

Université 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**

Présentée par: **HASSANI Kahina**

Master

Option : Construction Mécanique

**Modélisation et optimisation des paramètres technologiques
d'usinage en tournage de l'acier inoxydable AISI 304 par la
méthodologie de surface de réponse (RSM)**

Sous la Direction de :

- **Dr. Boucherit Sebti**
- **Pr. YALLESE Med Athmane**

Année universitaire 2018/2019

Dédicace

À la mémoire de mon défunt père, paix à son âme.

À la plus belle, merveilleuse, tendre et généreuse créature que Dieu a créée sur terre, à ma mère, celle qui m'a tout donnée, qui m'a soutenue et qui m'a toujours guidée vers le chemin du savoir et la réussite.

À ma grande famille, qui est la source de ma motivation et l'origine de ma détermination.

À mes amis, qui par un mot, m'ont donné la force d'avancer et continuer.

Je dédie ce mémoire.

Remerciements

À la fin de ce travail, je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée la foi et de m'avoir permis d'en arriver là.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Mécanique et de Structures (LMS) du département de Génie mécanique à l'Université de 08 Mai 1945 Guelma. Sous la direction du Pr Yaltese M^{ed} Athmane et Mr Boucherit Sebti, je les remercie pour la patience et la confiance qu'ils m'ont accordée, leurs pertinentes remarques et précieux conseils, leur disponibilité et bienveillance.

Je tiens aussi à remercier tous mes enseignants du département Génie mécanique, pour l'effort qu'ils m'ont contribué tout au long de mon cursus universitaire.

Je voudrais également remercier mon camarade Omar Abda Anis et Mr Kouahla, pour leur précieuse aide dans la réalisation des essais, ainsi que les ingénieurs du Laboratoire.

À tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques. Qu'ils trouvent ici le témoignage de mon profond respect.

J'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes, qui m'ont fortement encouragées et soutenues, tout au long de la réalisation de ce travail.

Résumé

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur l'état de surface du produit fini impose l'optimisation des paramètres de coupe. L'optimisation est donc une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de mémoire de fin d'étude. Il consiste à investiguer le comportement des outils en carbure métallique (GC2015) avec revêtements CVD, face à l'acier inoxydable austénitique (AISI 304).

Le présent travail commence par l'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, le rayon de bec d'outil, la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe, sur les paramètres technologiques d'usinage (l'effort de coupe, l'accélération, la rugosité de surface et la température de coupe).

Ensuite, on s'intéresse à la modélisation de ces paramètres technologiques en fonction des paramètres de régime de coupe, en utilisant la méthodologie des plans d'expériences (modélisation par la méthodologie de surface de réponse RSM). La dernière partie du travail est réservée à l'optimisation mono et multi objectif de Taguchi, afin de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs de l'optimisation.

Mots clés : plans d'expérience ; ANOVA ; modélisation ; optimisation ; Taguchi ; RSM

ملخص

يتطلب التأثير الاقتصادي لتكاليف التصنيع، والمتطلبات التقنية لحالة السطح النهائي للمنتج تحسين شروط القطع. وبالتالي، يعد التحسين عملية مهمة في عملية التشغيل الآلي، مما يتيح اختيار ظروف ملائمة للقطع. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير شروط القطع بواسطة (GC2015) مع الطلاء CVD، التي تواجه الفولاذ المقاوم للصدأ الأوستنيتي (AISI 304).

يبدأ العمل الحالي بدراسة تأثير شروط القطع، أي نصف قطر أداة القطع، وسرعة القطع، ومعدل التغذية لكل دورة، وعمق التمريرة، على معايير تقنية التصنيع. (قوة القطع، التسارع، خشونة السطح و درجة حرارة القطع).

بعد ذلك، نركز على استخراج نماذج رياضية لمعايير القطع التكنولوجية بدلالة شروط القطع، وذلك باستخدام منهجية التصميم التجريبي (نمذجة استجابة السطح RSM). الجزء الأخير من العمل محجوز لاستعمال الطريقة التحسينية في حالة وجود هدف وحيد و في حالة تعدد الاهداف للعثور على القيم المثلى لشروط القطع.

الكلمات المفتاحية : تصميم التجارب، العملية التحسينية، ANOVA, RSM, Taguchi

Table des matières

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	01
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. INTRODUCTION	03
I.2. USINABILITE	03
I.3. COUPE DES METAUX	03
I.4. PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE	04
I.4.1. Vitesse de coupe (V_c).....	04
I.4.2. Avance par tour (f).....	06
I.4.3. Profondeur de passe (a_p).....	06
I.5. OUTILS DE COUPE	07
I.5.1. Acier rapide (AR).....	07
I.5.2. Carbure de tungstène cémenté.....	07
I.5.3. Céramiques.....	08
I.5.4. Nitrure de bore cubique (CBN).....	08
I.5.5. Diamant polycristallin (PCD).....	08
I.6. PARAMETRES TECHNOLOGIQUES DE L'USINAGE	09
I.6.1. Usure des outils de coupe.....	09
I.6.2 Etat de surface.....	10
I.6.3 Efforts de coupe.....	12
I.6.4 Vibrations.....	13
I.7. Aciers Inoxydables	15
I.7.1. Définition.....	15

Table des matières

I.7.2. Classification des aciers inoxydables.....	16
I.7.3. Structure métallurgique et rôle des éléments d'addition.....	17
I.7.4. Propriétés des aciers inoxydables.....	18
I.7.5. Caractéristiques de l'acier inoxydable AISI 304.....	18
I.8. METHODES D'OPTIMISATIONS.....	19
I.8.1. Méthodologie de surface de réponse (<i>RSM</i>).....	19
I.8.2. Les réseaux de neurones artificiels (ANN).....	20
I.9. ETAT DE L'ART.....	21
I.10. CONCLUSION.....	32
CHAPITRE II : PROCEDURE EXPERIMENTALE	
II.1. INTRODUCTION.....	33
II.2. EQUIPEMENTS ET PREPARATION DES EXPÉRIENCES.....	33
II.2.1. Machine outil.....	33
II.2.2. Outils de coupe utilisés.....	34
II.2.3. Porte outil utilisé.....	35
II.2.4. Eprovettes d'usinage.....	36
II.2.5. Enregistrement des efforts de coupe.....	37
II.2.6. Etat de surface de la pièce.....	39
II.2.7. Mesure de la température.....	41
II.2.8. Acquisition des vibrations.....	42
II.3. CONDITIONS DE COUPE.....	43
II.4. PLANIFICATION DES EXPERIENCES.....	44
II.5. CONCLUSION.....	45

Table des matières

CHAPITRE III : MODELISATION DES PARAMETRES TECHNOLOGIQUES D'USINAGE

III.1. INTRODUCTION	46
III.2. RESULTATS DES ESSAIS	46
III.3. ANALYSE DE VARIANCE ANOVA	47
III.3.1. Analyse ANOVA pour Fz.....	48
III.3.2. Analyse ANOVA pour RMSE.....	50
III.3.3. Analyse ANOVA pour Ra.....	51
III.3.4. Analyse ANOVA pour T°	52
III.4. ANALYSE DE REGRESSION	53
III.4.1. Analyse de régression pour Fz.....	54
III.4.2. Analyse de régression pour RMSE.....	54
III.4.3. Analyse de régression pour Ra.....	54
III.4.4. Analyse de régression pour T°	54
III.5. REPRESENTATION GRAPHIQUE 3D	55
III.5.1. L'effort tangentiel Fz.....	55
III.5.2. RMSE de l'accélération tangentielle (a _z).....	57
III.5.3. La rugosité de surface Ra.....	59
III.5.4. La température de coupe T°	61
III.6. CONCLUSION	63
 CHAPITRE IV : OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE	
IV.1. INTRODUCTION	64

Table des matières

IV.2. OPTIMISATION PAR LA METHODE DE TAGUCHI.....	64
IV.2.1. Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel F_z	66
IV.2.2. Analyse des effets principaux sur RMSE de l'accélération tangentielle.....	67
IV.2.3. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (R_a).....	68
IV.3. OPTIMISATION PAR LA METHODE DE LA FONCTION	
DESIRABILITE.....	70
IV.4. CONCLUSION.....	72
Conclusion générale	73

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1	Principe de la coupe des métaux dans le tournage	04
Figure I.2	Vitesse de coupe	05
Figure I.3	Avance par tour	06
Figure I.4	Profondeur de passe	06
Figure I.5	Formes d'usure sur les outils de coupe	10
Figure I.6	Décomposition d'une surface mesurée	11
Figure I.7	Rugosité moyenne arithmétique Ra	11
Figure I.8	Paramètres de rugosité	12
Figure I.9	Les composantes de l'effort de coupe	13
Figure I.10	Schéma d'un neurone unique	21
Figure I.11	Comparaison des modèles de prédictions pour Ra.	24
Figure I.12	Comparaison des modèles de prédictions pour Fv	24
Figure I.13	Comparaison des modèles de prédictions pour Ra	25
Figure I.14	Comparaison des modèles de prédictions pour Fv	25
Figure I.15	Vibration du porte outil dans la direction tangentielle	26
Figure I.16	Vibration du porte outil dans la direction axial	26
Figure I.17	Comparaison entre la sortie du modèle et la vibration de l'outil de coupe mesurée directement	27
Figure I.18	Comparaison entre Ra prédictive et réelle	28
Figure I.19	Comparaison entre l'usure d'outil prédictive et réelle	29
Figure I.20	Comparaison la puissance utile prédictive et réelle	29
Figure I.21	Principe de vibration en TUA	30
Figure I.22	Montage expérimental	30
Figure I.23	surface microtopographie 3D pour TUA et TC	31

Liste des figures

Chapitre II

Figure II.1	Tour à charioter et à fileter modèle SN40C	33
Figure II.2	Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015)	34
Figure II.3	Plaquette de coupe revêtue	35
Figure II.4	Porte plaquette utilisé	35
Figure II.5	Eprouvette utilisée pour les essais	36
Figure II.6	Chaîne d'acquisition des efforts avec le dynamomètre	38
Figure II.7	Rugosimètre Mitutoyo Modèle SurfTest SJ-210	40
Figure II.8	Thermomètre infrarouge AMPROBE IR-730	41
Figure II.9	Vibromètre Modèle VM-6360	42
Figure II.10	Acquisition des mesures	42

Chapitre III

Figure III.1	Effort de coupe (F_z) en fonction d' a_p et f	55
Figure III.2	Effort de coupe (F_z) en fonction de V_c et f	56
Figure III.3	Effort de coupe (F_z) en fonction de V_c et a_p	56
Figure III.4	RMSE en fonction de V_c et f	57
Figure III.5	RMSE en fonction de V_c et a_p	58
Figure III.6	RMSE en fonction de f et a_p	58
Figure III.7	Rugosité de surface (R_a) en fonction de V_c et f	59
Figure III.8	Rugosité de surface (R_a) en fonction de V_c et a_p	60
Figure III.9	Rugosité de surface (R_a) en fonction de f et a_p	60
Figure III.10	Température de coupe (T°) en fonction de f et V_c	61
Figure III.11	Température de coupe (T°) en fonction d' a_p et V_c	62
Figure III.12	Température de coupe (T°) en fonction d' a_p et f	62

Liste des figures

Chapitre IV

Figure IV.1	Graphique des effets principaux de r , V_c , a_p et f sur l'effort (F_z)	67
Figure IV.1	Graphique des effets principaux de r , V_c , a_p et f sur RMSE.	68
Figure IV.3	Graphique des effets principaux de r , V_c , a_p et f sur R_a .	69
Figure IV.4	Diagramme d'optimisation de réponses multiples (F_z , RMSE, R_a)	72

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1	Composition de l'acier inoxydable austénitique AISI 304	19
Tableau I.2	Résultats de comparaison des modèles de prédictions pour Ra	23
Tableau I.3.	Résultats de comparaison des modèles de prédictions pour Fv	24

Chapitre II

Tableau II.1	Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées	34
Tableau II.2	Caractéristiques de porte outil utilisé	36
Tableau II.3	Composition chimique de l'acier X2CrNi18-10	37
Tableau II.4	Caractéristiques physico-mécaniques de l'acier X2CrNi18-10	37
Tableau II.5	Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 18	44
Tableau II.6	Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 18 essais	45

Chapitre III

Tableau III.1	Résultats des essais	47
Tableau III.2	Analyse de la variance (ANOVA) pour Fz	49
Tableau III.3	Analyse de la variance (ANOVA) pour RMSE	50
Tableau III.4	Analyse de la variance (ANOVA) pour Ra	51
Tableau III.5	Analyse de la variance (ANOVA) pour T°	52

Chapitre

Tableau IV.1	Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées	65
---------------------	---	----

Liste des tableaux

Tableau IV.2	Moyenne des ratios S/N (Fz) pour chaque niveau des facteurs	66
Tableau IV.3	Moyenne des ratios S/N (RMSE) pour chaque niveau des facteurs.	67
Tableau IV.4	Moyenne des ratios S/N (Ra) pour chaque niveau des facteurs.	69
Tableau IV.5	Réponse d'optimisation des différentes valeurs de sorties (Fz, RMSE, Ra)	71

Nomenclature

Nomenclature

ANOVA : Analyse de la variance.

RSM : Méthodologie de surface de réponse.

CVD : dépôt vapeur chimique

AR : Acier Rapides.

CBN : Nitrure de bore cubique.

α : Angle de dépouille principal (degré).

γ : Angle d'attaque (degré).

λ : Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré).

χ : Angle de direction principal (degré).

R^2 : Coefficient de corrélation.

Ra : Rugosité moyenne arithmétique (μm).

Rt : Rugosité totale (μm).

Rz : Profondeur moyenne de la rugosité (μm).

Vc : Vitesse de coupe (m/min).

ap: Profondeur de passe (mm).

f : Avance par tour (mm/tr).

Fx : Effort de coupe axial (N).

Fy : Effort de coupe radial (N).

Fz : Effort de coupe tangentiel (N).

r : Rayon de bec de l'outil (mm).

Introduction générale

Introduction générale

Les différentes techniques de fabrication est un sujet important dans le domaine industriel. L'usinage par enlèvement de matière occupe un espace présumé dans ce domaine, c'est une méthode qui permet de produire des formes complexes et très précises sans changement des caractéristiques de la matière usinée.

Généralement, les recherches mondiales portent un commun intérêt, de trouver les conditions optimales d'usinage, et cela, afin d'atteindre l'objectif économique d'une part, et technologique d'autre part. C'est dans ce cadre que, l'étude concernant le tournage des aciers inoxydables austénitiques s'impose. Le tournage des aciers inoxydables austénitiques est tant convoité par la recherche, qu'il est devenu une actualité majeure dans le domaine de l'industrie moderne. Dans ce contexte, le travail réalisé dans ce mémoire a pour but, l'étude de l'usinabilité de l'acier inoxydable austénitique (AISI 304) en termes d'efforts de coupe, de rugosité, de vibration et de température de coupe, mais également, la modélisation mathématique et l'optimisation des paramètres d'usinage, afin de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statiquement significatif sur ces termes et les optimiser.

Ce travail est organisé en quatre chapitres distincts.

Le premier chapitre, représentant l'étude bibliographique, est divisé en deux parties, la première concerne les définitions de l'usinabilité, le principe de la coupe des métaux, les différents paramètres de coupe en tournage, ainsi que les outils de coupe. Cette partie est aussi consacrée à des généralités sur les paramètres technologiques de l'usinage, des aciers inoxydables, et des méthodes de modélisation. La seconde partie est réservée à l'état de l'art.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons les équipements et les conditions expérimentales utilisés 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 de la coupe.

Le troisième chapitre, concerne une étude statistique pour un plan L_{18} , l'analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux basée sur la méthodologie de surface de réponse a été réalisée en utilisant le logiciel MiniTab.18. L'objectif est de déterminer des

Introduction générale

modèles mathématiques qui permettent à la prédiction de l'effort tangentiel, la rugosité de surface, ainsi que l'accélération tangentielle et la température de coupe.

Le quatrième et dernier chapitre, nous élaborons deux formes d'optimisation, celle de Taguchi dite mono-objective, ensuite l'optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction de désirabilité. L'objectif est le choix des conditions de coupe les plus convenables afin d'obtenir les résultats désirés pour les paramètres technologiques voulus.

Enfin, nous clôturons avec une conclusion générale.

I.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est dédié à l'étude bibliographique, qui, est divisée en deux parties. La première dans laquelle on expose les définitions de l'usinabilité, le principe de la coupe des métaux, les différents paramètres de coupe en tournage, ainsi que les outils de coupe. Egalement dans cette partie, nous parlons des paramètres technologiques de l'usinage, des aciers inoxydables et enfin des méthodes de modélisation.

La seconde partie concerne l'état de l'art.

I.2. USINABILITE

L'usinabilité peut être définie comme l'aptitude d'un matériau à subir une mise en forme par enlèvement de matière. Les techniques d'usinage sont nombreuses, la plupart pouvant être appliquées aux aciers inoxydables [1].

Elle est aussi, généralement, définie en termes de trois facteurs : puissance, usure d'outil, et intégrité de surface. Ainsi, un matériau présente une bonne usinabilité lorsqu'il est usiné avec moins d'énergie, moins d'usure d'outil et un bon état de surface est produit sans altération [2]

Le terme « usinabilité » est donc employé pour décrire la facilité avec laquelle un matériau est usiné sous un ensemble de conditions de coupe.

I.3. COUPE DES METAUX

Afin de mieux placer les techniques, on peut dire que la coupe des métaux consiste à façonner et finir une surface de pièce de configuration donnée par un ensemble d'opérations à effectuer à l'aide de machines-outils *figure 1.1*. Cette technique ancienne est souvent appelé coupe onéreuse, dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux). Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, objet de notre étude, représente à lui seul 33% du domaine de l'usinage par enlèvement de copeaux [3].

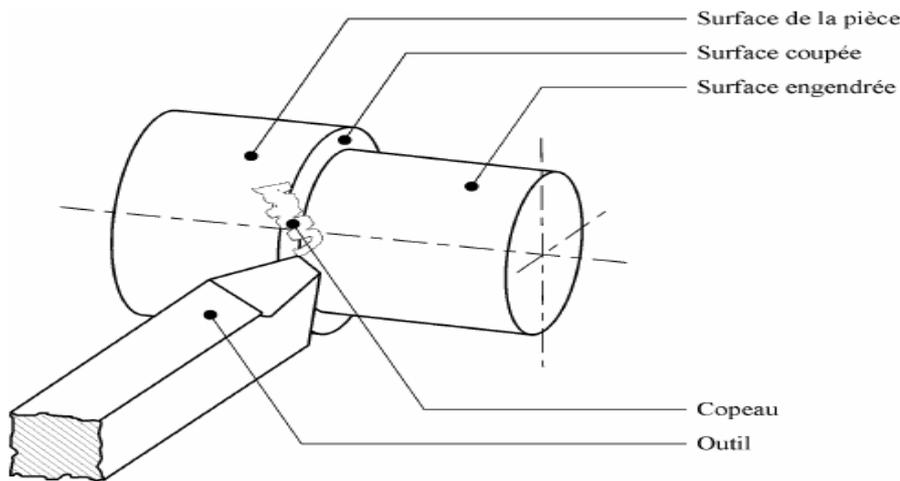


Figure I.1 Principe de la coupe des métaux dans le tournage [4].

I.4. PARAMETRES DE COUPE EN TOURNAGE

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe sont une notion plus large qui inclut les paramètres géométriques et cinématiques de coupe en plus d'autres facteurs qui influencent l'usinage tels que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, les fluides de coupe, l'état de la machine-outil, etc. [4]

I.4.1. Vitesse de coupe (V_c)

Pour le tournage, la vitesse de coupe est le chemin parcouru en mètres par minute, par un point placé sur le diamètre extérieur de la pièce *figure I.2*. Ce que l'on appelle en usinage "vitesse de coupe" correspond en cinématique à la vitesse circulaire uniforme, elle est régie par la formule suivante : [5]

$$n = \frac{V_c}{\pi \cdot d} \quad (I.1)$$

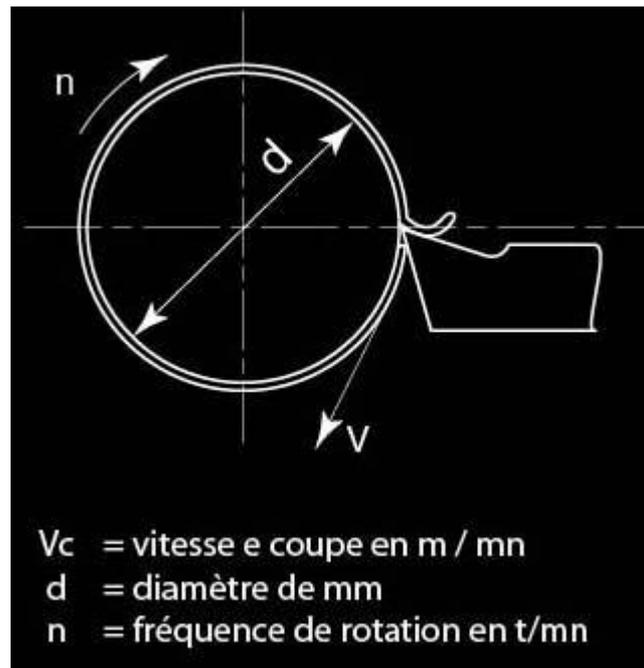


Figure I.2 Vitesse de coupe [5.]

La vitesse est donc une distance dans une unité de temps.

Le choix des vitesses de coupe dépend des facteurs suivants : [5]

- **De la matière à usiner**

généralement, plus la matière est tendre, plus la vitesse est élevée.

- **De la nature de la matière de l'outil de coupe**

- **Du genre d'usinage**

Ébauche, finition, tournage, filetage ... etc...

- **De la profondeur de passe**

Plus la quantité de matière est importante moins la vitesse de coupe est grande.

- **De la forme de la pièce et de sa fixation, du serrage de l'outil de coupe**

La rigidité du montage de l'outil de coupe ainsi que le bon serrage de la pièce (tenir compte de la forme pour des raisons de déformations) ont une influence sur les vitesses de coupe.

- **Du lubrifiant**

Une abondante lubrification permet d'augmenter la vitesse de coupe

- **Du type de machine**

Une machine robuste peut supporter des vitesses de coupe plus élevée par rapport à une machine de construction plus légère.

I.4.2. Avance par tour (f)

En tournage, l'avance est le déplacement en millimètre de l'outil pendant un tour de la pièce. C'est aussi l'épaisseur du copeau *figure I.3*. Comme pour le choix de la vitesse de coupe, le choix des avances dépend de la matière à usiner, mais aussi de la profondeur de passe, nature du métal de l'outil de coupe, l'état de surface à obtenir...etc...[5]

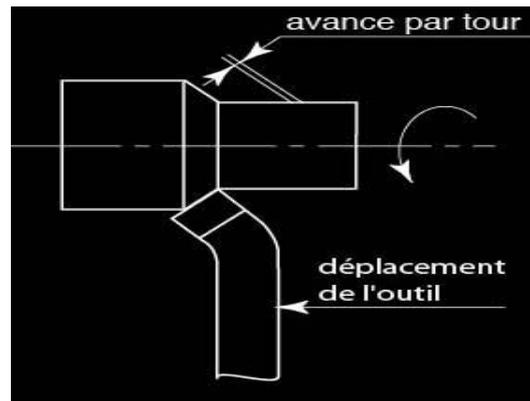


Figure I.3 Avance par tour [5].

I.4.3. Profondeur de passe (ap)

En chariotage, la profondeur de passe (a_p) *figure I.4* est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée Perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arrête de l'outil [4]

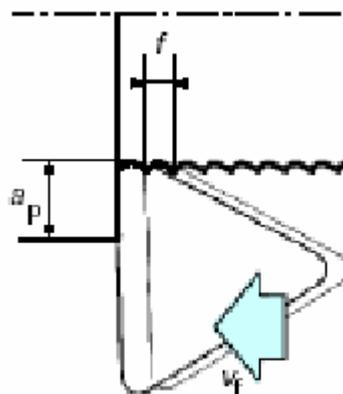


Figure I.4 Profondeur de passe a_p [4].

I.5. OUTILS DE COUPE

un outil de coupe doit être tenace pour résister aux chocs rencontrés lors de l'usinage, il ne doit pas se déformer plastiquement et sa déformation élastique doit être minimale afin de garantir une bonne précision de coupe, il doit être dur pour résister à l'usure et doit supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe.

Le choix d'un matériau pour un outil est le résultat d'un certain nombre de compromis. La modification des conditions de coupe, du procédé d'usinage ou du matériau de la pièce suffit à bouleverser ce compromis. C'est pourquoi il existe une grande variété de matériau de coupe. Les différents matériaux pour outils de coupe peuvent être regroupés selon différentes catégories :

- les aciers rapides (AR),
- les carbures,
- Les cermets,
- les céramiques,
- les matériaux ultra-durs (Nitrure de bore cubique CBN, diamant polycristallin PCD). [6]

I.5.1. Acier rapide (AR)

Est utilisé depuis le début du siècle et il constitue encore aujourd'hui un matériau très utilisé. Il possède la ténacité la plus élevée et demeure donc un choix privilégié pour les opérations instables et à coupe interrompue. De plus, il permet des arêtes très tranchantes, qui permettent la réalisation d'usinage sans bavures, à cet égard il est particulièrement intéressant pour l'usinage des polymères. [6]

I.5.2. Carbure de tungstène cémenté

Est devenu le matériau le plus utilisé. Ce substrat cémenté est obtenu par frittage de poudres métalliques constituées d'une « matière » dure (à base de carbure de tungstène WC) et d'un liant fusible lors du frittage (cobalt). Il présente un bon compromis dureté-ténacité et peut être utilisée à des températures supérieures à celles de l'acier rapide. En plus du carbure de tungstène (WC) et du Co, le carbure peut contenir dans des proportions variables des carbures additifs : souvent du carbure de titane (TiC), du carbure de tantale (TaC), du carbure de Niobium (NbC) pour les plus utilisés. Ces carbures additionnels

permettent de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier. Le cobalt confère au substrat sa ténacité.

Le mot cermet provient de la contraction des mots céramique et métal CERAmique / METal. Dans l'application qui nous intéresse ici, **cermets**, est le nom générique utilisé pour les carbures à base de titane, parmi lesquelles figurent le carbure de titane TiC, le carbonitride de titane TiCN et le nitrure de titane TiN. Comparé aux carbures cémentés, les cermets possèdent une meilleur thermiques mais au détriment de la ténacité

I.5.3. Céramiques

Sont chimiquement très stables et peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Ils offrent une dureté à chaud très élevé. Ils sont principalement composés d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 ou de nitrure de silicium (Si_3N_4). Leur application est principalement orientée vers la fonte grise, l'acier trempé et certains alliages exotiques. Leur ténacité est faible. Ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'attaque de la matière. Ils sont principalement utilisés en tournage.

I.5.4. Nitrure de bore cubique (CBN)

Possède une dureté extrêmement élevée, devancée seulement par le diamant. A chaud, cette dureté demeure excellente et il peut être utilisé jusqu'à $2000^{\circ}C$. Moins fragile que la céramique, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion. Son coût élevé le limite principalement à la production en série. Les cristaux de CBN, similaires à ceux du diamant synthétique, sont maintenus par un liant céramique ou métallique. Un liant céramique offre une ténacité faible mais une meilleure stabilité chimique et une excellente résistance à l'usure. Le liant métallique offre les caractéristiques inverses (bonne ténacité et moins résistant à l'usure). On recommande le CBN pour l'usinage de pièces dont la dureté est supérieure à 48HRC.

I.5.5. Diamant polycristallin (PCD)

Est un diamant synthétique qui possède une dureté proche de celle du diamant naturel (dureté 10 dans l'échelle de Mohs). Ce matériau est très onéreux et ses applications sont limitées à l'usinage des matériaux non-ferreux. La haute résistance à l'usure par abrasion les rend économiquement viables pour l'usinage des matériaux hautement abrasifs tels que les composites et le graphite. [6]

I.6. PARAMETRES TECHNOLOGIQUES DE L'USINAGE

I.6.1. Usure des outils de coupe

L'usure est définie par la matière qui sort définitivement du contact outil – pièce. L'usure de l'outil est la conséquence directe des sollicitations très sévères que subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces sollicitations sont de nature mécanique, accentuées par les effets thermiques. [6]

En fonction des conditions d'usinage (la nature de l'outil, du matériau usiné, du type d'usinage et des conditions de coupe) nous pouvons avoir les types d'usures suivantes : [7]

- **Usure en dépouille** : Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil **figure I.5 (a)**.
- **Usure suivant la surface d'attaque** : elle se caractérise par une cuvette dite "cratère " formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci **figure I.5 (b)**. Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau.
- **Fissuration de l'arête** : On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques **figure I.5 (c)**.
- **Rupture (cassure) de la pointe** : c'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide), **figure I.5 (d)**.
- **Déformation plastique** : la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée, **figure I.5 (e)**.
- **Entaille** : Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un

effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure, *figure I.5 (f)*. [7]

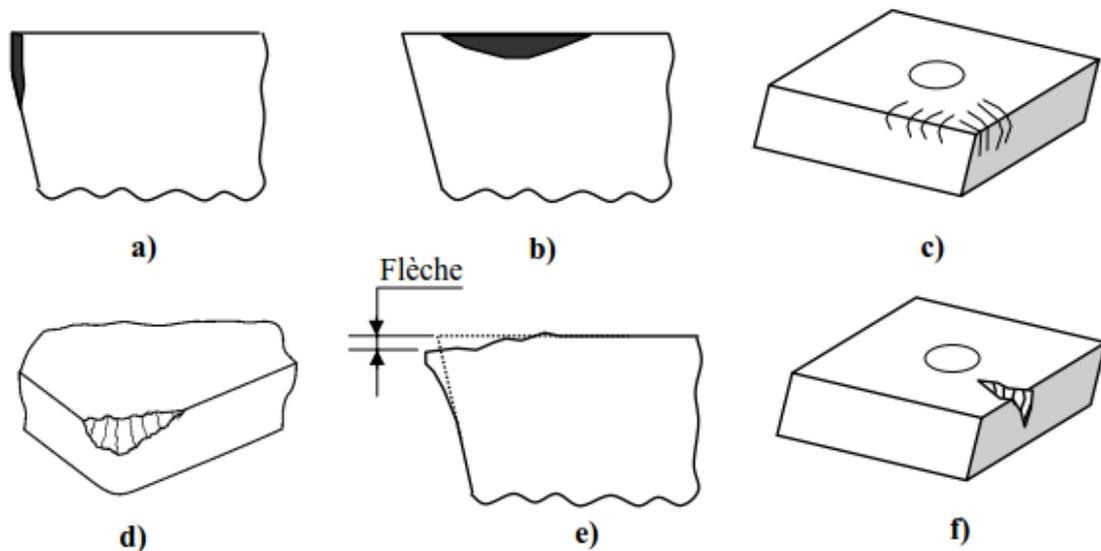


Figure I.5 Formes d'usure sur les outils de coupe [7].

I.6.2 Etat de surface

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D) ou une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (mesure 3D, exemple *figure I.6*). Le relief d'une surface mesuré en 2D peut-être représenté sous la forme d'une fonction $z(x) = h$ où x est la position du point courant sur la longueur d'évaluation de la surface et h la mesure de la hauteur du défaut à cette position. [8]

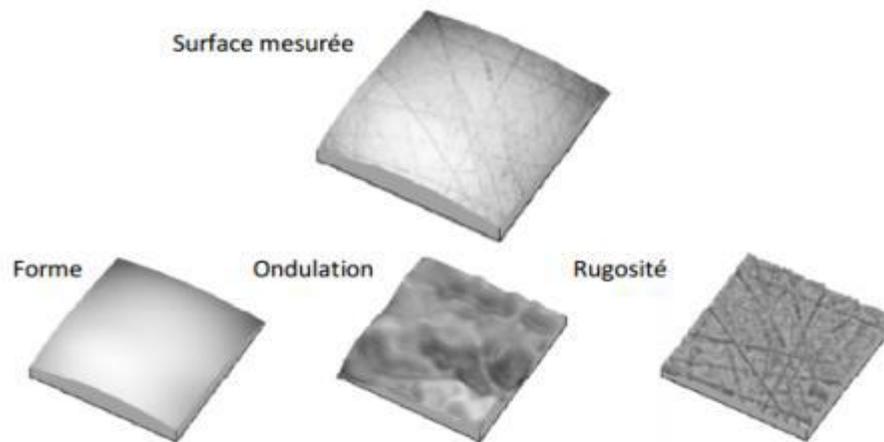


Figure I.6 Décomposition d'une surface mesurée [8].

Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est (Ra). Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation. Son expression est la suivante :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (I.2)$$

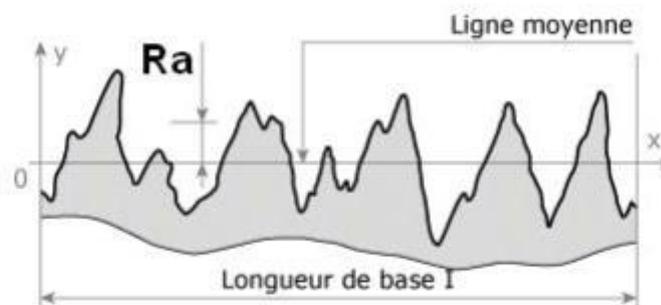


Figure I.7 Rugosité moyenne arithmétique Ra [8].

Les procédés courants d'usinage permettent d'obtenir un Ra compris entre 1,6 et 6,3 μm . En tournage et en fraisage, un certain nombre de facteurs agissent particulièrement sur la rugosité. L'état de surface en tournage de finition dépend principalement de l'avance (f) et du rayon de bec (r). Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit tenir compte de ces influences.

D'autres paramètres classiques sont définis comme suit : Rp : la hauteur maximale du pic le plus élevé observé par rapport à la ligne moyenne sur la longueur analysée Rt : rugosité

totale, la hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur la longueur analysée R_q : écart moyen quadratique [7]

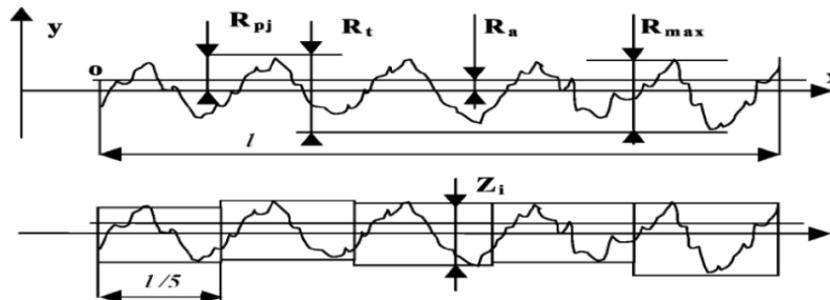


Figure I.8 Paramètres de rugosité.

I.6.3 Efforts de coupe

L'effort de coupe (F_c), appelé effort « générateur de puissance », est décisif, tout comme la vitesse de coupe, pour le calcul de la puissance de coupe ou d'entraînement de la machine-outil.

L'importance de l'effort de coupe dépend essentiellement de la matière à usiner et des Conditions de coupe actives.

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage *figure I.9*.

- F_z : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.
- F_x : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.
- F_y : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure. [8]

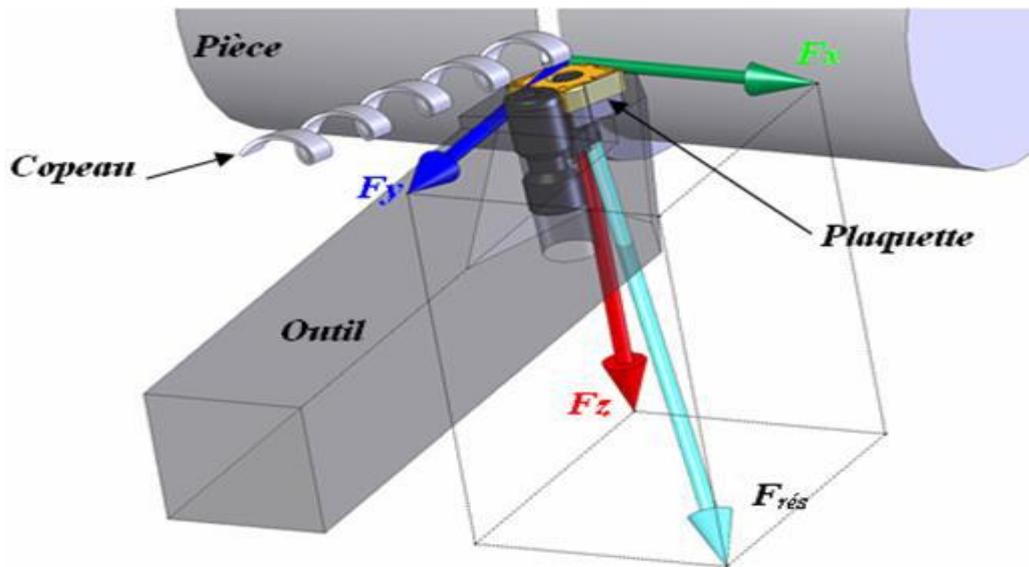


Figure I.9 Les composantes de l'effort de coupe [8].

I.6.4 Vibrations

Les vibrations, phénomène dit aussi broutement, du système machine- montage-outil pièce dégradant la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Un broutement important diminue la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil.

La compréhension et la maîtrise de ces problèmes ont suscité de nombreuses recherches scientifiques, principalement focalisées sur l'instabilité de la coupe dont la principale manifestation est le broutement. Elles ont permis d'identifier les causes de ces phénomènes et de proposer des modèles prédictifs. Ainsi, elles ont révélé l'existence de plages de vitesses de rotation de l'outil où le comportement vibratoire de l'usinage est satisfaisant, en particulier aux hautes vitesses et ce même pour de fortes conditions d'engagement des outils de coupe. Suivant leurs origines, elles peuvent être classées en deux types : les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau) [9]

A) Les vibrations forcées

Les vibrations forcées sont propres à la coupe discontinue comme le fraisage, mais elles peuvent éventuellement apparaître lors du tournage de pièces n'ayant pas de

symétrie de révolution. Provoquées par une source dans la machine-outil ou en dehors, mais agissant indépendamment de l'opération de coupe. Ce genre apparaît sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- la variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe intermittente (tournage d'un arbre à rainure longitudinale par exemple) ou à une surépaisseur variable,
- les forces centrifuges d'inertie (effets de balourds) dues au manque d'équilibre des masses en rotation (ébauche, mandrin, poulies, rotors des moteurs électriques, de roulements défectueuxetc.),
- la transmission d'ébranlements vibratoires par les machines avoisinantes,
- les chocs dus aux vibrations ou à la précision insuffisante des surfaces actives des pièces des organes de transmission (usure des pièces d'un mécanisme, manque de précision des engrenages), aux engagements et aux changements de régimes brusques.

Il est à noter qu'il existe d'autres sources de vibrations forcées au sein même de la coupe, on peut citer entre autres : l'hétérogénéité de la matière usinée, les irrégularités géométriques de la surface à usiner, Mais ces causes sont la plupart du temps du second ordre par rapport à la cause première qu'est la discontinuité de la coupe. La répercussion sur la qualité de l'usinage est dans ce cas gênante, mais on peut y remédier par une installation adéquate de la machine-outil, par des équilibrages mieux exécutés par une construction plus rigide du bâti de la machine, etc.....

Les vibrations forcées sont à l'origine de mauvais usinages quand la fréquence d'excitation est égale à ou un sous-multiple de fréquence propre de la structure. La valeur du coefficient d'amortissement est alors déterminante pour limiter l'amplitude de vibration.

B) Les vibrations auto-excitées (broutement)

Les vibrations auto-excitées, aussi appelées auto-vibrations ou vibrations régénératives, provenant du phénomène de coupe lui-même. Ces vibrations, néfastes pour la coupe, sont la principale cause du broutement. Elles sont à éviter absolument en usinage car elles dégradent fortement la qualité de la surface usinée et peuvent induire des

efforts de coupe élevés. Ces vibrations apparaissent quand le système usinant n'a plus la capacité de suivre la dynamique imposée par la coupe. Ses causes essentielles sont :

- la variation de la force de frottement du copeau glissant sur l'outil et de l'outil taillant l'ébauche,
- l'écroûissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur,
- les variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui modifient en cours d'usinage l'angle de coupe et la surface de la section droite de la tranche cisillée,
- le contact avec frottement sur la face de dépouille de l'outil et de la variation de l'épaisseur de matière enlevée. Ces variations excitent le mouvement vibratoire de la structure qui en retour, entretient les fluctuations de ces phénomènes.

L'intensité des vibrations auto-excitées est définie par le métal en œuvre et ses propriétés mécaniques, les facteurs mécaniques d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil et la raideur du système machine-montage-outil-pièce. Les difficultés d'application des bases théoriques pour prévoir complètement les conditions d'apparition du broutage; viennent d'abord de la complexité des systèmes mécaniques réels qui possèdent un grand nombre de degrés de liberté et qui se modifient au cours du travail de la machine-outil (déplacements des chariots, usure des outils, échauffements des paliers,.. .) En outre, les structures des machines comportent des non linéarités (des pièces en contact discontinu, frottements solides, variation des efforts avec l'amplitude de déplacement) et des variations de caractéristiques dans le temps (amortissements, serrages ...) qui s'échappent au calcul.

Le perçage vibratoire auto-excité constitue une exception car, dans cette technologie les vibrations sont mises à profit pour fragmenter les copeaux et faciliter ainsi leur évacuation. [9]

I.7. Aciers Inoxydables

I.7.1. Définition

Les aciers inoxydables constituent une vaste famille d'alliages métalliques qui ont tous en commun de contenir du fer et du chrome. Suivant leur teneur en chrome dont le seuil minimal est de 10,5 %, ce qui leur assure une résistance aux agents oxydants

(résistance à la corrosion), et les traitements métallurgiques (trempe, revenu) qu'ils ont subis, ils présentent un large éventail de propriétés [10].

I.7.2. Classification des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables peuvent être classés en trois familles :

- **Les 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.
- **Les 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).
- **Les 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. [6]
- **Les aciers austéno-ferritiques** : Ont une structure mixte ferrite/austénite et sont chargés en éléments d'alliage : 22 à 25 % de chrome, 5 à 6 % de nickel, 2 à 3 % de molybdène. Ils ont de bonnes propriétés mécaniques et surtout une très bonne résistance à la corrosion. [8]

I.7.3. Structure métallurgique et rôle des éléments d'addition

- **Le chrome** : Les aciers inoxydables sont des alliages fer-chrome ou plus exactement acier-chrome c'est-à-dire fer-carbone-chrome. Conformément à la norme européenne EN 10088-1, un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone. C'est le chrome qui donne aux aciers inoxydables leur résistance à la corrosion.
- **Le carbone** : La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % en masse afin d'éviter la formation de carbures (notamment de carbures de chrome qui est un composé chimique très stable avide de chrome) qui sont préjudiciables au matériau. Par exemple, le carbure $Cr_{23}C_6$ qui peut apparaître dans l'austénite 18-9 a un effet négatif vis-à-vis de la corrosion intergranulaire (appauvrissement très important en chrome aux abords des carbures formés provoquant la perte du caractère d'inoxidabilité par captation du chrome).
- **Le nickel** : Favorise la formation de structures homogènes de type austénitique. Il apporte les propriétés de ductilité, de malléabilité et de résilience. A éviter soigneusement dans le domaine du frottement.
- **Le manganèse** : Est un substitut du nickel. Certaines séries d'alliages austénitiques ont été développées permettant de faire face aux incertitudes d'approvisionnement du nickel
- **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 où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) avant que ne se forme le carbure de chrome préservant de ce fait le caractère inoxydable de l'acier en évitant l'appauvrissement en chrome de la matrice aux abords des zones carburées. [6]

I.7.4. Propriétés des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables présentent une grande variété de structure et donc de propriétés physiques, mécaniques et surtout chimiques. La principale propriété des aciers et leur excellente résistance à la corrosion, ce qui leur donne une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux [8]

A) propriété de mise en forme Les aciers inoxydables peuvent être fabriqués et transformés en utilisant un large éventail de technologie et sont entièrement (recyclables) à la fin de leur vie utile. Son usinage est beaucoup plus difficile que celui de certains matériaux d'où un coût considérablement plus élevé.

B) propriétés physiques Ces aciers possèdent :

- Une masse volumique de l'ordre 7850Kg/m³.
- Une capacité thermique de 0.5J/g.0C pour T=0 0C a 100 0C.
- Une conductivité thermique de 16.2 W/m.K a 1000C.
- Une conductivité thermique de 21.4 W/m.K a 5000C [6].

C) propriétés mécaniques Les aciers inoxydables représentent les propriétés mécaniques suivantes [6] :

- La dureté, Rockwell B est : 79 HRB ;
- La résistance à la traction est : 558 Mpa ;
- L'allongement à la rupture est : 50 %
- Le module de Yong est : 2.105 Mpa

D) Propriété électrique La résistivité électrique des aciers inoxydables est : $7.4 \cdot 10^{-5}$ ohm.Cm. [6]

I.7.5. Caractéristiques de l'acier inoxydable AISI 304

L'acier inoxydable austénitique le plus utilisé est le X5CrNi18-10 (avec une désignation américaine AISI 304) dont la composition en masse est présentée dans le

tableau I.1. C'est un acier austénitique au Cr-Ni du type 18/10, non magnétique, acier tenace à froid, température de formation de calamine 8500C. [8]

Tableau I.1. Composition de l'acier inoxydable austénitique AISI 304

Fe	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	N
reste	Max 0.07	17- 19.5	8-10.5	≤ 1	≤ 2	≤0.045	≤0.015	≤0.11

I.8. METHODES DE MODELISATION

La modélisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération.

La modélisation de processus d'usinage est habituellement difficile, où les aspects suivant sont exigés :

- La connaissance du processus de coupe ;
- Les équations empiriques reliant la vie d'outil, les forces, la puissance, etc., pour développer des contraintes réalistes ;
- Spécifications des possibilités d'usinage ;
- Développement d'un critère efficace d'optimisation ;
- La connaissance des techniques mathématiques et numériques de modélisation. En usinage, les tâches de modélisation sont critiques, parce qu'il comporte beaucoup de processus complexes. Habituellement, la petite variation d'un paramètre cause les changements notables des autres. D'ailleurs, quelques variables, telles que l'effort de coupe ou l'usure d'outil, dépendent fortement des conditions de coupe [6].

Dans ce qui suit nous allons présenter les méthodes de modélisation les plus utilisées dans les publications les plus récentes dans ce domaine.

I.8.1. Méthodologie de surface de réponse (RSM)

Cette méthode combine les techniques mathématiques et statistiques, elle examine la relation entre un ou plusieurs paramètres d'entrée et de sortie. C'est un modèle d'approximation seulement mais beaucoup utilisé pour sa facilité d'estimation et d'application. [11]

La méthodologie de surface de réponse est une approche générale pour obtenir la valeur maximale d'une variable dépendante (de réponse) qui dépend de plusieurs variables (explicatives) indépendantes. Cette technique combine la conception des expériences (CdE) et la régression multiple.

Les techniques courantes de CdE sont basées sur les principaux suivants :

- **Comparaison** : aides détectant la variation indésirable des résultats mesurés.
- **Randomisation** : diminuer l'influence des facteurs non contrôlés sur les résultats mesurés.
- **Réplication** : laisse estimer la variation des résultats mesurés.
- **Blocage** : réduit les sources connues mais non pertinentes de variation entre les unités et augmente, en conséquence, la précision dans l'évaluation de la source de variation.
- **Orthogonalité** : s'assure que le contraste sera effectué de telle manière que toute l'information puisse être saisie. [6]

I.8.2. Les réseaux de neurones artificiels (ANN)

C'est une structure logique avec des éléments multi traitements, qui sont connectés par des poids d'interconnexion. Cette méthode est utilisée quand la compréhension complète des mécanismes physique est très difficile ou impossible à saisir. [11]

Les réseaux de neurones se composent de neurones fonctionnant en parallèle. Ces neurones sont inspirés du système nerveux biologique. Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau est fortement influencé par la connexion des neurones entre eux. Il est possible d'entraîner un réseau de neurones pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères par exemple) en ajustant les valeurs des connexions (ou poids) entre les éléments (neurones). [6]

La *figure I.10* représente un neurone simple avec le vecteur des entrées \mathbf{p} , le vecteur des poids \mathbf{W} , le biais associé au neurone b , la fonction de transfert f et enfin la sortie a .

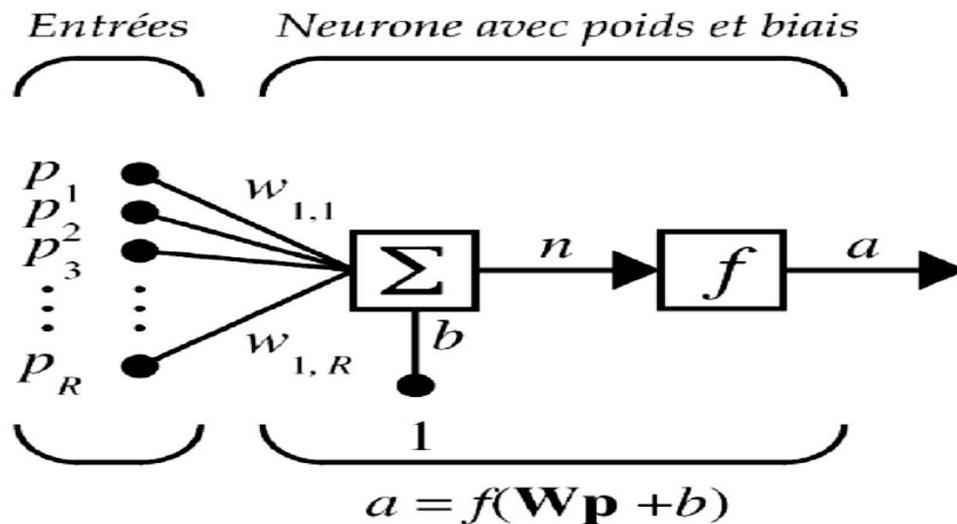


Figure I.10 Schéma d'un neurone unique [6].

I.9. ETAT DE L'ART

Dans cette partie nous parlerons des travaux effectués à propos de l'usinage des aciers inoxydables, comme nous exposerons les recherches faites concernant les différentes méthodes d'optimisation.

Analyse statistique de l'usinage en acier inoxydable austénitique AISI 304 à l'aide d'un outil en carbure revêtu de Ti (C, N) / Al₂O₃ / TiN

Dans cet article, Berkani et al [12] ont 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), la puissance de coupe (P_c), la force de coupe spécifique (K_c) et la rugosité de surface (R_a).

La machine utilisée dans les travaux en cours est le tour TOS TRENCIN, modèle SN40C, son étude est basé sur un plan d'expérience complet L16 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) .

Les chercheurs 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), et d'en déduire la puissance de coupe (P_c) et la force de coupe spécifique (K_c) à partir des équations mathématiques.

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 Ra et la force de coupe Fc ont des valeurs comprises entre 5,81% et 8,57%, et de 0,16% jusqu'à 11,02%, respectivement.

Sur la modélisation de la rugosité de surface et la force de coupe lors du Tournage d'Inconel 718 à l'aide d'artificiel réseau de neurones (ANN) et réponse méthodologie de surface (RSM): précision et avantage

Hamid Tebassi et al [13] ont travaillé sur la comparaison de la performance de réponse en surface (RSM) et les méthodologies de réseau de neurones (ANN) avec leurs capacités de modélisation, de prévision et de déterminer si l'approche fournit une supériorité, une capacité et une amélioration évidente de modèles de rugosité de surface et de force de coupe en termes de meilleure coefficient de détermination (R^2), erreur quadratique moyenne inférieure (RMSE) et erreur prédictive de modèle (MPE).

L'étude comparative, grâce à l'analyse de variance (ANNOVA), a apporté que :

Les modèles ANN se révèlent être capable de meilleures prévisions de rugosité de surface et force de coupe dans la gamme qu'ils ont formé, que les modèles RSM en termes de meilleure corrélation et d'erreur plus faible.

En effet, le modèle de prédiction RSM pour Ra présente un coefficient de détermination (R^2) inférieur à celui qui est présenté par ANN, mais supérieur concernant l'erreur principale moyenne (RMSE) et le modèle d'erreur prédictive (MPE), les résultats sont regroupés dans le *tableau I.2* et la *figure I.11*

Tableau I.2. Résultats de comparaison des modèles de prédictions pour Ra[13]

	RSM	ANN
R^2	0.9333%	0.98926%
RMSE	1.1929%	0.04081%
MPE	10.6549%	2.37288%



Figure I.11 Comparaison des modèles de prédictions pour Ra.[13]

De même pour la force de coupe Fv, les résultats sont présentés dans le **tableau 1.3** et la **figure 1.12** ci-dessous :

Tableau I.3. Résultats de comparaison des modèles de prédictions pour Fv[13]

	RSM	ANN
R^2	0.9883%	0.99979%
RMSE	8.7939%	0.63012%
MPE	3.5398%	0.19985%

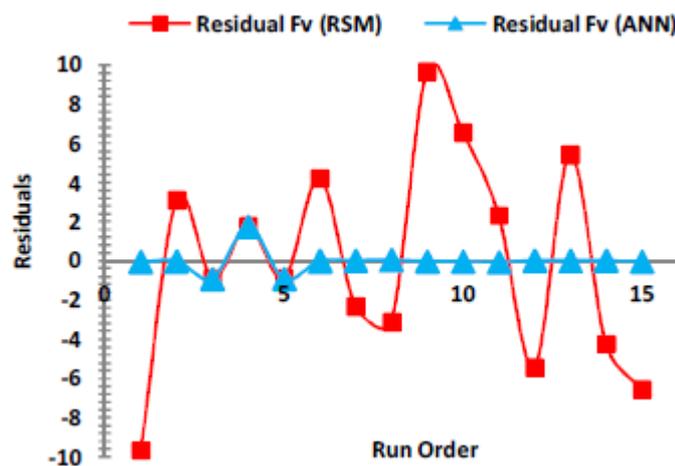


Figure I.12 Comparaison des modèles de prédictions pour Fv[13]

De plus, les auteurs ont révélé que le modèle de prédiction ANN fournit un maximum d'avantage en termes de précision de 10,1% pour Fv et 24,38% pour Ra comparé au modèle de prédiction RSM, résultats dans les *figures I.13 I.14* suivantes :

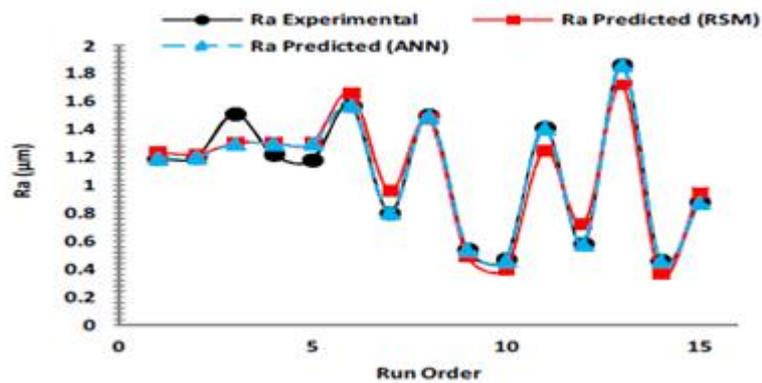


Figure I.13 Comparaison des modèles de prédictions pour Ra.[13]

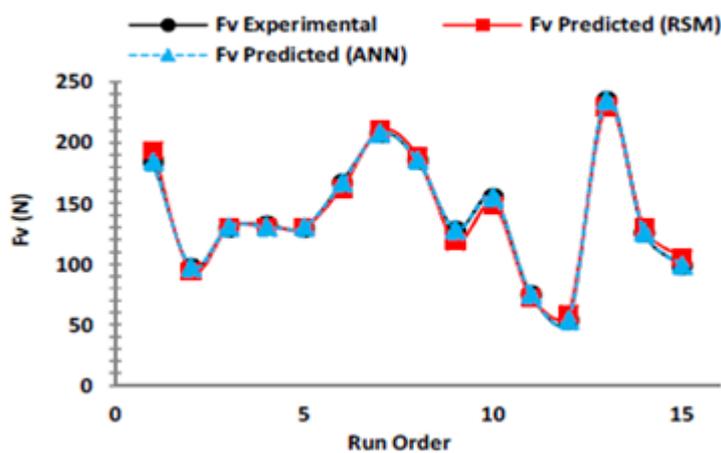


Figure I.14 Comparaison des modèles de prédictions pour Fv.[13]

Prévision et contrôle de la vibration de l'outil de coupe dans les tours à commande numérique avec Anova et Ann.

Au cours de cette étude, des expériences ont été menées sur un tour à commande numérique avec un insert de carbure CCGT-0930FL. Des variables d'usinage, telles que la vibration tangentielle et axiale de l'outil de coupe, ont été mesurées dans des processus d'usinage CNC basés sur le signal de vibration collecté via un système d'acquisition de

données LabVIEW. Et contrôlé en utilisant du néoprène en matériau viscoélastique (VEM).

L'effet des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, la profondeur de coupe et le taux d'avance sur les variables d'usinage est évalué. D'après les résultats des tests, S. S. Abuthakeer et al [14] ont pu tirer ces conclusions :

- D'après l'analyse modale, les pics de signaux présentent une réponse dans une plage de fréquences propres particulière de 3 400 Hz sans aucun amortisseur. Les fréquences propres ont été décalées à 2150 Hz avec un amortisseur en néoprène.

- On observe que la fréquence propre s'éloigne de la fréquence de fonctionnement, évitant ainsi la condition de résonance de l'outil de coupe.
- Le rapport d'amortissement de l'outil de coupe a été amélioré de 0,0149 à 0,06976 avec un coussinet en néoprène, ce qui indique que l'utilisation d'un coussinet pour outil de coupe contribue à améliorer la durée de vie de l'outil.
- Les vibrations dans les directions tangentielle et axiale ont été réduites de 60% et de 78,5% avec le coussinet d'amortissement en néoprène.
- L'amortissement passif peut offrir des avantages substantiels en termes de performances dans de nombreux types de structures et de machines, souvent sans pénalité significative en termes de poids ou de coûts.

Les *figures I.15 et I.16* ci-dessous montrent les résultats :

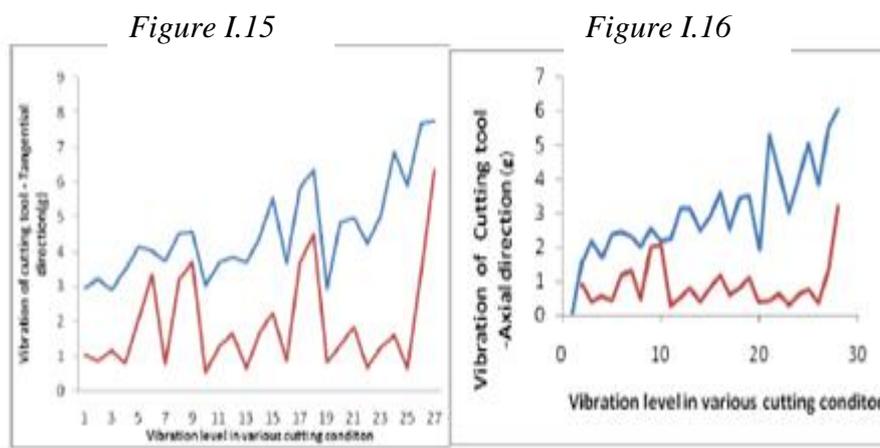


Figure I.15 vibration du porte outil dans la direction tangentielle.

Figure I.16 vibration du porte outil dans la direction axial.

Les auteurs ont signalé aussi que :

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée et il a été constaté que la profondeur de coupe (contribution de 38%), la vitesse de coupe (contribution de 35%) et le taux d'alimentation (contribution de 27%) avaient une influence plus grande sur la vibration de l'outil de coupe. Les résultats expérimentaux démontrent que la profondeur de coupe et la vitesse de coupe sont les principaux paramètres des trois facteurs contrôlables (profondeur de coupe, vitesse de coupe et vitesse d'avance) qui influencent la vibration de l'outil de coupe lors du tournage de l'aluminium Al 6063.

Les résultats du modèle de réseau neuronal ont montré une correspondance étroite entre la sortie du modèle et la vibration de l'outil de coupe mesurée directement. Cette méthode semble également présenter des potentiels de prédiction pour les profils non expérimentaux. La méthodologie ANN consomme moins de temps pour une précision accrue.

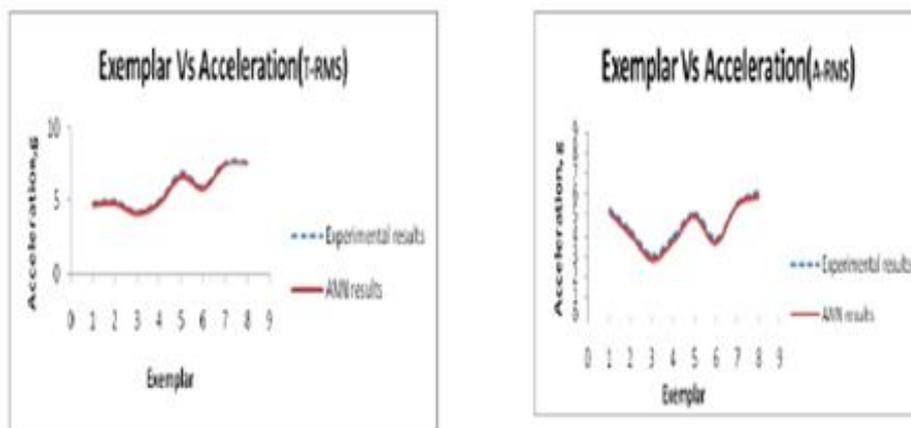


Figure I.17 Comparaison entre la sortie du modèle et la vibration de l'outil de coupe mesurée directement.

Modélisation prédictive des opérations de tournage à l'aide des méthodes RSM, ANN et SVR

Amit Kumar Gupta [11], a développé des modèles empiriques de prévision de la rugosité de surface, de l'usure des outils et la puissance requise à partir d'expériences de retournement.

La méthodologie de surface de réponse, les réseaux de neurones artificiels et la régression du vecteur de support ont été utilisés pour construire de nouveaux modèles de prédiction.

Les méthodologies de RA, RSM, ANN et SVR ont été discuté dans cette étude, et ont été comparés et évalués à l'aide de statistiques descriptives et de tests d'hypothèses.

Il a été constaté que les modèles ANN et SVR sont bien meilleurs que les modèles RA et RSM pour prévoir :

- **La rugosité de surface**

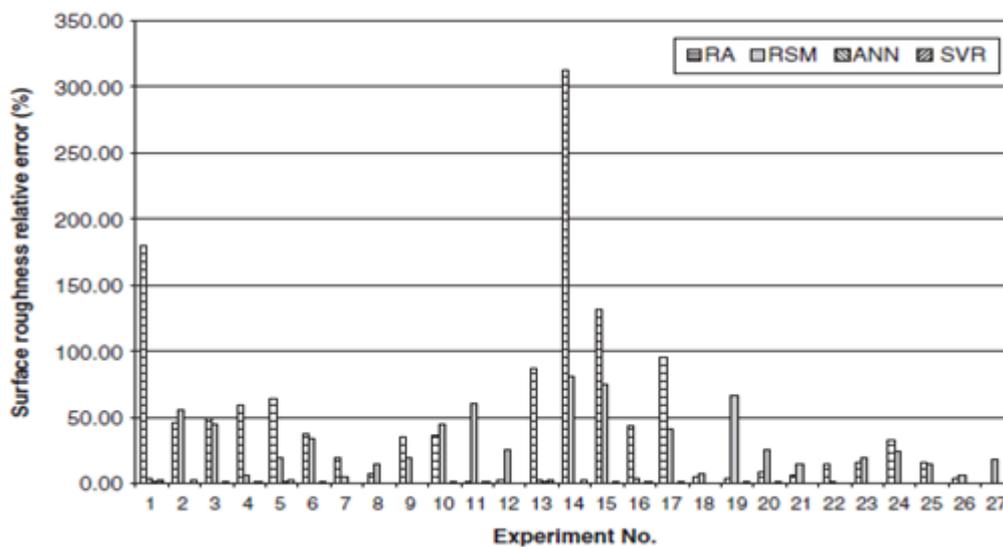


Figure I.18 Comparaison entre Ra prédictive et réelle.

- **L'usure des outils**

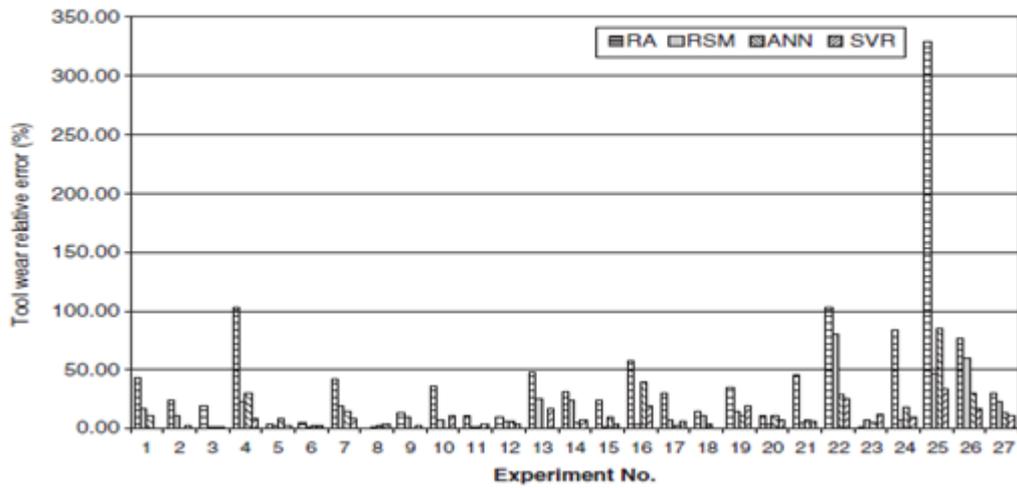


Figure I.19 Comparaison entre l'usure d'outil prédictive et réelle.

- La puissance requise

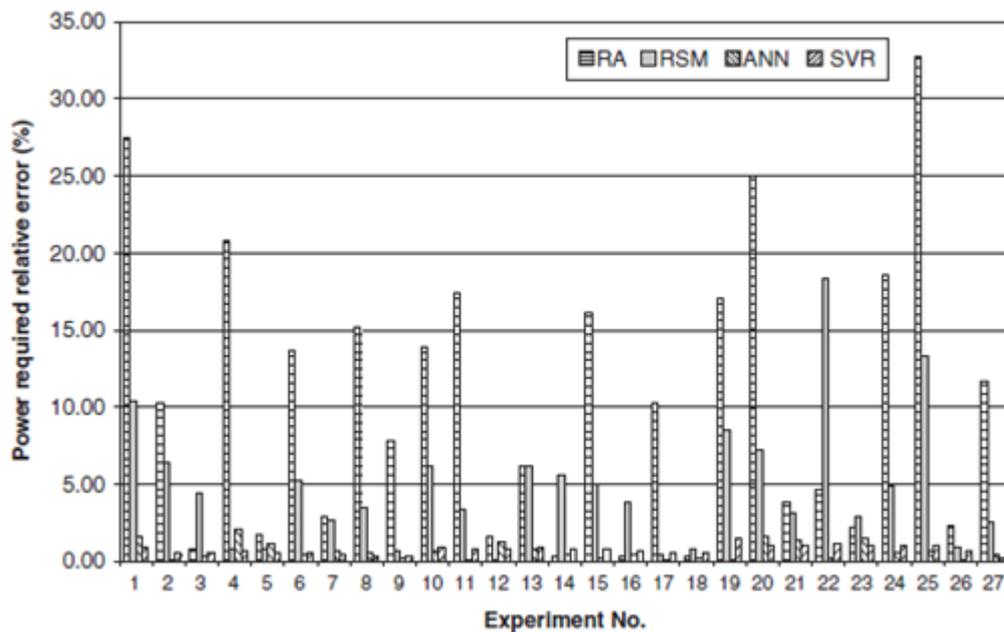


Figure I.20 Comparaison la puissance utile prédictive et réelle.

Les méthodes de modélisation et les modèles ainsi développés dans cet article peuvent aider la simulation, la prédiction, l'optimisation et l'amélioration des paramètres de réponse et sélection des paramètres de processus en opérations de tournage.

Etude expérimentale du tournage ultrasonique en vibration assistée (TUA) de l'acier austénitique inoxydable AISI 304

Ping Zou et al [15], on fait une étude expérimentale pour la détermination de la topographie en tridimensionnelle (3D) et de la rugosité de surface de la pièce usinée d'un acier inoxydable austénitique AISI 304, pour deux cas d'usinage : tournage ultrasonique en vibration assistée (TUA), *figure I.21*, et au tournage conventionnel (CT) dans un tour de type CA6140, *figure I.22*.

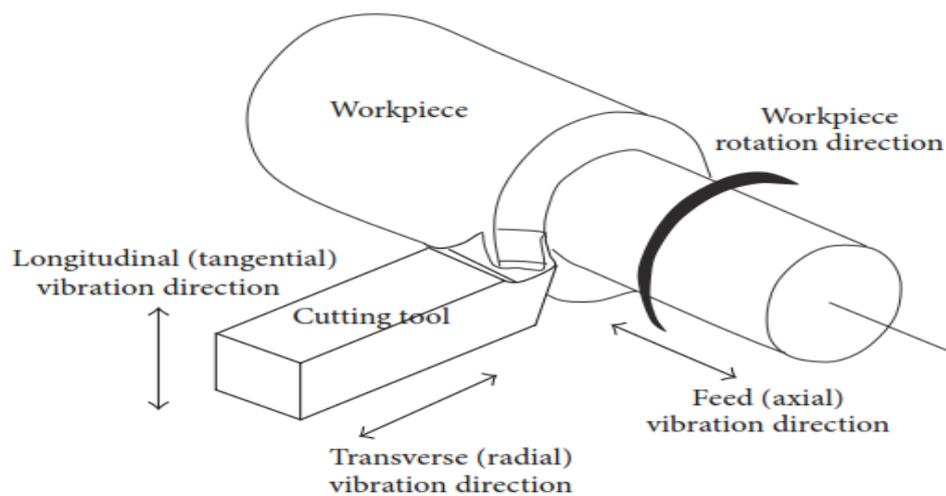


Figure I.21 Principe de vibration en TUA.



Figure I.22 Montage expérimental.

Les paramètres mise en étude sont : La moyenne arithmétique des aspérités absolue, Sa est la racine des moyennes des carrés de Sa qui est Sq , pour caractériser et analyser la morphologie en 3D des surfaces usinées.

Les auteurs ont tiré les conclusions suivantes :

La comparaison du TUA et TC pour AISI 304 a montré que dans le cas TC les stries de surface étaient assez irrégulières, et il y avait des distinctions remarquables entre les rainures le long de la surface usinée, pour la surface obtenue par UAT la distribution globale des grains a été bien répartie sous forme convexe et concave, **figure I.23**

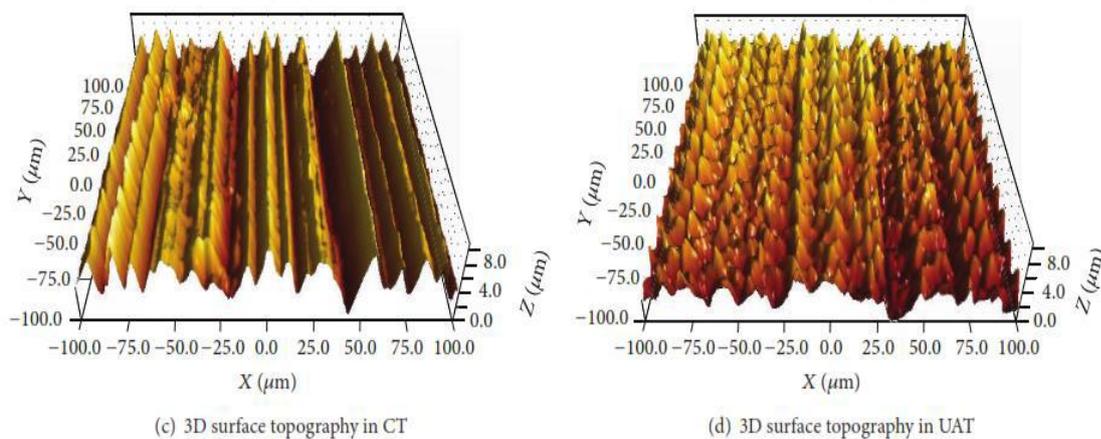


Figure I.23 surface microtopographie 3D pour TUA et TC.

- La topographie de surface est meilleure pour une amplitude ultrasonore de $A=23$ μm comparer aux autres amplitudes dans le cas TUA et aussi pour le TC.
- Dans le TUA de AISI 304, les paramètres d'usinage V_c , a_p , f et le A ont un effet significatif sur la rugosité de surface de la pièce usinée, plus l'amplitude ultrasonore A est faible, plus la rugosité de surface est importante, aussi, la rugosité de surface diminue préalablement et augmente ensuite avec l'augmentation de l'amplitude ultrasonique.
- La rugosité de surface est meilleure à une vitesse de coupe $V_c = 21$ m / min pour un régime de coupe de $f = 0,08$ mm / tr, $a_p = 0,1$ mm et $A = 23$ μm , cependant, à une vitesse de coupe $V_c = 25$ m / min, le meilleur régime devient : $f = 0,1$ mm / tr, $A = 15\mu\text{m}$ ou bien $A = 23\mu\text{m}$.

- Les valeurs de Sa et Sq pour TUA sont supérieures à ceux de TC, lorsque des paramètres de procédé appropriés sont choisis lors du processus du tournage, les rugosités de surface dans UAT sont meilleures que dans TC en choisissant les régimes de coupe suivantes :
 - i) $f = 0,08 \text{ mm / tr}$, $ap = 0,1 \text{ mm}$, $Vc = 22 \text{ m / min}$, et $A = 15 \sim 23 \mu\text{m}$;
 - ii) $f = 0,08 \sim 0,2 \text{ mm / tr}$, $ap = 0,1 \text{ mm}$, $Vc = 21 \text{ m / min}$, et $A = 23 \mu\text{m}$;
 - iii) $f = 0,08 \text{ mm / tr}$, $ap = 0,05 \sim 0,2 \text{ mm}$, $Vc = 21 \text{ m / min}$, et $A = 23 \mu\text{m}$;
 - iv) $f = 0,08 \text{ mm / t}$, $ap = 0,1 \text{ mm}$, $Vc = 20 \sim 23 \text{ m / min}$, et $A = 23 \mu\text{m}$.
- Le bon choix du régime de tournage pour TUA, améliore la rugosité de la surface d'une manière remarquable, l'utilisation des conditions de coupe de $A = 23\mu\text{m}$, $f = 0.08 \text{ mm / tr}$, $ap = 0.05 \text{ mm}$ ou bien $ap = 0.1 \text{ mm}$ et $Vc = 21 \text{ m / min}$ donnent une topographie et une rugosité de surface satisfaisante pour l'emploi dans l'application de l'engineering.

I.10. CONCLUSION

L'étude bibliographique présentée, fait savoir que le but du tournage, est l'obtention d'un bon état de surface, tout en optimisant les paramètres de coupe et prolongeant la durée de vie de l'outil.

On conclut également que, les aciers inoxydables, de part leur résistance à la corrosion, sont beaucoup utilisés dans plusieurs domaines industriels.

II.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des outils mis en œuvre pour une approche expérimentale qui consiste en une présentation du matériel qui sert à l'étude expérimentale. Les mesures concernent les efforts de coupe, la rugosité de surface, la température de coupe et le phénomène de vibration de l'outil de coupe. Nous présentons aussi des informations concernant le couple outil-matière ainsi que les conditions de coupe et le plan d'expérience utilisé.

II.2. EQUIPEMENTS ET PREPARATION DES EXPÉRIENCES

Pour la réalisation des expériences, il est nécessaire de préparer les équipements, les éprouvettes ainsi que les outils de coupe.

II.2.1. Machine outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais *figure II.1* est un tour à charioter et à fileter de la société Tchèque «TOS TENCIN» modèle SN 40 d'une puissance de 6.6KW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de 45 à 2000 tr/min et d'avances de 0.08 à 6.4 mm/tr.



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

II.2.2. Outils de coupe utilisés

Les outils de coupe utilisés sont des plaquettes en carbure amovibles de la marque **Sandvik Coromant** de forme carré *figure II.2 et II.3*, à fixation par trou central avec les caractéristiques suivantes :

Tableau II.1. Informations relatives aux plaquettes de coupe utilisées.

Diamètre du cercle inscrit	12.7 mm
Désignation sandvik	2015
Longueur effective du tranchant	12.496mm
Revêtement	CVD, Ti(C, N)+Al₂O₃+TiN
Angle de dégagement majeur	0 degré
Rayon de coin	0.4mm et 0.8mm
Épaisseur d'insertion	4.763mm
Poids	10g

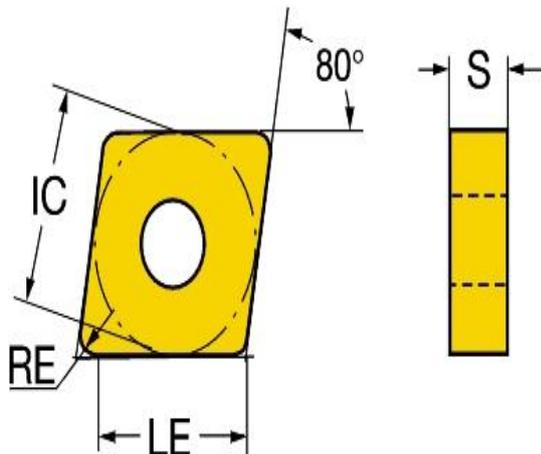


Figure II.2 Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement CVD (GC2015)

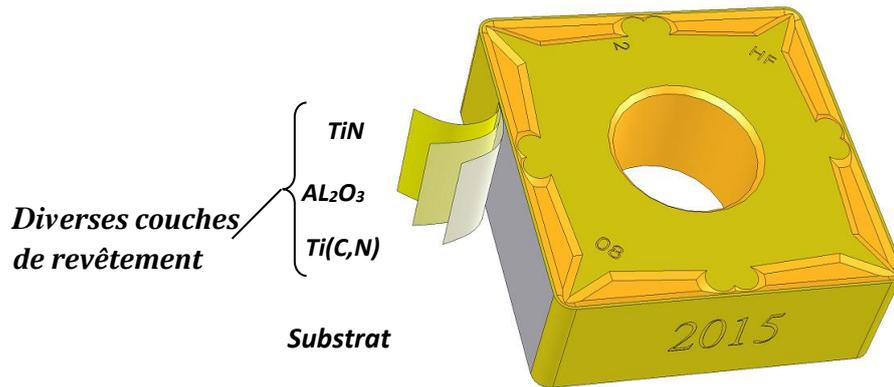


Figure II.3 Plaquette de coupe revêtue.

II.2.3. Porte outil utilisé

Afin de réaliser les essais, le choix du porte plaquette s'est effectué sur le porte outil de désignation **PSBNR25x25M12** *figure II.4*, dont la géométrie de la partie active de l'outil, est matérialisée par les angles définis sur le *Tableau II.2*.

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



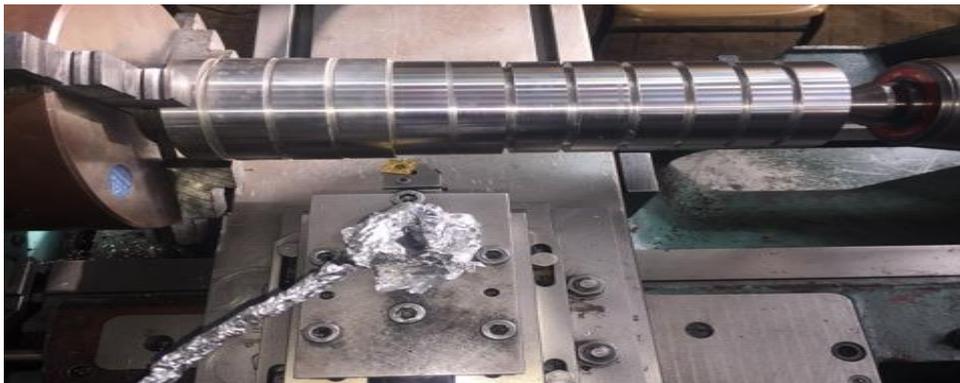
Figure II.4 Porte plaquette utilisé.

Tableau II.2. Caractéristiques de porte outil utilisé.

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

II.2.4. Eprouvettes d'usinage

Les essais ont été réalisés sur une barre d'acier inoxydable **X2CrNi118-10 (AISI304)** *figure II.5*, ce dernier est un acier Inoxydable austénitique, il offre une bonne aptitude au formage et à la fabrication, comme il assure une excellente résistance à la corrosion, l'usure ainsi qu'à la fissuration par corrosion sous contraintes. Cet acier est utilisé dans nombreux domaines tels que : l'industrie mécanique, l'agroalimentaire, chimie, transports, médecine et chirurgie...Etc

**Figure II.5** Eprouvette utilisée pour les essais.

Sa composition chimique ainsi que ses caractéristiques physico-mécaniques sont présentées dans le *tableau II.3* et *II.4* respectivement.

Tableau II.3. Composition chimique de l'acier X2CrNi18-10.

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

Tableau II.4. Caractéristiques physico-mécaniques de l'acier X2CrNi18-10.

	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]
X2CrNi118-10	15	16	200	45	160-200

II.2.5. Enregistrement des efforts de coupe

Le système d'acquisition de base des efforts est composé de *figure II.6* :

- Table de mesure dynamométrique kistler à capteurs piézo-électriques,
- Amplificateurs de signaux kistler,

- Carte d'acquisition permettant de transformer un signal analogique en signal numérique de marque national instrument,
- Programme de mesure permettant d'effectuer les mesures et de les exploiter. Ce programme a été fait sur la base du logiciel dynoware.

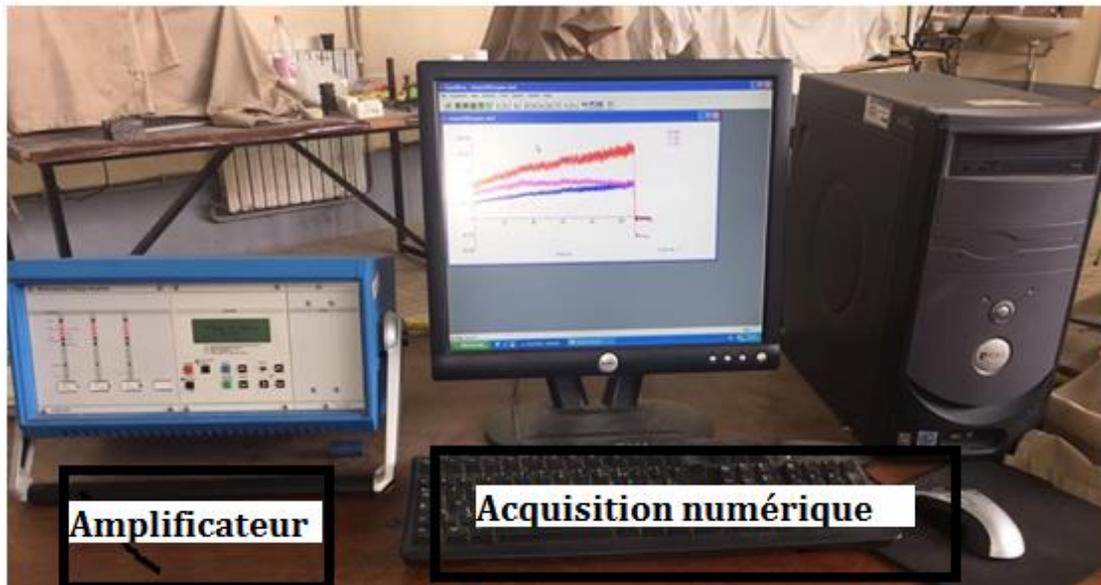


Figure II.6 Chaîne d'acquisition des efforts avec le dynamomètre.

L'ensemble dynamométrique se compose de quatre capteurs permettant de mesurer trois composantes orthogonales (X, Y et Z), mais il ne permet pas d'enregistrer les couples. Ses références sont les suivantes :

- Type 9257 B N° série 87069
- Nombre de capteur, capteurs piézo-électriques 4
- Charge admissible des capteurs : +- 5 KN
- Sensibilité : -7,92 pC/N pour F_x , -7,91 pC/N pour F_y et -3,80 pC/N pour F_z
- Linéarité : $\pm 0,3 \leq \%FSO$
- Rigidité : $>1 \text{ kN}/\mu\text{m}$
- Seuil de réponse : $< 0,01$
- Gamme de température d'utilisation 0 à 70°C

- Fréquence propre : en 3,5 kHz

Le signal de sortie fourni par les capteurs piézo-électriques est de type analogique en termes de variations de potentiel dans une plage de + ou – 1 volt. Il est donc nécessaire de l'amplifier pour pouvoir le mesurer commodément. Pour cela, nous avons utilisé des amplificateurs **kistler** de type (5011B) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Tension de sortie : $\pm 10V$
- Courant de sortie : $\pm 5 \text{ mA}$
- Gamme de fréquence : 0 à 200 kHz
- Impédance : 10Ω
- Erreur : $\pm 3\%$
- Linéarité : $\leq \pm 0,05 \% F_s$

Pour l'acquisition, nous avons opté pour une carte (référence PCI-MOI-16E-4 série ADA77F). Elle a comme caractéristiques :

- Nombre d'entrées – sorties : 16
- Vitesse d'acquisition : 500 000 points/s pour chaque entrée
- Résolution 12 bits
- Signal acceptable : $\pm 10 \text{ volts}$, - bande passante : 0 – 600 kHz

II.2.6. Etat de surface de la pièce

La caractérisation de la topographie de surface (2D) de la pièce usinée est effectuée grâce au rugosimètre de la marque **Mitutoyo modèle Surftest SJ-210** *figure II.7*

Ce dernier est doté :

- D'un menu intuitif avec fonctions multiples personnalisables (Ra, Rc, Ry, Rz, Rt...).
- D'une capacité -200 μm à +150 μm .

- D'une sonde en diamant.
- D'un écran couleur 2.4''
- D'une mémoire de 10 configurations et de 39 rugosités.
- D'une force de mesure 0,75 mN, angle 60°, rayon 2 μm
- D'une course du palpeur 17,5 mm
- D'une sortie RS232C, SPC, USB.
- D'un poids 500 g.



Figure II.7 Rugosimètre Mitutoyo Modèle Surftest SJ-210.

La pointe en diamant (palpeur) se déplace linéairement sur la surface usinée, Les mesures sont répétées à trois reprises à 120° et le résultat final est une moyenne de ces valeurs.

II.2.7. Mesure de la température

Les températures ont été mesurées à l'aide du thermomètre infrarouge ‘‘AMPROBE’’ Modèle IR-730 *figure II.8* dont les caractérisations suivantes :

- Gamme de mesure de la température sans contact : -50...1550°C
- Résolution optique : 50:1
- Valeur de l'émissivité : 0.1...1
- Précision de mesure : +- 1.8%
- Résolution des mesures : 0.1°C
- Dimensions : 279×355×89mm
- Poids : 292g
- Source d'alimentation : 1pile 9V 6F22
- Interface: USB



Figure II.8 Thermomètre infrarouge AMPROBE IR-730

II.2.8. Acquisition des vibrations

Les effets de vibrations ont pu être enregistrés grâce aux deux vibromètres, Modèle VM-6360 *figure II.9*, on a utilisé deux appareils afin de mesurer les effets dans les deux directions : tangentielle et radiale.



Figure II.9 Vibromètre Modèle VM-6360.

L'acquisition des mesures s'est faite à l'aide du programme **Data collection system**



Figure II.10 Acquisition des mesures.

Caractéristiques générales :

Capteur : accéléromètre piézoélectrique

Plage de mesure :

Accélération : 0,1 ~ 400 M/S², 0,3 ~ 1312 m/s² ; 0,0 ~ 40 g - équivalent Peak

Vitesse : 0.01 ~ 400 mm/s, 0.004 ~ 40,6 cm/S, True RMS

Cylindrée : 0,001 ~ 4.0 mm, 0,04 ~ 160 mm ; équivalent peak-peak

Gamme de fréquence :

Accélération : 10 Hz ~ 1 K Hz, 10 Hz ~ 10 K Hz

Vitesse : 10 Hz ~ 1 K Hz

Cylindrée : 10 Hz ~ 1 K Hz

Précision : 5% de la lecture + 2 chiffres

Conversion métrique/impérial

Sortie analogique : Sortie AC 0 ~ 2 V Peak échelle totale (résistance à la charge : Au-dessus 10 K)

Max. Valeur tenue

Power Off : manuel ou Power Off Arrêt automatique

Indicateur de batterie : Indicateur de batterie faible

Sortie de données : USB, RS-232, Bluetooth

Conditions de fonctionnement : température : 0~50 degrés; Humidité : moins de 90% HR

Alimentation : Batterie 4 x 1,5 V AAA (UM-4)

Dimensions : 124 x 62 x 30 mm

Poids : 120 g (sans les piles)

II.3. CONDITIONS DE COUPE

Plusieurs facteurs influent sur le système d'usinage, dans notre travail nous nous sommes intéressés à cet ensemble d'éléments : vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f), profondeur de passe (a_p), rayon du bec de l'outil (r).

Les paramètres de sortie (résultats) à observer sont : les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y , F_z), la rugosité de surface (R_a , R_t , R_z), la température de coupe (T°) et le phénomène de vibration de l'outil de coupe (V_y , V_z).

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais varient dans les intervalles suivants : V_c [116-232] m/min ; f [0.08-0.16] mm/tr ; a_p [0.15-0.45] mm ; r [0.4-0.8] mm

II.4. PLANIFICATION DES EXPERIENCES

Les essais ont été réalisés suivant la 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.

Le type de plan choisi est celui de Taguchi car il simplifie le protocole expérimental pour mettre en évidence les effets de facteurs sur la réponse. La méthode de Taguchi se distingue par une réduction importante du nombre d'essais, tout en gardant une bonne précision.

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

Dans cette étude, la table orthogonale standard L_{18} de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale **tableau II.5** Les niveaux des paramètres ont été choisis dans les intervalles recommandés par le fabricant d'outil de coupe (Sandvik Company). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le **tableau II.6**

Tableau II.5. Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 18.

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

Tableau II.6. Paramètres de coupe et leurs niveaux pour un plan de 18 essais.

Niveau	Vitesse de coupe (V_c)	Avance(f)	Profondeur de passe (ap)	Rayon de bec
1	116	0.08	0.15	0.4
2	165	0.12	0.3	0.8
3	232	0.16	0.45	

II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait le point sur les équipements utilisés lors de nos travaux. On a désigné les caractéristiques des matériaux de coupe et la composition chimique du matériau usiné, comme on a présenté les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences.

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des essais réalisés, ainsi que la modélisation mathématique des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'étudier la relation entre les paramètres d'entrée : la vitesse de coupe (V_c en [m/min]), l'avance par tour (f en [mm/tr]), la profondeur de passe (a_p en [mm]) et le rayon de bec de l'outil (r en [mm]), et les paramètres de sortie : l'effort tangentiel (F_z), RMS (Root-Mean-Square Deviation) de l'accélération tangentielle (a_z), la rugosité de surface (R_a) et la température de coupe (T°).

Afin de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de corrélation de chaque modèle, ainsi que la présentation 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique nommé «Design Expert». Ce logiciel nous a permis de faire des statistiques basées sur l'analyse de la variance, afin de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur (F_z), $RMS(a_z)$, (R_a) et (T°).

III.2. RESULTATS DES ESSAIS

Les résultats sont obtenus suite aux essais de tournage de l'acier inoxydable AISI 304 par un outil en carbure revêtu [Ti(C, N)/Al₂O₃/TiN] suivant un plan de Taguchi L_{18} .

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_n|^2} \quad (III.1)$$

Avec ; n : nombre de valeurs (a_z), X_n : L'écart entre la valeur X_i et X_{i+1} .

Les valeurs des paramètres d'entrées (r , V_c , f , a_p) et celles des réponses considérés sont présentées dans le **tableau III.1**.

- L'effort tangentiel (F_z)
- La rugosité de surface (R_a)
- L'accélération tangentielle (RMS)
- La température de coupe (T°)

Tableau III.1. Résultats des essais.

N°	Paramètres d'entrée (facteurs)				Paramètres de sortie (réponses)			
	r mm	Vc m/min	ap mm	f mm/tr	Fz	RMS (a _z)	Ra	T°
1	0.4	116	0,15	0,08	8,31	0.84	0,9650	37,5
2	0.4	116	0,3	0,12	101,34	2.79	1,6893	49,5
3	0.4	116	0,45	0,16	162,69	1.02	2,4116	71,7
4	0.4	165	0,15	0,12	27,25	0.73	1,5490	36,3
5	0.4	165	0,3	0,16	124,78	0.78	2,4683	59,9
6	0.4	165	0,45	0,08	112,78	1.68	1,1293	57
7	0.4	232	0,15	0,08	19,2	0.78	0,8616	39,6
8	0.4	232	0,3	0,12	105,9	1.24	1,5030	44,1
9	0.4	232	0,45	0,16	187,99	1.61	2,2676	81,4
10	0.8	116	0,15	0,16	44,05	1.16	1,4173	40,9
11	0.8	116	0,3	0,08	70,74	0.69	0,8080	55,3
12	0.8	116	0,45	0,12	135,07	0.80	0,9416	48,9
13	0.8	165	0,15	0,16	35,64	0.48	1,4806	40,8
14	0.8	165	0,3	0,08	81,61	0.56	0,5326	49,6
15	0.8	165	0,45	0,12	144,19	1.74	0,9186	54,8
16	0.8	232	0,15	0,12	38,78	0.25	0,9536	45,6
17	0.8	232	0,3	0,16	126,95	0.29	1,3926	38,3
18	0.8	232	0,45	0,08	113,06	0.74	1,3570	43,5

III.3. 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) que les résultats observés dans une étude (ou résultats plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si $P > 0,05$, le paramètre est insignifiant

- Si $P < 0,05$, le paramètre est significatif

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

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

Où : $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses, \bar{y}_i la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son niveau $i^{\text{ème}}$, N nombre total d'expériences, N_{nf} niveau de chaque facteur f .

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

$$MC = \frac{SS}{MC_e} \quad (\text{III.3})$$

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.

$$F = \frac{MC}{MC_e} \quad (\text{III.4})$$

Avec MC_e les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA (*Contribution. %*), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat. [6]

$$\text{contribution \%} = \frac{SC_f}{SC_t} \times 100 \quad (\text{III.5})$$

Avec SC_f somme des carrés des écarts finals,

SC_t somme des carrés des écarts totaux.

III.3.1. Analyse ANOVA pour F_z

Le *tableau III.2* montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour l'effort tangentiel (F_z) en fonction de r , V_c , ap et f

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

Source	DL	SS	MC	Valeur F	Valeur P	Contribution	remarques
modèle	13	47440.5	3649.3	96.03	0.0002	99.68%	signifiant
r	1	201.0	8.8	0.23	0.6560	0.42%	Non signifiant
Vc	1	438.9	404.6	10.65	0.0310	0.92%	signifiant
f	1	6366.4	3005.5	79.09	0.0009	13.38%	Signifiant
ap	1	38822.9	23247.2	611.74	0.0000	81.57%	Signifiant
Vc×Vc	1	71.02	14.4	0.38	0.5715	0.15%	Non signifiant
f×f	1	8.28	78.7	2.07	0.2235	0.02%	Non signifiant
ap×ap	1	1041.46	718.9	18.92	0.0122	2.19%	Signifiant
r×Vc	1	17.16	8.7	0.23	0.6571	0.04%	Non signifiant
r×f	1	51.99	7.8	0.21	0.6731	0.11%	Non signifiant
r×ap	1	0.03	82.0	2.16	0.2158	0.00%	Non signifiant
Vc×f	1	110.74	13.3	0.35	0.5862	0.23%	Non signifiant
Vc×ap	1	17.95	76.7	2.02	0.2284	0.04%	Non signifiant
f×ap	1	292.68	292.7	7.70	0.0501	0.61%	signifiant
erreur	4	152.01	38			0.32%	
total	17	47592.52				100.00%	

Les résultats du *tableau III.2* indiquent que la profondeur de passe (**ap**) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel (**F_z**). Sa contribution est de (81.57%). Le second facteur qui a une influence sur **F_z** est l'avance par tour (13.38%), suivi par la vitesse de coupe (**Vc**) avec une contribution de (0.92%). L'interaction (**ap×ap**) est significative avec une contribution de (2.19%), tandis que, l'interaction (**f×ap**) est moins importante (0.61%).

III.3.2. Analyse ANOVA pour RMS

Le *tableau III.3* montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour RMSE de l'accélération tangentielle (a_z) en fonction de r, Vc, ap et f

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

Source	DL	SS	MC	Valeur F	Valeur P	Contribution	remarques
modèle	13	5.2187	0.4014	1.16	0.486	79.10%	Non significiant
r	1	1.2587	0.1131	0.33	0.597	19.08%	Non significiant
Vc	1	0.4667	0.4760	1.38	0.305	7.07%	Non significiant
f	1	0.00021	0.3480	1.01	0.372	0.00%	Non significiant
ap	1	0.9352	1.9131	5.55	0.078	14.17%	Non significiant
Vc×Vc	1	0.0113	0.0706	0.21	0.674	0.17%	Non significiant
f×f	1	0.5550	1.7333	5.03	0.088	8.41%	Non significiant
ap×ap	1	0.0210	0.5482	1.59	0.276	0.32%	Non significiant
r×Vc	1	0.0234	0.0128	0.04	0.856	0.36%	Non significiant
r×f	1	0.3403	0.8202	2.38	0.198	5.16%	Non significiant
r×ap	1	0.2080	0.7215	2.09	0.222	3.15%	Non significiant
Vc×f	1	0.0586	0.6111	1.77	0.254	0.89%	Non significiant
Vc×ap	1	1.0123	1.2607	3.66	0.128	15.34%	Non significiant
f×ap	1	0.3276	0.3276	0.95	0.385	4.97%	Non significiant
erreur	4	1.3788	0.3447			20.90%	
total	17	6.5976				100.00%	

Les résultats du *tableau III.3* indiquent que le rayon du bec de l'outil (**r**) et la profondeur de passe (**ap**) sont les facteurs les plus importants affectant RMS de l'accélération tangentielle (a_z), avec des contributions de (19.08% et 14.10%) respectivement. Suivis de la vitesse de coupe (**Vc**) avec (7.07%) de contribution.

III.3.3. Analyse ANOVA pour Ra

Le *tableau III.4* montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité de surface (Ra) en fonction de r, Vc, ap et f

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

Source	DL	SS	MC	Valeur F	Valeur P	Contribution	remarques
modèle	13	5.28990	0.40692	50.87	0.0009	99.40%	signifiant
r	1	1.41269	1.15862	144.84	0.0003	26.54%	signifiant
Vc	1	0.00127	0.00088	0.11	0.7570	0.02%	Non signifiant
f	1	2.78853	2.00113	250.16	0.0001	52.40%	Signifiant
ap	1	0.26960	0.00016	0.02	0.8937	5.07%	Non signifiant
Vc×Vc	1	0.00431	0.08560	10.70	0.0308	0.08%	signifiant
f×f	1	1.10905	0.12745	15.93	0.0162	2.05%	signifiant
ap×ap	1	0.00794	0.03005	3.76	0.1246	0.15%	Non signifiant
r×Vc	1	0.09164	0.07552	9.44	0.0372	1.72%	signifiant
r×f	1	0.32410	0.40619	50.78	0.0021	6.09%	signifiant
r×ap	1	0.00301	0.05323	6.65	0.0614	0.06%	Non signifiant
Vc×f	1	0.04676	0.00393	0.49	0.5219	0.88%	Non signifiant
Vc×ap	1	0.07614	0.00525	0.66	0.4635	1.43%	Non signifiant
f×ap	1	0.15486	0.15486	19.36	0.0117	2.91%	signifiant
erreur	4	0.03200	0.03200			0.60%	
total	17	5.32190				100.00%	

Les résultats donnés par l'analyse de la variance présentés dans le *tableau III.4*, indiquent que l'avance (**f**) et le rayon du bec de l'outil (**r**) sont les termes les plus significatifs avec les contributions respectives (52.40% et 26.54%).

Les interactions (**r×Vc**, **r×f** et **f×ap**) ainsi que les produits (**Vc²** et **f²**) ont des effets significatifs moins importants avec (1.72% ; 6.09% ; 2.91% ; 0.08% ; 2.05%) de contribution respectivement.

III.3.4. Analyse ANOVA pour T°

Le *tableau III.5* montre les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour la température de coupe (T°) en fonction de r, Vc, ap et f

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

Source	DL	SS	MC	Valeur F	Valeur P	Contribution	remarques
modèle	13	2407.78	185.214	7.40	0.034	96.01%	signifiant
r	1	195.36	16.277	0.65	0.465	7.79%	Non signifiant
Vc	1	10.60	10.641	0.43	0.550	0.42%	Non signifiant
f	1	212.52	5.470	0.22	0.664	8.47%	Non signifiant
ap	1	1132.96	366.211	14.63	0.019	45.18%	Signifiant
Vc×Vc	1	0.04	20.424	0.82	0.417	0.00%	Non signifiant
f×f	1	90.57	3.122	0.12	0.742	3.61%	Non signifiant
ap×ap	1	0.59	27.352	1.09	0.355	0.02%	Non signifiant
r×Vc	1	55.57	47.712	1.91	0.240	2.22%	Non signifiant
r×f	1	309.59	120.811	4.83	0.093	12.34%	Non signifiant
r×ap	1	220.85	299.297	9.16	0.039	8.81%	Signifiant
Vc×f	1	81.22	5.220	0.21	0.672	3.24%	Non signifiant
Vc×ap	1	39.24	0.584	0.02	0.886	1.56%	Non signifiant
f×ap	1	58.66	58.664	2.34	0.201	2.34%	Non signifiant
erreur	4	100.13	25.033			3.99%	
total	17	2507.91				100.00%	

Les résultats donnés par l'analyse de la variance présentés dans le *tableau III.5*, indiquent que la profondeur de passe (**ap**) est le facteur le plus important affectant la température de coupe (T°) avec une contribution de (45.18%).

L'interaction (**r×ap**) a un effet significatif de 8.81% de contribution.

III.4. ANALYSE DE REGRESSION

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 (V_c), l'avance par tour (f), la profondeur de passe (ap) et la température de coupe (T°)) et la sortie (Y), défini comme un des aspects d'usinabilité (paramètres technologiques d'usinage) est donnée par :

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

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 :

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

Avec $\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_{ij}$

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 (V_c, f, ap et T), 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 :

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{III.8})$$

Avec y_i valeur de la réponse calculée à la $i^{\text{ème}}$ expérience ;

\bar{y}_i Valeur mesurée à la $i^{\text{ème}}$ expérience.

\bar{y} Valeur moyenne des réponses mesurées. [6]

III.4.1. Analyse de régression pour Fz

L'analyse de régression de **Fz** en fonction de r , V_c , f et a_p donne l'équation (III.9) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 99.68\%$

$$\begin{aligned} Fz = & -165.9 + 39.6 r + 0.336 V_c + 795 f + 578 a_p - 0.00073 V_c^2 - 3675 f^2 - 790 a_p^2 \\ & - 0.073 r \times V_c + 156 r \times f - 134.6 r \times a_p - 0.87 V_c \times f + 0.557 V_c \times a_p \\ & + 2213 f \times a_p \end{aligned}$$

III.4.2. Analyse de régression pour RMS

L'analyse de régression de **RMS** en fonction de r , V_c , f et a_p donne l'équation (III.10) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 79.10\%$

$$\begin{aligned} RMS = & -5.20 - 2.37 r + 0.0171 V_c + 105.2 f + 2.8 a_p - 0.000051 V_c^2 - 545 f^2 - 21.8 a_p^2 \\ & - 0.0028 r \times V_c + 50.5 r \times f - 12.63 r \times a_p - 0.186 V_c \times f + 0.0714 V_c \times a_p \\ & + 74.0 f \times a_p \end{aligned}$$

III.4.3. Analyse de régression pour Ra

L'analyse de régression de **Ra** en fonction de r , V_c , f et a_p donne l'équation (III.11) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 99.40\%$

$$\begin{aligned} Ra = & 1.809 + 0.157 r - 0.02404 V_c + 11.90 f + 1.82 a_p + 0.000057 V_c^2 + 147.9 f^2 \\ & + 5.11 a_p^2 + 0.00683 r \times V_c - 35.52 r \times f + 3.43 r \times a_p + 0.0150 V_c \times f \\ & - 0.00461 V_c \times a_p - 50.9 f \times a_p \end{aligned}$$

III.4.4. Analyse de régression pour T°

L'analyse de régression de **T°** en fonction de r , V_c , f et a_p donne l'équation (III.12) du modèle complet avec un coefficient de corrélation $R^2 = 96.01\%$

$$\begin{aligned} T^\circ = & -16.6 + 163.8 r + 0.311 V_c - 178 f - 36.3 a_p - 0.000873 V_c^2 + 732 f^2 + 154 a_p^2 \\ & - 0.172 r \times V_c - 613 r \times f - 225.1 r \times a_p + 0.54 V_c \times f + 0.049 V_c \times a_p - 5 \\ & + 991 f \times a_p \end{aligned}$$

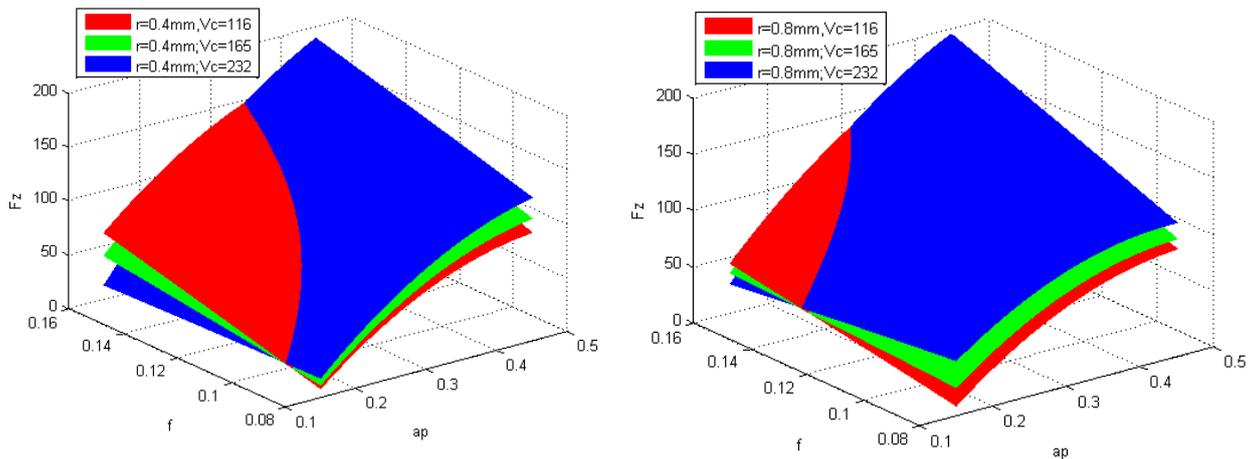
III.5. REPRESENTATION GRAPHIQUE 3D

III.5.1. L'effort tangentiel F_z

Les relations entre l'effort tangentiel et la profondeur de passe et l'avance sont visualisées sur la *figure III.1. (a et b)*. On remarque que l'effort tangentiel (F_z) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) et de l'avance (f).

Pour les différentes valeurs de la vitesse de coupe (V_c), F_z ne varie pas beaucoup donc V_c n'a pas d'effet important sur (F_z).

Nous pouvons observer que pour les petites valeurs de ($V_c = 116$ m/min), F_z est supérieur avec un petit rayon de bec ($r=0.4$ mm).

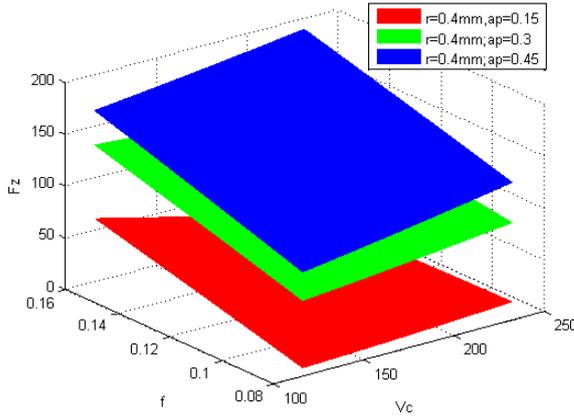


a) Différentes valeurs de V_c et $r=0.4$ mm

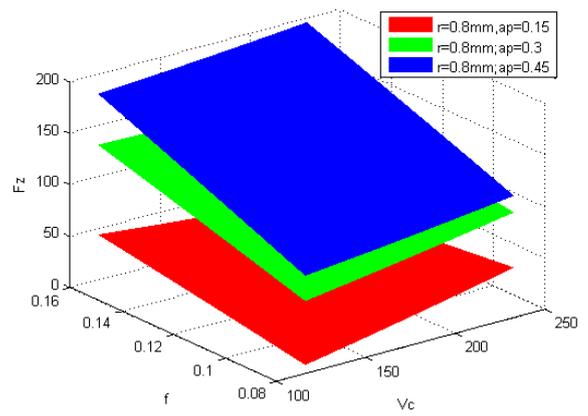
b) Différentes valeurs de V_c et $r=0.8$ mm

Figure III.1 Effort de coupe (F_z) en fonction de a_p et f .

Les relations entre l'effort tangentiel et la vitesse de coupe et l'avance sont visualisées sur la *figure III.2. (a et b)*. On remarque que l'effort tangentiel (F_z) augmente avec l'augmentation de l'avance (f), tandis qu'il est moins affecté par la croissance de V_c . On remarque aussi qu'à chaque augmentation de la valeur de la profondeur de passe (a_p), l'effort F_z augmente aussi. Quand ($a_p=0.15$ mm) et le rayon de bec est petit ($r=0.4$ mm), l'effort tangentiel (F_z) est plus grand.



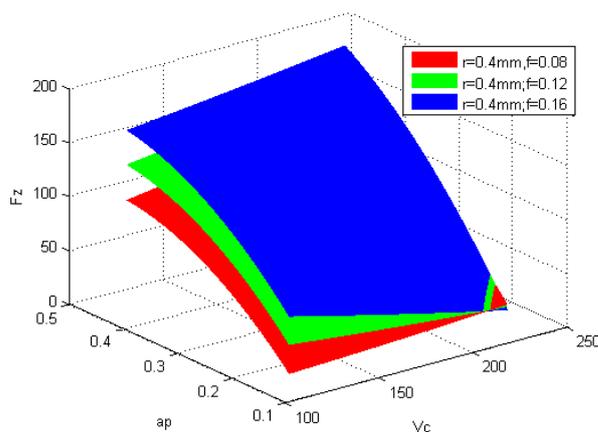
a) Différentes valeurs de a_p et $r=0.4mm$



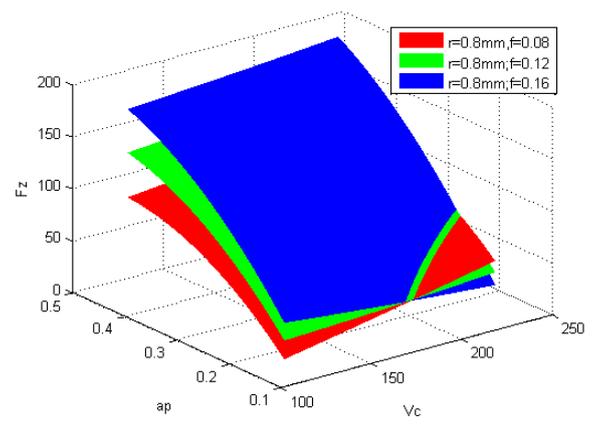
b) Différentes valeurs de a_p et $r=0.8mm$

Figure III.2 Effort de coupe (F_z) en fonction de V_c et f .

Les relations entre l'effort tangentiel et la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont visualisées sur la **figure III.3 (a et b)**. On remarque que l'effort tangentiel (F_z) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p). On remarque aussi qu'à chaque augmentation de la valeur de l'avance (f), l'effort (F_z) augmente aussi. Quand ($f=0.08$ mm), l'effort tangentiel (F_z) est légèrement plus grand pour un petit rayon de bec ($r=0.4mm$).



a) Différentes valeurs de f et $r=0.4mm$



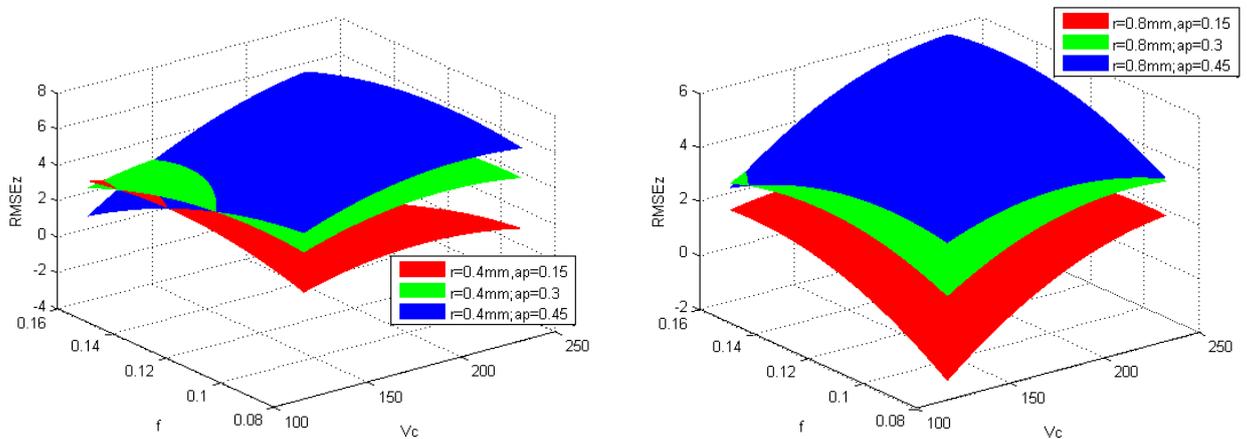
b) Différentes valeurs de f et $r=0.8mm$

Figure III.3 Effort de coupe (F_z) en fonction de V_c et a_p

D'après l'analyse des *figures III (1, 2 et 3)*, on constate que l'effort tangentiel augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et de l'avance. Ceci est dû à l'élargissement de la section de contact entre l'outil et la pièce usinée. Aussi, l'augmentation de la profondeur de passe mène à la diminution de la pression de coupe, mais par contre fait augmenter considérablement les efforts de coupe [16]. On peut déduire que l'influence de la profondeur de passe est plus importante, et ce à partir de la pente de la variation de l'effort tangentiel suivant l'axe (a_p).

III.5.2. RMS de l'accélération tangentielle (a_z)

La *figure III.4 (a et b)* montre la variation de RMS en fonction de l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c). On remarque que RMS augmente avec l'augmentation de V_c tandis que la variation de f n'a pas un effet important sur l'augmentation du RMS. Aussi, à chaque variation de la valeur de la profondeur de passe (a_p), on observe que RMS augmente. On remarque également que, pour la petite valeur de profondeur de passe ($a_p=0.15$), avec un petit rayon de bec ($r=0.4$), on obtient une grande valeur de RMS.

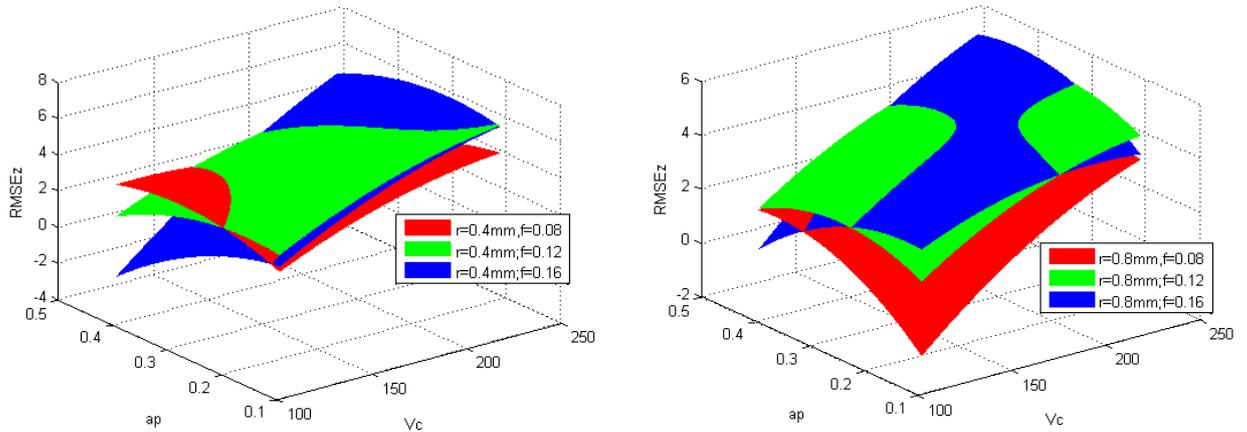


a) Différentes valeurs de a_p et $r=0.4mm$

b) Différentes valeurs de a_p et $r=0.8mm$

Figure III.4 RMS en fonction de V_c et f

D'après l'analyse de la *figure III.5 (a et b)* nous pouvons observer que, RMS augmente avec la croissance de V_c . Pour les différentes valeurs de l'avance (f), la variation du RMS n'est pas très importante.

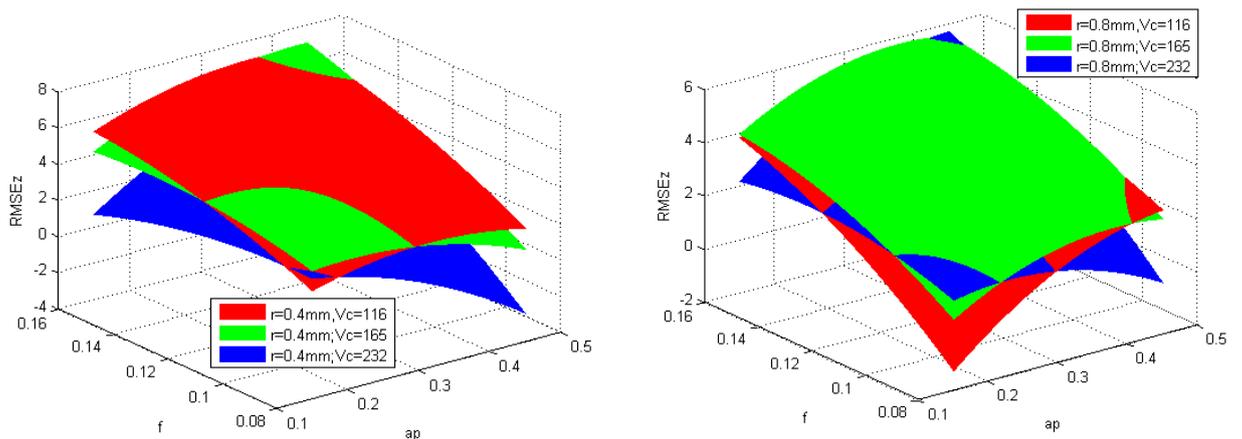


a) différentes valeurs de f et $r=0.4mm$

b) différentes valeurs de f et $r=0.8mm$

Figure III.5 RMS en fonction de V_c et a_p

L'analyse de la *figure III.6 (a et b)* nous permet de voir que, RMS décroît avec l'augmentation de la profondeur de passe. On remarque aussi que, les petites valeurs de RMS sont enregistrées à grande vitesse de coupe ($V_c=222$ m/min), tandis que les valeurs supérieures sont enregistrées à une vitesse moyenne ($V_c=165$ m/min).



a) différentes valeurs de V_c et $r=0.4mm$

b) différentes valeurs de V_c et $r=0.8mm$

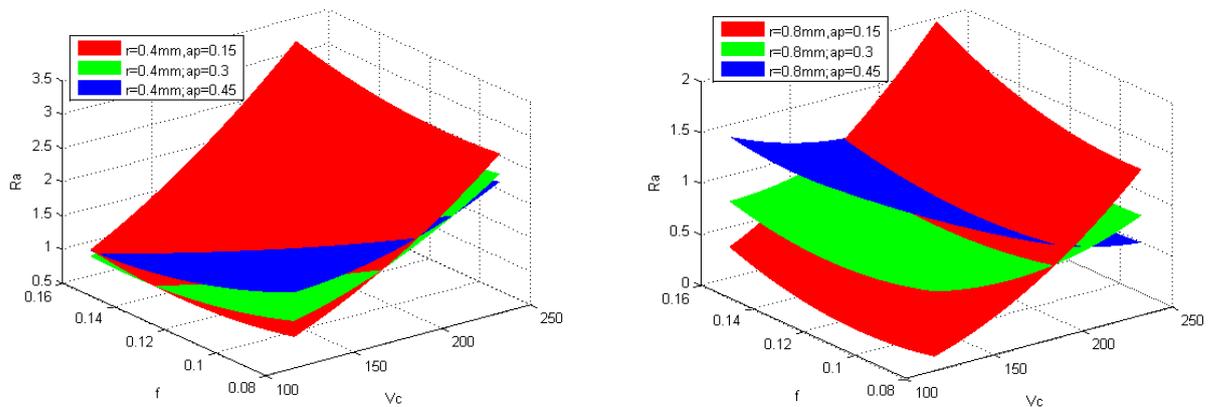
Figure III.6 RMS en fonction de f et a_p

D'après l'analyse des *figures III (4, 5 et 6)* on constate que, le rayon de bec de l'outil, la vitesse de coupe et la profondeur de passe influencent considérablement la vibration de l'outil. Un rayon de 0.4 mm conduit au refoulement de la matière usinée et à l'augmentation des vibrations de l'outil, qui font augmenter les valeurs de la rugosité de surface.

III.5.3. La rugosité de surface Ra

D'après la *figure III.7 (a et b)*, on remarque que, pour un rayon de bec d'outil petit et quelques soit la profondeur de passe, la croissance de la vitesse de coupe (V_c) affecte légèrement la rugosité de surface (R_a). Par contre pour un rayon de 0.8mm et une profondeur de passe plus grande, la rugosité de surface diminue si la vitesse de coupe augmente.

Aussi, nous pouvons observer que, des valeurs élevées de rugosité de surface sont obtenues en utilisant une petite profondeur de passe ($a_p = 0.15$ mm), particulièrement avec un rayon de bec de 0.8 mm.

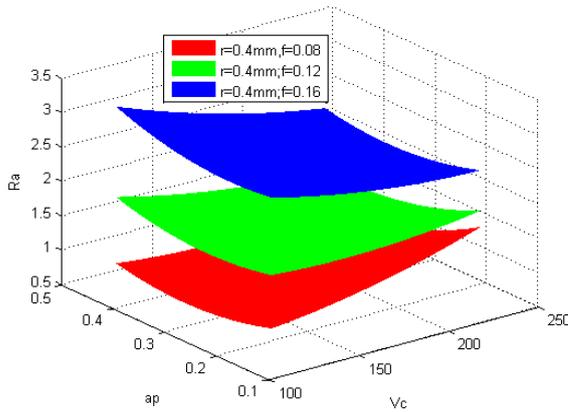


a) Différentes valeurs de a_p et $r=0.4$ mm

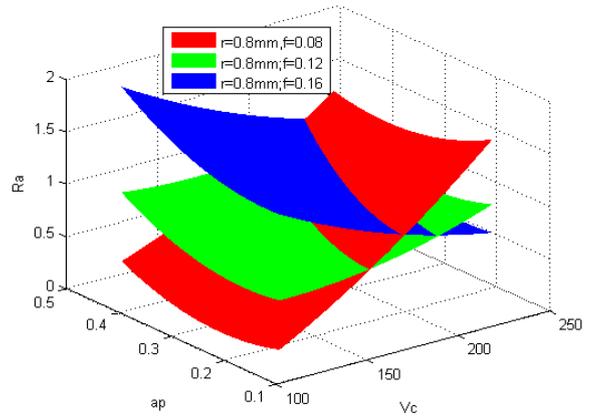
b) Différentes valeurs de a_p et $r=0.8$ mm

Figure III.7 Rugosité de surface (R_a) en fonction de V_c et f

D'après la *figure III.8 (a et b)*, on remarque que, la variation de la profondeur de passe (a_p) n'a pas d'effet très important sur la rugosité de surface (R_a). On observe que R_a augmente avec l'augmentation des valeurs de l'avance f . On remarque aussi que, l'utilisation d'une petite valeur d'avance ($f=0.08$ mm/tr) avec un grand rayon de bec d'outil ($r=0.8$ mm) donne les plus petites valeurs de rugosité de surface, par rapport à l'utilisation d'une grande avance ($f=0.16$ mm/tr) qui mène à l'élévation de R_a .



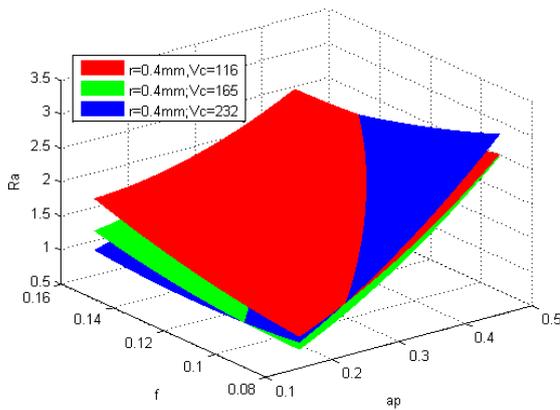
a) Différentes valeurs de f et $r=0.4mm$



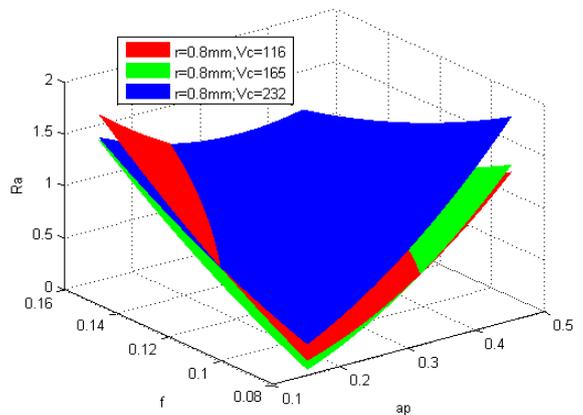
b) Différentes valeurs de f et $r=0.8mm$

Figure III.8 Rugosité de surface (Ra) en fonction de Vc et ap

D'après la *figure III (a et b)*, On remarque que, Ra augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe (ap) et de l'avance (f), mais particulièrement quand $r=0.8mm$.



a) Différentes valeurs de Vc et $r=0.4mm$



b) Différentes valeurs de Vc et $r=0.8mm$

Figure III.9 Rugosité de surface (Ra) en fonction de f et ap

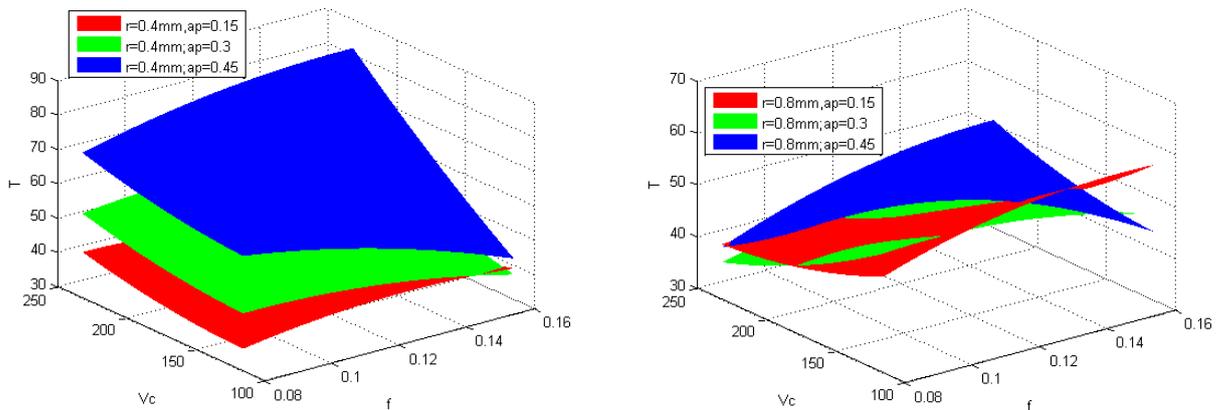
L'analyse des *figures III (7, 8 et 9)*, nous révèle que, l'avance (f) et le rayon de bec de l'outil (r) sont les paramètres qui affectent la rugosité de surface (Ra).

L'utilisation d'une petite valeur d'avance avec un grand rayon de bec d'outil donne les plus petites valeurs de rugosité de surface, Benga & Abrao [16], ont rapporté qu'aux

petites avances, les distances entre les crêtes et les creux des traces de l'avance sont petites.

III.5.4. La température de coupe T°

D'après la *figure III.10 (a et b)*, on remarque que, la température (T°) augmente légèrement avec l'augmentation de V_c et f . La température de coupe croit avec l'augmentation de la profondeur de passe (a_p). On constate que, le changement de rayon du bec de l'outil, engendre le changement de l'allure des courbes (T°).

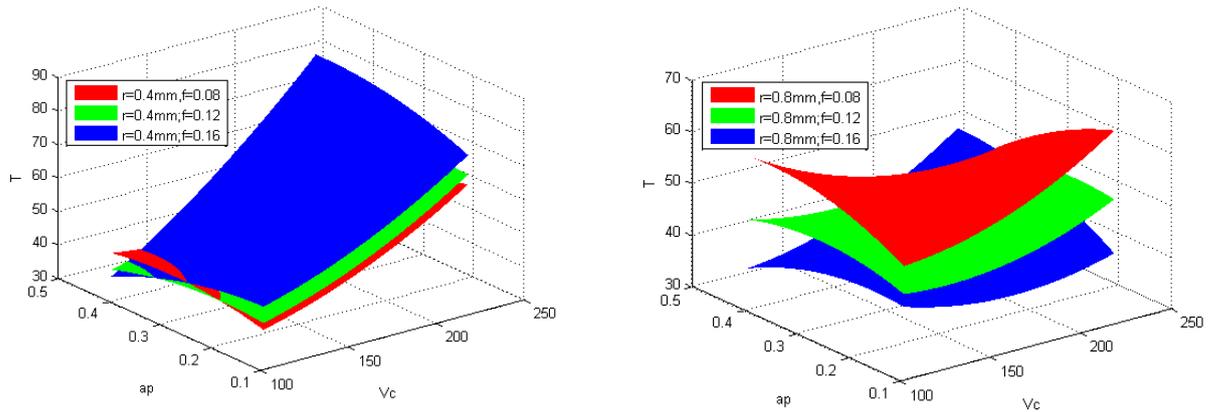


a) Différentes valeurs de a_p et $r=0.4\text{mm}$

b) Différentes valeurs de a_p et $r=0.8\text{mm}$

Figure III.10 Température de coupe (T°) en fonction de f et V_c

D'après la *figure III.11 (a et b)*, nous observons que, l'influence de la vitesse de coupe (V_c) sur T° , est plus importante que l'influence de la profondeur de passe (a_p) et ce à partir de la pente de la variation de la température de coupe suivant l'axe (V_c). Bien que l'analyse statistique a montré que (V_c) n'a pas un effet significatif sur T° . Pour les différentes valeurs de l'avance (f), la température (T°) ne varie pas beaucoup. On obtient des plus grandes valeurs de (T°) avec des petites avances ($f=0.08$ mm/tr) et un rayon de bec d'outil plus grand ($r=0.08\text{mm}$).

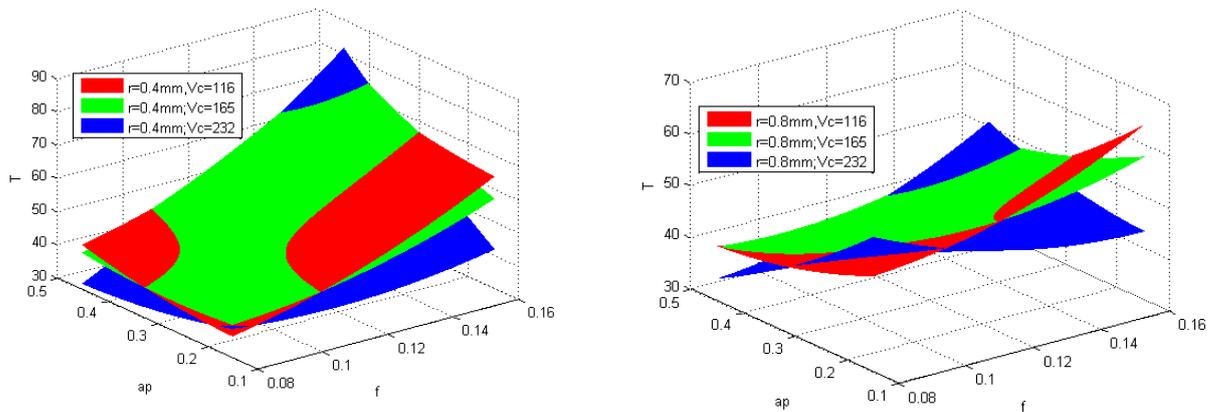


a) Différentes valeurs de f et $r=0.4mm$

b) Différentes valeurs de f et $r=0.8mm$

Figure III.11 Température de coupe (T°) en fonction de a_p et V_c

D'après la *figure III.12 (a et b)*, on remarque que la température (T°) croit légèrement avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance. On observe également, que pour une vitesse de coupe moyenne ($V_c=165$ m/min) et un rayon de bec d'outil plus grand ($r=0.08mm$), on obtient des valeurs de température supérieures.



a) Différentes valeurs de V_c et $r=0.4mm$

b) différentes valeurs de V_c et $r=0.8mm$

Figure III.12 Température de coupe (T°) en fonction de a_p et f

L'analyse des *figures III. (10, 11 et 12)*, nous révèle que la vitesse de coupe (V_c), la profondeur de passe (a_p) ainsi que le rayon de bec de l'outil (r), sont les paramètres qui affectent la température de coupe (T°).

Yallese et al [17], ont rapporté que l'augmentation de la vitesse de coupe engendre une augmentation des frottements et des déformations ce qui élève la température dans la zone de coupe.

La majorité de la chaleur dégagée du processus de coupe est évacuée par le copeau [17], donc une profondeur de passe plus grande veut dire un copeau plus épais et donc plus de chaleur.

Un rayon de bec de l'outil plus grand, inclut une zone de frottement plus large, ce qui conduit à l'élévation de la température de coupe (T°).

III.6.CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de comprendre et d'exprimer la relation entre les phénomènes de la coupe tels que (effort tangentiel, rugosité, RMS de l'accélération tangentielle et température de coupe) et les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe et rayon de bec de l'outil) lors de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304.

IV.1. INTRODUCTION

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage est une tâche très importante, 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:

- Optimisation mono-objectif en utilisant la méthode de Taguchi ;
- Optimisation multi-objectif en utilisant la méthode de la fonction désirabilité.

IV.2. OPTIMISATION PAR LA METHODE DE TAGUCHI

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]. 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, Le plus faible effort tangentiel, rugosité de surface et l'accélération tangentielle. La caractéristique (S/B) la plus petite est la meilleure (*smaller-the-better*) a été utilisé pour (F_z , R_a , RMS), les résultats sont affichés dans le **tableau IV.1**. Les caractéristiques de qualité (S/B), sont calculées avec les équations suivantes : [6]

- a) 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) [6]

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

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

n = nombre de mesures effectuées

- b) L'optimum est une valeur maximale (*plus grand c'est meilleur*): la valeur cible (m) est égale à l'infini, on vise la maximisation de la caractéristique de performance. Maximiser Y revient à minimiser $1/Y$ et, Taguchi recommande l'utilisation de l'équation (IV.2) [6]

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

- c) L'optimum est une valeur ciblée : la valeur cible est égale à une valeur nominale m_0 (Nominal c'est meilleur), la fonction de perte augmente quand (Y) s'éloigne de la valeur nominale m_0 , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (IV.3) [6]

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\left(\frac{y_j^2}{s_j^2} \right) \right] \quad \text{IV.3}$$

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

N°	S/N.Fz	S/N.RMS	S/N.Ra
1	18,3920	1,5144	0,3094
2	40,1156	8,9120	-4,5543
3	44,2272	0,1720	-7,6463
4	28,7073	2,7335	-3,8010
5	41,9228	2,1581	-7,8480
6	41,0446	4,5061	-1,05644
7	25,6660	2,1581	1,2932
8	40,4979	-1,8684	-3,5391
9	45,4826	4,1365	-7,1115
10	32,8789	1,2891	-3,0294
11	36,9933	3,2230	1,8517
12	42,6111	1,9382	0,5220
13	31,0387	6,3751	-3,4091
14	38,2348	5,0362	5,4708
15	43,1787	4,8109	0,7368
16	31,7721	12,0411	0,4120
17	42,0726	10,7520	-2,8769
18	41,06617	2,6153	-2,6515

IV.2.1. Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel F_z

Le **tableau IV.2** affiche les paramètres d'usinage (r , V_c , a_p , f) qui ont un effet sur l'effort tangentiel F_z . La plus importante influence correspond à la profondeur de passe (a_p) avec un effet de 14.89, en seconde position vient l'avance par tour (f) avec un effet de 6.04, suivie de la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 1.89, et en dernier lieu le rayon de bec de l'outil (r) avec 1.53 d'effet.

Tableau IV.2. Moyenne des ratios S/N (F_z) pour chaque niveau des facteurs.

niveau	r	V_c	a_p	f
1	-36.23	-35.87	-28.08	-33.57
2	-37.76	-37.35	-39.97	-37.81
3		-37.76	-42.94	-39.60
Delta	1.53	1.89	14.86	6.04
Rang	4	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (F_z) correspond aux niveaux r_1 , V_{c1} , a_{p1} et f_1 . Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de l'effort tangentiel (F_z) sont donc, le plus petit rayon de bec d'outil $r = 0.4mm$, la plus petite vitesse de coupe $V_c = 116 m/min$, la plus petite profondeur de passe $a_p = 0.15mm$ et la plus faible avance par tour $f = 0,08 mm/tr$. Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence avec des cercles **figure IV.1**

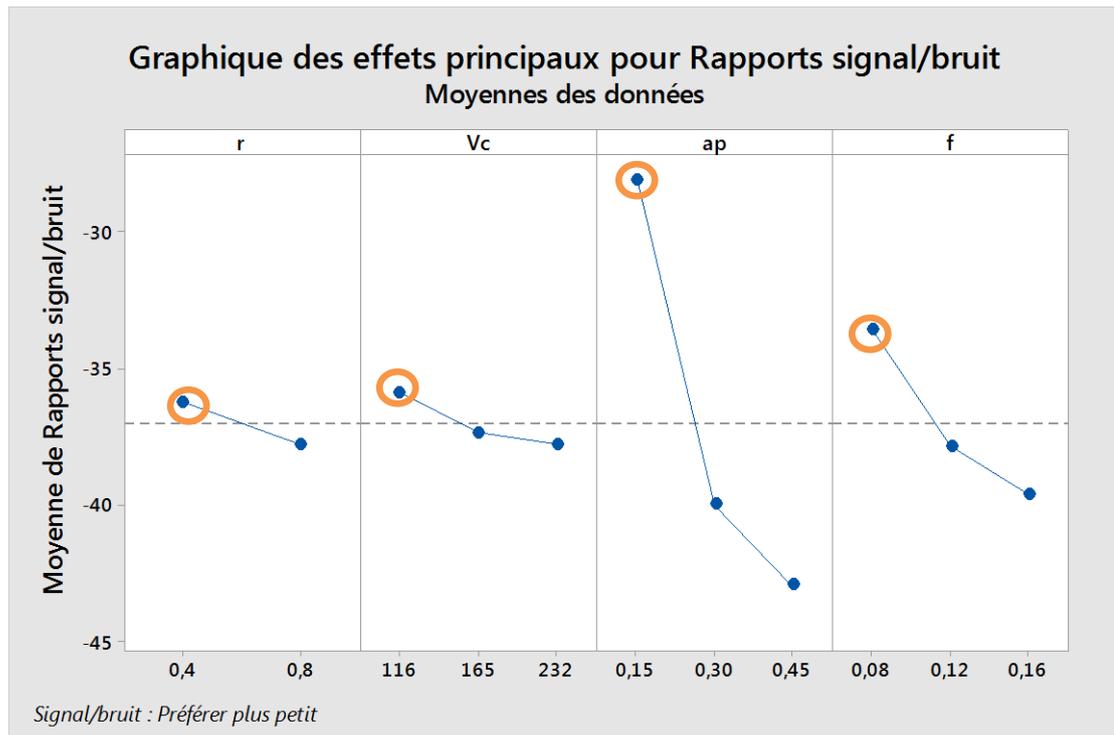


Figure IV.1 Graphique des effets principaux de r, Vc, ap et f sur l'effort (Fz)

IV.2.2. Analyse des effets principaux sur RMS de l'accélération tangentielle

Le **tableau IV.3** affiche les paramètres d'usinage (r, Vc, ap, f) qui ont un effet sur l'effort tangentiel Fz. La plus importante influence correspond à la profondeur de passe (ap) avec un effet de 5.4342, en seconde position vient le rayon de bec de l'outil (r) avec un effet de 5.5936, suivie de la vitesse de coupe (Vc) avec un effet de 4.2099, et en dernier lieu l'avance par tour (f) avec 2.0944 d'effet.

Tableau IV.3. Moyenne des ratios S/N (RMS) pour chaque niveau des facteurs.

niveau	r	Vc	ap	f
1	-1.2257	-0.6163	3.9222	1.6735
2	3.9868	1.1643	1.7315	0.1869
3		3.5936	-1.5120	2.2813
Delta	5.2125	4.2099	5.4342	2.0944
Rang	2	3	1	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (RMS) correspond aux niveaux r2, Vc3, ap1 et f3. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions

optimales de l'accélération tangentielle (RMS) sont donc, le plus grand rayon de bec d'outil

$r = 0.8mm$, la plus grande vitesse de coupe $V_c = 232 m/min$, la plus petite profondeur de passe $a_p = 0.15mm$ et la plus haute avance par tour $f = 0,16 mm/tr$. Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence avec des cercles *figure IV.2*

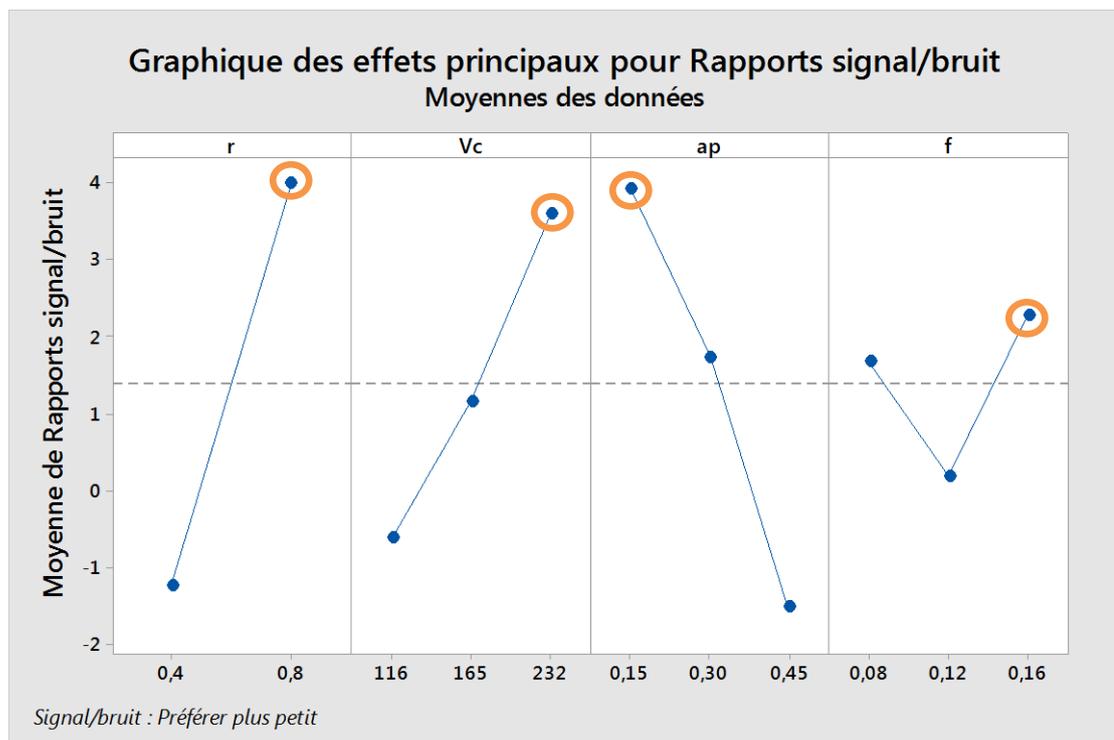


Figure IV.1 Graphique des effets principaux de r , V_c , a_p et f sur RMS .

IV.2.3. Analyse des effets principaux sur la rugosité de surface (R_a)

Le *tableau IV.4* affiche les paramètres d'usinage (r , V_c , a_p , f) qui ont un effet sur la rugosité de surface (R_a). La plus importante influence correspond à l'avance par tour avec un effet de 6.1898, en seconde position vient le rayon de bec de l'outil (r) avec un effet de 3.4423, suivie de la profondeur de passe (a_p) avec un effet de 1.4970, et en dernier lieu la vitesse de coupe (V_c) avec 0.7612 d'effet.

Tableau IV.4. Moyenne des ratios S/N (Ra) pour chaque niveau des facteurs.

niveau	r	Vc	ap	f
1	-3.7727	-2.0911	-1.3708	0.8695
2	-0.3304	-1.6512	-1.9160	-1.7039
3		-2.4123	-2.8678	-5.3203
Delta	3.4423	0.7612	1.4970	6.1898
Rang	2	4	3	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Ra) correspond aux niveaux r_2 , Vc_2 , ap_1 et f_1 . Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (Ra) sont donc, le plus grand rayon de bec d'outil $r = 0.8mm$, la vitesse de coupe moyenne $Vc = 165 m/min$, la plus petite profondeur de passe $ap = 0.15mm$ et la plus faible avance par tour $f = 0,08 mm/tr$. Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence avec des cercles **figure IV.3**

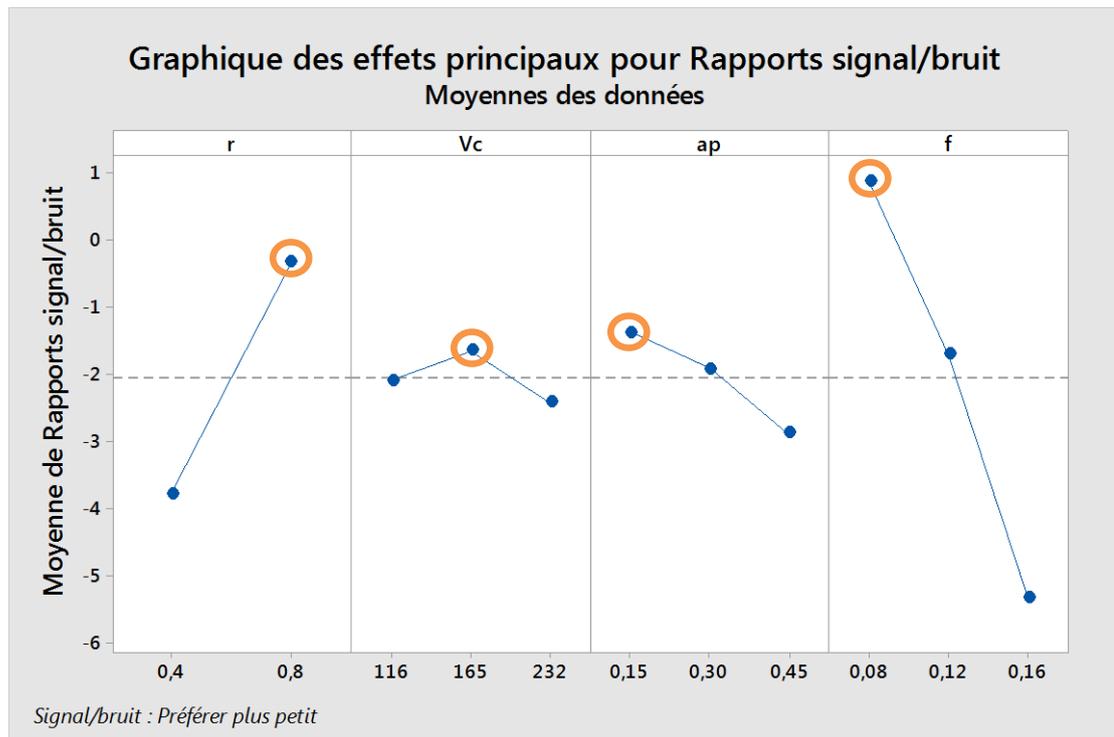


Figure IV.3 Graphique des effets principaux de r, Vc, ap et f sur Ra.

IV.3. OPTIMISATION PAR LA METHODE DE LA FONCTION DESIRABILITE

L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal [9].

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir aux critères souhaités de l'effort tangentiel (Fz), l'accélération tangentielle ($RMSE$) et la rugosité de surface (Ra), avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser Fz , $RMSE$ et Ra .

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit : [9]

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \tag{IV.4}$$

$$F(x) = -DF$$

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

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{Si } Y_i \leq Inf_i \\ \frac{Y_i - Inf_i}{T_i - Inf_i} & \text{Si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i \\ \frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} & \text{Si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i \\ 0 & \text{Si } Y_i \geq Sup_i \end{cases} \tag{IV.5}$$

$$d_i = 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$\begin{aligned}
 di &= 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \\
 di &= \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \\
 di &= 1 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i
 \end{aligned}
 \tag{IV.6}$$

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

$$\begin{aligned}
 di &= 1 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i \\
 di &= \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \\
 di &= 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i
 \end{aligned}
 \tag{IV.7}$$

Donc, l’objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui maximise la fonction combinée de désirabilité DF, C'est-à-dire minimisé F(x).

Le **tableau IV.5** et la **figure IV.4** (notée ci-dessous), exposent les résultats de l’optimisation réalisés par la méthodologie de surface de réponse (RSM) des différentes sorties (Fz, RMS, Ra). Les paramètres de coupe optimaux obtenus s’avèrent : le rayon de bec de l’outil ($r = 0.76 \text{ mm}$), la vitesse de coupe ($Vc = 220.07\text{m/min}$), la profondeur de passe ($ap = 0.15 \text{ mm}$), l’avance par tour ($f = 0.08 \text{ mm/tr}$). Les valeurs de sorties optimisées sont : $Fz = 23.310\text{N}$, $RMS = 0.248$ et $Ra = 0.533 \mu\text{m}$

Tableau IV.5. Réponse d’optimisation des différentes valeurs de sorties (Fz, RMS, Ra)

Réponse s	Objectifs	Solution globale				Cible	Valeur sup	Valeur ajust
		<i>r</i>	<i>Vc</i>	<i>ap</i>	<i>f</i>			
		(mm)	(m/min)	(mm)	(mm/tr)			
Fz	Minimiser	0.76	220.07	0.15	0.08	8.310	187.99	23.310
RMS	Minimiser	0.76	220.07	0.15	0.08	0.250	2.79	0.248
Ra	Minimise	0.76	220.07	0.15	0.08	0.532	2.46	0.533
Désirabilité composite = 0.97								

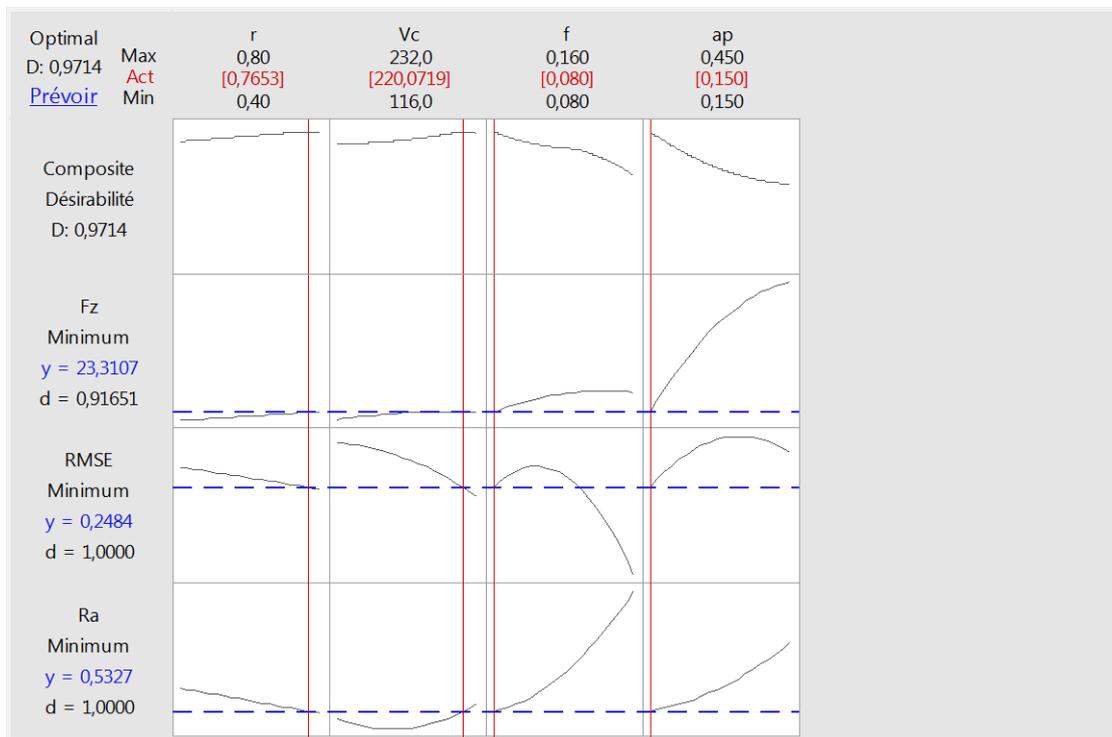


Figure IV.4 Diagramme d'optimisation de réponses multiples (F_z , RMS, R_a)

IV.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi pour optimiser l'effort tangentiel (F_z), RMS de l'accélération tangentielle (a_z), et la rugosité de surface (R_a), ensuite l'optimisation multi-objectif, où nous avons utilisé l'approche de la fonction désirabilité pour optimiser ces réponses simultanément.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude expérimentale de l'usinage de l'acier inoxydable austénitique AISI 304 nous a permis d'étudier l'effet des conditions de coupe en tournage sur les paramètres de sortie à savoir ; l'effort tangentiel (F_z), RMS de l'accélération tangentielle, la rugosité de surface usinée (R_a) et la température de coupe (T°). Par la suite élaborer une modélisation des conditions de coupes.

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

- L'analyse ANOVA de l'effort tangentiel (F_z) pour le plan L_{18} montre que la profondeur de passe (a_p) est statistiquement le facteur le plus significatif sur F_z avec une contribution de 81.57%, le second facteur qui a une influence sur F_z , est l'avance par tour (f) avec 13.38% de contribution, suivie par la vitesse de coupe avec une contribution de 0.92% .
- L'analyse ANOVA de RMS montre que, le rayon de bec de l'outil (r), la profondeur de passe (a_p) et la vitesse de coupe (V_c), affectent l'accélération tangentielle (a_z) avec des contributions de 19.08% ; 14.10% et 7.07% respectivement. Même si statistiquement parlant, ils n'ont pas d'effet significatif.
- D'après L'analyse ANOVA de la rugosité de surface (R_a), on constate que l'avance (f) et le rayon du bec de l'outil (r) sont les termes les plus significatifs avec les contributions respectives (52.40% et 26.54%). La meilleure rugosité de surface est obtenue en employant une petite avance et un grand rayon de bec.
- L'analyse de la variance de la température de coupe (T°) a montré que la profondeur de passe (a_p) à un effet significatif sur T° avec une contribution de 45.18%. Contrairement à la vitesse de coupe et le rayon de bec de l'outil qui n'ont pas d'influence statistique mais qui contribuent quand même avec 7.79% et 0.42%. Pour diminuer la température de coupe, il faut abaisser V_c et a_p et utiliser un rayon plus petit.

Conclusion générale

- Les modèles proposés par la méthodologie de surface de réponse (RSM) permettent d'obtenir des approximations des différents paramètres de sortie étudiés, ont un intérêt important car ils permettent de faire des prédictions, et sont efficaces pour le traitement des problèmes de la fabrication mécanique.
- L'optimisation mono-objective des paramètres de coupe par l'application du logiciel MiniTab18 a permis, l'obtention des combinaisons optimales des paramètres de coupe qui sont : le rayon de bec de l'outil ($r = 0.76\text{mm}$), la vitesse de coupe ($V_c = 220.07 \text{ m/min}$), la profondeur de passe ($a_p = 0.15\text{mm}$) et l'avance par tour ($f = 0,08 \text{ mm/tr}$). Ce régime de coupe permet, dans notre cas d'étude, d'obtenir de meilleurs résultats concernant l'effort tangentiel ($F_z = 23.31\text{N}$), l'accélération tangentielle ($\text{RMS} = 0.248$) et un meilleur état de surface ($R_a = 0.533 \mu\text{m}$).

Références:

[1]: **Czaplicki A.** L'usinabilité et la coupe des métaux. Revue de la société royale belge des ingénieurs et des industries, n°12. pp. 708 – 736 (1962).

[2]: **Kalpakjian S.** (1985) Manufacturing processes for engineering materials. Addison-Wesley Publishing Company, 839 pages. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02833667>

[3]: **C. Bedrin.** Généralités sur la coupe des métaux. Conférences CAST, Lyon, INSA de Lyon, pp.5-7 (1971).

[4]: **Madani Mohammed Saïd et Ghouini Rabah,** Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master.. Amélioration des paramètres Technologiques de coupe en tournage. (2011)

[5]: **Utilisation d'un tour** <http://serge79.over-blog.com/article-la-vitesse-de-coupe-45528985.html>

[6]: **Lakhdar BOUZID** thèse doctorat. 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-(2015) (2015).

[7]: **ALLAL Mohammed,** Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master. Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 en utilisant la méthode RSM et l'approche de Taguchi. (2016).

[8]: **BOUSSAID Khawla,** Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master. Prédiction des paramètres technologiques d'usinage en tournage de l'acier inoxydable AISI 304 par la méthodologie de surface de réponse. (2018)

[9]: **HESSAINIA ZAHIA** thèse doctorat. Etude de l'impact des paramètres affectant la rugosité des surfaces et les efforts de coupe en usinage des pièces traitées thermiquement. (2014).

[10]: **Pierre-Jean CUNAT,** Aciers inoxydables Critères de choix et structure. 10 mars 2000

[11]: **Amit Kumar Gupta**, Predictive modelling of turning operations using response surface methodology, artificial neural networks and support vector regression International Journal of Production Research, 48:3, 763-778. 2008 DOI: 10.1080/00207540802452132

[12]: **Sofiane Berkani, Mohamed Athman Yallese, Lakhdar Boulanouar and Tarek Mabrouki** Analyse statistique de l'usinage en acier inoxydable austénitique AISI304 à l'aide d'un outil en carbure revêtu de Ti (C, N) / Al₂O₃ / TiN CVD. International Journal of Industrial Engineering Computations 6 (2015) 539–552.

[13]: **Hamid Tebassi, Mohamed Athmane Yallese , Ikhlasb Meddour, Francois Girardin and Tarek Mabrouki** On the Modeling of Surface Roughness and Cutting Force when Turning of Inconel 718 Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology: Accuracy and Benefit”, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 61(1), pp. 1-11. Doi: <https://doi.org/10.3311/PPme.8742>.

[14]: **S. S. Abuthakeer, P.V. Mohanram, G. Muhan Kumar** Prévission et contrôle de la vibration de l'outil de coupe dans les tours à commande numérique avec Anova et Ann. /International Journal of Lean Thinking Volume 2, Issue 1 (June 2011)

[15]: **Ping Zou, Yingshuai Xu, Yu He, Mingfang Chen, and Hao Wu**, Etude expérimentale du tournage assisté par vibration par ultrasons de 304 austénitiques en acier inoxydable. Shock and Vibration, vol. 2015, Article ID 817598, 19 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/817598>.

[16]: **Meddour Ikhlas** thèse doctorat. Année 2015. Prédiction de la rugosité de surface, des efforts de coupe et des vibrations de l'outil en tournage dur par les méthodes rsm et ann - application au couple : al₂o₃+tic/ 100cr6 –

[17]: **Mohamed Athmane Yallese, Lakhdar Boulanouar, Nacer Zeghib, Salim Belhadi, Jean-François Rigal** Etude des efforts et de la température de coupe lors de tournage dur de l'acier aisi 52100 par un outil cbn. Revue Synthèse Volume 13, Numéro 1, Pages 74-86