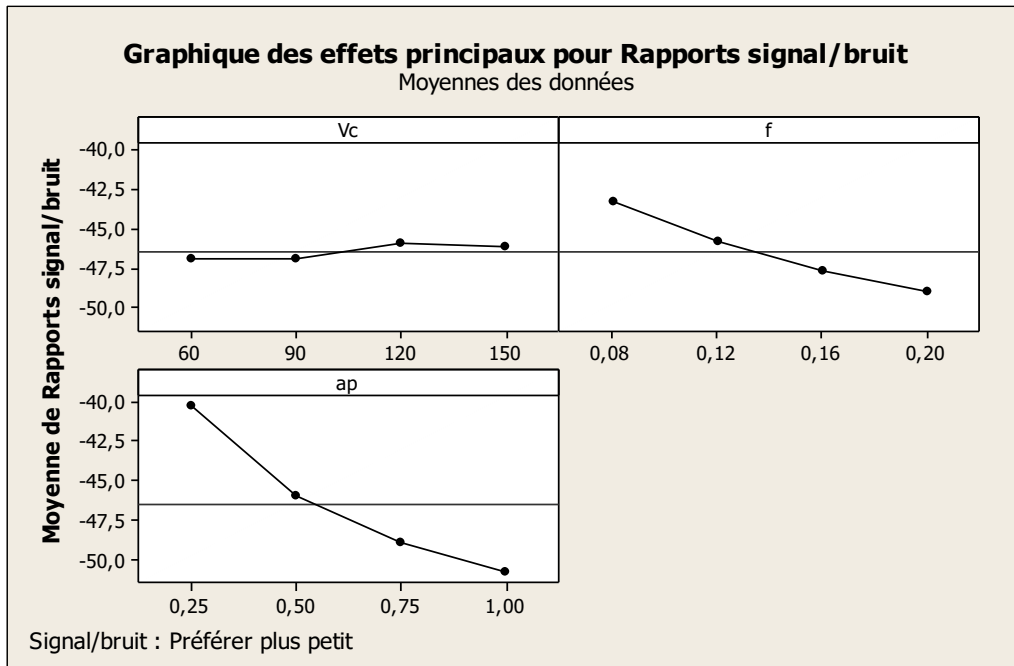


Figure IV-2 Graphique des effets principaux de Vc, f et ap pour l'effort de coupe (F_c)

IV.2.1.3 Analyse des effets principaux sur la pression de coupe spécifique (K_c) :

Du tableau (IV.4) et la figure (IV-3), on remarque que les paramètres d'usinage (Vc, f et ap) dévoilent des effets différents sur la pression de coupe spécifique (K_c). L'influence la plus significative correspond à l'avance (f) avec un effet de 2.32, suivie par la profondeur de passe (ap) avec un effet de 1.45 et en fin vient la vitesse de coupe (Vc) avec 0.98 d'effet.

Tableau IV.4 Moyenne des ratios S/B de (K_c) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	Vc	f	ap
1	-69,62	-70,45	-69,84
2	-69,62	-69,38	-69,55
3	-68,65	-68,79	-68,98
4	-68,87	-68,13	-68,39
Delta	0,98	2,32	1,45
Rang	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (K_s) correspond aux niveaux Vc3, f4 et ap4. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la pression de coupe spécifique (K_c) sont donc : Vc= 120 m/min, f= 0.20 mm/tr et ap= 1.00 mm. Les paramètres du régime de coupe sont mentionnés sur la figure (IV-3).

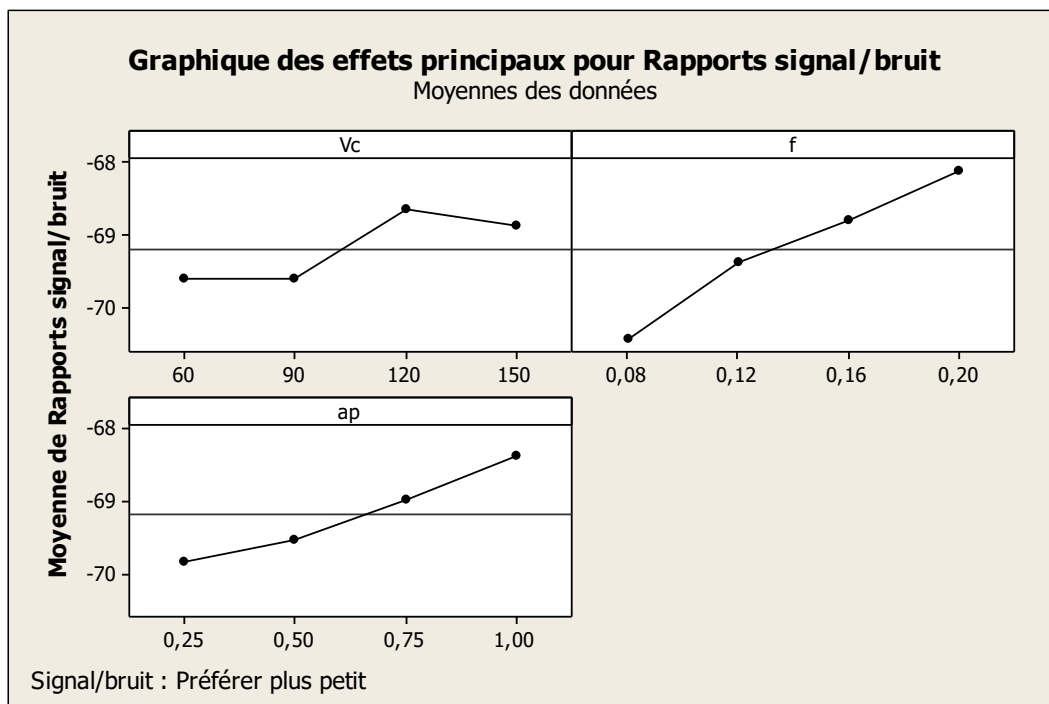


Figure IV-3 Graphique des effets principaux de Vc, f et ap pour L'effort de coupe spécifique (Kc)

IV.2.1.4 Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc) :

Du tableau (IV.5) et de la figure (IV-4), en remarque que les paramètres d'usinage (Vc, f et ap) exposent des effets différents sur la puissance de coupe (Pc). L'influence la plus importante correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 10.95 suivie par la vitesse de coupe avec un effet de 7.21 et en fin vient l'avance (f) avec 5.64 d'effet.

Tableau IV.5 Moyenne des ratios S/B de (Pc) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	Vc	f	ap
1	-46,92	-47,75	-44,61
2	-50,44	-50,20	-50,34
3	-51,96	-52,11	-53,30
4	-54,13	-53,39	-55,20
Delta	7,21	5,64	10,59
Rang	2	3	1

Dans l'approche Taguchi, l'optimum de la réponse (Pc) correspond aux niveaux Vc1, f1 et ap1. Les niveaux des paramètres prévus sous les conditions optimales de la puissance de coupe (Pc) sont donc la plus faible vitesse de coupe Vc= 60 m/min, la plus faible avance f= 0.08 mm/tr et la plus petite valeur de la profondeur de passe ap= 0.25 mm. Les paramètres du régime de coupe optimaux sont présentés sur la figure (IV-4).

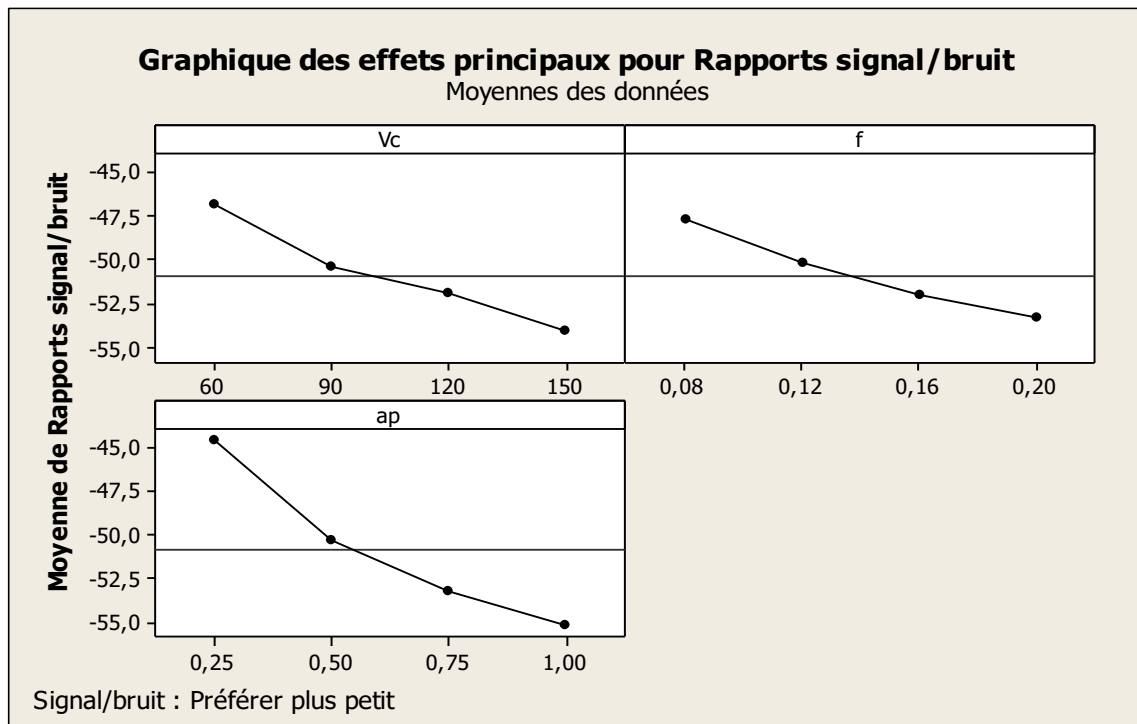


Figure IV-4 Graphique des effets principaux de Vc, f et ap pour la puissance de coupe (Pc)

IV.3 Optimisation par la méthode d'analyse des composantes principales pondérées (ACPP) :

L'analyse en composantes principales pondérées (ACPP ou WPCA en anglais **weighted principal component analysis**), ou selon le domaine d'application la transformation de Karhunen–Loève (KLT) [24], est une méthode de la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée, qui consiste à transformer des variables liées entre elles dites : corrélées en statistique, en nouvelles variables décorrélées les unes des autres.

Ces nouvelles variables sont nommées : composantes principales, ou axes principaux, elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

IV.3.1 Histoire et applications :

L'ACP prend sa source dans un article de Karl Pearson publié en 1901 [25], il prolonge ses travaux dans le domaine de la régression et des corrélations entre plusieurs variables.

Il utilise ces corrélations non plus pour expliquer une variable à partir des autres (comme en régression), mais pour décrire et résumer l'information contenue dans ces variables.

Encore connue sous le nom de transformée de **Karhunen-Loève** ou de transformée de **Hotelling**, l'ACP a été de nouveau développée et formalisée dans les années 1930 par **Harold Hotelling [26]**. La puissance mathématique de l'économiste et statisticien américain le conduira aussi à développer l'analyse canonique des corrélations, généralisation des analyses factorielles dont fait partie l'ACP.

Les champs d'application sont aujourd'hui multiples, allant de la biologie à la recherche économique et sociale, et plus récemment le traitement d'images. L'ACP est majoritairement utilisée pour :

- décrire et visualiser des données ;
- décorrélérer des données ; la nouvelle base est constituée d'axes qui ne sont pas corrélés entre eux ;
- débruiter des données, en considérant que les axes que l'on décide d'oublier sont des axes bruités.

IV.3.2 Etapes de la méthode d'analyse en composantes principales pondérées (ACPP) :

L'ACPP propose, à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de p variables quantitatives pour n unités (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables.

Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage ou bien de l'observation d'une population toute entière.

Les représentations des unités permettent de voir s'il existe une structure, non connue a priori, sur cet ensemble d'unités. L'analyse en composantes principales passe par différentes étapes qui sont mentionnées ci-dessous :

- **Normalisation des réponses, pour cela on utilise la formule suivante :**

$$x_i^*(j) = \frac{x_i(j) - \min x_i(j)}{\max x_i(j) - \min x_i(j)} \quad \text{IV-2}$$

avec : $i=1,2,\dots,$

$n; j=1,2,\dots, m$

Où : n est le nombre d'expérience et m est le nombre des variables.

Les variables après normalisation (sans dimension) prennent des valeurs comprises entre 0 et 1, tableau (IV.6), le but de cette étape est de rendre toutes les variables sous la même grandeur d'échelle.

- **Vérification de la corrélation entre les réponses de sortie normalisées par la formule suivante :**

$$R_{jl} = \frac{cov(x_i(j), x_i(l))}{\sigma(x_i(j)) \times \sigma(x_i(l))} \quad \text{IV-3}$$

avec : $j=1,2,\dots,n$,

$l=1,2,\dots,n$;

où : $cov(x_i(j), x_i(l))$ est la covariance de la séquence $x_i(j)$ est $x_i(l)$;

$\sigma(x_i(j))$ est $\sigma(x_i(l))$, sont les standards déviations (écart type) de $x_i(j)$ est $x_i(l)$ respectivement.

- **Conversion des réponses normalisées en indice non corrélé considéré comme des composantes principales :**

$$P_j = \sum_{i=1}^r a_{ji} X_i, \quad \text{IV-4}$$

avec, $j=1,2,\dots,k$,

k : est nombre des composantes,

r : est le nombre d'expériences.

a_{ij} : Coefficients des valeurs des vecteurs propres de la matrice R_{nn} , $\sum_{i=1}^r a_{ij}^2 = 1$.

- L'analyse en composantes principales pondérées (ACPP) est introduite par Datta et al. [27]. Comme chaque composante principale a sa propre variance qui peut ne pas être la même, dans cette étude, la variance de chaque composante principale est utilisée comme poids pour calculer l'indice de performance à réponses multiples (IPM). IPM peut être calculé comme :

$$IPM = \sum_{j=1}^k W_j P_j \quad \text{IV-5}$$

avec : le poids W_j est défini comme : $W_j = \frac{a_{jj}}{\sum_{i=1}^r a_{ij}}$ IV-6

- Tracer les graphiques principaux de l'indice de performance à réponse multiples (IPM) pour déterminer la combinaison optimale, la plus petite valeur de l'IPM correspond au régime optimal.

Dans le tableau (IV.6) on a présenté les valeurs du signal bruit des variables de sortie (Ra, Fc, Kc et Pc) avec leurs valeurs normalisées et cela par l'utilisation de l'équation (IV-2).

Tableau IV.6 : Rapport signal sur bruit

Ra, S/B (db)	Fc, S/B (db)	Kc, S/B (db)	Pc, S/B (db)	Ra, S/B (sans dimension)	Fc, S/B (sans dimension)	Kc, S/B (sans dimension)	Pc, S/B (sans dimension)
1,412	-37,779	-71,759	-37,779	0,922	1,000	0,000	1,000
-1,798	-45,790	-70,225	-45,790	0,629	0,492	0,363	0,558
-4,244	-50,543	-68,960	-50,543	0,406	0,191	0,663	0,296
-8,691	-53,561	-67,540	-53,561	0,000	0,000	1,000	0,129
0,355	-43,221	-71,180	-46,743	0,825	0,655	0,137	0,506
-0,588	-39,785	-70,242	-43,307	0,739	0,873	0,360	0,695
-4,350	-52,310	-68,228	-55,832	0,396	0,079	0,837	0,004
-6,235	-52,355	-68,834	-55,877	0,224	0,076	0,693	0,002
2,270	-44,941	-69,378	-50,962	1,000	0,546	0,564	0,273
-0,828	-49,887	-68,303	-55,908	0,717	0,233	0,819	0,000
-2,798	-41,096	-69,055	-47,117	0,538	0,790	0,641	0,485
-6,277	-47,846	-67,846	-53,866	0,220	0,362	0,928	0,113
-0,172	-47,551	-69,489	-55,510	0,777	0,381	0,538	0,022
-5,801	-47,840	-68,755	-55,798	0,264	0,363	0,712	0,006
-3,973	-46,998	-68,937	-54,957	0,430	0,416	0,669	0,052
-6,689	-42,293	-68,314	-50,252	0,183	0,714	0,817	0,312

La matrice carrée de corrélation (R_{nn}) entre les réponses de sortie normalisées est présentée dans le tableau (IV.7), on constate que toutes les composantes de cette matrice sont différent de zéro, ce qui prouve que les réponses sont corrélées (test de Pearson).

Tableau IV.7 : Matrice de corrélation R_{nn} :

1,000	0,5705	-0,7577	0,5140
0,5705	1,000	-0,7057	0,8244
-0,7577	-0,7057	1,000	-0,7953
0,5140	0,8244	-0,7953	1,000

L'application de l'équation (IV-4) transforme les réponses normalisées en indice non corrélé considéré comme des composantes principales, tableau (IV.8), en multipliant par les valeurs des vecteurs propres de la matrice corrélation R_{nn} , tableau (IV.9).

Tableau IV.8 Composantes principale et l'IPM.

Composantes principales				
PC1	PC2	PC3	PC4	IPM
0,618	0,621	0,168	1,433	0,612
0,623	0,546	0,046	0,627	0,577
0,658	0,537	0,026	0,081	0,588
0,674	0,539	0,242	-0,463	0,600
0,469	0,601	-0,104	0,891	0,463
0,616	0,791	0,179	0,940	0,622
0,610	0,655	-0,117	-0,221	0,551
0,464	0,520	-0,014	-0,225	0,425
0,672	0,903	-0,314	0,570	0,642
0,657	0,845	-0,306	0,010	0,608
0,606	0,909	0,251	0,551	0,625
0,573	0,814	0,199	-0,151	0,566
0,475	0,793	-0,333	0,272	0,465
0,393	0,737	0,076	-0,071	0,410
0,437	0,782	-0,016	0,078	0,449
0,500	0,913	0,442	0,170	0,547

Tableau IV.9 : Vecteurs propres de la matrice corrélation R_{nn} :

	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC3</i>	<i>PC4</i>
<i>Ra</i>	0.3526	0.2927	-0.7640	0.4542
<i>Fc</i>	-0.3449	0.6828	0.4017	0.5034
<i>Kc</i>	0.5912	0.5816	0.1815	-0.5285
<i>Pc</i>	0.6381	-0.3315	0.4711	0.5109

Tableau IV.10 : Valeurs propres de la matrice corrélation R_{nn} :

Valeur propre	3,0923	0,5635	0,2427	0,1015
Coeff. de Proportion (poids W_j)	0,773	0,141	0,061	0,025
Cumulée	0,773	0,914	0,975	1,000

IV.3.3 Analyse des effets principaux sur l'IPM :

Du tableau (IV-11) et la figure (IV-5), en remarque que les paramètres d'usinage (V_c , f et ap) dévoilent des effets différents sur l'IPM. L'influence la plus significative correspond à la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 0,1452, suivie par la profondeur de passe (ap) avec un effet de 0,0878 et en fin vient l'avance (f) avec 0,0197 d'effet.

Tableau IV-11 Moyenne des ratios de l'IPM pour chaque niveau des facteurs

Niveau	V_c	f	ap
1	0,5942	0,5455	0,6015
2	0,5152	0,5542	0,5137
3	0,6102	0,5532	0,5162
4	0,4677	0,5345	0,5560
Delta	0,1425	0,0197	0,0878
Rang	1	3	2

Selon le tableau des effets principaux, l'optimum de l'IPM correspond aux niveaux V_c3 , $f2$ et $ap1$. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales sont donc : $V_c= 120$ m/min, $f= 0.12$ mm/tr et $ap= 0.25$ mm. Les paramètres du régime de coupe sont mentionnés sur la figure (IV-5).

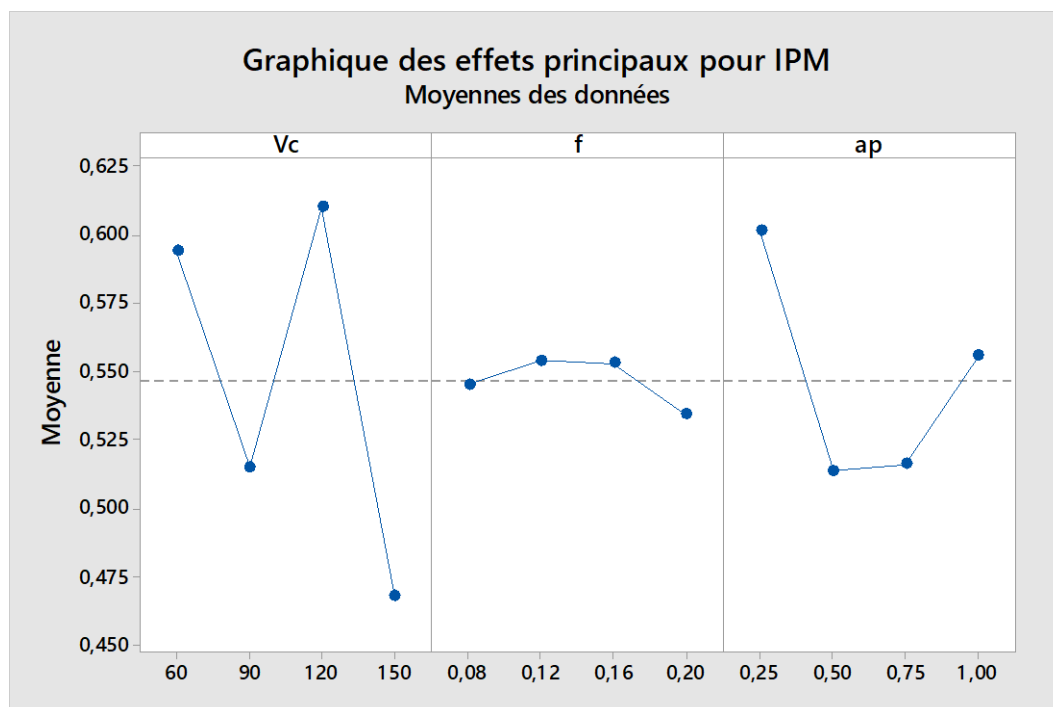


Figure IV-5 Graphique des effets principaux de l'indice de performance à réponse multiples IPM.

La méthode proposée permet le calcul et la détermination des valeurs de réponse correspondant aux facteurs et à leurs niveaux respectifs. La valeur maximale de l'IPM (IPM = **0,642**) correspondant à chaque facteur donne le niveau de facteur optimal prévu.

La figure (IV .5) montre le graphe de réponse de l'IPM. A partir du graphe de réponse, la meilleure combinaison est donnée par la combinaison : $V_c = 120$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, et $a_p = 0.25$ mm.

Pour le calcul de l'IPM on utilise le coefficient de proportionnalité (CP), tableau (IV-10), ce coefficient est calculé par l'équation (IV-6), sa formule est basé sur les valeurs propres, il joue le rôle d'une pondération (poids) pour distinguer l'importance de chaque variable (Facteur).

Dans notre travail, le but était de minimiser les paramètres Ra, Fc, Kc et Pc, pour cela, on choisit la plus grande valeur de l'IPM [28], tableau (IV-8).

IV.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d'optimisation : L'optimisation mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode Taguchi pour optimiser les paramètres de sortie Ra, Fc, Kc et Pc ; et l'optimisation multi-objectives, où nous avons utilisé la méthode d'analyse des composantes principales pondérés (ACPP) pour les mêmes paramètres de sortie.

L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée de Signal/Bruit représente la meilleure performance, dans ce cas, on obtient les régimes : ($V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr et $a_p = 0.25$ mm), ($V_c = 120$ m/min, $f = 0.08$ mm et $a_p = 0.25$ mm), ($V_c = 120$ m/min, $f = 0.20$ mm/tr et $a_p = 1.00$ mm), ($V_c = 60$ m/min, $f = 0.08$ mm/tr, $a_p = 0.25$ mm) pour Ra, Fc, Kc et Pc, respectivement.
- L'optimisation par la méthode ACP basé sur le calcul de l'IPM s'avère plus intéressante, car elle donne un seul régime de coupe qui est dans notre cas $V_c = 120$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, et $a_p = 0.25$ mm.

Conclusion générale

L'étude expérimentale dans ce travail est conduite afin de modéliser les paramètres de performances d'usinage tels que : la rugosité de surface, l'effort de coupe, l'effort spécifique de coupe et la puissance de coupe, et par la suite optimiser les conditions de coupe qui sont : la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe, lors du tournage de l'aciers inoxydable martensitique AISI 420 avec une plaquette en carbure GC2015 à triple revêtement CVD utilisée pour finition et ébauche légère.

Les résultats obtenus ont abouti aux conclusions suivantes :

- Les résultats de l'ANOVA pour la rugosité de surface (R_a) pour un niveau de confiance fixé à 95% montrent que l'avance (f) est le facteur le plus important qui affecte (R_a), sa contribution est de 77.48% suivie par la profondeur de passe (a_p) avec 3.57% de contribution, le carré de la vitesse de coupe (V_c^2) et l'interaction ($f \cdot a_p$) ont des contributions de (5.87 et 3.57) %, respectivement, qui sont jugés significatifs.
- L'analyse ANOVA des résultats indique que la profondeur de passe (a_p) est le premier paramètre qui affecte l'effort (F_c) de coupe avec pourcentage de contribution 66.44% puis l'avance de 25.60% suivie par la vitesse de coupe (V_c) de 5.20%, les interactions et le carré ($f \cdot a_p$ et a_p^2) ont des contributions de (1.41 et 0.45) %, respectivement.
- Les résultats de L'analyse ANOVA montre que l'avance est le facteur le plus prépondérant qui affect (K_c), sa contribution est de 53.89%. Le deuxième paramètre qui influe sur (K_c) est la profondeur de passe avec une contribution d'environ 24% suivie par la vitesse de coupe (V_c) avec 11,98%.
- L'analyse de la variance de la puissance de coupe (P_c) montre que le premier facteur qui influe sur la puissance de coupe est la profondeur de passe, sa contribution est 57.85% suivie par la vitesse de coupe avec une contribution de 21.96% et en dernier lieu, l'avance par une contribution de 10.64%.
- Les modèles mathématiques basés sur la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour la rugosité de surface, l'effort de coupe ,l'effort spécifique de coupe et la puissance de coupe, ayant des (R^2) de 92,87% , 99,23 % , 93.97% et 99.23%, respectivement, sont acceptable parce qu'ils sont proche à l'unité, et présentent une bonne concordance comparés avec les données expérimentales.
- La méthodologie de surface de réponse (MSR) nous a permis de tracer les graphes en trois dimensions qui permettent de visualiser la surface de réponse

de chaque paramètre mis en étude. Ils permettent aussi de choisir les régimes et les conditions d'usinage souhaitables.

- Les résultats obtenus par la Méthode de Taguchi pour une optimisation monoobjective sont :
 - ✓ $V_c = 120$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr, et $a_p = 0.25$ mm pour (Ra).
 - ✓ $V_c = 120$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr et $a_p = 0.25$ mm pour (Fc).
 - ✓ $V_c = 120$ m/min, $f = 0,20$ mm/tr, et $a_p = 1.00$ mm pour (Kc).
 - ✓ $V_c = 60$ m/min, $f = 0,08$ mm/tr et $a_p = 0.25$ mm pour (Pc).

- L'application la méthode d'analyse des composantes principales pondérés (ACPP) qui est une méthode d'optimisation multi-objective pour optimiser les paramètres de sortie Ra, Fc, Kc et Pc, en se basant sur le calcul de l'indice de performance à réponses multiples (IPM) s'avère plus intéressante, car elle donne un seule régime de coupe qui est dans notre cas $V_c = 120$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, et $a_p = 0.25$ mm.

Références Bibliographiques

- [1] **CZAPLICKI A.**, L'usinabilité et la coupe des métaux. Revue de la société royale Belge des ingénieurs et des industries, 1962, N°12. pp. 708 – 736.
- [2] **Bedrin.C ; Roumesy.B.**, Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon 1989.
- [3] CETIM. Etude de l'usinage à grande vitesse, Décision d'aide N°: 72-7-0669. 1979.
- [4] Couple Outil-Matière : Domaine de Fonctionnement des Outils Coupants.
- [5] **M. Habek**, étude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100cr6, l'école nationale supérieure d'arts et métiers, spécialité “ mécanique - matériaux - procédés ”, le 11 décembre, 2006.
- [6] **S. Bissey**, Développement d'un modèle d'effort de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités. Thèse en procédé de fabrications. ENSAM, N° d'ordre: 2005-04 2005.
- [7] **Dawson.T.G**; machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools Gorgia institute of technology 2002.
- [8] **Roumesy B.**, Détermination des lois d'usure, Machines- outils, N° 301,1975.
- [9] **Weil R** , Techniques d'usinage, Dunod, Paris 1971.
- [10] **Bouزيد, L., Yallese, M. A., Chaoui, K., Mabrouki, T., & Boulanouar, L.** (2015). Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 229(1), 45-61.
- [11] **Bruni, C., d'Apolito, L., Forcellese, A., Gabrielli, F., Gobbi, L., & Simoncini, M.** (2007). Finish milling operations of AISI 420 B stainless steel under dry and wet conditions. In Proc. of the 10th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, Eds, F. Micari and L. Filice, Reggio Calabria, Italy (pp. 275-279).

- [12] **Liew, W. Y. H., & Ding, X.** (2008). Wear progression of carbide tool in low-speed end milling of stainless steel. *Wear*, 265(1-2), 155-166.
- [13] **Noordin, M. Y., Kurniawan, D., & Sharif, S.** (2007). Hard turning of stainless steel using wiper coated carbide tool. *International Journal of Precision Technology*, 1(1), 75-84.
- [14] **El-Tamimi, A. M., & El-Hossainy, T. M.** (2008). Investigating the machinability of AISI 420 stainless steel using factorial design. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(4), 419-426.
- [15] **Berkani, S., Yallese, M., Boulanouar, L., & Mabrouki, T.** (2015). Statistical analysis of AISI304 austenitic stainless steel machining using Ti (C, N)/Al₂O₃/TiN CVD coated carbide tool. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6(4), 539-552.
- [16] **Bouزيد, L., Boutabba, S., Yallese, M. A., Belhadi, S., & Girardin, F.** (2014). Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(5-8), 879-891.
- [17] http://www.sodif-outillage.fr/wa_files/D_C3_83_C2_A9colletage_20_20Outils_20de_20coupe_20Sandvik_20Coromant.pdf
- [18] **Lakhdar BOUZID** « Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-» thèse de doctorat « université de 08 Mai 1945 Guelma »
- [19] **Chabbi, A., Yallese, M. A., Meddour, I., Nouioua, M., Mabrouki, T., & Girardin, F.** (2017). Predictive modeling and multi-response optimization of technological parameters in turning of Polyoxymethylene polymer (POM C) using RSM and desirability function. *Measurement*, 95, 99-115.
- [20] **Yusup, N., Zain, A. M., & Hashim, S. Z. M.** (2012). Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011). *Expert Systems with Applications*, 39(10), 9909-9927.
- [21] Constant, C. "La méthodologie Taguchi: introduction à la recherche technologique-gestion fonctionnelle de la qualité ou gestion «off line»." *Revue de statistique appliquée* 37.2 (1989): 47-77.

- [22] **KIVAK, Turgay.** Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 2014, vol. 50, p. 19-28.
- [23] **Chahal, M., Singh, V., & Garg, R.** (2017). Optimum surface roughness evaluation of dies steel H-11 with CNC milling using RSM with desirability function. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 8(2), 432-444.
- [24] <http://tcts.fpms.ac.be/cours/1005-07-08/codage/codage/xcodim2.pdf> [archive]
- [25] **Pearson, K.** (1901). LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2(11), 559-572.
- [26] Analysis of a Complex of Statistical Variables with Principal Components », 1933, *Journal of Educational Psychology*.
- [27] **Datta, S., Nandi, G., Bandyopadhyay, A., & Pal, P. K.**(2009). Application of PCA-based hybrid Taguchi method for correlated multicriteria optimization of submerged arc weld: a case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(3-4), 276-286.
- [28] **Sahoo, P., Pratap, A., & Bandyopadhyay, A.** (2017). Modeling and optimization of surface roughness and tool vibration in CNC turning of Aluminum alloy using hybrid RSM-WPCA methodology. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(3), 385-398.