

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : De technologie

Département : Génie Mécanique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

OPTIMISATION DES PARAMETRES DE COUPE (cas du tournage)-APPROCHE PAR ANALYSE VIBRATOIRE

Présenté par : *MERAH KHAOULA*

Encadrant : *LAOUAR LAKHDAR* Professeur Université Badji Mokhtar-Annaba

Jury de Soutenance :

MEKHILEF Slimane	M. C. A	Université Badji Mokhtar-Annaba	Président
LAOUAR LAKHDAR	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba	Encadrant
BOUCHELAGHEM Abdelaziz	Professeur	Université Badji Mokhtar-Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Mes remerciements s'adressent en premier lieu, à mon Dieu tout puissant qui m'a aidé pour mener ce travail.

*Je tiens à remercier mon encadrant, Professeur **Lakhdar LAOUAR** pour ses précieux conseils et ses encouragements durant le déroulement de ce travail, pour sa patience, sa disponibilité.*

*Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury **Pr .BOUCHLAGHEM .A** et **Dr. MEKHILF.S**, de m'avoir fait l'honneur de juger mon travail et d'assister à la soutenance.*

*Je remercie vivement les collègues doctorants, **MEBAREK Majdi** et **BOUCHLAGHEM Nassim** pour leur aide et leur soutien durant l'exécution de ce travail.*

*Mes remerciements les plus sincères au personnel de l'entreprise **AMM El-Hadjar** pour leur accueil durant la période de stage.*

Mes remerciements vont également à tout le personnel du département de génie mécanique et du laboratoire de mécanique industrielle.

Enfin je remercie toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire, ainsi que tous les collègues de la promotion

2022-2023.

*A ma très chère Mère. Qui s'est toujours sacrifiée pour me voir
réussir. A mon père*

A mon fiancé "A.M.F.E.D"

Ma grand-mère et grand père

Mon frère et Ma sœur

Mes tantes,

Toute ma famille Merah - Dendani

Mes cousins et cousines

Mes nièces, mes neveux

Mes chères copines

Les doctorants qui m'a aidé

Majdi et Nassim

Listes des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Abstract	
المخلص	
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Etude Bibliographique.	
I.1. Introduction.....	3
I.2. La qualité de surface (importance production et caractérisation).....	3
I.2.1. Importance.....	3
I.2.2. Rôle et fonctions de la surface.....	3
I.2.3. Relation entre l'état de surface et fonctionnalité d'une pièce.....	4
I.3. Mise en forme et production des surfaces des pièces mécaniques.....	4
I.4. Procédé par enlèvement de matière.....	6
I.5. Procédé du tournage.....	6
I.5.1 Outils de coupe.....	7
I.5.2 Géométrie de l'outil de coupe.....	7
I.5.2.1 Eléments de l'outil.....	7
I.5.2.2 Angles de l'outil.....	8
I.5.2.3 Définition des angles caractéristiques.....	9
I.5.3. Matériaux d'outils.....	10
I.5.4. Conditions de coupe.....	12
I.6. Influence de la machine –outil et des conditions de coupe sur la qualité de la surface	
I.7. Qualité de surface –Rugosité.....	14
I.7.1 Définition.....	14
I.7.2 Défauts de surface.....	14
I.8. Techniques d'analyse et de surveillance.....	17
I.9. Généralités sur l'analyse vibratoire.....	18
I.9.1 Définition de vibration.....	19
I.9.2. Définition de vibration d'usinage.....	19

I.9.3. Les risques des vibrations.....	19
I.9.4. Type des vibrations.....	20
I.9.4.1. Vibrations libres.....	20
I.9.4.2. Vibrations forcées.....	20
I.9.4.3. Vibrations auto-excitées.....	21
I.9.5. Effets des vibrations sur les processus de coupe.....	21
I.9.6. Analyse vibratoire.....	22
I.9.7. Appareils de mesure des vibrations.....	22
I.9.8. Les méthodes de mesures des vibrations.....	22
I.9.8.1. Mesures directes.....	22
I.9.8.2. Mesure avec contact.....	22
I.9.8.3. Mesure sans contact.....	23
I.9.8.4. Mesure indirecte.....	24
I.9.9. Indicateurs scalaires.....	24
I.9.9.1. Valeur efficace au valeur RMS.....	25
I.9.9.2. Facteur crête.....	25
I.9.9.3. Kurtosis.....	25
I.9.9.4. Facteur K (FK).....	26
I.9.9.5. Skewness.....	26
I.10. Conclusion.....	27

Chapitre II. Matériels et méthodes.

II.1. Introduction.....	29
II.2. Matériau.....	29
II.2.1. Composition chimique du matériau.....	29
II.3. Mesure de la dureté.....	30
II.4. Machine –outil et ses caractéristiques.....	30
II.5. Outil de coupe.....	31
II.6. Montage sur tour.....	32
II.7. Préparation de la pièce.....	32
II.8. Dimensionnement de la pièce.....	33
II.9. Régime de coupe.....	34

II.10. Etude expérimentale.....	34
II.11. Mesure de rugosité	35
II.12. Analyse vibrations.....	35
II.13. Composants du système compact DAQ.....	36
II.14. Conclusion.....	37
Chapitre III. Résultats et interprétation.	
III.1.Introduction.....	39
III.2.Résultats expérimentaux des rugosités et des signaux vibratoires.....	39
III.3. Traitements des données.....	39
III.3.1. Traitement par Minitab.....	39
III.3.1.1. Traitement des données de rugosité.....	39
III.3.1.2. Traitement des données des indicateurs.....	40
III.3.2. Traitement par Box-behnken.....	47
III.3.2.1. Traitement des données de rugosité.....	47
III.3.2.2. Traitement des données des indicateurs.....	49
III.4. Test de validation.....	61
III.5. Conclusion.....	62
Conclusion générale	63
Référence bibliographique	65

Chapitre I : Eude bibliographique

Figure I.1. Les différents procédés de mise en forme et de fabrication	5
Figure I.2. Opération de tournage	7
Figure I.3. Les principales arêtes et surfaces d'un outil de tournage	8
Figure I.4. Plan de référence Pr, plan de travail conventionnel Pf, plan de l'arête l'outil Ps ...	8
Figure I.5. Les angles d'arêtes de l'outil	9
Figure I.6. Les angles des faces de l'outil	10
Figure I.7. Les paramètres de coup en tournage	13
Figure I.8. Ordre 1	15
Figure I.9. Ordre 2	15
Figure I.10. Ordre 3.....	16
Figure I.11. Ordre 4.....	17
Figure I.12. Les différents types d'analyse	18
Figure I.13. Définition d'une vibration	19
Figure I.14. Vibrations dans les outils coupants.....	19
Figure I.15. Vibrations libre	20
Figure I.16. Vibrations forcée	20
Figure I.17. Vibrations auto –excitées	21
Figure I.18. Capteur de vibration	23
Figure I.19. Vibromètre laser	24
Figure I.20. Représentation schématique de la distribution d'une variable aléatoire correspondant à trois valeurs du Kurtosis.....	26

Chapitre II : Matériels et méthodes.

Figure II.1. Spectromètre à émission optique (thermo Fisher).....	29
Figure II.2. Duromètre.....	30
Figure II.3. Tour 1A616	31
Figure II.4. Outil de charioter dresser	31
Figure II.5. Outil de tronçonnage	32
Figure II.6. Dispositif expérimentale	32
Figure II.7. La pièce usinée	33
Figure II.8. Dessin de définition	33

Figure II.9. Rugosimètre TR220.....	34
Figure II.10. Le matériel utilisé lors de l'analyse vibratoire.....	36
Figure II.11. Composants du système compact DAQ	37
Figure II.12. Schéma de la procédure expérimentale	37
Chapitre III : résultats et interprétation	
Figure III.1. Graphe des effets principaux pour Ra.....	40
Figure III.2. Graphe des effets pour RMSx	41
Figure III.3. Graphe des effets RMSy.....	42
Figure III.4. Graphe des effets pour RMSz	43
Figure III.5. Graphe des effets principaux pour Kux.....	44
Figure III.6. Graphe des effets principaux pour Kuy.....	45
Figure III.7. Graphe des effets principaux pour Kuz.....	46
Figure III.8. Diagramme de surface 3D de Ra.....	48
Figure III.9. Diagramme de surface 3D de RMSx.....	50
Figure III.10. Diagramme de surface 3D de RMSy.....	52
Figure III.11. Diagramme de surface 3D de RMSz.....	54
Figure III.12. Diagramme de surface 3D de Kux.....	56
Figure III.13. Diagramme de surface 3D de Kuy.....	58
Figure III.14. Diagramme de surface 3D de Kuz.....	60
Figure III.15. Indicateur RMS.....	61
Figure III.16. Evolution de la rugosité	61

Chapitre II : Matériels et méthodes

Tableau II.1. Analyse chimique de matériaux	29
Tableau II.2. Les résultats de la dureté	30
Tableau II.3. Caractéristiques du tour 1A616.....	31
Tableau II.4. Les régimes de coupe	34
Tableau II.5. Les niveaux	34
Tableau II.6. Matrice de Box –Behnken pour trois facteurs	34
Tableau II.7. Matrice d’expériences en tournage	35

Chapitre III : Résultats et interprétation

Tableau III.1. Résultat de box –behnken	39
Tableau III.2. Traitement de la matrice d’expériences Ra	47
Tableau III.3. Traitement de la matrice d’expériences de RMSx	49
Tableau III.4. Traitement de la matrice d’expériences de RMSy	51
Tableau III 5. Traitement de la matrice d’expériences de RMSz	53
Tableau III.6. Traitement de la matrice d’expériences de KUx	55
Tableau III.7. Traitement de la matrice d’expériences de KUy.....	57
Tableau III.8. Traitement de matrice d’expériences de KUz	59
Tableau III.9. Les résultats du test de validation.....	61

Résumé

La qualité de surface joue un rôle important lors du fonctionnement d'une structure mécanique et conditionne ainsi sa durée de vie. Généralement, les surfaces fonctionnelles des pièces de mécanisme sont réalisées et parachevées par enlèvement de matière, cependant pour obtenir les meilleurs résultats sur la qualité de surface, il serait important de rechercher les conditions de coupe les plus favorables. On se propose alors, dans ce projet d'examiner un système usinant (opération de tournage), en vue d'optimiser le régime de coupe permettant d'obtenir un bon état de surface caractérisé par une rugosité R_a minimale et en utilisant la surveillance par les techniques vibratoires de rechercher la corrélation entre l'état de surface réalisée et les indicateurs vibratoires scalaires (RMS et Kurtosis). Une étude expérimentale a été engagée, ce qui a permis d'étudier l'effet des paramètres de coupe (N , f , a_p) sur la qualité de surface (R_a) et les signaux vibratoires relevés selon les 3 axes (x , y et z) en temps réel lors de l'usinage d'une pièce en acier non allié C50. La conduite de l'expérimentation a été effectuée au moyen d'une méthodologie basée sur les plans d'expériences de Box-behnken, ce qui a permis de formuler des modèles de prédiction, des courbes 3D et d'isométries. Les indicateurs scalaires RMS et le Kurtosis ont été obtenus à partir du traitement des résultats expérimentaux au moyen d'un programme élaboré sous Matlab. Le traitement des données par MINITAB et par le modèle de Box-Behnken, ont révélé que l'évolution de l'indicateur RMS est en accord avec celle de la rugosité R_a , nous retenons alors que l'indicateur RMS est le plus représentatif.

Mots clés : Qualité de surface, Optimisation, Indicateurs vibratoires, Rugosité

The surface quality plays an important role during the operation of a mechanical structure and thus determines its lifetime. Generally, the functional surfaces of mechanism parts are produced and finished by removing material, however to obtain the best results on surface quality, it would be important to seek the most favorable cutting conditions. We then propose, in this project to examine a machining system (turning operation), with a view to optimizing the cutting regime allowing to obtain a good surface characterized by a minimum roughness Ra and by using monitoring by vibration techniques to find the correlation between the state of the surface produced and the scalar vibration indicators (RMS and Kurtosis). An experimental study has been started, which made it possible to study the effect of the cutting parameters (N, f, ap) on the surface quality (Ra) and the vibration signals recorded along the 3 axes (x, y and z) in real time when machining a C50 non-alloy steel part. The conduct of the experiment was carried out using a methodology based on the Box-behnken design of experiments, which made it possible to formulate prediction models, 3D curves and isoresponses. The RMS scalar indicators and the Kurtosis were obtained from the processing of the experimental results using a program developed under Matlab. The data processing by MINITAB and by the Box-Behnken model, revealed that the evolution of the RMS indicator is in agreement with that of the roughness Ra, we retain then that the RMS indicator is the most representative.

Key words : surface quality, Optimization, Vibration indicators, roughness.

تلعب جودة السطح دورًا مهمًا أثناء استعمال هيكل ميكانيكي وبالتالي تحدد العمر الافتراضي له. بشكل عام يتم إنتاج الأسطح الوظيفية لأجزاء الآلية وتشطيبها عن طريق إزالة المواد، وللحصول على أفضل النتائج لجودة السطح، سيكون من المهم البحث عن أفضل ظروف القطع. يُقترح بعد ذلك في هذا المشروع فحص نظام التشغيل الآلي (عمليات الخراطة) ، بهدف تحسين نظام القطع الذي يسمح بالحصول على حالة سطح جيدة تتميز بالحد الأدنى من الخشونة Ra وباستخدام المراقبة بواسطة تقنيات الاهتزاز للعثور على العلاقة المتبادلة بين حالة السطح الناتج ومؤشرات الاهتزاز القياسي (RMS و Kurtosis). تم إجراء دراسة تجريبية أتاحَت دراسة تأثير عوامل القطع (السرعة ، التغذية ، عمق القطع) على جودة السطح (Ra) وإشارات الاهتزاز المسجلة على طول المحاور الثلاثة (x و y و z) أنيا أثناء تشغيل قطعة من فولاذي لا سبيكي C50. تم إجراء التجربة باستخدام منهجية تعتمد على تصميم (Box-behnken) للتجارب، مما جعل من الممكن صياغة نماذج تنبؤ ومنحنيات ثلاثية الأبعاد واستجابات متساوية. تم الحصول على مؤشرات RMS العددية والتفرطح من معالجة النتائج التجريبية باستخدام برنامج تم تطويره تحت Matlab. كشفت معالجة البيانات بواسطة MINITAB ونموذج (Box-behnken) ، أن تطور مؤشر RMS يتوافق مع مستوى الخشونة Ra، والنتيجة أن مؤشر RMS هو الأكثر تمثيلًا.

الكلمات المفتاحية: جودة السطح، التحسين، مؤشرات الاهتزاز، الخشونة

Introduction général

Dans l'industrie mécanique, le souci du fabricant est en premier lieu la réalisation des produits de bonne qualité avec un coût minimal. Lors du procédé par enlèvement de matière, ce résultat peut être obtenu par la recherche des conditions optimales d'usinages. Pendant le processus de coupe la présence de vibrations dans le couple outil matière (COM) a été observée, ce qui engendre une détérioration de l'état de surface. En effet, il a été montré dans plusieurs travaux qu'il existe une forte corrélation entre les vibrations et la rugosité de surface. De ce fait, pour la maîtrise des conditions d'usinages, on fait appel aux techniques de surveillance par analyse vibratoire. Par conséquent, pour évaluer la qualité de surface, différentes caractéristiques des signaux vibratoires ont été utilisées. Le but de ce travail consiste à montrer l'influence des paramètres de coupe sur la qualité de surface caractérisée par la rugosité "Ra", en mettant en relief la relation de cette dernière avec les indicateurs vibratoires tels que le RMS ainsi que le kurtosis.

Ce travail regroupe trois chapitres :

Le premier chapitre inclue une étude bibliographique sur l'importance de la qualité de surface dans un système mécanique, les procédés de mise en forme en mettant l'accent sur le procédé par coupe, la présentation de la rugosité, ainsi que les différentes techniques de surveillance et de contrôle par l'analyse vibratoire.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le matériau de l'échantillon examiné avec ses caractéristiques, la machine-outil et l'outil de coupe, la méthodologie expérimentale employée basée sur les plans d'expériences. Les instruments de mesure des signaux vibratoires et de mesure de rugosité sont exposés.

Le troisième chapitre, englobe les résultats de l'expérimentation et leurs traitements par Minitab et par le modèle de Box-Behnken. Des simulations sont présentées et interprétées, suivi de tests de validation des modèles.

Le mémoire s'achève par une conclusion générale avec des perspectives et des références bibliographiques.

Chapitre I

I.1 Introduction

La durée de vie d'un système mécanique, dépendent des caractéristiques des surfaces des pièces mécaniques qui le constituent. En effet, les surfaces fonctionnelles d'un corps solide sont souvent sollicitées aux différentes contraintes telles que la résistance aux frottements, à l'usure, à la corrosion, conduction thermique et électrique, contraintes mécaniques, étanchéité ...etc. Les surfaces mécaniques fabriquées présentent toujours des irrégularités où l'état de surface constitue un facteur important d'appréciation. En effet lors de la réalisation d'une surface, plusieurs facteurs interviennent, notamment, l'état des machines-outils, des conditions de mise en forme,...etc. Cependant, pour l'évaluation de la conduite d'une opération de fabrication, nous faisons appel aux différents indicateurs, tels que : le critère de rugosité et ceux relatifs aux fluctuations vibratoires dans le but d'effectuer un choix judicieux des paramètres de fabrication. Ce chapitre rassemble une partie bibliographique qui met en relief le rôle de la qualité de surface dans un mécanisme, l'étude des différents procédés de mise en forme en particulier par enlèvement de matière, la caractérisation de l'état de surface et la présentation des techniques et de surveillance par analyse vibratoire.

I.2 La qualité de surface (importance, production et caractérisation)

I.2.1 Importance

En raison du processus de production de la pièce, l'état de surface est représenté par des irrégularités, généralement elles sont mesurées avec un appareil appelé profil mètre avec une jauge d'épaisseur à pointe de diamant et reproduites graphiquement, permettant de visualiser la forme des irrégularités et Estimez leur profondeur et leur espacement. Dans les bureaux d'études, l'état de surface est un élément très important car il représente les dimensions de la pièce, indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect de la surface usinée. Un état de surface est un ensemble de caractéristiques microscopiques géométriques, chimiques, physico-chimiques et cristallographiques. La qualité de l'état de surface n'a pas été évaluée par rapport à des critères clairement définis. Elles restent encore dans bien des cas le domaine des laboratoires ou de grandes entreprises qui sont équipé des appareils de contrôle adaptés. Ces critères sont standardisés dans certaines industries (Automobile, l'emboutissage, etc...) Il faut dégager 4 caractéristiques principales :

1. L'apparence : Qualités de présentation, de contrôle ;
2. Le degré de soins : Qualité de décontamination ;
3. La rugosité : Qualité d'adhérence, ou d'accrochage de produits ou de revêtements ;
4. La dureté : Qualités des contraintes superficielles. [1]

I.2.2 Rôle et fonctions de la surface

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication

La surface fonctionnelle d'une pièce peut remplir 16 fonctions Surface de contact avec une autre pièce :

- Frottement de glissement lubrifié (FG),
- Frottement à sec (FS)
- , • Frottement de roulement (FR),
- Frottement fluide (FF),
- Résistance au matage (RM),
- Étanchéité dynamique avec ou sans joint (ED),
- Étanchéité statique avec ou sans joint (ES),
- Ajustement fixe avec contrainte (AC)
- Adhérence, collage (AD)

Surface libre, indépendante :

- Générée par la coupe d'un outil (OC),
- Résistance aux efforts alternés (EA),
- Résistance à la corrosion (RC),
- Destinée à recevoir un revêtement, peinture (RE),
- Destinée à recevoir un dépôt électrolytique (DE),
- Mesure (ME),
- aspect (AS). [2]

I.2.3 Relation entre l'état de surface et fonctionnalité d'une pièce

L'industrie mécanique et en particulier l'industrie aéronautique cherche toujours à optimiser les paramètres de surface afin d'améliorer leurs corrélations avec les phénomènes fonctionnels. Les surfaces des pièces ont une fonction bien précise, allant de la limitation de la matière à la réalisation des fonctions aussi complexes que l'étanchéité dynamique, des phénomènes de frottement et des pièces en mouvement relatif. L'aspect micro-géométrie de la surface intervient souvent de façon capitale dans son aptitude à satisfaire la fonction attendue. Un bon choix d'un ou plusieurs paramètres de l'état de surface permettra d'assurer la qualité du fonctionnement pendant la durée de vie du produit. Donc la qualité de l'état de surface influe sur la fonction que doit remplir cette surface.

I.3 Mise en forme et production des surfaces des pièces mécaniques

Un procédé de fabrication est un ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication suivant les besoins.

La fabrication mécanique consiste à la mise en forme des pièces mécaniques par plusieurs procédés :

- Obtention par enlèvement de matière
- Obtention par déformation
- Obtention par fusion
- Obtention par assemblage

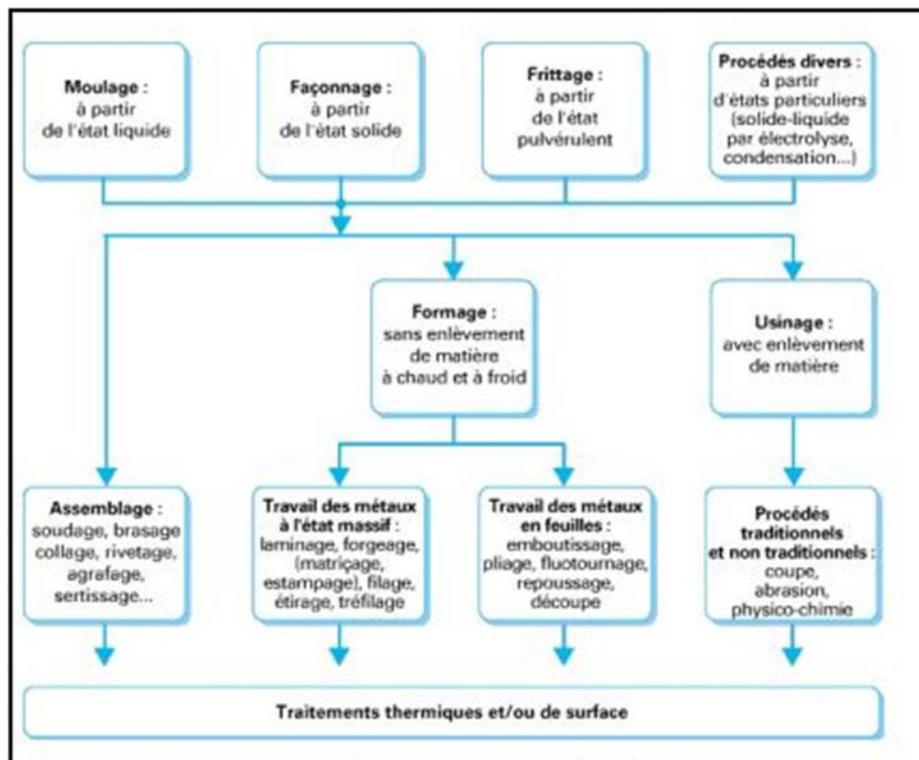


Figure I.1. les différents procédés de mise en forme et de fabrication

Dans le domaine de la fabrication mécanique, les industriels doivent faire face à de nombreux facteurs au sein du marché. Le prix de revient, les délais de livraison demandés et obtenir des pièces de bonne qualité de surface.

Le procédé par enlèvement de matière (par coupe) occupe une place importante dans l'élaboration des pièces mécanique, grâce aux nombreux avantages, notamment :

- Atteinte de très faibles tolérances (précision dimensionnelle élevée) ;
- Réalisation des coins très aigus peuvent être obtenus sur la pièce ;
- Préservation des propriétés mécaniques du matériau ;
- etc.....

I.4 procédé par enlèvement de matière

Le procédé par enlèvement de matière consiste à obtenir la forme finale par arrachements de petits morceaux de matière (copeaux). De manière générale on appelle usinage ces procédés. On y distingue les techniques suivantes :

- Le Tournage
- Le Fraisage
- Le perçage
- La perforation
- La Rectification
- Le Limage
- L'électro-érosion.
- Les découpages

Ce domaine est soumis à de fortes contraintes : économiques, technologiques et physique... etc. Les industriels ont besoin d'améliorer leurs processus de production pour améliorer l'état de la surface. Améliorer la qualité des pièces mécaniques implique l'obtention d'une bonne qualité de surface avec une grande précision des côtes. L'état de la surface et la précision des côtes dépend de plusieurs facteurs en l'occurrence, les paramètres de coupe, la nuance de la matière à usiner, la nuance et la géométrie de l'outil de coupe, ainsi que l'état de la machine-outil. [3]

I.5 Procédé de tournage :

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

La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. [4]

- **Le but du tournage** est de réaliser des formes de révolution tels que cylindres, cônes, tores et autres formes de révolution complexes.

Le tournage est une technique de coupe un peu particulière dans le domaine de l'usinage car c'est la seule pour laquelle on a à la fois :

- une pièce mobile
- un outil à dent unique

- une coupe continue (la matière défile en continu sur la face de coupe de l'outil)

Ces spécificités font que cette technique, très simple, est la plus utilisée et la mieux indiquée pour les axes de recherche liés à la coupe : paramètres, critères de performance, outils, matériaux, durée de vie des outils, ...etc.

- **Le principe du tournage est le suivant :** la pièce est solidaire d'une broche tournante (donc elle tourne) et l'outil se déplace dans un plan. La trajectoire de l'outil dans son plan d'évolution donne la génératrice de la pièce de révolution. [5]

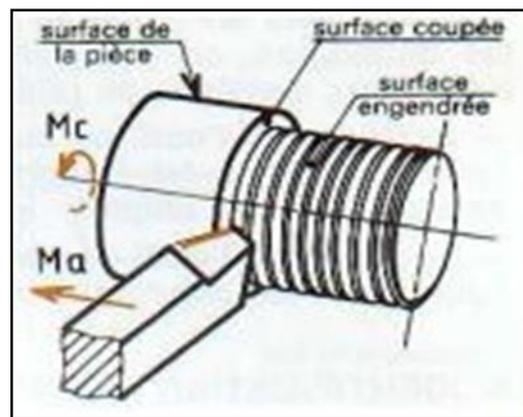


Figure I.2 : Opération de tournage

I.5.1 Outils de coupe

La conception des outils coupants est directement liée au matériau usiné, au type et la nature de l'opération (ébauche, finition). [6]

Les outils de coupe permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables de la pièce. [7]

I.5.2 Géométrie de l'outil de coupe

I.5.2.1 Éléments de l'outil : Un outil de coupe comprend deux parties

a. une partie active : partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps.

b. un corps ou queue de l'outil : nécessaire à la mise en position et le maintien de l'outil sur le porte-outil. [8]

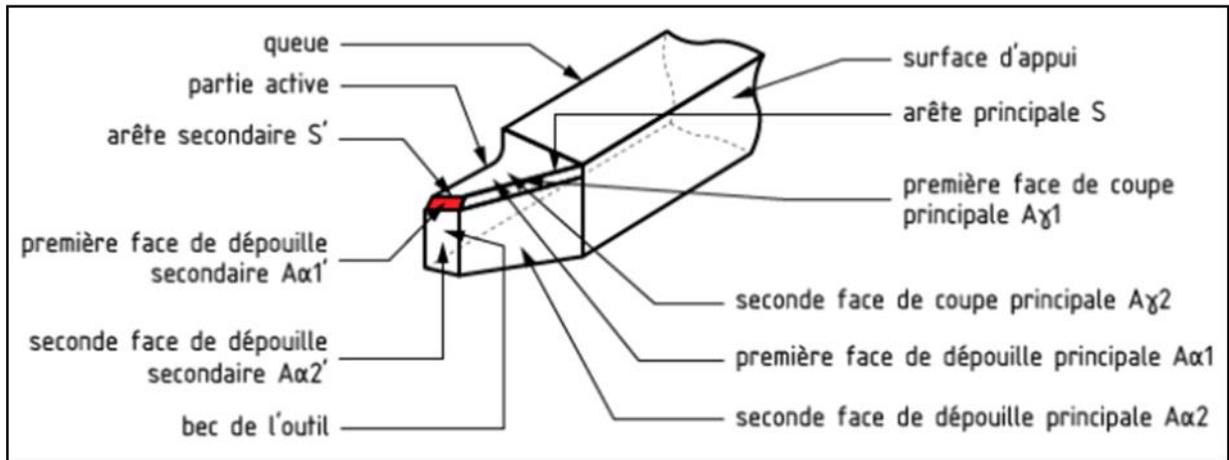


Figure I.3. Les principales arêtes et surfaces d'un outil de tournage.

I.5.2.2 Angles de l'outil : Les angles d'arête de l'outil se définissent après avoir situé et repéré les éléments de référence suivants : [9]

- M : point considéré de l'arête.
 - V : vecteur supposé du sens de coupe.
 - f : vecteur supposé du sens d'avance.
 - Pb : plan de base, surface d'appui de l'outil.
 - Pr : plan de référence parallèle à Pb et contenant M et f.
 - Pf : plan de travail conventionnel perpendiculaire à Pr et contenant M, V, f.
 - Ps : plan d'arête principale de l'outil perpendiculaire à Pr et tangent à l'arête en M.
- [10]

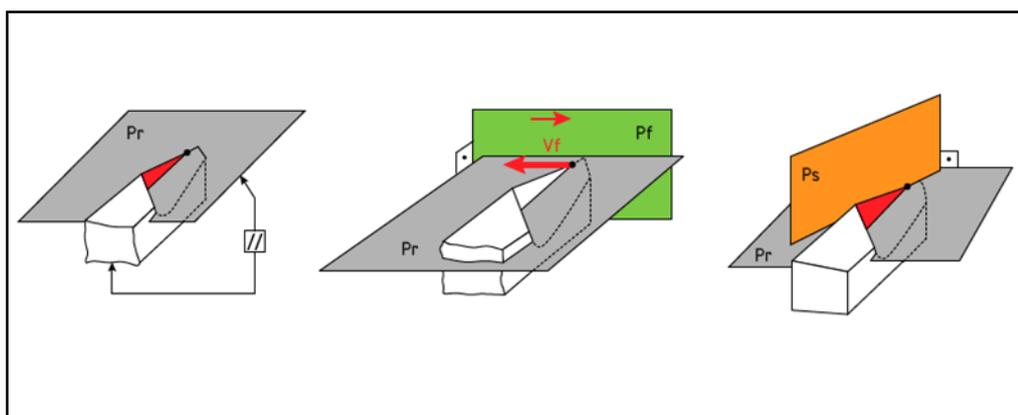


Figure I.4. Plan de référence Pr, plan de travail conventionnel Pf, plan de l'arête l'outil Ps.

I.5.2.3 Définition des angles caractéristiques

- Les angles d'arêtes de l'outil :

- λ_s "Lambda s" : angle d'inclinaison d'arête, angle aigu mesuré dans **Ps**, compris entre **Pr** et la tangente à l'arête, au point A. Il peut être positif ou négatif.
- κ_r "Kappa r" : angle de direction d'arête, angle aigu mesuré dans **Pr**, compris entre **Pf** et **Ps**.
- ϵ_r "epsilon r" : Angle de pointe, angle mesuré dans **Pr**, entre l'arête de coupe principale **S** et l'arête de coupe secondaire **S'**.

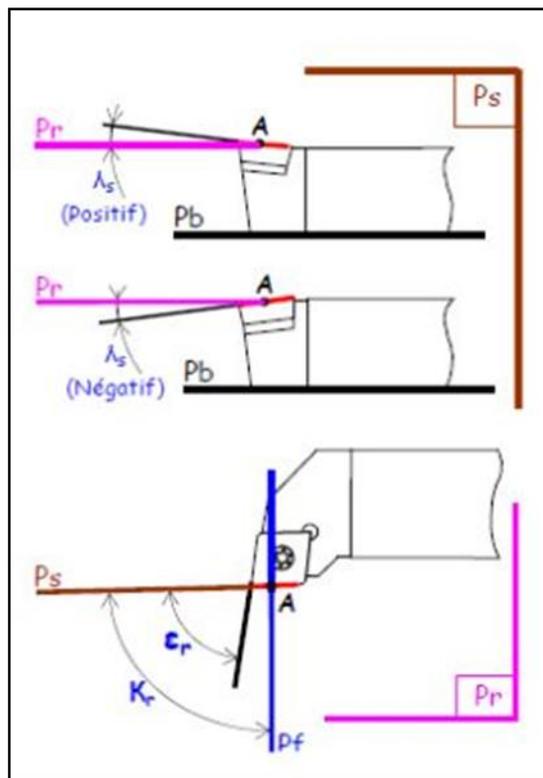


Figure I.5. Les angles d'arêtes de l'outil.

- Les angles des faces de l'outil

- α_o "alpha o" : angle de dépouille orthogonal, angle aigu mesuré dans **Po**, compris entre **Ps** et **Aa**.
- β_o "beta o" : angle de taillant orthogonal, angle mesuré dans **Po**, compris entre **Aa** et **Ay**.
- γ_o "gamma o" : angle de coupe orthogonal, angle aigu mesuré dans **Po**, compris entre **Pr** et **Ay**. [11]

$$Rq : \alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ$$

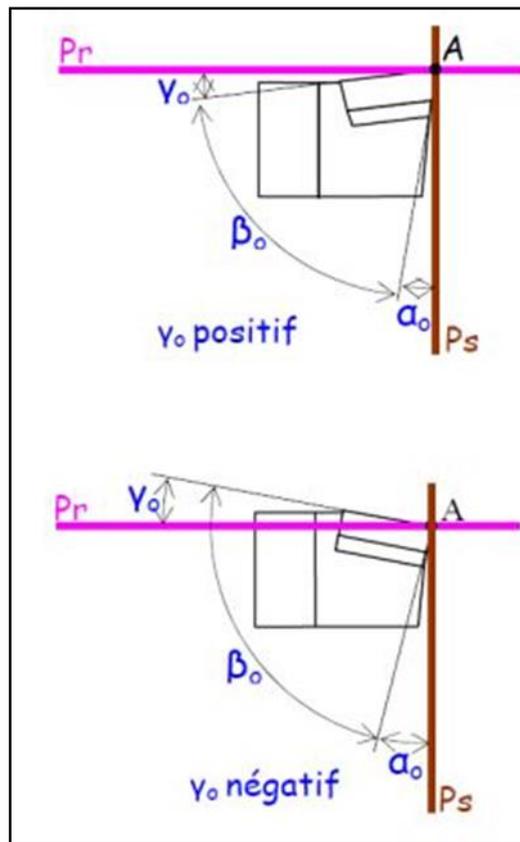


Figure I.6. Les angles des faces de l'outil.

I.5.3 Matériaux d'outils :

- **Aciers rapides**

Ce sont des aciers fortement alliés qui contiennent plus de 0,7 % de carbone et des éléments d'addition susceptibles de former des carbures :

- Dans tous les cas environ 4 % de chrome (C) ;
- Du tungstène (W), du molybdène (D), du vanadium (V), en proportions variables ;
- Eventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud.

Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C.

Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NF A 35-590 en retient 16, parmi lesquelles des aciers sur carburés et des aciers au cobalt.

- **Carbures métalliques**

Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie des poudres par frittage, Ils sont constitués :

- De substances dures (60 à 95 % du carbure) qui donnent la dureté et donc la résistance à l'usure. Elles se composent de carbure de tungstène (WC) phase (γ), de carbure de titane (TiC), de carbure tantale (TaC) et de carbure de niobium (NbC) (phase γ).

- De substances liantes qui donnent la ténacité au carbure. La plus employée est le cobalt (Co) car il dissout facilement les différents carbures (phase β). On obtient différentes nuances de carbures en faisant varier le pourcentage des substances dures et liantes. Ces nuances présentent des tenues plus ou moins importantes à l'usure (selon la dureté) et aux chocs (selon la ténacité) en fonction de l'utilisation prévue.

La résistance à la chaleur et la conductivité thermique dépendent :

- De la taille des grains **WC**
- Du pourcentage de **Co**
- Du contenu de la phase γ .

• Carbures micrograin

Ils sont caractérisés par une structure granulométrique très fine du carbure de tungstène (0,2 à 1 μm), lié par du cobalt (6 à 13 %).

Ils ont une ténacité plus élevée pour une dureté constante et de ce fait peuvent entrer dans le domaine des applications de matériaux tels que l'acier rapide. Cette nuance permet des arêtes beaucoup plus fines par suite, l'obtention d'angles de coupe très positifs.

• Carbures revêtus

Les carbures existent de plus en plus sous forme revêtus. Ce revêtement en couches de quelques microns (1 à 20 μm) est constitué, selon les applications:

- De nitrure de titane (TiN), d'une dureté d'environ 2 000 HV (jaune d'or).
- De carbure de titane (TiC), d'une dureté d'environ 3 900 HV (gris).
- De carbonitrure de titane (Ti) (C1N), d'une dureté de 3 000 HV (gris).
- D'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), d'une dureté d'environ 2 400 (noir).

Ces revêtements améliorent très nettement les possibilités des outils, en particulier la durée de vie, grâce à une réduction importante du frottement copeau/outil et pièce/outil. Les résultats sont surtout spectaculaires sur les aciers rapides (certains fabricants de fraises annoncent une augmentation de la durée de vie de 500 %).

• Cermets

Il s'agit de matériaux à base de titane avec un liant de nickel, de cobalt ou des deux à la fois. Ils ont une très bonne résistance à l'usure et une excellente stabilité chimique. Ils sont surtout réservés aux opérations de finition. Ils donnent de bons résultats en tournage de finition pour

les aciers, en particulier pour les aciers inoxydables. Ils peuvent être revêtus (PVD) de TiN et Ti (C1N).

• Céramiques

Les céramiques se présentent sous forme de plaquettes frittées, il existe deux grandes familles de céramiques :

Les céramiques à base d'alumine sous deux aspects : les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxyde d'aluminium et d'autres oxydes métalliques ;

- Les céramiques mixtes de couleur grise composée d'oxydes d'aluminium et de carbures métalliques.
- Les céramiques à base de nitrure de silicium : ce sont des matériaux nouveaux, les plus connus étant les sialons. Elles sont de couleur noire, composée de nitrure de silicium et d'oxydes métalliques.

En pratique, les céramiques sont prévues pour supporter des vitesses de coupe élevées à des températures importantes. Elles résistent bien à l'usure mais mal aux chocs. Elles sont souvent utilisées sur des machines puissantes pour l'usinage des métaux ferreux. Elles ne conviennent pas pour les alliages légers et pour les alliages de titane (problèmes chimiques). Elles peuvent être revêtues de TiN et Al₂O₃.

• Nitrure de bore cubique (CBN)

Le nitrure de bore cubique est un des matériaux de coupe des plus durs (dureté supérieure aux céramiques et aux carbures).

Il s'agit de particules de nitrure de bore cubique et une matière liante céramique. Il se présente généralement sous la forme d'une pointe qui est basée sur un support de carbure. Il peut également être fritté sur chaque pointe du support carbure, ce qui améliore la sécurité.

Les plaquettes peuvent être revêtues (PVD) de TiN, ce qui facilite la détection de l'usure. Une nuance additionnée de nitrure de titane, très dure, est principalement utilisée en finition pour les aciers trempés, les aciers cimentés et pour les fontes. Une nuance de CBN pure, très résistante à l'usure, mais aussi très tenace est recommandée pour les aciers trempés et les fontes dans des conditions difficiles.

• Diamant polycristallin (DP ou PCD)

Le diamant polycristallin est composé de cristaux à grains fins de diamètres compris entre 5 et 30µm. Les plaquettes de coupe sont découpées par électroérosion dans un disque de diamant polycristallin. Il est recommandé pour la finition et la semi-finition des métaux non ferreux (aluminium, cuivre, plomb) et pour les matières non métalliques telles que le graphite et les composites. [12]

I.5.4 Condition de coupe

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, le type de machine, la puissance de la machine et le type de l'opération.

- **Vitesse de coupe :**

En usinage, la vitesse de coupe v_c est la distance parcourue par une dent en une minute. Elle est exprimée en mètres par minute (m/min).

Elle dépend de la matière usinée, du type d'opération, de l'outil, de l'état de surface souhaité, etc. Ainsi a été développée une technique qui permet de déterminer la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance par dent en recherchant le minimum de la pression spécifique. On appelle cela le Couple Outil Matière (COM).

La formule de calcul de la vitesse de coupe est donnée par la relation suivante :

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad [\text{m/min}]$$

D : diamètre de la pièce à usiner en (mm)

n : vitesse de rotation en (tr/min)

- **Vitesse d'avance :**

Est la vitesse de déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage. C'est cette trajectoire qu'il faut suivre afin que l'outil usine la forme souhaitée. Elle est exprimée en [mm/min].

- **Profondeur de passe :**

La profondeur de passe est le volume de la matière enlevée qui dépend de l'engagement de l'outil dans la pièce. Elle est exprimée en [mm]. [13]

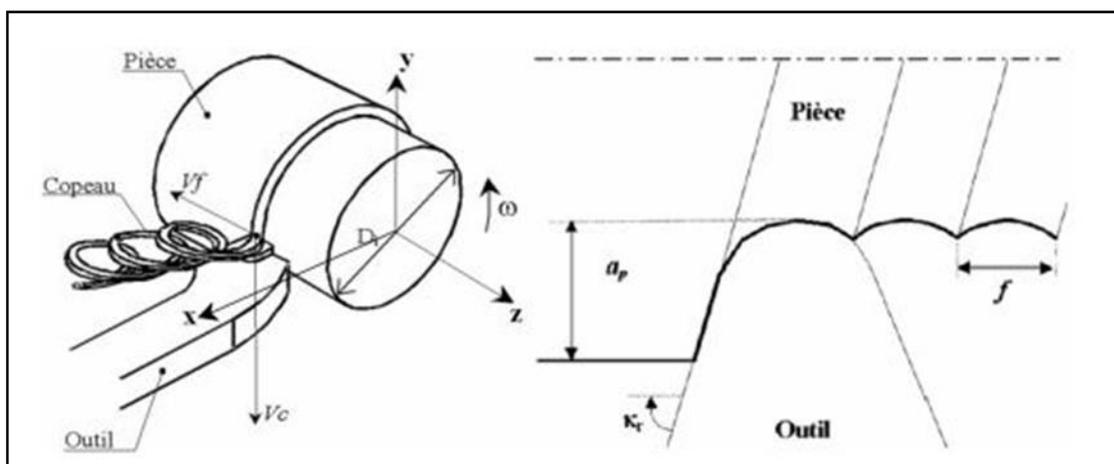


Figure I.7. Les paramètres de coupe en tournage.

I.6 Influence de la machine-outil et des conditions de coupe sur la qualité de la surface

L'état de surface d'une pièce usinée est influencé à la fois par la machine-outil utilisée et par les conditions de coupe. En effet une machine-outil rigide réduit les vibrations et les déformations pendant l'usinage, ce qui peut améliorer l'état de surface. Les machines de haute qualité, dotées de structures robustes, peuvent fournir une meilleure stabilité et une précision, ce qui se traduit par une meilleure finition de surface. Les paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe doivent être optimisés en fonction du matériau et de la géométrie de la pièce. Des paramètres de coupe correctement sélectionnés réduisent les forces excessives les vibrations, ce qui améliore l'état de surface.

I.7 Qualité de surface - Rugosité

I.7.1 Définition

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, à la rigidité du montage et de la machine, à la formation des copeaux, aux efforts de coupe,...etc.

I.7.2. Défauts de surface

Ces défauts sont de nature géométrique ou physico-chimique. On ne s'intéresse ici qu'aux défauts géométriques, qui sont classés conventionnellement sous quatre numéros d'ordre

- **Défauts du premier ordre :**

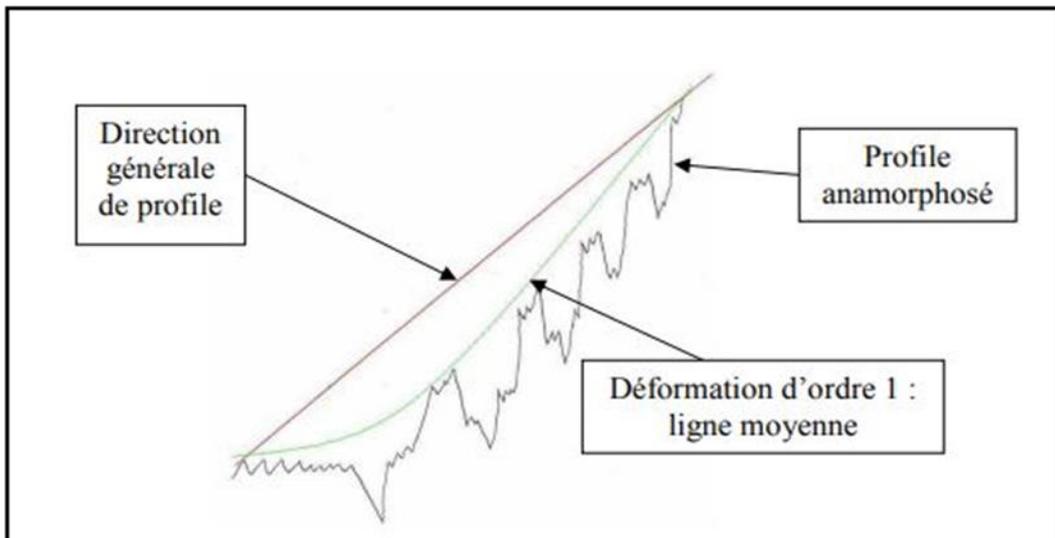
Écart de forme ou de position (ligne moyenne), il est représenté par la ligne moyenne.

Les différents types de défauts représentés par l'ordre 1 sont :

- Les défauts de planéité.
- Les défauts de rectitude.
- Les défauts de circularité.

Les causes de ces défauts sont :

- La déformation de la pièce avant usinage dans son système d'ablocage.
- La déformation de la pièce au cours de l'usinage due à l'effort exercé par l'outil sur la pièce ou due à la mauvaise inclinaison de l'outil.
- La déformation de la pièce après démontage (contraintes internes (ex : température))
- La déformation de l'outil machine due à l'action de la pièce sur l'outil.
- Les défauts au niveau des guidages.



FigurI.8. Ordre 1.

• **Défauts du deuxième ordre**

Ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquence de la pièce et de l'outil générateur.

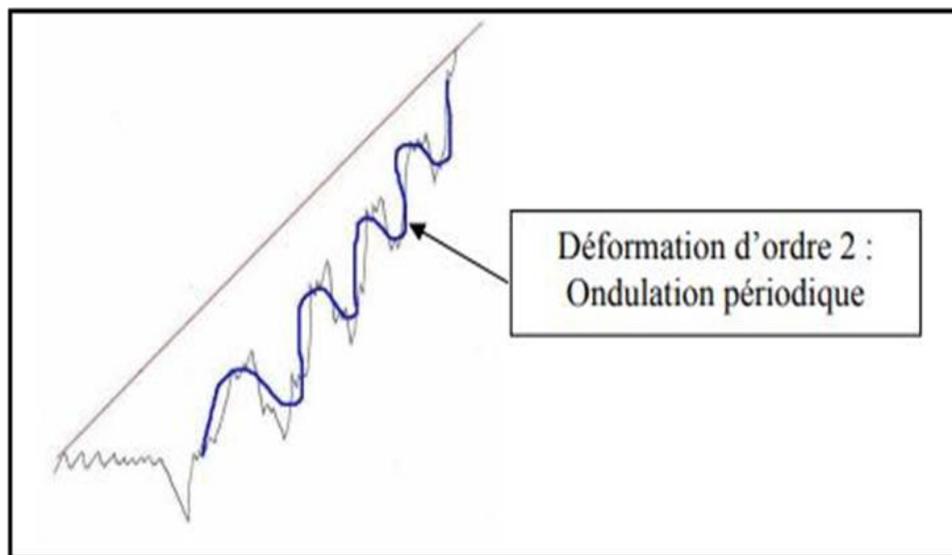


Figure I.9. Ordre 2 .

Ces phénomènes se traduisent par un manque de rigidité au niveau de :

- La pièce, dû à un mauvais équilibrage du montage sur le porte pièce.
- L'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple.
- La machine.

• **Défauts du troisième ordre**

L'influence de ces défauts a lieu au niveau de :

- L'étanchéité : Statique (pas de mouvement entre les pièces). Dynamique (mouvement entre deux pièces).
- Les frottements fluides.
- Les problèmes de revêtement (peinture...).

Les causes de ces défauts sont :

- Les phénomènes vibratoires hauts fréquence.
- Les stries ou sillons dus au passage de l'outil ($r\epsilon$).

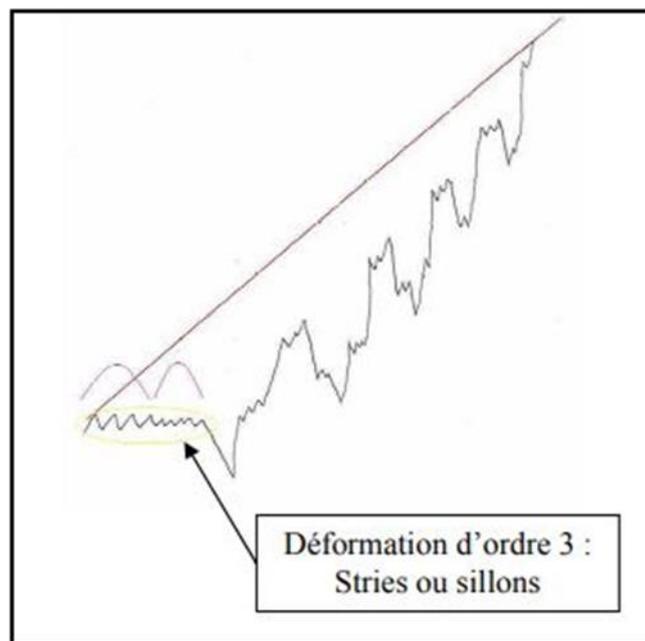


Figure I.10. Ordre 3.

• Défauts du quatrième ordre

Arrachement de matière, l'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 3.

Les causes de ces défauts sont :

- le mauvais affûtage de l'outil.
- chocs de l'outil sur la pièce (au montage par exemple).
- empreintes du système de serrage.

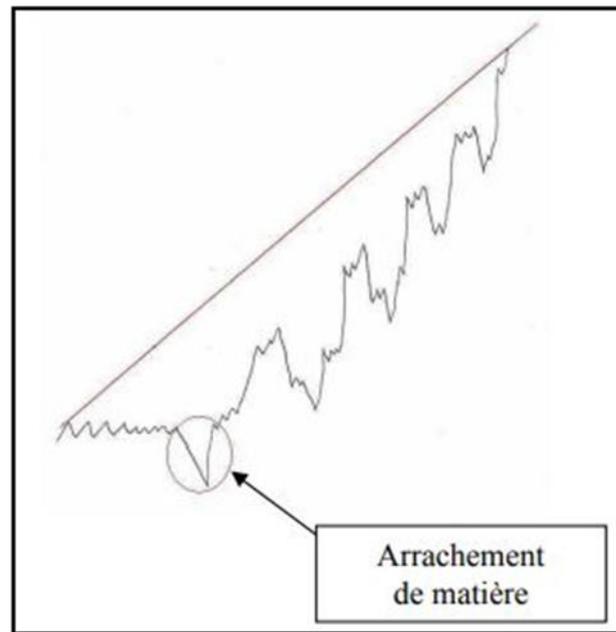


Figure I.11. Ordre 4.

➤ La maîtrise du processus de production d'une surface par enlèvement de matière (par coupe), nécessite l'emploi des techniques de contrôle, d'analyse, voire de surveillance du procédé. [14]

I.8. Techniques d'analyse et de surveillance

La surveillance d'un équipement de machine est assurée en relevant périodiquement un indicateur d'état de dégradation ou de performance. Il existe différentes techniques d'analyse :

- **L'analyse vibratoire** est la plus largement utilisée car adaptée aux des composants mécaniques et aux machines industrielles en fonctionnement. Elle permet de détecter la majorité des défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes.

- **L'analyse d'huile** est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrification (réducteurs, motoréducteurs, ...). Elle consiste à prélever un échantillon d'huile et de l'analyser pour déduire l'état de l'équipement.

- **La thermographie infrarouge** Elle est peu utilisée pour la surveillance des machines tournantes notamment pour la détection de défauts qui se manifestent par un échauffement anormal à la surface de l'équipement. La thermographie permet de réaliser des mesures à distances et d'obtenir instantanément une image thermique de la zone inspectée.

• **L'analyse acoustique** permet de détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones placés à distance de l'équipement.

• **Le contrôle par ultrasons** permet de détecter des défauts de faibles amplitudes à hautes fréquences tels que l'initiation de la dégradation d'un roulement.

➤ Le choix de l'indicateur dépend du type de machine à étudier et du type de défaillance que l'on souhaite détecter.

➤ Pour les machines tournantes, un indicateur de type vibratoire permet de détecter la plupart des défauts. [15]

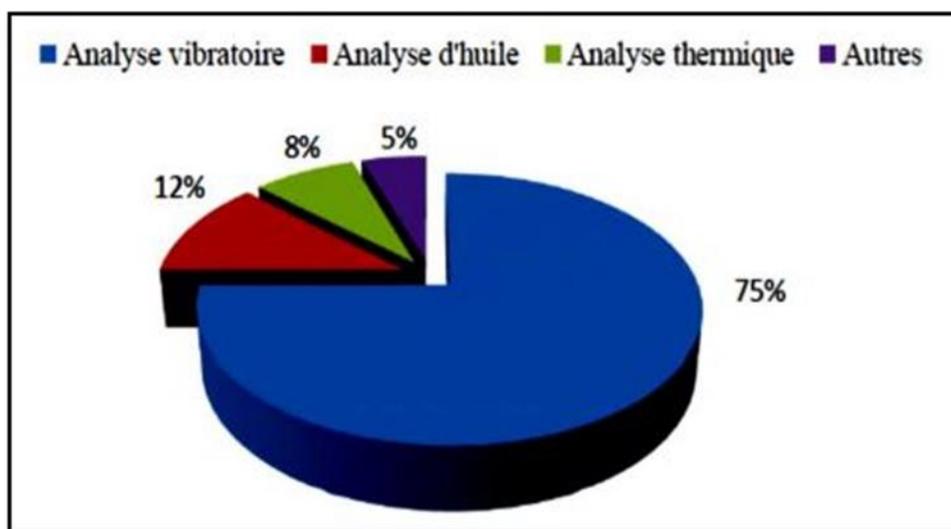


Figure I.12. Les différents types d'analyse.

I.9. Généralité sur l'analyse vibratoire

I.9.1. Définition de vibration :

Les vibrations sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Le mouvement vibratoire (ou mouvement oscillatoire) est fondamental en physique, et peut être trouvé sous les formes les plus variées : mouvement d'un pendule ou d'un poids suspendu à un ressort, mouvement des atomes à l'intérieur d'un solide ou d'une molécule, ou encore déplacement des électrons dans une antenne émettrice ou réceptrice d'ondes électromagnétiques. [16]

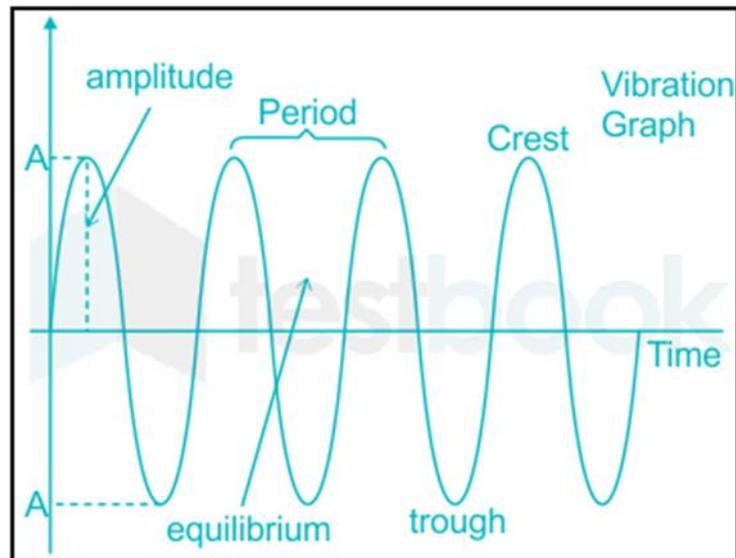


Figure I.13. Définition d'une vibration.

I.9.2. Définition vibration d'usinage :

Les vibrations d'usinage correspondent à un mouvement relatif entre la pièce usinée et l'outil coupant, ce qui se traduit par des ondulations plus ou moins marquées sur la surface usinée, que ce soit en tournage, fraiseage, perçage ou rectification. [15]

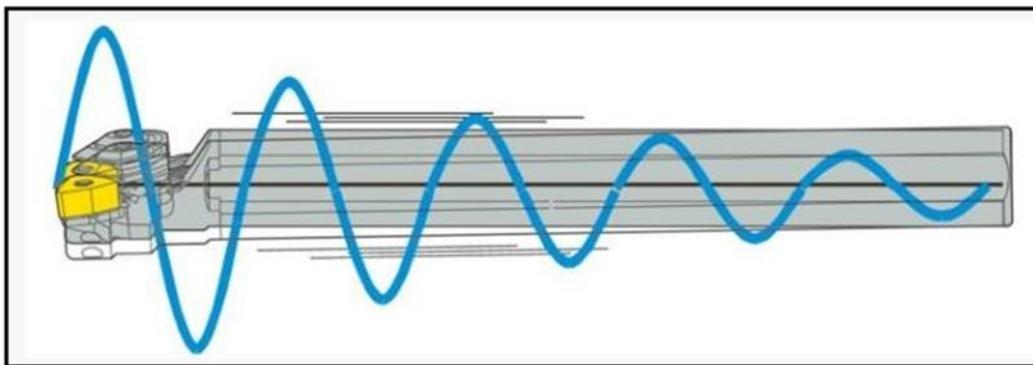


Figure I.14. Vibrations dans les outils coupants.

I.9.3. Les risques des Vibrations :

Les travaux d'usinages de précision sont effectués aujourd'hui presque exclusivement avec des outils dotés de plaquettes en carbure ou revêtues de diamant poly cristallin, sinon à bec rapporté en diamant. Les porte-outils existent en une variété de formes et de conceptions ayant une large influence sur la qualité de surface, la précision dimensionnelle des pièces usinées et la tenue des outils. Une telle situation s'avère critique dès lors que l'on usine des alésages profonds du

fait qu'il est alors nécessaire d'utiliser un outil présentant un porte-à-faux d'un rapport longueur sur diamètre important. [17]

I.9.4. Type des vibrations :

Sur les machines-outils utilisées en coupe, deux types de vibrations peuvent être observés :

I.9.4.1.vibrations libres

Elles correspondent à la réponse vibratoire naturelle de tout système mécanique à une brève excitation, un impact. Dans le cas de l'usinage, que ce soit en fraisage ou en tournage, elles sont généralement utilisées pour la caractérisation du système, lors d'un sonnage ou test du marteau.

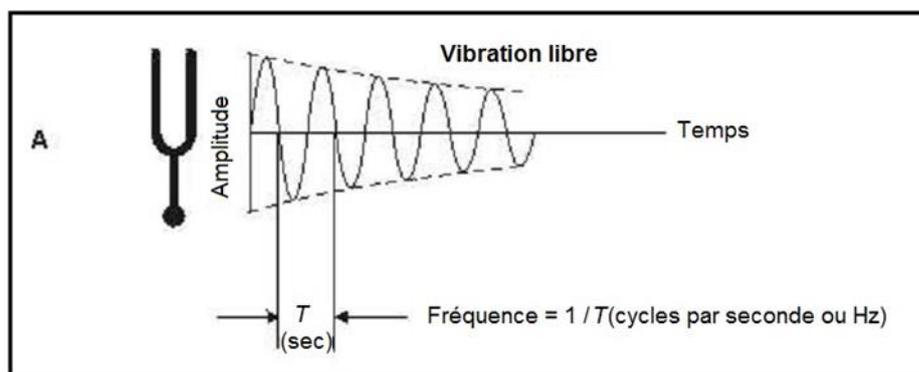


Figure I.15. Vibration libre.

I.9.4.2. Vibrations forcées

Elles apparaissent sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- La variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe interrompue ou une surépaisseur variable.
- Les effets dynamiques provoqués par un mauvais équilibrage des masses en mouvement.
- La précision insuffisante des guidages et des organes de transmission.

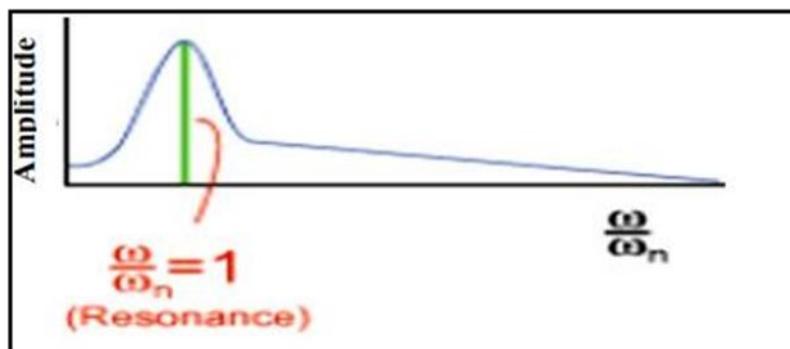


Figure I.16. Vibration forcée.

I.9.4.3. Vibrations auto- excitées

C'est un phénomène plus complexe et bien plus fréquent dans la coupe des métaux que le phénomène des vibrations forcées. 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 cisailée.

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. [17]

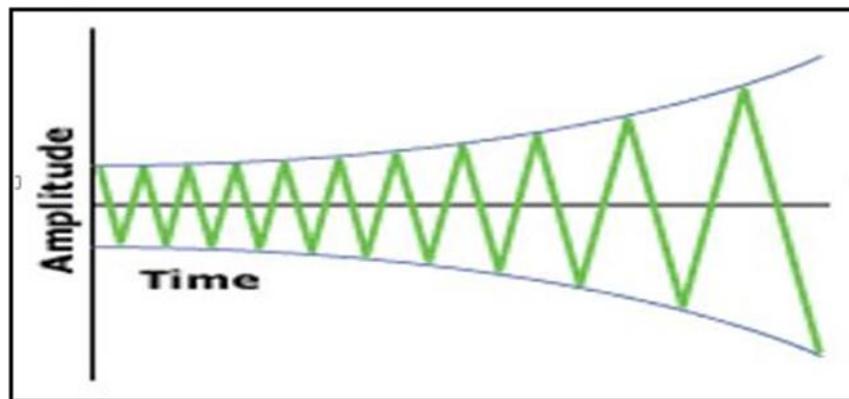


Figure I.17. Vibrations auto- excitées.

I.9.5. Effets des vibrations sur les processus de coupe :

Les vibrations du système (machine- porte pièce- pièce- outil- porte outil), phénomène dit aussi de broutement, qui apparaissent lors des opérations d'usinage sont la source de multiples difficultés.

- Elles dégradent la qualité de la surface usinée.
- Elles affectent la durée de l'outil et accélèrent son usure.
- Elles conduisent à une détérioration rapide de certains organes de la machine-outil (roulements- glissières...).
- Elles peuvent entraîner des dérèglages de certains organes de la machine-outil.
- Les vibrations entre la pointe de l'outil et la surface usinée engendrent des défauts géométriques sur la pièce.

- Les vibrations importantes diminuent la productivité et rendent même parfois impossible l'opération sur la machine-outil.
- Elles peuvent être aussi une source de fatigue et de gêne pour l'opérateur.
- L'augmentation des performances des outils, l'apparition de nouveaux matériaux difficilement usinables rendent ces problèmes de plus en plus aigus, les machines étant alors souvent poussées au maximum de leurs possibilités. [18]

I.9.6. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire intervient souvent en complément de la mesure acoustique ou thermique, pour en préciser le diagnostic. Il s'agit d'analyser les vibrations émises par la machine pour détecter et identifier des défauts de fonctionnement. L'analyse vibratoire permet, par exemple, de déceler des défauts de serrage, des arbres de transmission désalignés ou encore des courroies endommagées. Les vibrations sont captées grâce à différents dispositifs, généralement non intrusifs : accéléromètres (capteurs d'accélération ou de rotation), vibromètres laser, enregistreurs numériques ou encore analyseurs de spectres. Elles peuvent être mesurées de différentes façons : amplitude, niveau acoustique (décibels) ou encore fréquence hertz.

I.9.7. Appareils de mesure des vibrations

Le capteur est un organe chargé de prélever une grandeur physique à mesurer et de la transformer en une grandeur exploitable.

- La grandeur physique à mesurer (mesurande) constitue le signal d'entrée (ou stimulus) du capteur.
- La grandeur exploitable étant de nature électrique constitue le signal de sortie (réponse) du capteur. Elle est une représentation de la grandeur à mesurer. [19]

I.9.8. Les méthodes de mesures des vibrations

I.9.8.1. Mesures directes

Le capteur mesure directement les vitesses ou accélérations de la pièce ou de l'outil en cours de l'usinage, il faut choisir le capteur avec précaution. Nous montrons ici les mesures avec et sans contact.

I.9.8.1.1 Mesure Avec Contact

Le capteur de vibrations appelé accéléromètre doit être placé en contact avec le corps à mesurer, il faut donc le placer sur la broche pour capter le signal de l'outil. Il faut également faire attention à l'endroit où est placé le capteur, pour éviter tout risque de choc entre l'outil et l'accéléromètre. Les capteurs de déplacement (capacitif, inductif) sont aussi des capteurs avec contact. Ces capteurs ne posent pas le problème de la masse ajoutée comme les accéléromètres.

Par contre, la petite distance de mesure peut entraîner des collisions sous l'effet de l'amplitude des vibrations, qui peuvent endommager le capteur.



Figure I.18. Capteur de vibrations.

I.9.8.1.2. Mesure sans contact.

Les capteurs sans contact sont capables de mesurer les vibrations du système usinant à une distance importante. Ceci ne pose pas le problème de l'interaction entre le capteur et la pièce à mesurer. Les capteurs de pression acoustique (microphone, sonde d'intensité acoustique) sont sensibles aux bruits environnants. Ainsi, ils capteront aussi bien les vibrations de la pièce que les vibrations de l'outil. Mais c'est également un inconvénient. Ils vont également capter le son émis par d'autres sources que le système usinant en vibration. Il faut donc être capable d'isoler le signal recherché du signal mesuré. Les vibromètres laser sont également utilisés, ils ne mesurent que le corps sur lequel il est pointé. L'avantage de ce capteur présent de pouvoir mesurer les vibrations depuis l'extérieur de l'enceinte de la machine, le faisceau laser passant à travers les vitres. Par contre, il est très difficile de réaliser des mesures d'usinage sous lubrification, le faisceau n'étant pas réfléchi correctement par la surface du corps à mesurer.



Figure I.19. Vibromètre laser.

I.9.8.2. Mesure indirect

Les mesures les plus courantes sont les mesures des vibrations de l'outil que les vibrations de la pièce. Le capteur d'efforts (dynamomètre) se présente sous la forme d'une platine sur laquelle est montée la pièce, et qui est installée sur la table de la machine. Le capteur mesure ainsi les efforts dans les trois directions. Cependant, il faut prendre garde à ce que le comportement dynamique du capteur n'interfère pas avec le comportement du système usinant. Le premier mode propre de ces platines se situe aux environs de 1 kHz, ce qui est du même ordre de grandeur que les fréquences de vibrations du système usinant. Nous risquons alors de mesurer les vibrations de la platine, et non du système usinant. [20]

I.9.9. Indicateurs scalaires

Dans la pratique, la présence des défauts aux fréquences caractéristiques n'est pas toujours facile à déceler. Pour les mettre en évidence, plusieurs techniques d'analyse peuvent être mises en œuvre. La première technique est l'analyse temporelle. Ce type d'analyse est basé directement sur l'extraction des paramètres dits « indicateurs de défauts » à partir d'un signal vibratoire, les plus simples étant les indicateurs scalaires. Un indicateur scalaire peut correspondre à une grandeur caractéristique : (i) de son amplitude (valeur efficace, amplitude crête, taux de modulation...), (ii) de sa distribution d'amplitude (facteur de crête, kurtosis) ou (ii) de sa composition spectrale (amplitude d'une composante spectrale, valeur efficace d'une famille de composantes, taux d'harmoniques...). Ces indicateurs permettent de caractériser l'état de fonctionnement global des équipements mais ne localisent pas le défaut. Leur

utilisation très répandue s'explique aisément par leur facilité d'utilisation : ils se réduisent à un nombre, se prêtent facilement à l'automatisation de leur gestion (archivage, courbes d'évolution, comparaison à des seuils). De nombreux indicateurs ont été développés dans la littérature. Il existe également des indicateurs obtenus par une combinaison de plusieurs indicateurs existants ont proposé un ensemble d'indicateurs scalaires pour le diagnostic automatisé des défauts de roulements.

I.9.9.1. Valeur efficace ou valeur RMS

Cette valeur est très utilisée, mais en générale cette dernière ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans la maintenance prédictive, Elle s'écrit comme suit :

D'où

$x(n)$: signal temporel mesuré.

N: nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

$$V = \sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [x(n)]^2}$$

I.9.9.2. Facteur crête

Les indicateurs spécifiques comme le facteur de crête est mieux adapté pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles, il est défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace.

I.9.9.3. Kurtosis

C'est un indicateur qui définit par le moment d'ordre 4 de la distribution des amplitudes vibratoires il traduit la largeur de la courbe de densité de probabilité du signal. Un signal ayant un Kurtosis > 3 se représente par une distribution plus étroite dominée par la présence d'amplitudes crêtes anormalement élevées comme c'est le cas en présence de chocs répétés.

Le Kurtosis permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut, il s'écrit comme suit : [21]

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N [(x(i) - \bar{x})^4]}{N(\sigma^2)^2}$$

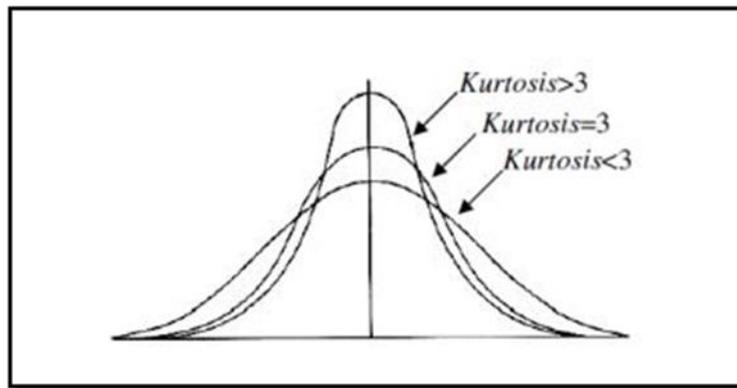


Figure I.20. Représentation schématique de la distribution d'une variable aléatoire correspondant à trois valeurs du Kurtosis.

I.9.9.4. Facteur K (FK)

Le facteur K est défini comme étant le produit entre la valeur crête et a valeur efficace

Facteur K= Valeur crête *Valeur efficace Equation

Le facteur K est plus sûr pour effectuer une analyse ponctuelle (analyse « spot ») des roulements.

Sa valeur est directement liée à l'état du ou des roulements. Contrairement au facteur de crête, le facteur K est un indicateur instable.[20]

I.9.9.5. Skewness

Le coefficient de dissymétrie (skewness) est définit comme étant le troisième moment statistique centré. Il correspond à une mesure de l'asymétrie de la distribution d'une variable aléatoire réelle.

Avec : $x(i)$ est la série temporelle au point n .

\bar{x} est la moyenne des données et σ est la valeur efficace.

La valeur efficace ou RMS (RootMean Square), notée RMS, est l'indicateur scalaire le plus couramment utilisé vu sa relation directe avec l'énergie contenue dans le signal vibratoire. La RMS est la racine carré de la moyenne quadratique du signal vibratoire temporel discrétisé $x(i)$ de longueur N et de moyenne empirique \bar{x} . Appelé également niveau vibratoire global, il est représentatif de l'énergie de la vibration basses fréquences

La méthode la plus simple pour mesurer les défauts dans le domaine temporel est en l'utilisation de la valeur efficace (RMS). Cependant, le niveau RMS ne peut pas montrer des changements appréciables dans les premiers stades de défaillances des roulements. Cet indicateur ne fournit donc pas une information sur la naissance du défaut. Il est utile pour le suivi du niveau global. La valeur RMS est utilisée souvent pour détecter des dissipations d'énergie anormalement élevées, elle peut être utilisée aussi pour la surveillance acoustique. [21]

I.1. conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'importance de la qualité de la surface dans la fabrication des pièces mécaniques ainsi les différents procédés de la mise en forme, en l'occurrence le procédé par coupe et en particulier le procédé de tournage. Les techniques de surveillance et contrôles des machines tournant par l'analyse des signaux vibratoires, ont été présentés et explicités. Dans le prochain chapitre, on se propose d'examiner le processus de coupe en utilisant un usinage sur un tour, au moyen du critère relatif à l'état de surface et des indicateurs vibratoires.

Chapitre II

II.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons passé en revue la partie bibliographique où il est montré que l'état de machine-outil ainsi que les conditions de coupe, influent sur la qualité de la surface produite. Dans ce chapitre, on se propose de réaliser une expérimentation sur un tour. L'examen du processus de coupe est réalisé par analyse vibratoire. Les équipements utilisés, en l'occurrence, les machines-outils, les outils, les appareils de mesure la rugosité, ainsi que l'appareillage de contrôle vibratoire, ont été exposés. L'expérimentation a été conduite suivant une méthodologie basée sur le plan d'expérience

II.2. Matériau

Le matériau utilisé pour cette étude expérimentale est un acier non allié, sa nuance est présentée dans le tableau II.1.

II.2.1. Composition chimique du matériau

L'analyse chimique du matériau a été réalisée dans le laboratoire de service de spectrométrie et équipements d'analyses (Complexe sidérurgique d'El Hadjar), au moyen d'un spectromètre à émission optique (Thermo Fisher) représenté par la figure II.1. Les éléments chimiques sont présentés dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Analyse chimique de matériau.

éléments	C	Fe	Mn	Cr	Si	Mo
%	0.5113	98.5558	0.61894	0.0252	0.2424	0.00112



Figure II.1. Spectromètre à émission optique (Thermo Fisher).

II.3. Mesure de la Dureté

La mesure de la dureté a été effectuée sur un Duromètre (figure II.2), au niveau de département de métallurgie.



Figure II.2. Duromètre

Tableau II.2. Les résultats de la dureté

HB	HV
330 Kgf/mm ²	317.28 Kgf/mm ²

II.4. Machine-outil et ses caractéristiques

La machine utilisée est un tour parallèle, model 1A616 de puissance 5.5KW ou niveau de département de génie mécanique.



Figure II.3. Tour 1A616.

Tableau II.3. Caractéristiques du tour 1A616.

Avance mm/tr	Vitesse de rotation tr/min	Puissance de la machine KW
0,037- 052	9-1800	5.5

II.5. Outil de coupe

Dans ce travail on a utilisé deux outils de coupes, le premier est un outil à charioter dresser et le second est un outil de tronçonnage.

Les outils employés sont présentés sur la figure :

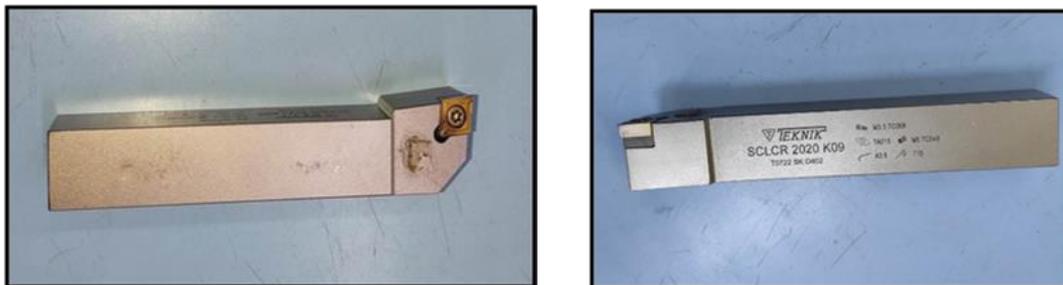


Figure II.4. Outil de charioter dresser.

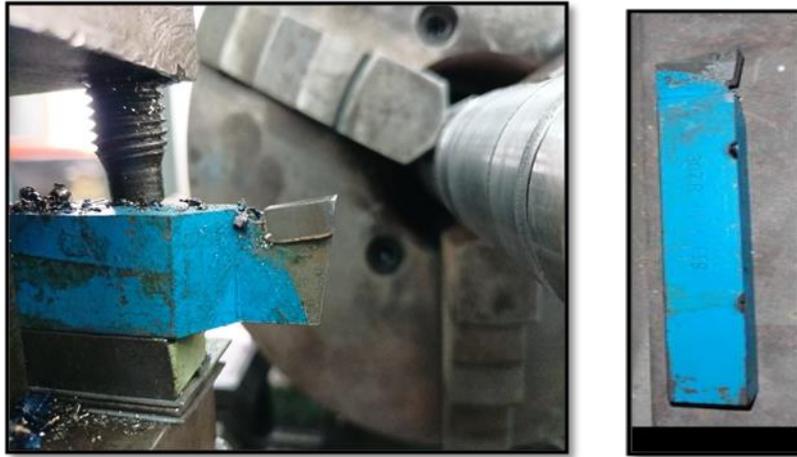


Figure II.5.Outil de tronçonnage.

II.6. Montage sur tour

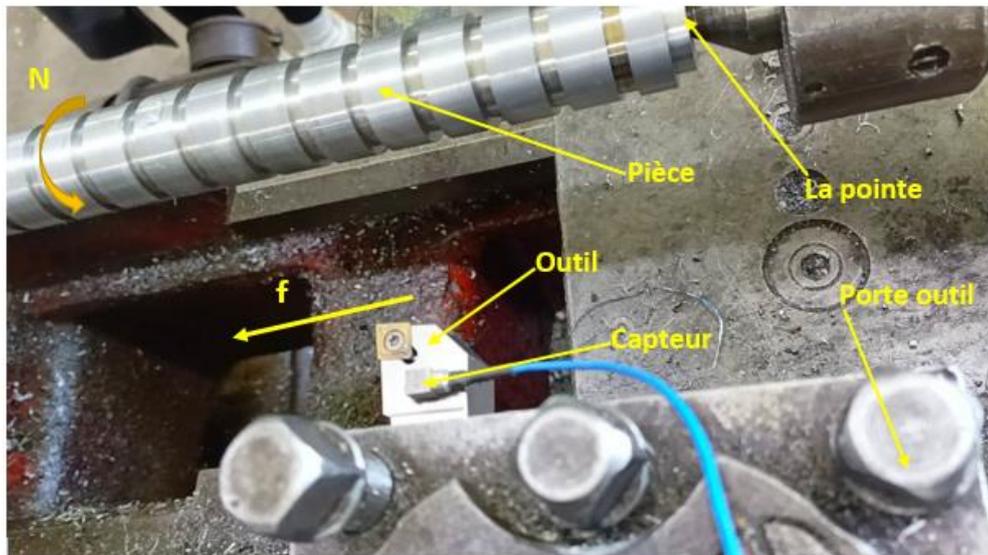


Figure II.6. Dispositif expérimentale.

II.7. Préparation de la pièce

L'étude a été menée sur une pièce cylindrique préparée par tournage sur un tour conventionnel, tel qu'illustré dans la Figure II.7. , au sein du Département de génie Mécanique de l'Université Badji Mokhtar Annaba.



Figure II.7. La pièce usinée.

II.8. Dimensionnement de la pièce

La pièce de longueur 358mm et diamètre 32 mm a été préparé en 17 paliers de largeur 13 mm séparé par des gorges de diamètre 30 mm et 6mm de largeur. La figure II.8. Illustre le dessin de définition de cette dernière.

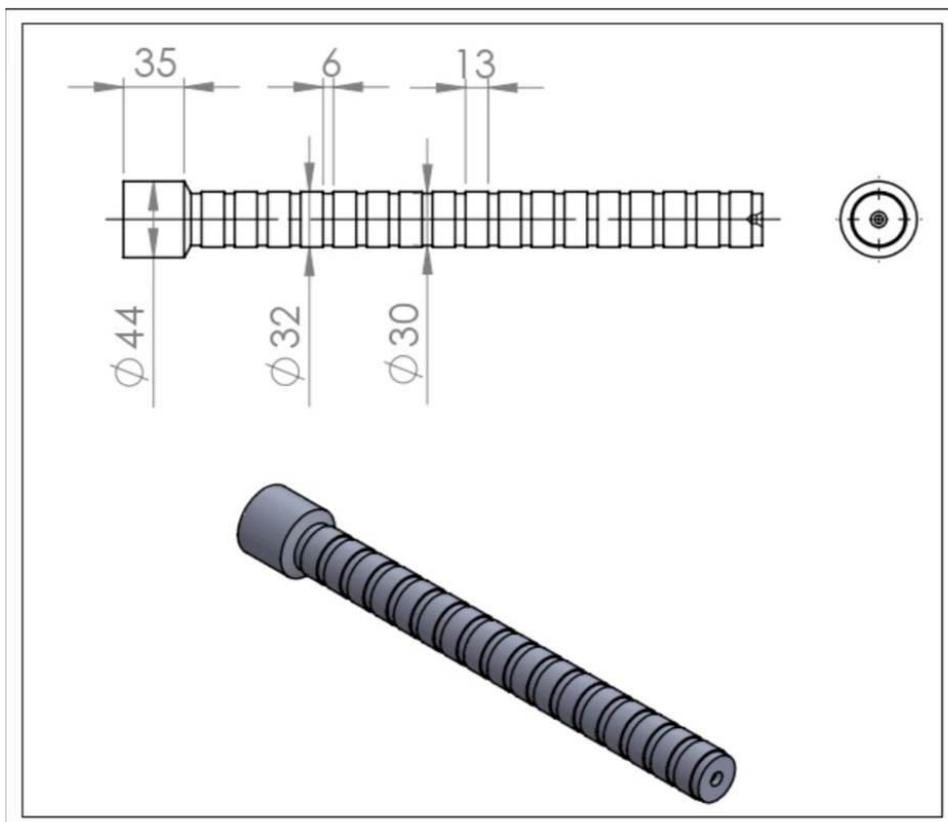


Figure II.8. Dessin de définition.

II.9. Régime de coupe

Le régime de coupe retenu pour la préparation de la pièce est présenté dans le tableau II.4. il a été déterminé sur un abaque spécialisé en fonction de l'opération réalisée, du diamètre et pourcentage de carbone dans la pièce ainsi que l'outil de coupe utilisé.

Tableau II .4. Les régimes de coupe.

<i>X1</i>	<i>N</i>	<i>710</i>	<i>1120</i>	<i>1400</i>
<i>X2</i>	<i>f</i>	<i>0.065</i>	<i>0.11</i>	<i>0.148</i>
<i>X3</i>	<i>ap</i>	<i>0.5</i>	<i>0.85</i>	<i>1.2</i>

II.10. Etude expérimentale

Plan d'expérience

Un plan d'expérience basé sur la méthode de Box behnken et la surface de réponse a été utilisé dans notre étude comme méthode statistique. Ce dernier se concentre sur l'effet des paramètres de coupe tel que : fréquence de rotation (N), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap) sur la rugosité (Ra) après usinage. Chaque paramètre présente 3 niveaux, l'étude comprenait un total de 15 essais comme le montre le tableau II .6.

Tableau II .5. Les Niveaux.

Niveaux	ap	N	f
-1	0,5	710	0,065
0	0,85	1120	0,11
+1	1,2	1400	0,148

Tableau II .6. Matrice de Box-Behnken pour trois facteurs.

N°	ap	N	f
1	1	-1	0
2	1	0	-1
3	1	0	1
4	1	1	0
5	0	-1	-1
6	0	-1	1
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	1	-1
11	0	1	1
12	-1	-1	0
13	-1	0	-1
14	-1	0	1
15	-1	1	0

Tableau II.7. Matrice d'expériences en tournage.

N°	ap	N	f
1	1.2	710	0.11
2	1.2	1120	0.065
3	1.2	1120	0.148
4	1.2	1400	0.11
5	0.85	710	0.065
6	0.85	710	0.148
7	0.85	1120	0.11
8	0.85	1120	0.11
9	0.85	1120	0.11
10	0.85	1400	0.065
11	0.85	1400	0.148
12	0.5	710	0.11
13	0.5	1120	0.065
14	0.5	1120	0.148
15	0.5	1400	0.11

II.11. Mesure de Rugosité

Pour la mesure de la rugosité nous avons opté pour le critère "Ra", pour cela nous avons utilisé un rugosimètre2D type TR220.



Figure II.9. Rugosimètre TR220.

II.12. Analyse Vibratoire

La figureII.10. Montre le matériel utilisé lors de l'analyse vibratoire. Ce dispositif expérimental est composé, d'un module d'acquisition de vibration, d'un capteur de mesure de vibrations et d'un logiciel d'enregistrement de vibration.



FigureII.10. Le matériel utilisé lors de l'analyse vibratoire.

- 1 → PC.
- 2 → logiciel LabVIEW.
- 3 → marteau.
- 4 → Châssis
- 5 → Modules

II.13. Composants du système CompactDAQ

Dans notre système CompactDAQ, un châssis est connecté à votre PC via USB ou internet, puis équipé d'un ou plusieurs modules conditionnés pour une connectivité directe des capteurs. Des variantes de contrôleur sont disponibles pour exécuter un système d'exploitation Windows ou en temps réel pour un fonctionnement autonome.

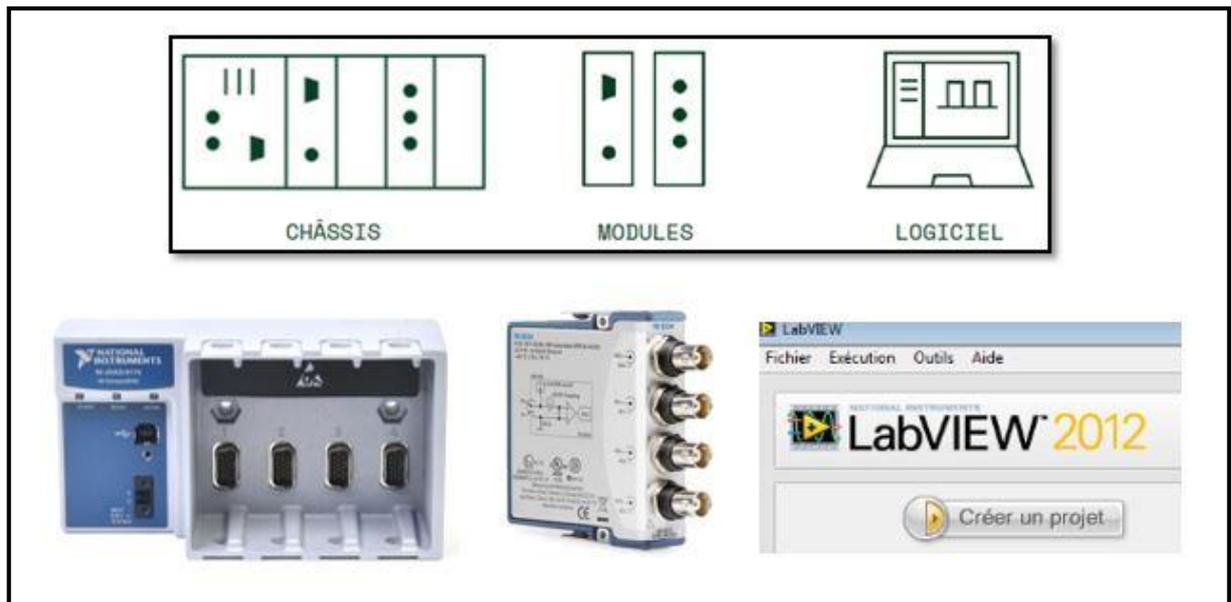


Figure II.11. Composants du système CompactDAQ.

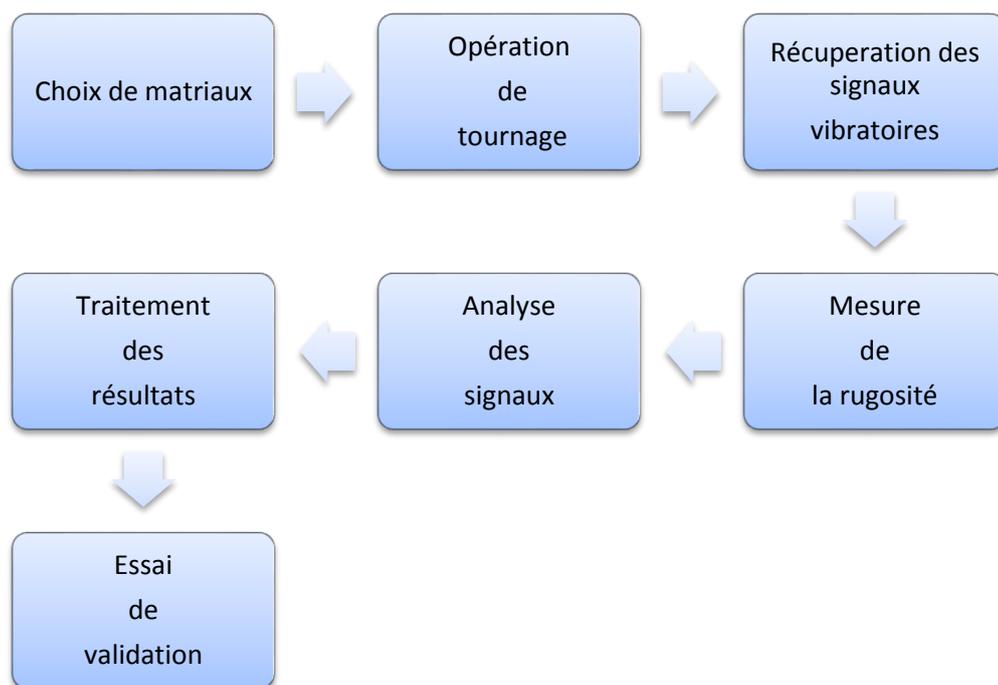


Figure II.12. Schéma de la procédure expérimentale.

II.14. Conclusion

L'expérimentation a été réalisée suivant les plans d'expérience de box à trois facteurs (N,f,ap) qui nous ont permis d'observer et d'évaluer les effets des différents paramètres du régime de coupe et leurs influences sur les réponses considérées (la rugosité Ra et les indicateurs vibratoires). Les différentes étapes de déroulement de la partie expérimentale ont été représentées schématiquement sur la figure. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les résultats et leur interprétation.

Chapitre III

III.1. Introduction

A partir des résultats obtenus lors de l'expérimentation pour les différents régimes de coupe utilisés, une analyse suivie d'une simulation a été présentée dans ce chapitre. L'analyse s'articule sur l'effet des conditions de coupe sur la qualité de la surface réalisée représentée par le critère de rugosité Ra et sur les indicateurs vibratoires (le RMS et le Kurtosis). Dans un premier temps, nous avons présenté les graphes des effets principaux et les modèles mathématiques obtenus par MiniTab. L'étude a été suivie par l'établissement des modèles mathématiques et des courbe 3D par la méthode de Box-behnken. Cette dernière, nous a permis de montrer l'influence des paramètres de coupe : nombre de tour (N), l'avance (f) et la profondeur de passe (ap), sur les réponses de sortie étudiées : la rugosité Ra, valeur efficace ou valeur RMS selon l'axe (x, y, z) et le KURTOSISE selon l'axe (x, y, z).

III.2. Résultat expérimentaux des rugosités et des signaux vibratoires

On présente les résultats des 15 expériences réalisées dans cette étude sur la base du plan de Box-behnken.

Tableau III.1.Résultat de box-behnken

N°	Paramètres de coupes			Ra moy	Kux	Kuy	Kuz	RMSx	RMSy	RMSz
	ap	N	f							
1	1,2	710	0,11	1,04833333	3,205	3,1041	3,1118	0,0339	0,0164	0,0408
2	1,2	1120	0,065	1,391	3,0668	2,9455	2,9345	0,0382	0,0153	0,0369
3	1,2	1120	0,148	4,03633333	3,6461	3,5023	3,4698	0,1117	0,0622	0,147
4	1,2	1400	0,11	1,25733333	3,0589	3,0947	3,081	0,0574	0,0294	0,0696
5	0,85	710	0,065	1,931	4,4298	3,7379	3,7761	0,0407	0,0149	0,037
6	0,85	710	0,148	3,51433333	3,2591	3,3897	3,4089	0,033	0,0198	0,0474
7	0,85	1120	0,11	1,45166667	3,0171	3,0507	3,0571	0,0449	0,0257	0,0614
8	0,85	1120	0,11	1,31833333	3,1093	3,1534	3,1392	0,0424	0,0247	0,0592
9	0,85	1120	0,11	1,05966667	4,3877	3,1578	3,7696	0,00008028	0,00004069	0,00012285
10	0,85	1400	0,065	1,137	3,1821	3,0986	3,1244	0,0364	0,0106	0,0245
11	0,85	1400	0,148	3,601	3,4389	3,2085	3,2135	0,1955	0,0791	0,1836
12	0,5	710	0,11	1,663	3,4003	3,3383	3,3153	0,0258	0,0078	0,0186
13	0,5	1120	0,065	1,94666667	3,4123	3,1861	3,1616	0,0416	0,0088	0,0199
14	0,5	1120	0,148	3,214	3,022	3,1092	3,1096	0,1241	0,0196	0,0448
15	0,5	1400	0,11	1,29866667	3,0657	3,1544	3,1634	0,0482	0,0143	0,0326

III.3. Traitement des données

III.3.1. Traitement par Minitab

III.3.1.1 Traitement des données de rugosité

- **Modèle**

En utilisant la méthode Minitab pour l'analyse des données, un modèle mathématique de second ordre a été généré, permettant de décrire la relation entre la rugosité Ra et les

paramètres de coupe utilisés dans cette étude. Ce modèle est également capable de prédire les résultats de rugosité Ra.

$$\text{Ra} = 1,277 - 0,0487 \cdot \text{ap} - 0,1078 \cdot \text{N} + 0,995 \cdot \text{f} + 0,071 \cdot \text{ap}^2 - 0,03 \cdot \text{N}^2 + 1,3 \cdot \text{f}^2 + 0,143 \cdot \text{ap} \cdot \text{N} + 0,345 \cdot \text{ap} \cdot \text{f} + 0,22 \cdot \text{N} \cdot \text{f}$$

Le coefficient de détermination R^2 a été calculé à 0,98, indiquant une forte corrélation entre les résultats modélisés et expérimentaux. Par conséquent, le modèle peut être considéré comme représentatif des résultats obtenus, étant donné que le coefficient de corrélation est proche de 1.

• **Effet des principaux paramètres**

La Figure III.1. Illustre le graphique des effets principaux sur Ra, où il est possible de constater que la variation du paramètre d'avance provoque une variation significative dans la rugosité, indiquant ainsi son influence prépondérante sur le résultat. En revanche, la fréquence de rotation et la profondeur de passe ne génèrent pratiquement aucune variation dans la rugosité, soulignant ainsi que leur influence sur la rugosité est négligeable par rapport à celle de l'avance.

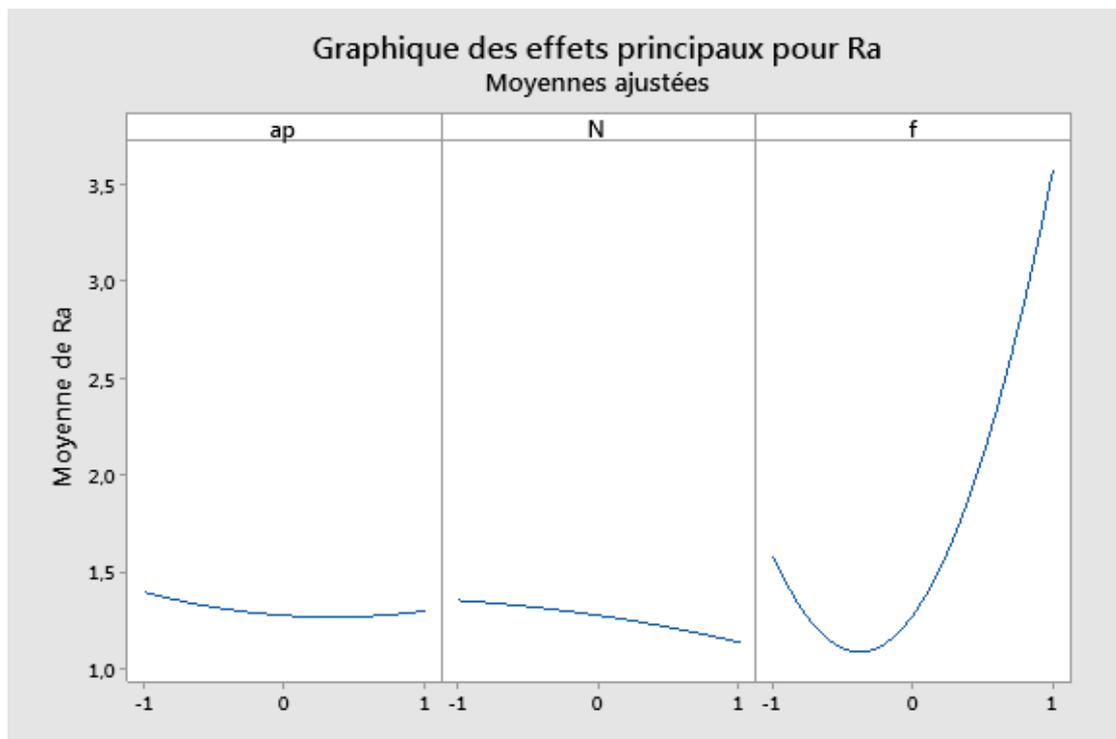


Figure III.1. Graph des effect principal pour Ra.

III.3.1.2 Traitement des données des indicateurs

a. Analyse RMSx

• **Modèle**

$$\text{RMSx} = 0,0291 + 0,00019 \cdot \text{ap} + 0,02551 \cdot \text{N} + 0,03843 \cdot \text{f} + 0,0073 \cdot \text{ap}^2 + 0,0048 \cdot \text{N}^2 + 0,0424 \cdot \text{f}^2 + 0,0003 \cdot \text{ap} \cdot \text{N} - 0,0022 \cdot \text{ap} \cdot \text{f} + 0,0417 \cdot \text{N} \cdot \text{f}$$

- **Effet des principaux paramètres**

La Figure III.2. Illustre le graphique des effets principaux sur RMS_x, où il est possible de constater que la variation du paramètre d'avance provoque une variation significative dans le signal RMS_x, indiquant ainsi son influence prépondérante sur le résultat, suivi par l'influence de la fréquence de rotation. En revanche, la profondeur de passe ne génèrent pratiquement aucune variation sur RMS_x, soulignant ainsi que son influence est négligeable par rapport à celle de l'avance et de la fréquence de rotation.

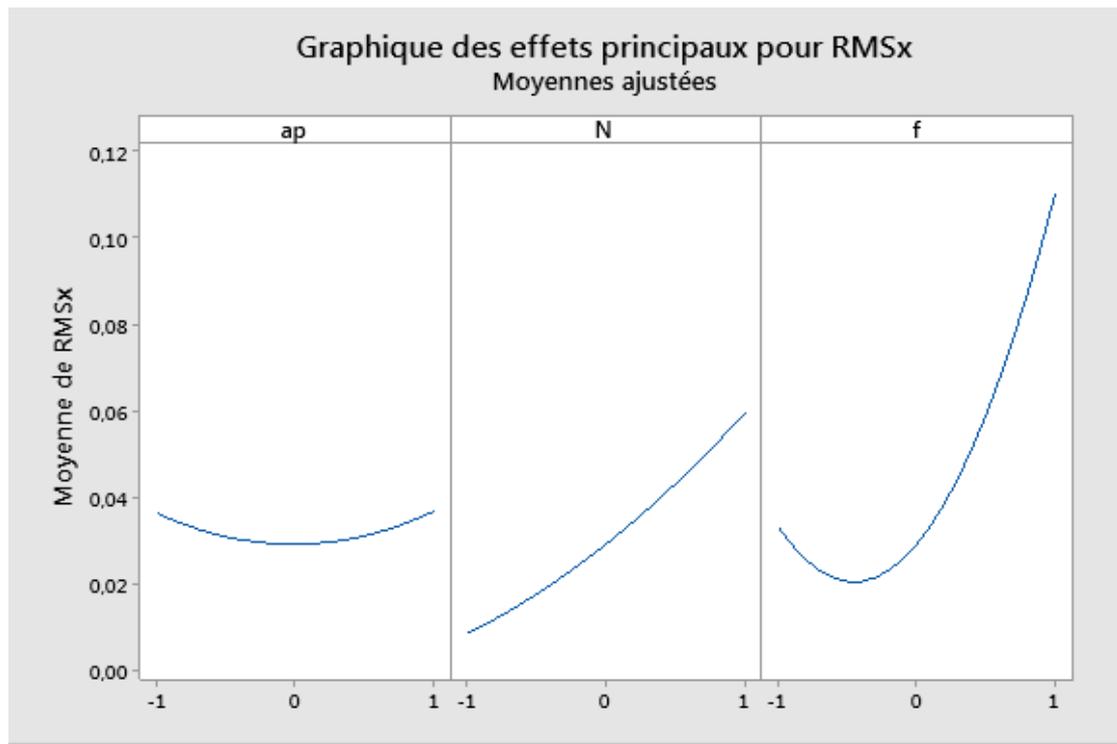


Figure III.2. Graph des effets pour RMS_x.

b. Analyse RMS_y

- **Modèle mathématique**

➤
$$\text{RMS}_y = 0,01681 + 0,0091 \cdot \text{ap} + 0,00931 \cdot N + 0,01639 \cdot f + 0,00223 \cdot \text{ap}^2 + 0,00239 \cdot N^2 + 0,01189 \cdot f^2 + 0,00163 \cdot \text{ap} \cdot N - 0,00903 \cdot \text{ap} \cdot f + 0,0159 \cdot N \cdot f$$

- **Effet des principaux paramètres sur RMS_y**

La Figure III.3. Illustre le graphique des effets principaux sur RMS_y, où il est possible de constater que la variation du paramètre d'avance provoque une variation significative dans le signal RMS_y, indiquant ainsi son influence prépondérante sur le résultat. La fréquence de rotation ainsi que la profondeur de passe ont un effet similaire sur RMS_y et leurs effet et modéré par rapport à l'avance.

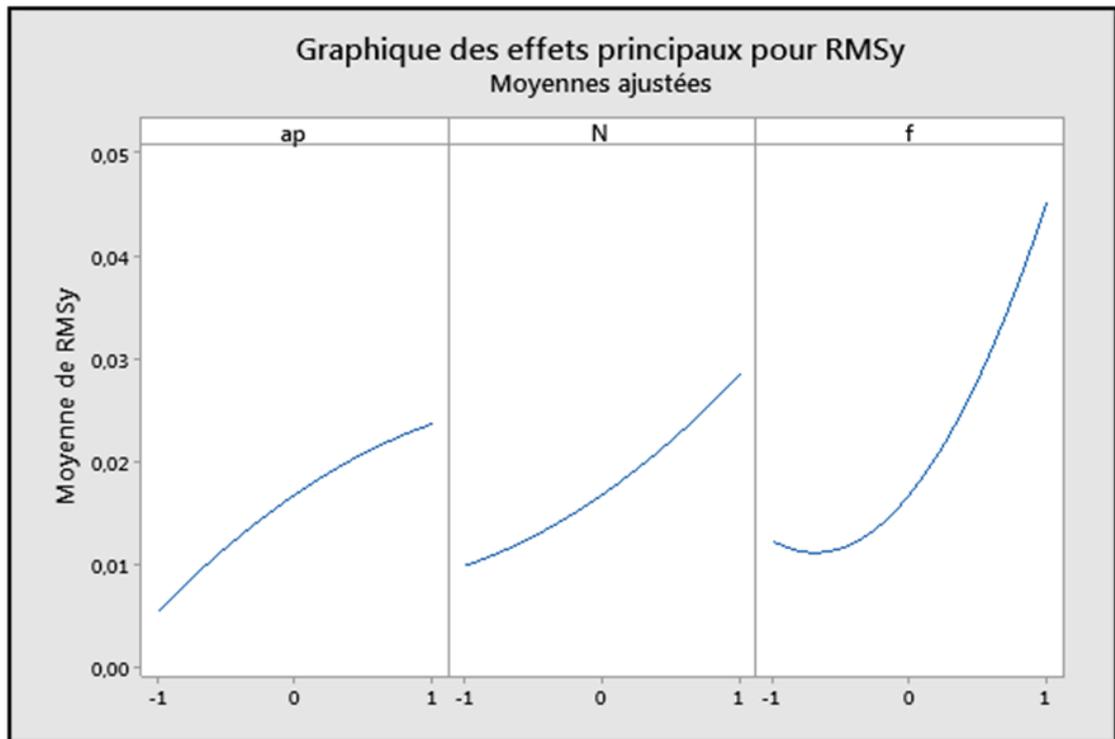


Figure III.3. Graph des effets RMSy.

c. Analyse RMSz

- **Modèle mathématique**

➤ $RMSz = 0,0402 + 0,0223*ap + 0,02081*N + 0,03806*f - 0,0054*ap^2 + 0,0056*N^2 + 0,0273*f^2 + 0,0037*ap*N + 0,0213*ap*f + 0,0372*N*f.$

- **Effet des principaux paramètres sur RMSz**

La Figure III.4. illustre le graphique des effets principaux sur RMSz, où il est possible de constater que la variation du paramètre d'avance provoque une variation significative dans le signal RMSz, indiquant ainsi son influence prépondérante sur le résultat. La fréquence de rotation ainsi que la profondeur de passe ont un effet similaire sur RMSz et leurs effets sont modérés par rapport à l'avance.

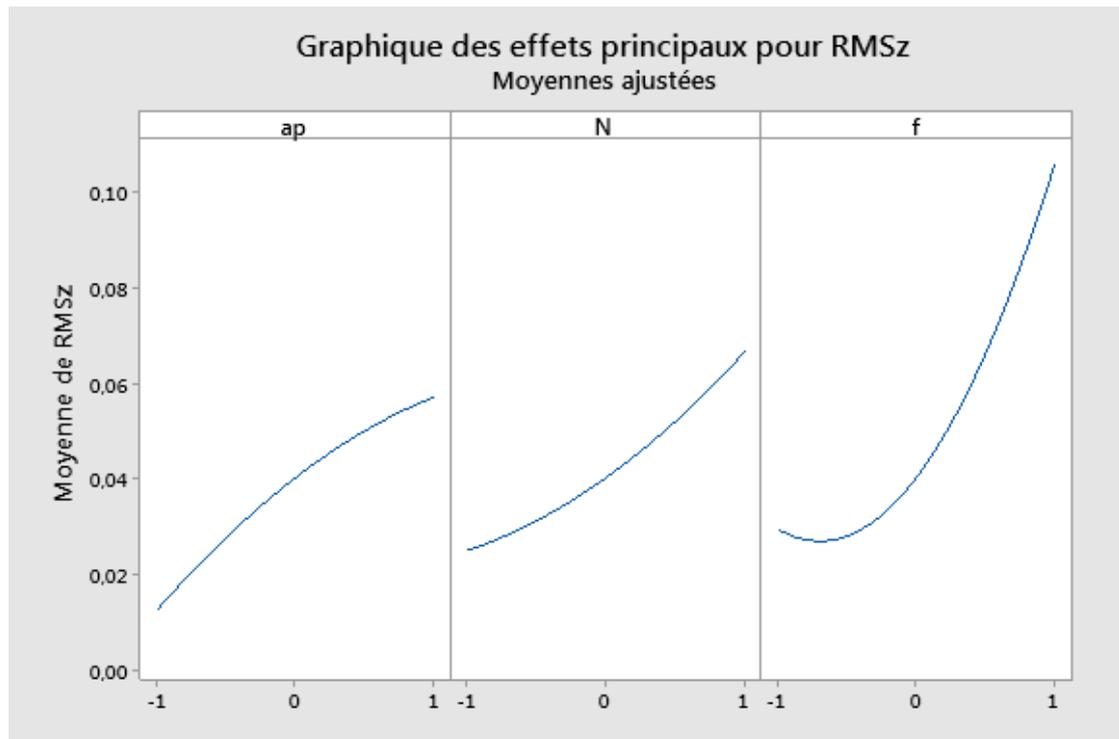


Figure III.4. Graph des effets pour RMSz.

d. Analyse Ku_x

- **Modèle mathématique**

➤ $Ku_x = 3,505 + 0,01 \cdot ap - 0,194 \cdot N - 0,091 \cdot f - 0,306 \cdot ap^2 - 0,016 \cdot N^2 + 0,089 \cdot f^2 + 0,047 \cdot ap \cdot N + 0,242 \cdot ap \cdot f + 0,357 \cdot N \cdot f.$

- **Effet des principaux paramètres sur Ku_x**

La Figure III.5. Illustre le graphique des effets principaux sur Ku_x , où il est possible de constater que tout les parametres de coupes ont une influence significatif sur Ku_x .

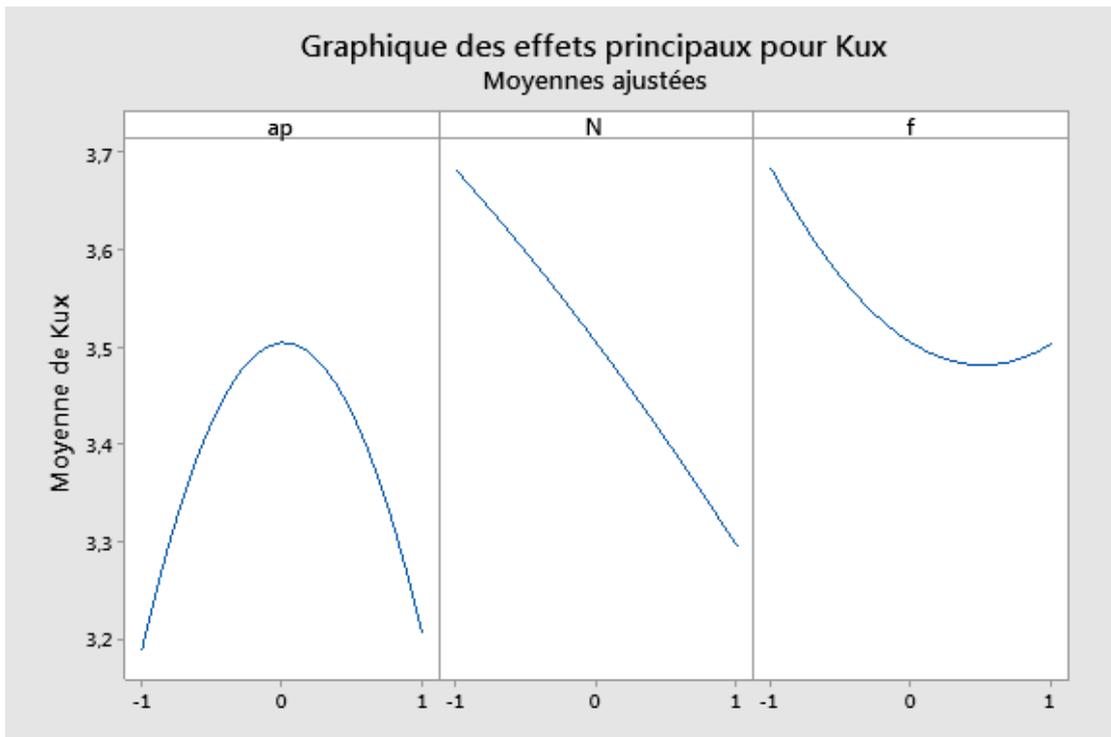


Figure III.5. Graph des effets principaux pour K_{ux} .

e. Analyse K_{uy}

- **Modèle mathématique**

➤
$$K_{uy} = 3,1206 - 0,0177 \cdot ap - 0,1267 \cdot N + 0,0302 \cdot f - 0,0603 \cdot ap^2 - 0,1126 \cdot N^2 + 0,1255 \cdot f^2 + 0,0436 \cdot ap \cdot N + 0,1584 \cdot ap \cdot f + 0,1145 \cdot N \cdot f$$

- **Effet des principaux paramètres sur K_{uy}**

La Figure III.6. Illustre le graphique des effets principaux sur K_{uy} , où il est possible de constater que tout les paramètres de coupes ont une influence significatif sur K_{uy}

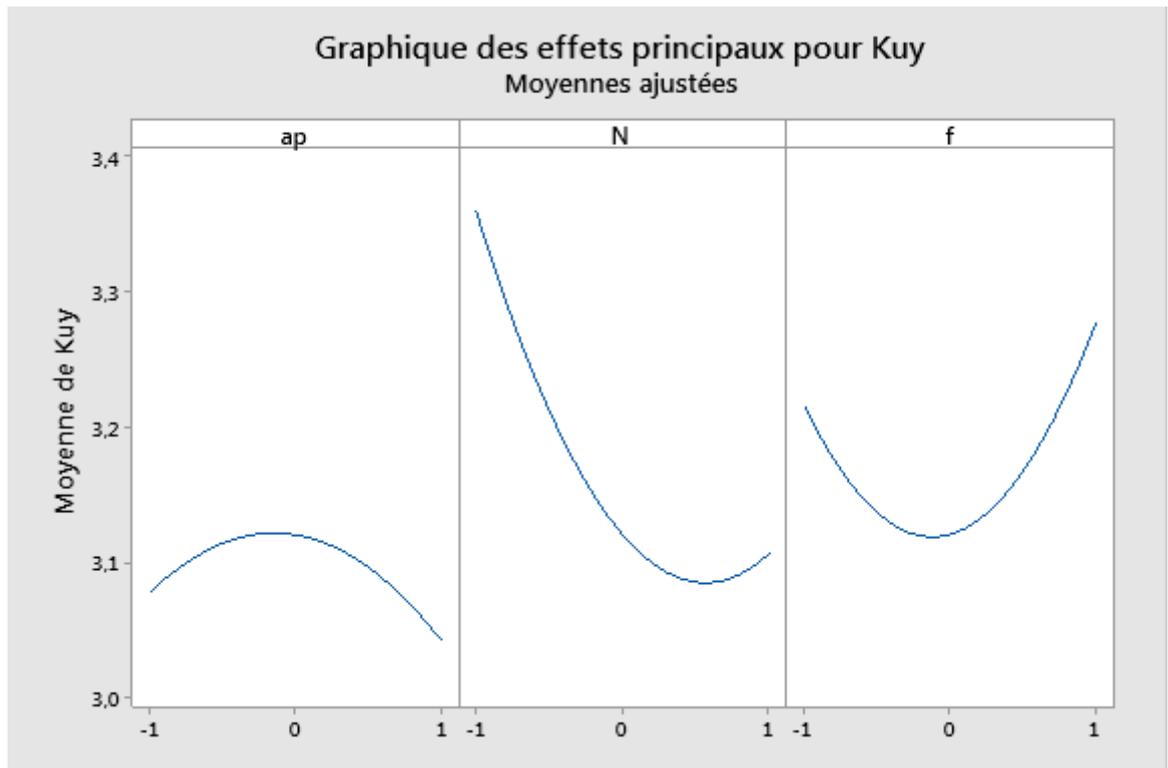


Figure III.6. Graph des effets principaux pour KUy.

f. Analyse Ku_z

• Modèle mathématique

$$\text{Kuz} = 3,322 - 0,019 \cdot \text{ap} - 0,129 \cdot \text{N} + 0,026 \cdot \text{f} - 0,183 \cdot \text{ap}^2 + 0,029 \cdot \text{N}^2 + 0,03 \cdot \text{f}^2 + 0,03 \cdot \text{ap} \cdot \text{N} + 0,147 \cdot \text{ap} \cdot \text{f} + 0,114 \cdot \text{N} \cdot \text{f}$$

• Effet des principaux paramètres sur Ku_z

La Figure III.7. Illustre le graphique des effets principaux sur Ku_z , où il est possible de constater que tout les paramètres de coupes ont une influence significatif sur Ku_z .

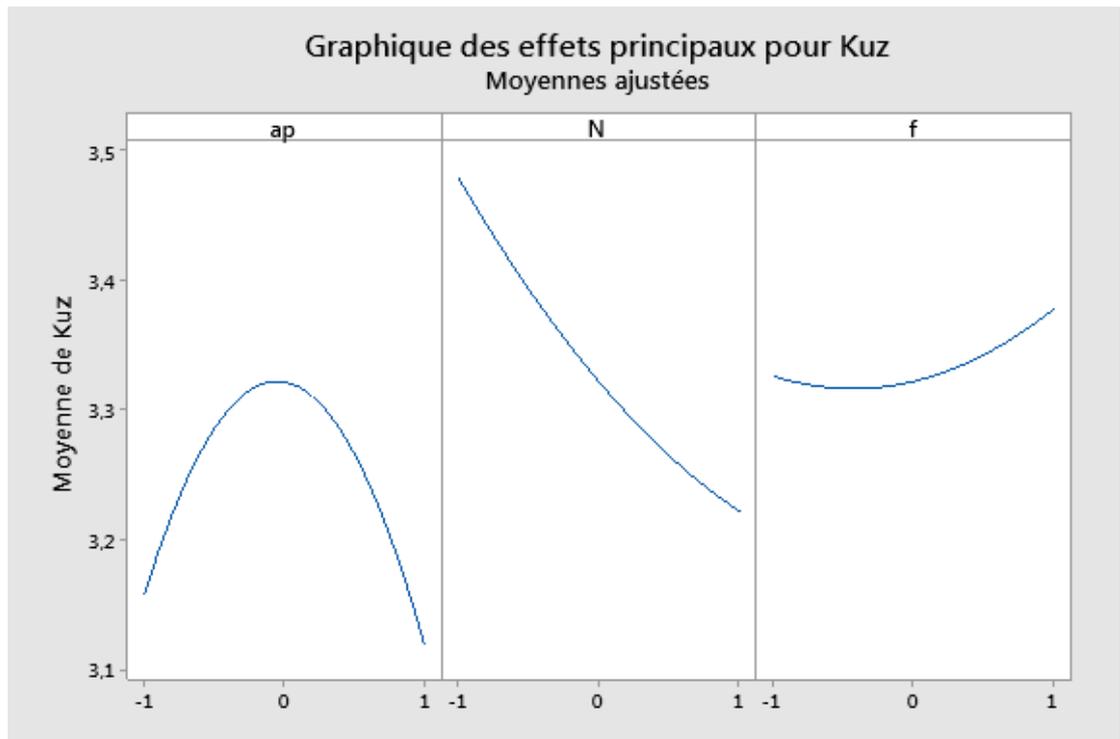


Figure III.7. Graph des effets principaux pour Ku_z

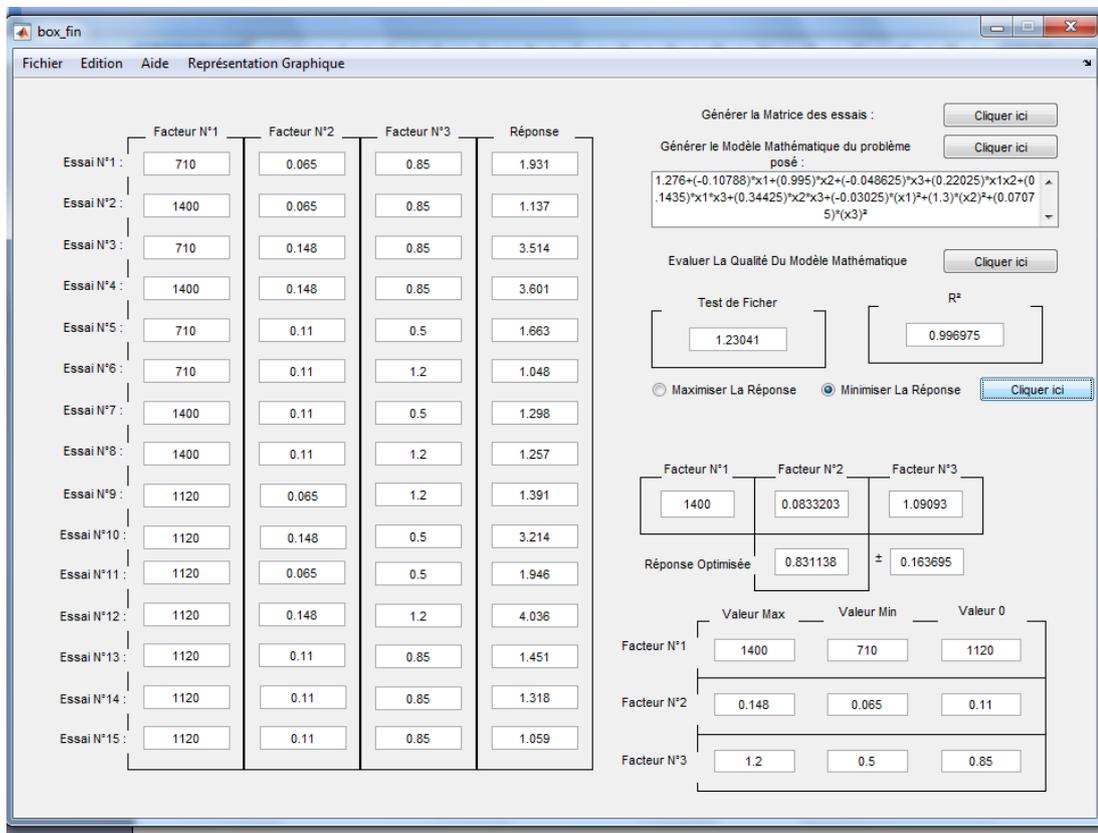
- **Conclusion de MiniTab**

A partir des résultats de l'expérimentation et après analyse des signaux vibratoires lors de l'application des régimes de coupe variés, nous constatons que la corrélation des indicateurs considérés avec la rugosité est différente, ce qui apparaît dans les graphiques des effets principaux. En effet, l'indicateur RMS est plus significatif, voire plus représentatif que le KURTOSIS par rapport à la rugosité.

III.3.2. Traitement par Box-behnken

III.3.2.1 Traitement des données de rugosité

Tableau III.2. Traitement de la matrice d'expériences de Ra.



- **Modèle**

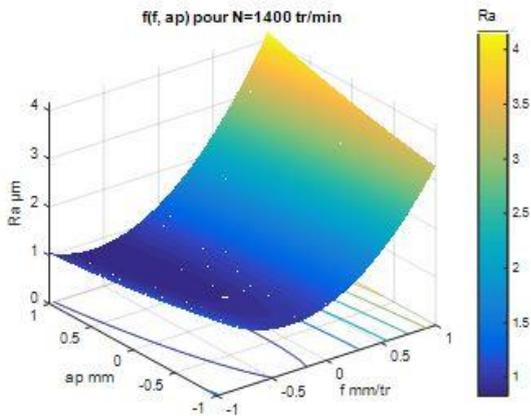
En utilisant la méthode de Box-Behnken pour l'analyse des données, un modèle mathématique de second ordre a été généré, permettant de décrire la relation entre la rugosité Ra et les paramètres de coupe utilisés dans cette étude. Ce modèle est également capable de prédire les résultats de rugosité Ra.

- $Ra = 1.276 + (-0.10788) \cdot x_1 + (0.995) \cdot x_2 + (-0.048625) \cdot x_3 + (0.22025) \cdot x_1 x_2 + (0.1435) \cdot x_1 x_3 + (0.34425) \cdot x_2 x_3 + (-0.03025) \cdot (x_1)^2 + (1.3) \cdot (x_2)^2 + (0.07075) \cdot (x_3)^2 + e$
- $R^2 = 0.99$

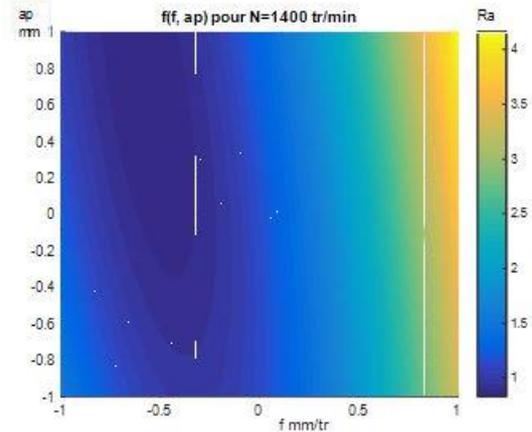
Le coefficient de détermination R^2 a été calculé à 0,98, indiquant une forte corrélation entre les résultats modélisés et expérimentaux. Par conséquent, le modèle peut être considéré comme représentatif des résultats obtenus, étant donné que le coefficient de corrélation est proche de 1.

- **Diagramme de surface 3D de Ra**

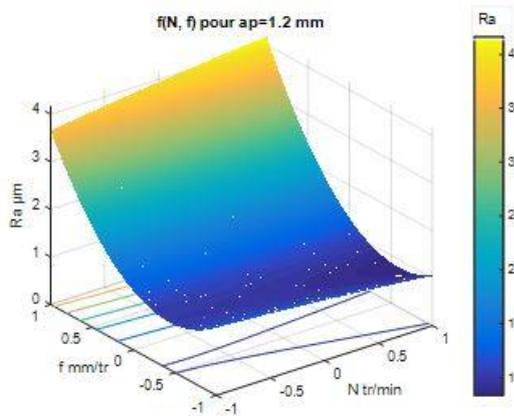
Les graphiques 3D montre le comportement des paramètres de coupe sur la rugosité. Ils confirment les observations précédentes en montrant que la fréquence de rotation et la profondeur de passe ne génèrent pratiquement aucune variation dans la rugosité, soulignant ainsi que leur influence sur la rugosité est négligeable par rapport à celle de l'avance qui a un effet significatif sur la rugosité. On peut observer que des valeurs faibles de l'avance donnent une faible rugosité, et inversement, des valeurs élevées de l'avance entraînent une rugosité plus importante.



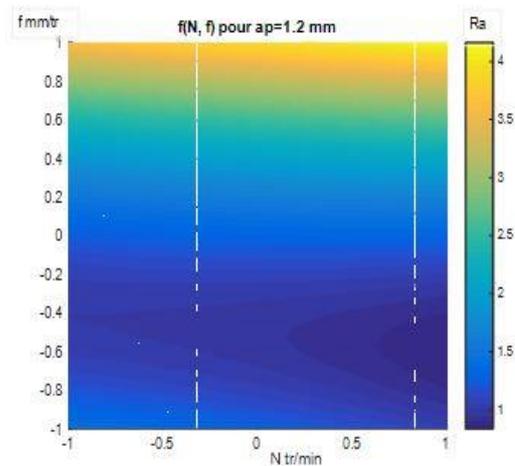
a) Variation de Ra en fonction de f et ap pour N=1400 tr/min



b) Courbe d'isoréponse variation de Ra en fonction de f et ap



c) Variation de Ra en fonction de N et f pour ap=1.2mm



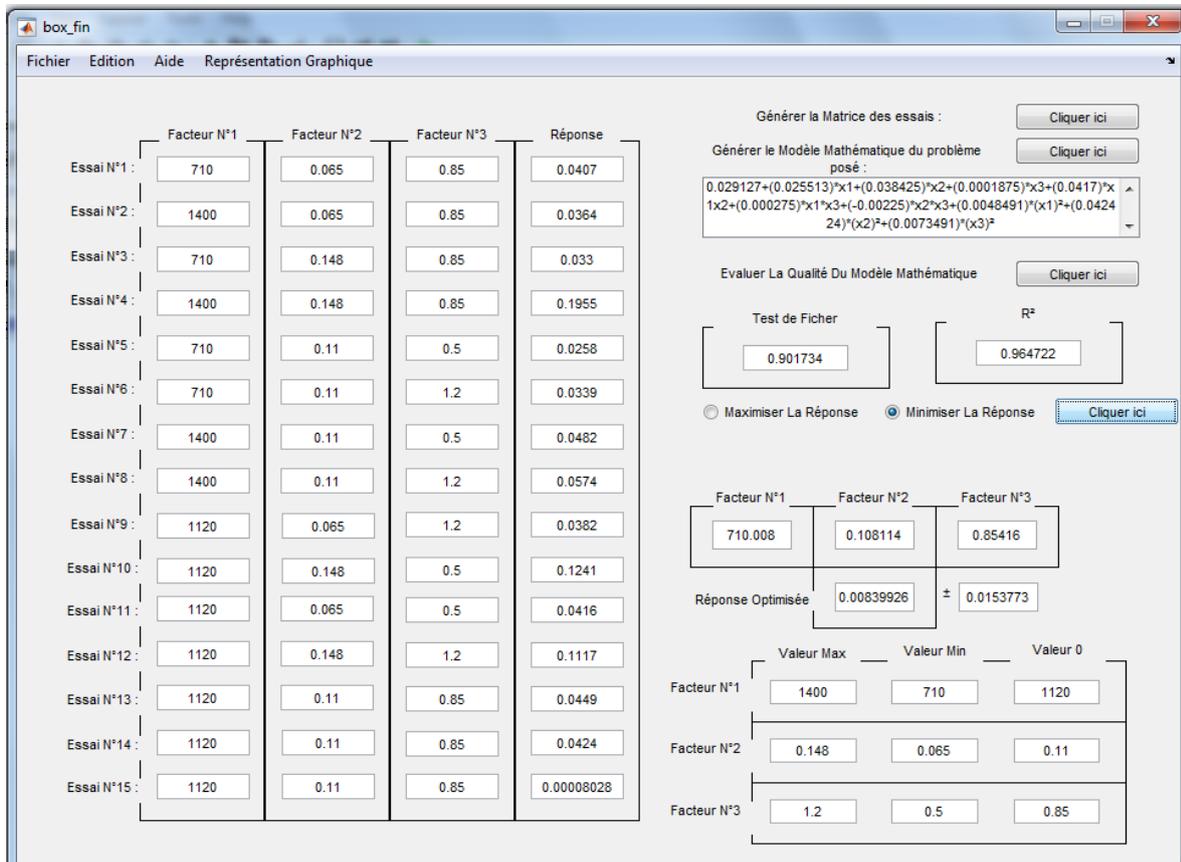
d) Courbe d'isoréponse variation de Ra en fonction de N et f

Figure III.8. Diagramme de surface 3D de Ra.

III.3.2.2 Traitement des données des indicateurs

a. Analyse RMSx

Tableau III.3. Traitement de la matrice d'expériences de RMSx.



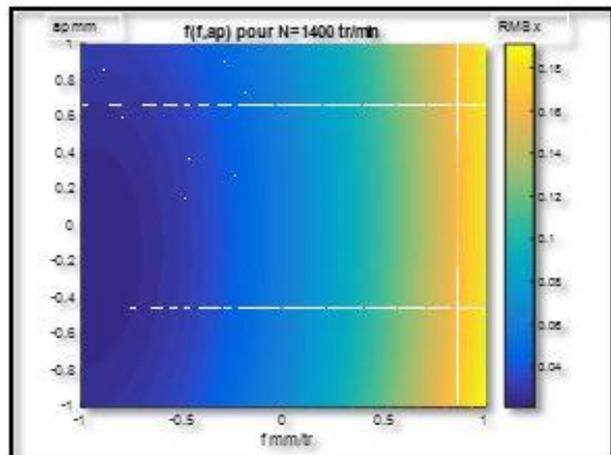
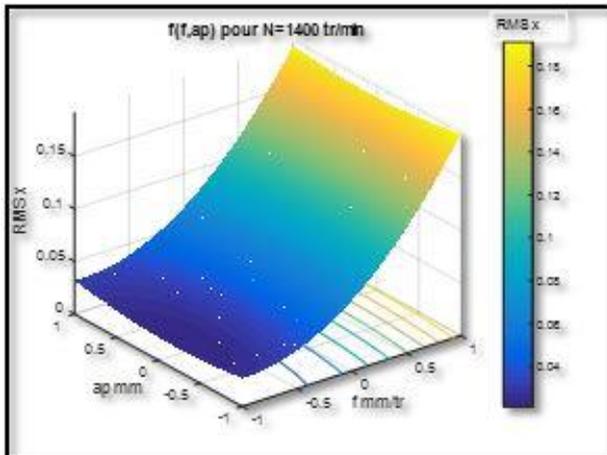
• **Modèle mathématique**

➤
$$RMS_x = 0.029127 + (0.025513) * x_1 + (0.038425) * x_2 + (0.0001875) * x_3 + (0.0417) * x_1 x_2 + (0.000275) * x_1 * x_3 + (-0.00225) * x_2 * x_3 + (0.0048491) * (x_1)^2 + (0.042424) * (x_2)^2 + (0.0073491) * (x_3)^2$$

➤ $R^2 = 0.96$

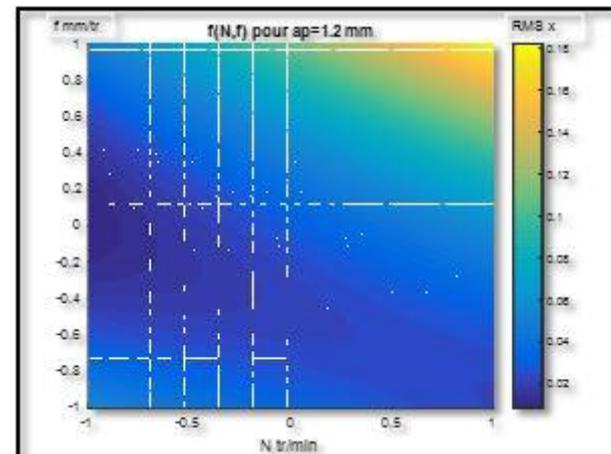
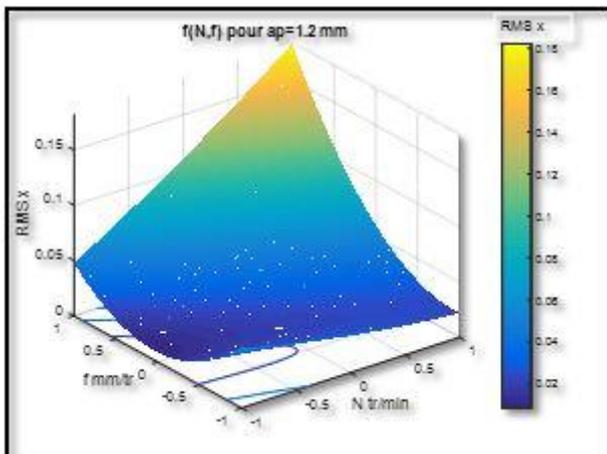
• **Diagramme de surface 3D sur RMSx**

Les graphiques 3D montre le comportement des paramètres de coupe sur RMSx. Ils confirment les observations précédentes en montrant que la profondeur de passe ne génère pratiquement aucune variation dans le RMSx, soulignant ainsi que son influence sur est négligeable par rapport à celle de l'avance et la fréquence de rotation qui ont un effet significatif sur la réponse. On peut observer que des valeurs faibles de l'avance et de la fréquence de rotation entrain une diminution de RMSx.



a) Variation de RMSx en fonction de f et ap pour N=1400 tr/min

b) Courbe d'isoréponse variation de RMSx en fonction de f et ap



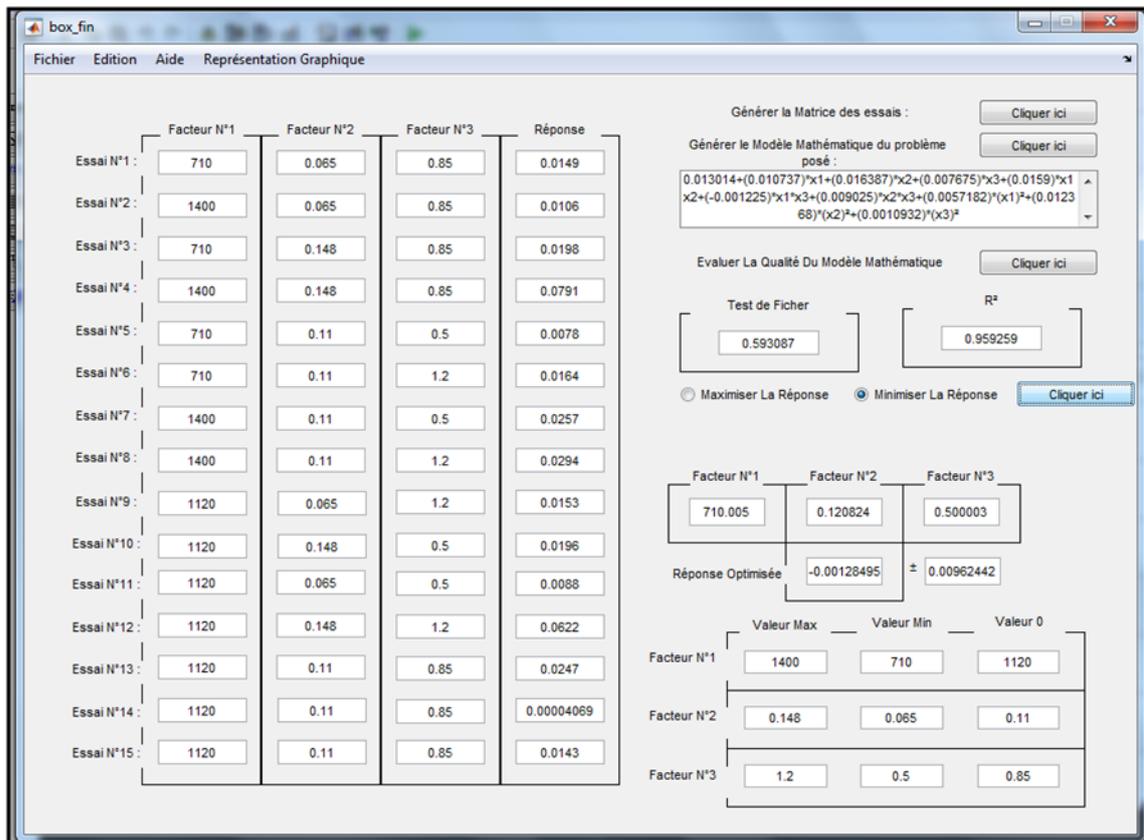
c) Variation de RMSx en fonction de N et f pour ap=1.2mm

d) Courbe d'isoréponse variation de RMSx en fonction de N et f

Figure III.9. Diagramme de surface 3D de RMSx.

b. Analyse RMS_Y

Tableau III.4. Traitement de la matrice d'expériences de RMS_Y.

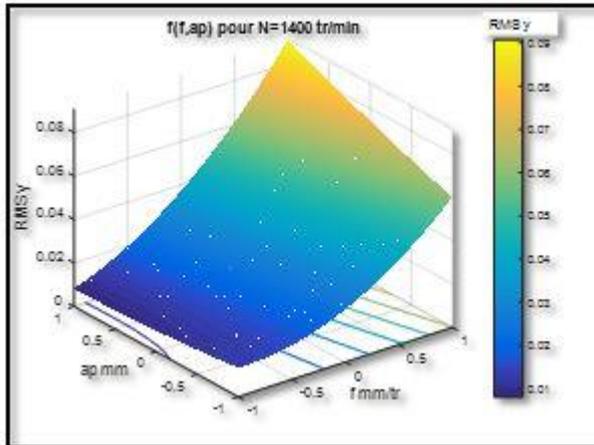


• **Modèle mathématique**

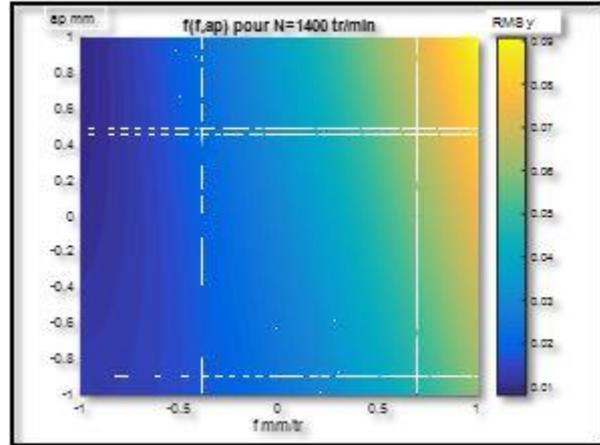
- $RMS_Y=0.013014+(0.010737)*x_1+(0.016387)*x_2+(0.007675)*x_3+(0.0159)*x_1x_2+(0.001225)*x_1*x_3+(0.009025)*x_2*x_3+(0.0057182)*(x_1)^2+(0.012368)*(x_2)^2+(0.0010932)*(x_3)^2$
- $R^2=0.95$

• **Diagramme de surface 3D sur RMS_Y**

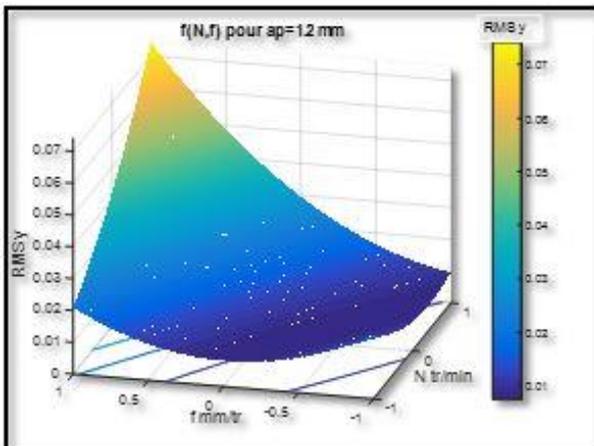
Les graphiques 3D montre le comportement des paramètres de coupe sur RMS_Y. Ils confirment les observations précédentes. On peut observer que des valeurs faibles des paramètres de coupes entraînent une diminution de RMS_Y.



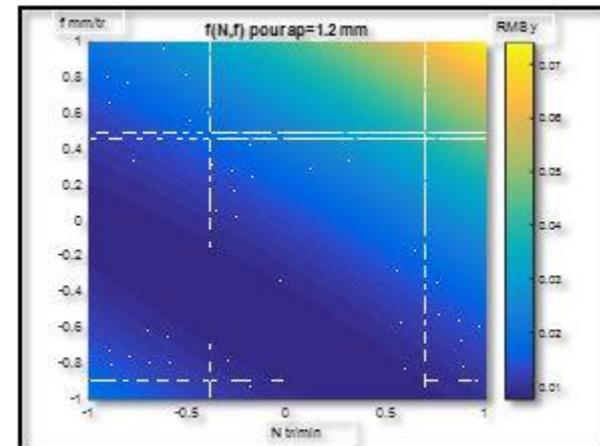
a) Variation de RMSy en fonction de f et ap pour N=1400 tr/min



b) Courbe d'isoréponse variation de RMSy en fonction de f et ap



c) Variation de RMSy en fonction de N et f pour ap=1.2mm

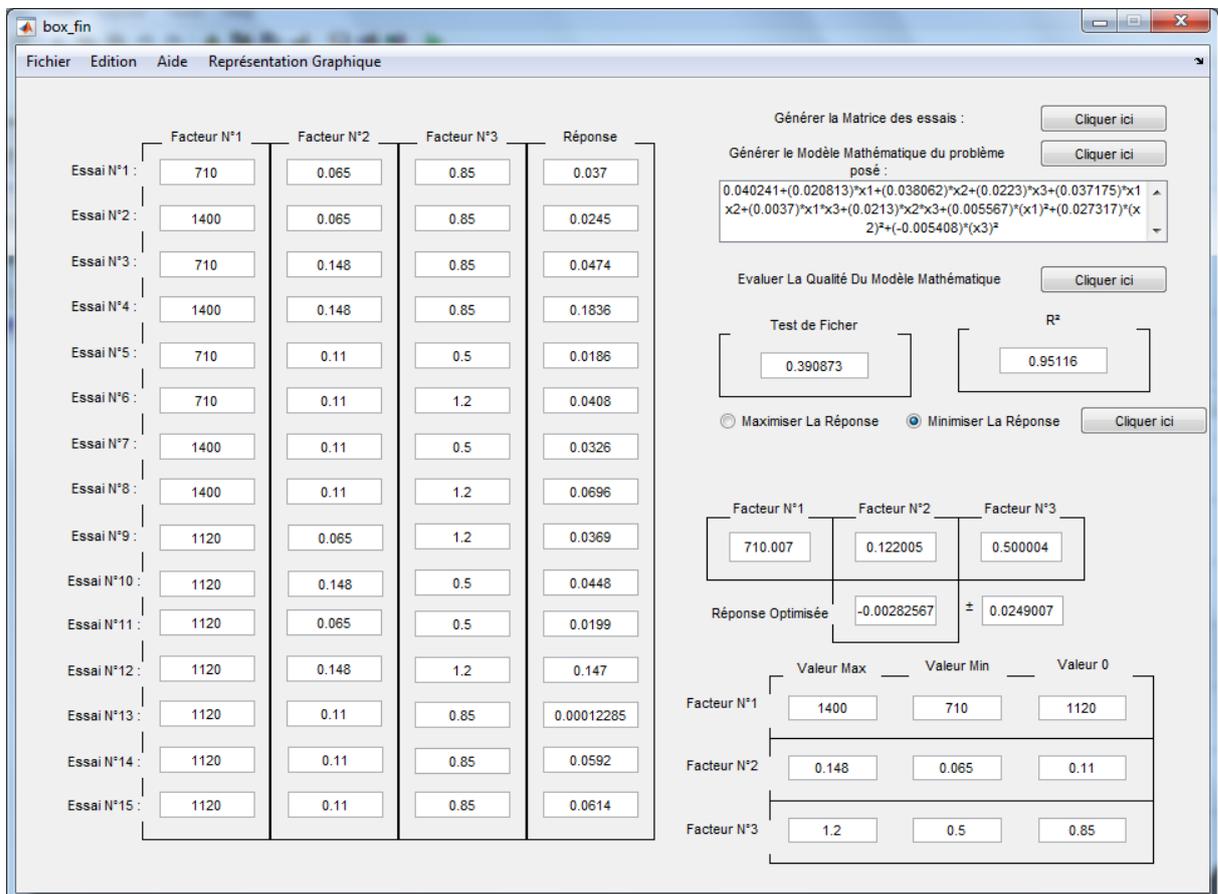


d) Courbe d'isoréponse variation de RMSy en fonction de N et f

Figure III.10. Diagramme de surface 3D de RMSy.

c. Analyse RMSz

Tableau III.5. Traitement de la matrice d'expériences de RMSz.



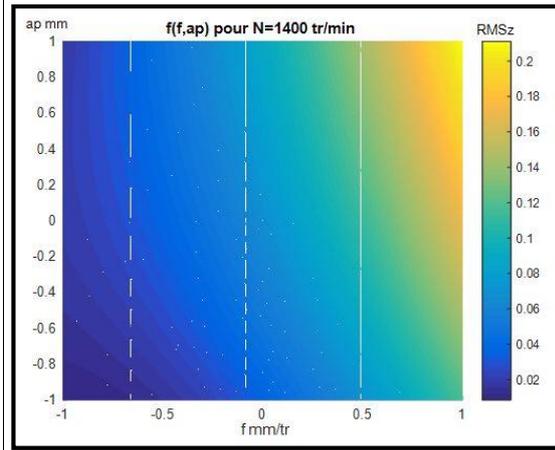
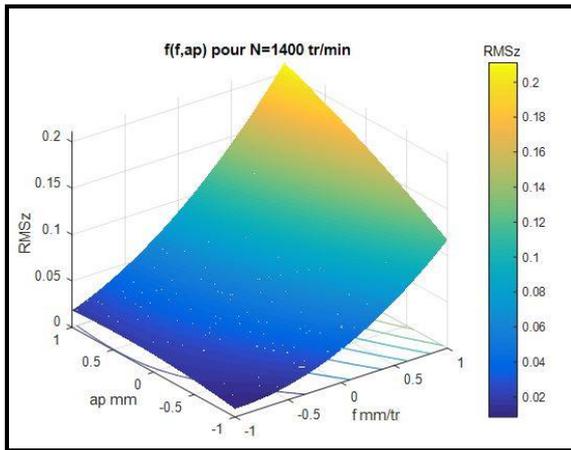
▪ **Modèle mathématique**

➤ $RMSz=0.040241+(0.020813)*x1+(0.038062)*x2+(0.0223)*x3+(0.037175)*x1x2+(0.0037)*x1*x3+(0.0213)*x2*x3+(0.005567)*(x1)^2+(0.027317)*(x2)^2+(-0.005408)*(x3)^2$.

➤ $R^2=0.95$

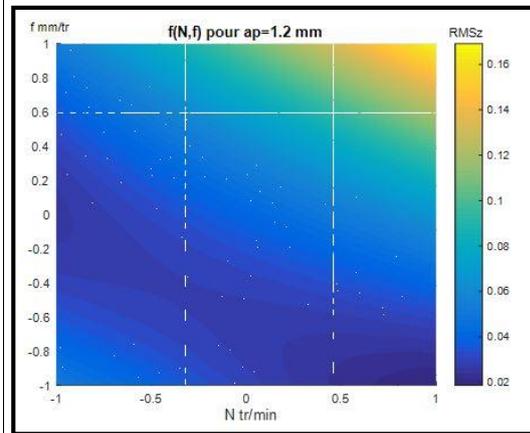
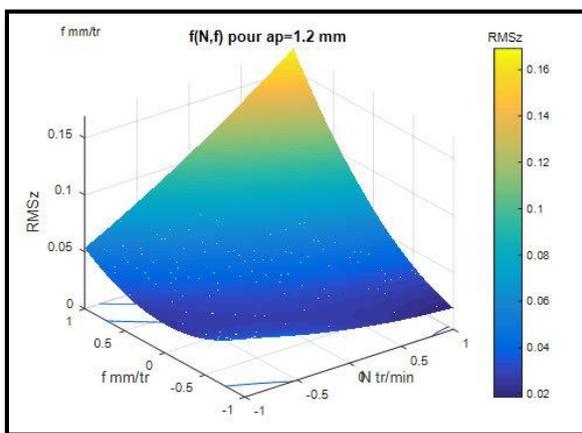
▪ **Diagramme de surface 3D sur RMSz**

Les graphiques 3D montre le comportement des paramètres de coupe sur RMSz. Ils confirment les observations précédentes. On peut observer que des valeurs faibles des paramètres de coupes entraînent une diminution de RMSz.



a) Variation de RMSz en fonction de f et ap pour N=1400 tr/min

b) Courbe d'isoréponse variation de RMSz en fonction de f et ap



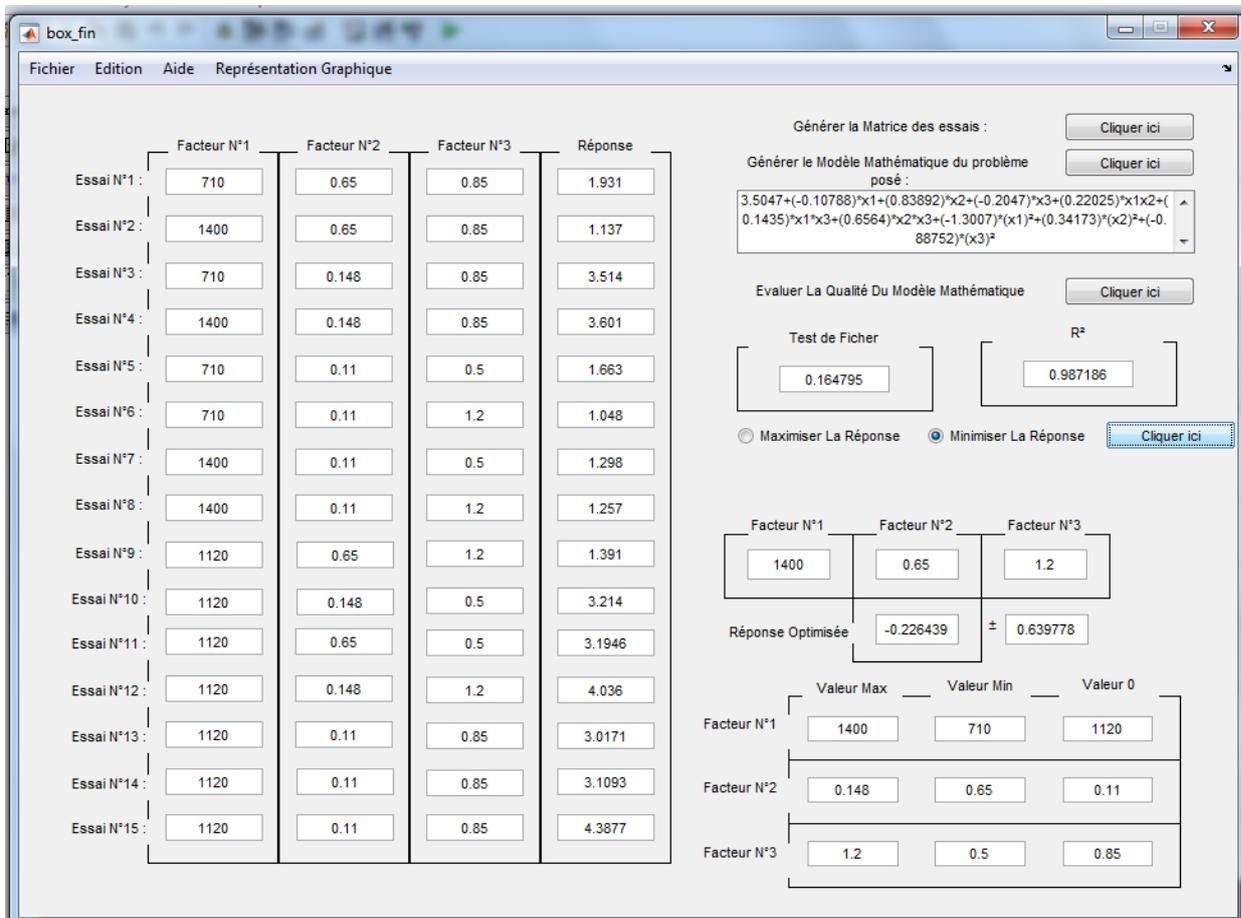
c) Variation de RMSz en fonction de N et f ap=1.2mm

d) Courbe d'isoréponse variation de RMSz en fonction de N et f

Figure III.11. Diagramme de surface 3D de RMSz.

d. Analyse K_{ux}

Tableau III.6. Traitement de la matrice d'expériences de K_{ux} .

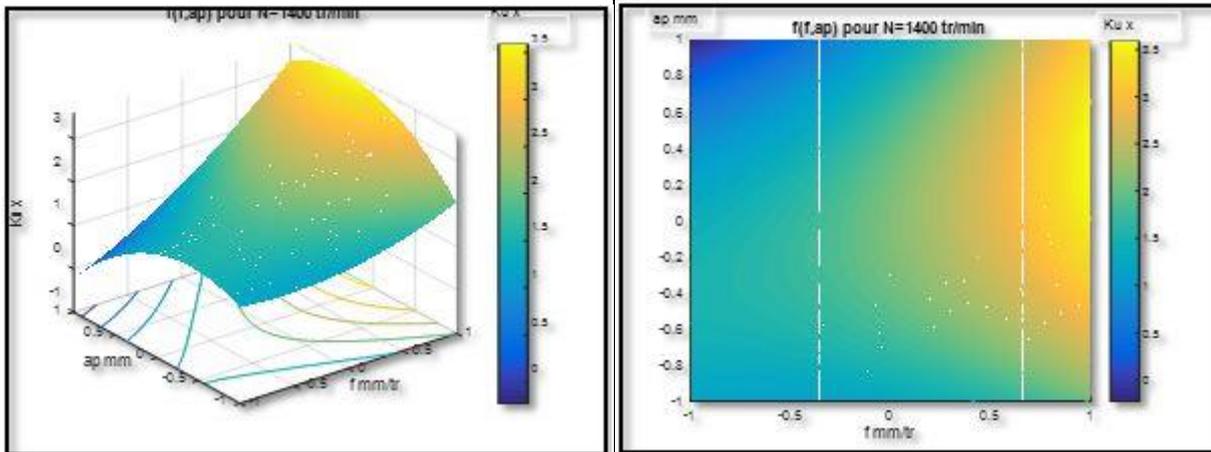


• **Modèle mathématique**

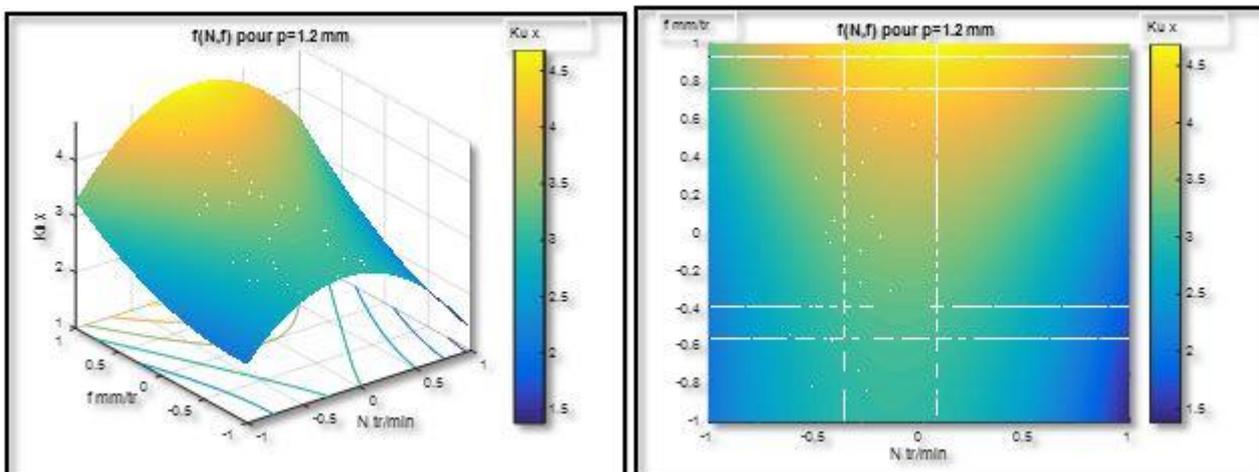
- $K_{ux}=3.5047+(-0.10788)*x_1+(0.83892)*x_2+(-0.2047)*x_3+(0.22025)*x_1x_2+(0.1435)*x_1*x_3+(0.6564)*x_2*x_3+(-1.3007)*(x_1)^2+(0.34173)*(x_2)^2+(-0.88752)*(x_3)^2$
- $R^2=0.98$

• **Diagramme de surface 3D sur K_{ux}**

Les graphiques 3D montre le comportement des paramètres de coupe sur K_{ux} . Ils confirment les observations précédentes que tous les paramètres ont une influence significatif sur K_{ux} .



a) Variation de K_{ux} en fonction de f et a_p pour $N=1400$ tr/min b) Courbe d'isoréponse variation de K_{ux} en fonction de f et a_p

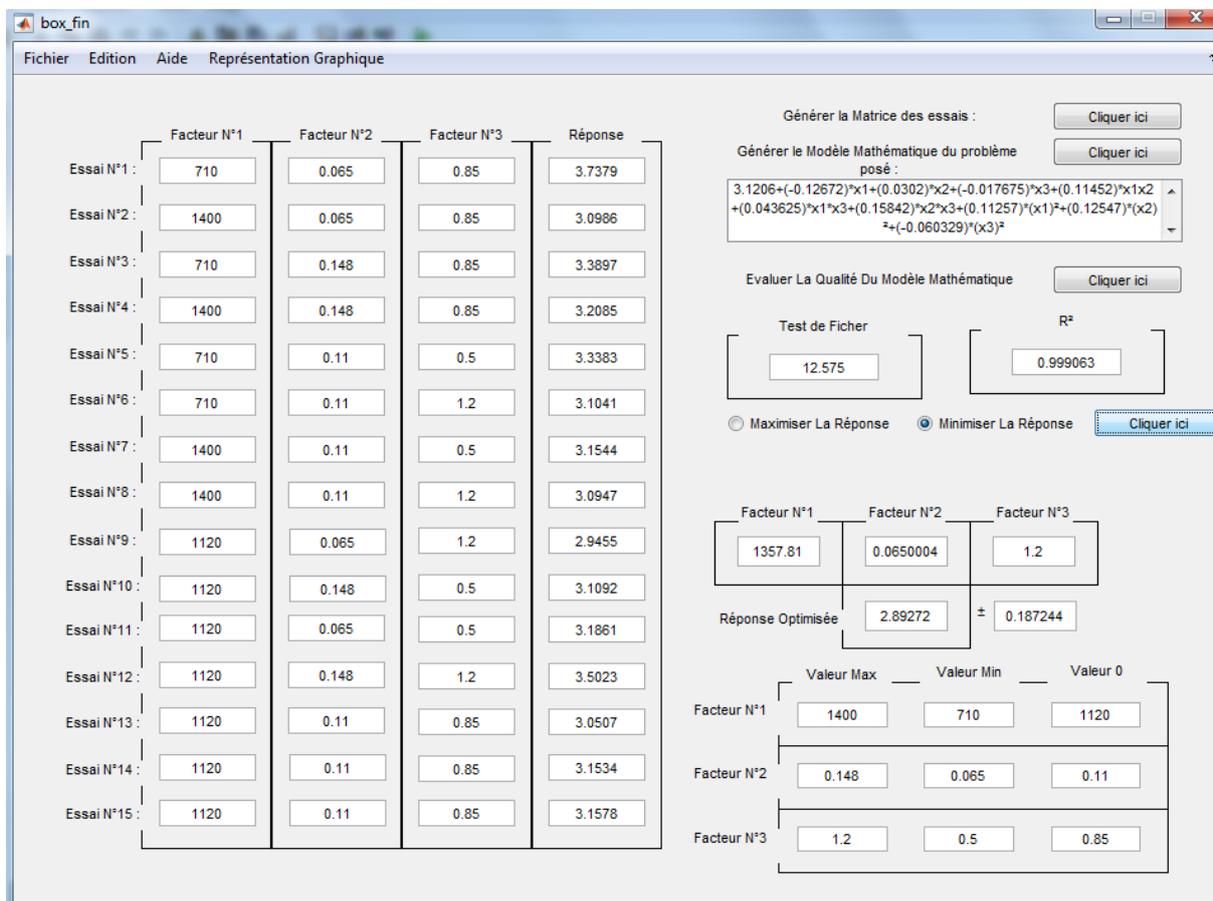


c) Variation de K_{ux} en fonction de N et f pour $a_p=1.2$ mm d) Courbe d'isoréponse variation de K_{ux} en fonction de N et f

Figure III.12. Diagramme de surface 3D de K_{ux} .

e. Analyse Kuy

Tableau III.7. Traitement de la matrice d'expériences de Kuy.



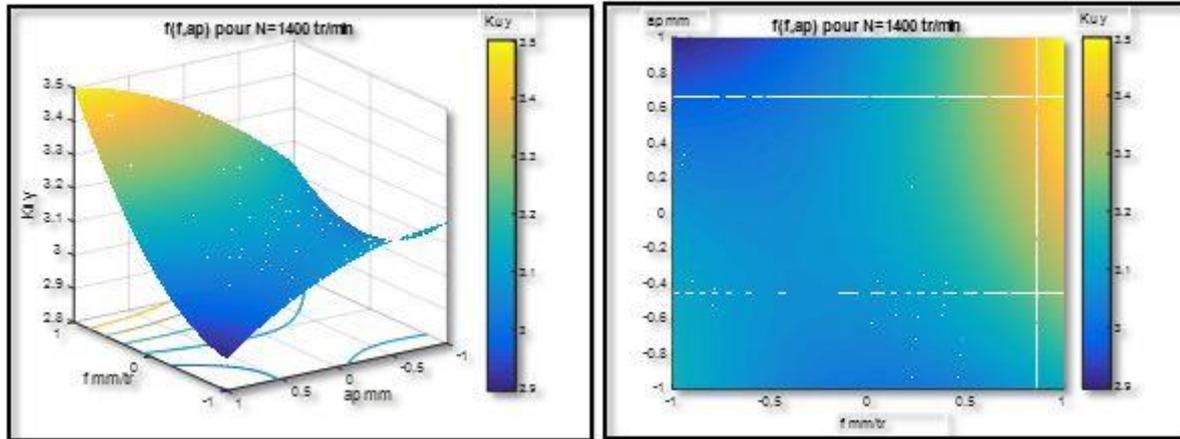
• **Modèle mathématique**

➤ $Kuy=3.1206+(-0.12672)*x1+(0.0302)*x2+(-0.017675)*x3+(0.11452)*x1x2+(0.043625)*x1*x3+(0.15842)*x2*x3+(0.11257)*(x1)^2+(0.12547)*(x2)^2+(-0.060329)*(x3)^2$

➤ $R^2=0.99$

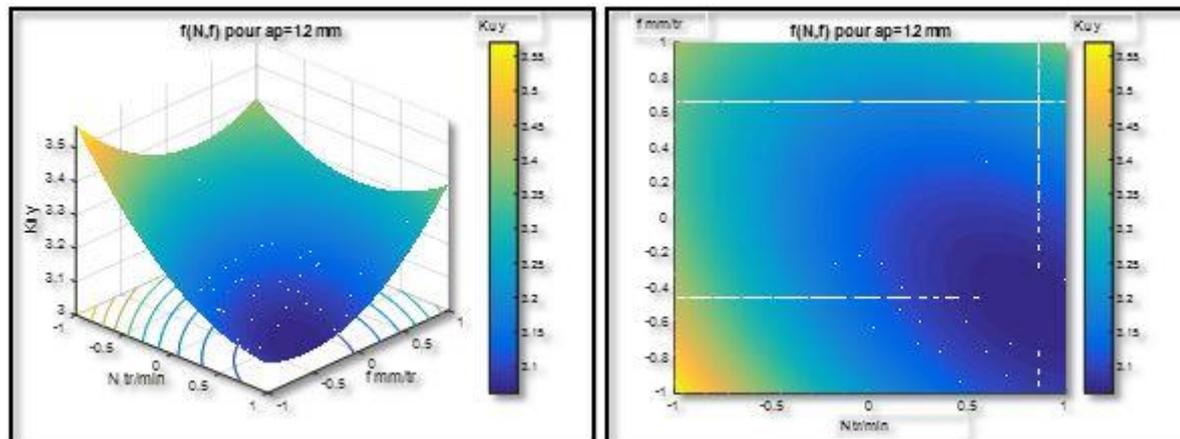
• **Diagramme de surface 3D sur Kuy**

Les graphiques 3D montre le comportement des paramètres de coupe sur Kuy. Ils confirment les observations précédentes que tous les paramètres ont une influence significative sur Kuy.



b) Variation de K_{uy} en fonction de f et a_p pour $N=1400$ tr/min

b) Courbe d'isoréponse variation de K_{uy} en fonction de f et a_p



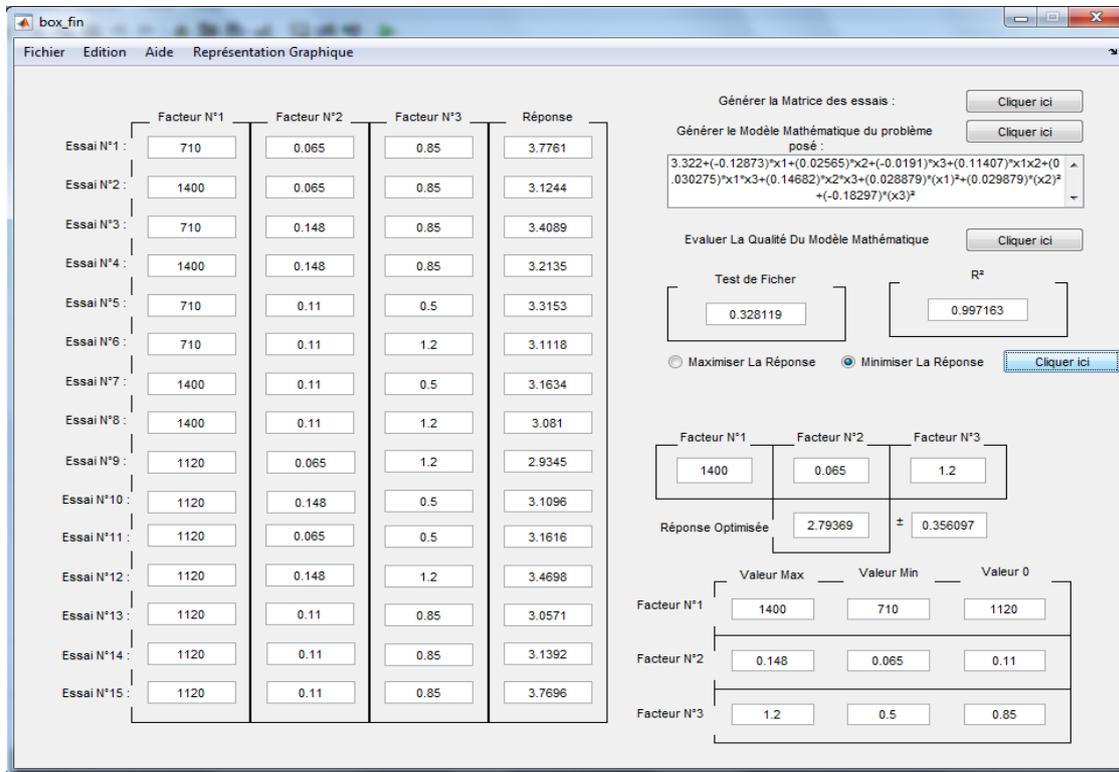
c) Variation de K_{uy} en fonction de N et f pour $a_p=1.2$ mm

d) Courbe d'isoréponse variation de K_{uy} en fonction de N et f

Figure III.13. Diagramme de surface 3D de K_{uy} .

f. Analyse Kuz

Tableau III.8. Traitement de la matrice d'expériences de Kuz.

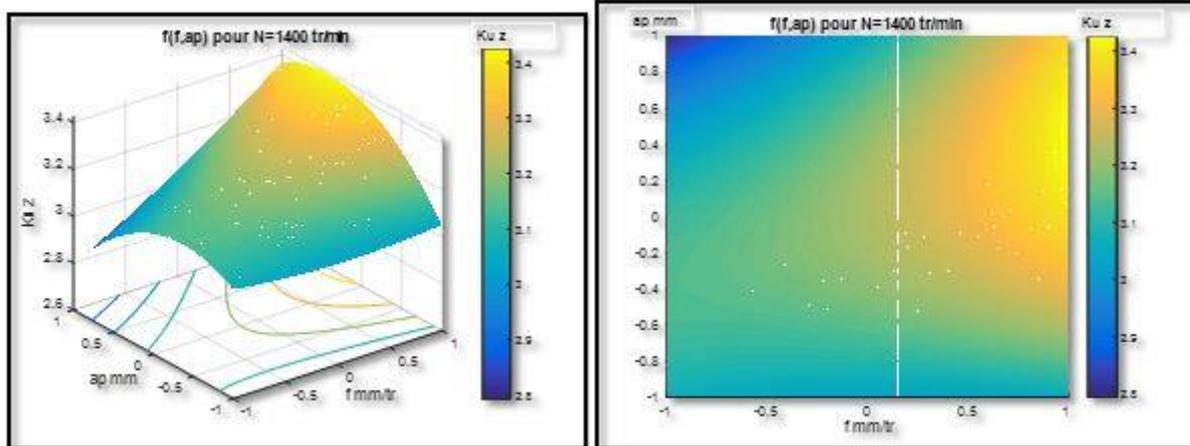


• **Modèle mathématique**

- $Kuz=3.322+(-0.12873)*x_1+(0.02565)*x_2+(-0.0191)*x_3+(0.11407)*x_1x_2+(0.030275)*x_1x_3+(0.14682)*x_2x_3+(0.028879)*(x_1)^2+(0.029879)*(x_2)^2+(-0.18297)*(x_3)^2$
- $R^2=0.99$

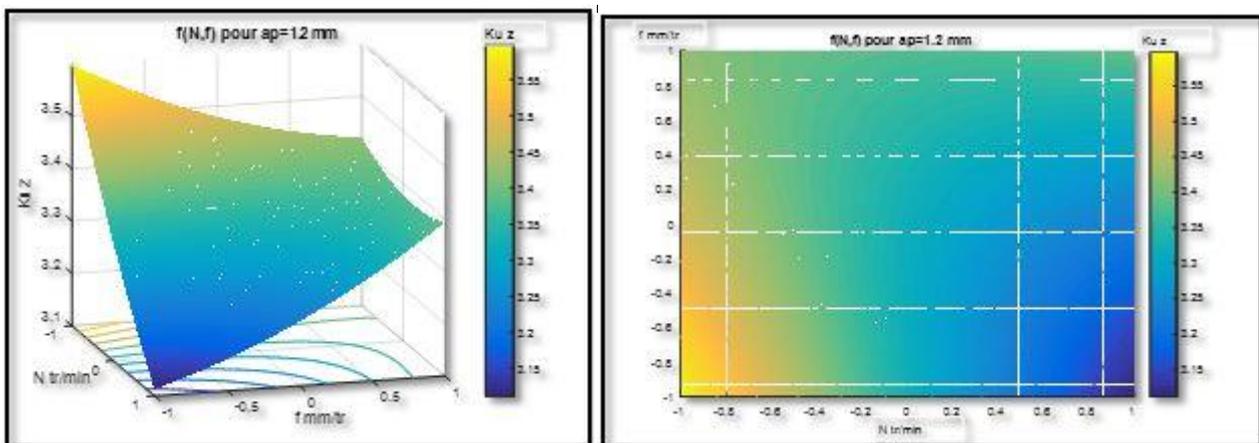
• **Diagramme de surface 3D sur Kuz**

Les graphiques 3D montre le comportement des paramètres de coupe sur Kuz. Ils confirment les observations précédentes que tous les paramètres ont une influence significative sur Kuz.



a) Variation de Kuz en fonction de f et ap pour N=1400 tr/min

b) Courbe d'isoréponse variation de Kuz en fonction de f et ap



c) Variation de Kuz en fonction de N et f pour ap=1.2mm

d) Courbe d'isoréponse variation de Kuz en fonction de N et f

Figure III.14. Les diagrammes de surface 3D sur Kuz.

Conclusion de box-behen

La rugosité est principalement influencée par l'avance, de sorte que l'augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la rugosité. De plus, l'augmentation de l'avance entraîne une augmentation de la valeur RMS et une diminution de la valeur Ku. En conséquence, il semble que la corrélation entre la rugosité et les vibrations est beaucoup plus prononcée pour l'indicateur RMS.

III.4. Test de Validation

Les tests de validation ont été réalisés par les régimes correspondants à la rugosité maximale (R_{max} : N =1400 tr/mn ; f=0.148 mm/tr ; a_p= 1.2 mm) et minimale (R_{min} : N =1400 tr/mn ; f=0.08 mm/tr ; a_p= 1.1 mm). Ces tests sont conduits en tenant compte de l'indicateur RMS qui est considéré en bonne corrélation avec la rugosité Ra. Les résultats du test sont consignés sur le tableau III.9.

Tableau III.9. Les résultats du test de validation.

Régime Optimal	Rugosité (Ra)	RMS _x	RMS _y	RMS _z
R Max	1.61	0.1444	0.0574	0.1178
R Min	1.1	0.0838	0.0366	0.0838

- Les graphiques correspondant à ces résultats, montrant l'évolution de la rugosité et le RMS sont présentés sur les figures III.15. et III.16.

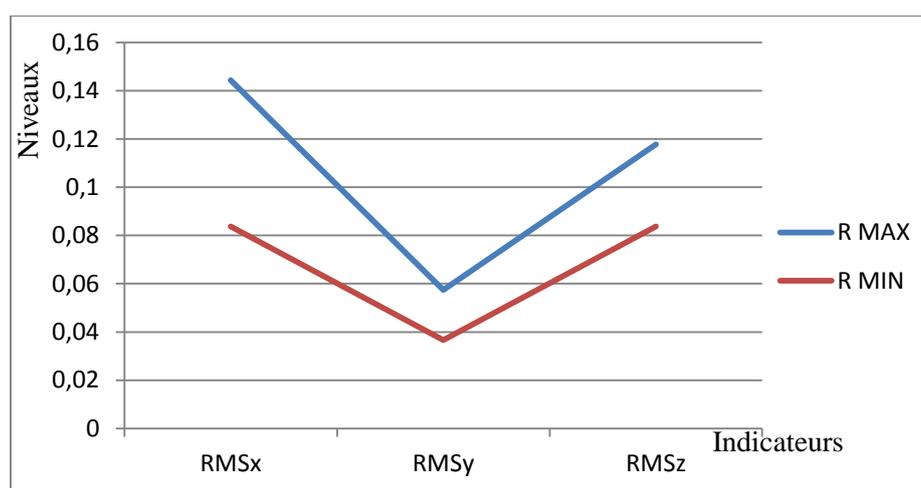


Figure III.15. Indicateurs RMS.

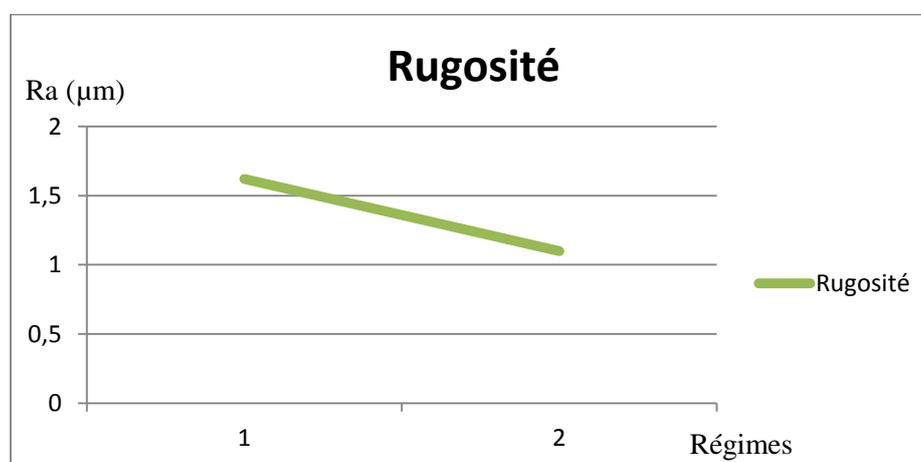


Figure III.16. Evolution de la rugosité.

D'après les graphes, nous constatons que le régime (1) offre une rugosité élevée ($R_a=1.61\mu\text{m}$), de même que les valeurs du RMS connaît un niveau important selon tous les axes. A l'inverse pour le régime (2), la rugosité est plus faible ($R_a=1.1\mu\text{m}$), pareillement le niveau de valeur du RMS est plus faible selon tous les axes.

III.5. Conclusion

D'après les résultats du traitement par MINITAB et le modèle de Box-Behnken, ainsi que les résultats du test de la validation, il ressort que l'indicateur RMS est en accord avec la rugosité. Donc cet indicateur peut être considéré comme représentatif.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire revêt un caractère expérimental sur une pièce en acier de construction (C50). L'objectif principal consiste à examiner un système usinant sur tour afin de montrer l'influence des paramètres de coupe sur la qualité de surface réalisée caractérisée par la rugosité "Ra", en mettant en relief son interaction avec les indicateurs vibratoires, en l'occurrence, le RMS et le kurtosis.

Une synthèse bibliographique a été exposée, en vue de montrer l'importance des procédés d'usinage en mettant l'accent sur le processus de coupe et l'importance de la surveillance par les techniques vibratoires. Aussi, la corrélation de la qualité de surface et les indicateurs vibratoires a été mise en évidence.

L'expérimentation a été conduite à l'aide d'une méthodologie basée sur des plans de Box-Behnken, en considérant l'impact des paramètres d'entrée (N, f et a_p), ce qui a permis la formulation des modèles mathématiques et des simulations numériques (courbes 3D et d'isoreponses) et l'optimisation du régime qui offre la meilleure qualité de surface.

Dans un premier temps, l'expérimentation a été exécutée avec une combinaison de 15 régimes de coupe où des mesures de signaux vibratoires en temps réel, ont été relevées. Par la suite, une caractérisation de la qualité de surface par mesure de la rugosité Ra, a été effectuée. Le traitement des résultats par MiniTab et par le modèle de Box-Behnken, a été réalisé afin de juger de l'impact des paramètres de coupe (N,f, a_p) sur les paramètres de sorties (Ra, RMS et kurtosis). Dans un second temps, des tests de validation accompagnés de relevés des signaux vibratoires, ont été réalisés sur deux paliers au moyen des régimes (N= 1400 trs/min, f=0.148 mm/tr, a_p =1.2 mm et N=1400 trs/min, f=0.083 mm, a_p = 1.09 mm) fournis par le modèle de Box-benken, relatif à la rugosité Ra.

Les résultats obtenus dans ce travail se résument en ce qui suit :

- La rugosité est particulièrement influencée par la vitesse d'avance, en effet à mesure que l'avance augmente, la rugosité augmente et inversement.
- L'indicateur RMS est plus représentatif que le KURTOSIS, en effet son évolution est similaire à celle de la rugosité (Ra et RMS ont la même tendance).
- Les tests de validation des conditions de coupe exprimées par le modèle prédit pour Ra_{min} et Ra_{max} , ont montré aussi que l'évolution de l'indicateur RMS est en accord avec l'évolution de la rugosité Ra.

- A partir des graphes relatifs aux réponses considérées, les modèles mathématiques de Ra et l'indicateur RMS, sont vérifiés au moyen du critère d'ajustement (R^2) :

- Pour la rugosité, $R^2= 0.99$

- Pour l'indicateur RMS : Selon x, $R^2= 0.96$

Selon y, $R^2= 0.95$

Selon z, $R^2=0.95$

Perspectives

Ce travail ouvre les perspectives suivantes :

- Considérer d'autres indicateurs vibratoires tels que : le facteur K, le facteur crête.
- Réaliser des travaux et essais sur d'autres matériaux.

- [1] **Bourebja Mounira**, Mémoire de magister "Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique " Université Badji Mokhtar- Annaba, 2010".
- [2] **Talhi Seif Eddine**, Mémoire de Fin D'étude d'un diplôme de Master, « Amélioration du fini de surface par usinage - Approche par la dimension fractale» 2019/2020
- [3] **SOUAB Ayoub**, mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master, ETUDE DE L'USINAGE DES MATÉRIAUX COMPOSITE PAR ANALYSE VIBRATOIRE 2017-2018
- [4] **Passerons**, Tournage, Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997
- [5] **A. PASSERON**, «Tournage », Technique de l'ingénieur, Volume N°1, Article Référence : BM 7086, (1998).
- [6] **A.CASTELLA.DUPONT**. Technologie coupe des métaux, édition Des forges 1976 Paris
- [7] **C. MARTY**. Industrialisation des produits mécaniques Tome 3 : procédés de fabrication LAVOISIER 1999
- [8] **SANDVIK**. Techniques modernes d'usinage. Edition SANDVIK , 1997.
- [9] **REMADNA, MEDHI**. Thèse : Le comportement du système usinant dur. Application au cas d'un acier trempé usinée avec des plaquettes CBN. Institut national des sciences appliquées de Lyon (2001).
- [10] **ALEXANDRE TOUMINE**. Cours d'usinage. Groupe de conception et de production. INSA de Lyon.
- [11] **A.BOUCHLEGHEM**. Cour coupe des Métaux 2_Chapitre II Master 1_FMetP2021.pdf
- [12] **S. BELHADI**, « Etude de l'usinage des Aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau », Thèse de doctorat de l'université Badji Mokhtar Annaba, pp 4, (2009)
- [13] **ALEXANDRE TOUMINE**. Cours d'usinage. Groupe de conception et de production. INSA de Lyon.
- [14] **Frank P. Bowden et David Tabor** . Introduction à la tribologie , nature et comportement des surfaces frottantes, aspects géométriques, édition : Heinemann (1973), London.
- [15] **Chevalier R**. «Etat de l'art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF», RFM, 2001.

[16] **A. BOULENGER, C.PACHAUD.** Diagnostic vibratoire en maintenance préventive
Edition : Dunod, Paris, octobre 1999.

[17] <http://www.analysepredictive.fr/tag/explication-de-lanalyse-vibratoire>

[18] **Maurice MARTINET,** Analyse multi résolution en ondelettes Du rayonnement
acoustique des structures planes, Thèse de Doctorat, Soutenue le 19 décembre 2001 L'Institut
National des Sciences Appliquées de Lyon.

[19] Paul Emile Boileau, Subhash Rakheja, et al. Caractérisation de l'environnement vibratoire
dans différentes catégories de véhicules : industries utilitaires et de transport urbain, Mai 2000.

[20] **M.V. THEVENOT,** « Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de
parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques », Thèse de doctorat de L'institut
National Polytechnique de TOULOUSE, pp 19-21, (2005).

[21] **Jean-Richard et Marc Demeuse.** La lecture des indicateurs internationaux en France.
N°18 ; Mai 2005.

[22] **Bettine F. Magister** en GM sur L'étude des prorusses d'usinage des pièces mécanique
sur les machin CNC a 5 axe. Beskra : université Mohamed khider-Beskra. 2012.