

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES INFLUENCES DES PARAMETRES  
DE COUPE DISCONTINUE SUR LES VIBRATIONS DU SYSTEME  
USINANT ET SUR L'ETAT DE SURFACE

Option : Génie Mécanique

Par :

**Fatiha KHETTABI**

**DIRECTEUR DE THESE : Ahmed LAGRED M.C.A Université d'Annaba**

Devant le jury

Président :	Lakhdar LAOUAR	Professeur	Université d'Annaba
Examineurs :	Lakhdar KHOCHEMANE	Professeur	Université de Skikda
	Hammoudi MAZOUZ	Professeur	Université de Batna
	Youcef KHADRI	M.C.A	Université d'Annaba

---

Année 2017



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES INFLUENCES DES PARAMETRES  
DE COUPE DISCONTINUE SUR LES VIBRATIONS DU SYSTEME  
USINANT ET SUR L'ETAT DE SURFACE

Option : Génie Mécanique

Par :

**Fatiha KHETTABI**

**DIRECTEUR DE THESE : Ahmed LAGRED M.C.A Université d'Annaba**

Devant le jury

Président :	Lakhdar LAOUAR	Professeur	Université d'Annaba
Examineurs :	Lakhdar KHOCHEMANE	Professeur	Université de Skikda
	Hammoudi MAZOUZ	Professeur	Université de Batna
	Youcef KHADRI	M.C.A	Université d'Annaba

---

Année 2017

## *Dédicace*

*Pour m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la sagesse pour accomplir ce travail, et surtout pour ça bien vaillance, car sans lui je n'aurai rien pu faire et grâce à lui je suis devenu celle qui je suis aujourd'hui et j'ai eu tous ce que j'ai, alors je dois avant tout dire « اللهم لك الحمد », merci ALLAH.*

*Et parce que c'est lui qui nous a dit : « أن اشكر لي ولوالدي », je tiens à dédier cette thèse à ma très chère **Mère : Khedidja (Daouia)** et à mon cher **Père : Lezghed (Youcef)**, en témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.*

*A toute ma famille.*

*A mes chers amis.*

---

# *Remerciements*

*Je remercie Dieu, le tout Puissant, pour tout.*

*Ce travail a été effectué en collaboration entre le Complexe Arcelor Mittal à Annaba et le Laboratoire de Mécanique et Structures (LMS) de l'université 8 mai 1945 de Guelma, sous la direction du docteur Ahmed LAGRED.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse : le docteur Ahmed LAGRED pour la confiance qu'il m'a accordée, ses encouragements, et ses précieux conseils, je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*Je remercie très sincèrement le professeur Lakhdar LAOUAR chef de formation doctorale, d'avoir accepté la présidence du jury. Mes vifs remerciements pour les rapporteurs : le professeur Lakhdar KHOCHEMANE ; le professeur Hammoudi MAZOUZ et le docteur Youcef KHADRI d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail de doctorat.*

*Je remercie également tous les membres du département Génie Mécanique et du laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI), Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Université Badji Mokhtar. Annaba.*

*Je remercie également le personnel des ateliers d'usinage des AMM du Complexe Arcelor Mittal à Annaba, et du Laboratoire de Mécanique et Structures (LMS), Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences de l'Ingénierat, Université 8 mai 1945. Guelma.*

*Je tiens également à remercier toute ma famille : mes chères Parents ; mes frères et mes sœurs ; mes oncles et mes tantes ; mes cousins et mes cousines. Je les remercie de leurs aides et encouragements tout au long de mes études.*

*Enfin, merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de thèse.*

## **Résumé**

Cette thèse de doctorat a pour but d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur les rugosités des pièces usinées, et sur les vibrations pendant le fraisage à sec. Une première partie concerne l'étude de l'usinage de deux types d'aciers : le C45 et 42CrMo4. Le critère d'évaluation considéré est la rugosité (Ra et Rz). Des modèles mathématiques exprimant l'influence des paramètres de coupe sur les critères de rugosité ont été établis d'après la méthode de surface de réponse, les résultats obtenus nous ont permis d'évaluer le paramètre le plus influent sur l'état de surface. Une deuxième partie concerne l'étude des vibrations en utilisant un acier C40, nous avons choisi la méthode des plans d'expériences basée sur le plan de Taguchi, les modèles quadratiques reliant chaque réponse aux différents combinaisons du régime de coupe ont été élaborés à l'aide d'un logiciel statistique MINITAB16. L'analyse de la variance (ANOVA) a été faite pour étudier le degré d'influence de chaque élément des paramètres de coupe sur les réponses étudiées. Une analyse des résultats expérimentaux obtenus au cours des deux parties de l'étude est présentée avec des conclusions et des perspectives.

**Mots clés :** Fraisage, rugosité, conditions de coupe, ANOVA, optimisation.

## **Abstract**

This thesis aims to study the influence of cutting parameters on the roughness of machined parts, and vibration during dry milling. The first part concerns the study of the machining of two types of steels: the C45 and 42CrMo4. The evaluation criteria considered is roughness (Ra and Rz). Mathematical models expressing the influence of cutting parameters on the roughness criteria were established by the response surface method, the results obtained have allowed us to evaluate the most influential parameter on the surface condition. A second part concerns the study of vibrations using a C40 steel, we have chosen the experimental design method based on the Taguchi plan, quadratic models linking each response to different combinations of cutting regime were elaborated using a statistical software MINITAB16. The analysis of variance (ANOVA) was made for studying the degree of influence of each element of the cutting parameters on the studied responses. An analysis of experimental results obtained in the two parts of the study is presented with conclusions and prospects.

**Keys-words:** Milling, roughness, cutting conditions, ANOVA, optimization.

---

## ملخص

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة تأثير عوامل القطع على خشونة سطوح القطع المنتجة، وعلى الاهتزازات أثناء عملية التفريز الجاف. الجزء الأول من الأطروحة يتعلق بدراسة نوعين من الفولاذ هما 42CrMo4 و C45 , معيار التقييم هو الخشونة (Ra,Rz). تم إنشاء النماذج الرياضية التي تبين تأثير عوامل القطع على معايير خشونة السطح من خلال استعمال استجابة السطح، وقد سمحت النتائج التي تم التوصل إليها إلى تقييم العامل الأكثر تأثيراً على حالة السطح. الجزء الثاني يهتم بدراسة الاهتزازات باستخدام الفولاذ C40 ، اخترنا طريقة التصميم التجريبي على أساس خطة تاجوشي، أعدت نماذج من الدرجة الثانية لربط كل استجابة بمختلف عناصر عوامل القطع باستخدام برنامج إحصائي (منطاب 16). تم إجراء تحليل التباين (أنوفا) لدراسة درجة تأثير كل عنصر من عوامل القطع على المخارج المراد دراستها (خشونة السطح و الاهتزازات). وقد قدم تحليلاً لنتائج التجارب التي تم الحصول عليها في شطري الدراسة مع تقديم خلاصة عامة لهذا العمل و الأفق المرجوة منه.

**الكلمات المفتاحية:** تفريز - خشونة السطح - عوامل القطع - أنوفا - تحسين.

## Table des matières

<b>Remerciements</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Table des matières</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des abréviations et des symboles</b>	
<b>Introduction générale</b> .....	1

### Chapitre I : Etude et analyse bibliographique

I.1.Introduction.....	3
I.2.Usinage à sec .....	3
I.3.Usinage conventionnel .....	4
I.4.Usinage à grande vitesse .....	4
I.5.Le fraisage .....	6
1.5.1.Types d'opération de fraisage .....	7
1.5.2.Les paramètres de coupe .....	8
1.5.2.1.La vitesse de la broche : N (tr/min) .....	8
1.5.2.2.La vitesse de coupe : $V_c$ (m/min) .....	8
1.5.2.3.La vitesse d'avance $V_f$ (mm/min) .....	8
1.5.2.4.Avance par tour $f$ (mm/tr) .....	9
1.5.2.5.Avance par dent : $f_z$ (mm/dent).....	9
1.5.2.6.La profondeur de coupe axiale $a_p$ (mm) .....	9
1.5.2.7.La largeur de coupe radiale $a_j$ (mm).....	9
1.5.2.8.L'épaisseur moyenne de copeau $h_j$ (mm).....	9
1.5.2.9.La surface du copeau $A$ (mm <sup>2</sup> ).....	10
1.5.2.10.La quantité d'enlèvement de matière $Q$ (mm <sup>3</sup> / min).....	10
1.5.2.11.Le temps d'usinage ( $T_e$ ).....	10
1.5.3.Directions de fraisage .....	10
I.6.Formation du copeau .....	11
I.6.1.Intérêt de la supervision de la formation du copeau .....	11
I.6.2.Phénomène de la formation du copeau .....	12
I.6.3.Analyse de la formation du copeau .....	12
I.6.4.Formes de copeaux obtenus en usinage .....	13
I.7.Matériaux de coupe.....	15
I.7.1.Les carbures métalliques .....	16



---

I.7.2. Les céramiques de coupe .....	18
I.7.3. Les cermets.....	18
I.7.4. Les Nitrures de Bore Cubique (CBN).....	19
I.7.5. Les diamants.....	20
I.8. Usure des outils.....	20
I.8.1. Relation usure-temps.....	21
I.8.2. Influence de l'usure de l'outil sur la pièce .....	22
I.9. L'état de surface .....	22
I.9.1. Définition.....	22
I.9.2. La rugosité .....	23
I.9.3. Les facteurs influant sur la rugosité .....	23
I.9.3.1. Avance et profondeur de passe.....	23
I.9.3.2. Vitesse de coupe.....	24
I.9.3.3. La géométrie de l'outil .....	24
I.9.3.4. Le mode d'usinage .....	24
I.9.4. Défauts de surface .....	25
I.9.5. Différents types de lignes.....	27
I.9.5.1. Longueur de base et longueur d'évaluation.....	28
I.9.5.2. Lignes de référence .....	28
I.9.6. Quantification.....	29
I.9.6.1. Méthode de la ligne moyenne.....	30
I.9.6.2. Méthode des motifs .....	31
I.9.7. Mesure de la rugosité .....	32
I.9.8. Modélisation de la rugosité .....	32
I.9.8.1. Cas de tournage.....	32
I.9.8.2. Cas de fraisage.....	33
I.10. Influence du système " Pièce-Outil-Machine " sur la rugosité .....	35
I.11. Travaux concernant l'étude de la rugosité.....	35
I.12. Conclusion.....	35

## **Chapitre II : Les vibrations en usinage**

II.1. Introduction.....	37
II.2. Identification du système « Pièce/Outil/Machine » .....	37
II.2.1. Eléments indépendants de l'opération d'usinage .....	38

---

---

II.2.2.Eléments dépendants de l'opération d'usinage .....	39
II.3.Différents types de vibrations en usinage .....	40
II.3.1.Les vibrations libres .....	40
II.3.2.Les vibrations forcées .....	40
II.3.3.Les vibrations auto-entretenues .....	41
II.3.3.1.Broutement d'origine régénératif .....	42
II.3.3.2.Broutement d'origine non-régénératif .....	42
II.3.3.3.Régénération de la surface.....	43
II.3.3.4.Couplage des modes .....	44
II.4.Sources des vibrations du système POM .....	44
II.5.Méthodes de mesure des vibrations .....	45
II.5.1.Mesures directes .....	45
II.5.2.Mesures indirectes .....	48
II.6.Analyse des vibrations .....	49
II.6.1.Les méthodes temporelles .....	49
II.6.1.1. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square) .....	49
II.6.1.2.Les indicateurs crêtes .....	50
II.6.1.3.Le Kurtosis .....	50
II.6.2.Les méthodes fréquentielles .....	51
II.6.2.1.L'analyse en fréquence .....	51
II.6.2.2.L'analyse d'enveloppe .....	53
II.6.2.3.Le cepstre .....	54
II.7.Quelques approches pour l'élimination des vibrations.....	54
II.7.1.Systèmes amortissants .....	54
II.7.2.La modification des efforts de coupe .....	54
II.7.3.Variation de la vitesse de broche.....	55
II.7.4.Outils de coupe spéciaux.....	57
II.8. Influence du régime de coupe sur les vibrations.....	58
II.9. Influence des vibrations sur l'état de surface .....	58
II.10. Conclusion .....	59

### **Chapitre III : Procédures expérimentales et méthodologies de recherche**

III.1.Introduction.....	60
III.2.Description du protocole expérimental .....	60

---

III.2.1.Machines-outils.....	60
III.2.2.Matière à usiner.....	61
III.2.3.Outils de coupe .....	62
III.2.4.Appareil de mesure de l'état de surface .....	63
III.2.5.Instrument de mesure des vibrations .....	64
III.3.Méthodologie de recherche.....	64
III.3.1.Méthode de surface de réponse (RSM).....	65
III.3.2.Méthode de Taguchi .....	67
III.3.3.Traitement des résultats.....	67
III.3.3.1.Analyse de la variance.....	67
III.3.3.2.Analyse de régression.....	69
III.3.3.3.Analyse graphique du modèle .....	69
III.3.3.3.1.Graphe des effets moyens .....	69
III.3.3.3.2.Notion des surfaces de réponse.....	70
III.3.3.4.Validation du modèle .....	71
III.4.Planification des expériences.....	71
III.4.1.Essais sur les matériaux C45 et 42CrMo4.....	71
III.4.2.Essais sur le matériau C40.....	71
III.5.Conclusion.....	73

## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

IV.1.Introduction.....	74
IV.2.Analyse des résultats des rugosités.....	74
IV.2.1.Discussion des résultats de l'usinage de l'acier C45.....	74
IV.2.1.1.Analyse de la variance .....	75
IV.2.1.2.Analyse de régression du critère de rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe ( $V_c$ , $f_z$ et $a_p$ ).....	77
IV.2.1.3. Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées.....	77
IV.2.1.4.Analyse des surfaces des réponses.....	78
IV.2.1.5. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité de surface Ra.....	79
IV.2.2.Discussion des résultats de l'usinage de l'acier 42CrMo4.....	80
IV.2.2.1.Analyse de la variance.....	82
IV.2.2.2.Analyses de régression des critères de rugosité.....	84
IV.2.2.3.Analyse des surfaces des réponses.....	85
IV.2.2.4. Optimisation des conditions de coupe pour les critères de rugosité (Ra et Rz).....	86

IV.3.Analyse des résultats des vibrations.....	88
IV.3.1.Analyse de la variance.....	91
IV.3.2.Analyses de régression des critères des vibrations.....	92
IV.3.3.Analyse des surfaces des réponses.....	94
IV.3.4. Optimisation des conditions de coupe pour les critères des vibrations.....	95
IV.4.Conclusion .....	96
<b>Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>98</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>100</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>106</b>

---

## Liste des figures

### Chapitre I : Etude et analyse bibliographique

Figure I.1 : Domaines d'application du fraisage .....	7
Figure I.2 : Fraisage de face .....	7
Figure I.3 : Plan épaulée.....	8
Figure I.4 : Fraisage en opposition .....	10
Figure I.5 : Fraisage en avalant .....	11
Figure I.6 : Principales zones de cisaillement du copeau .....	13
Figure I.7 : Différents types de copeaux .....	14
Figure I.8 : Copeau dentelé .....	14
Figure I.9 : Historique de l'acier au carbure de tungstène revêtu, chariotage d'un cylindre de $\phi$ 100 mm, longueur de 500 mm.....	15
Figure I.10 : Procédé d'obtention du CBN.....	19
Figure I.11 : Evolution de l'usure dans le temps .....	21
Figure I.12 : Un profil total mesuré à l'aide d'un profilomètre à contact sur une pièce.....	23
Figure I.13 : Influence de la géométrie de l'outil de coupe.. ..	24
Figure I.14 : Défaut d'ordre 1.....	25
Figure I.15 : Défaut d'ordre 2 .....	26
Figure I.16 : Défaut d'ordre 3 .....	27
Figure I.17 : Défaut d'ordre 4 .....	27
Figure I.18 : Longueurs d'évaluation et longueur de base .....	28
Figure I.19 : Ligne moyenne arithmétique .....	28
Figure I.20 : Ligne des moindres carrés .....	29
Figure I.21 : Ligne enveloppe inférieur et supérieur .....	29
Figure I.22 : Paramètres géométriques de la ligne moyenne.....	30
Figure I.23 : Différents paramètres utilisé pour décrire la rugosité de surface .....	31
Figure I.24 : Exemple des motifs de rugosité sur une pièce tournée .....	32
Figure I.25 : Sillons théoriques .....	33
Figure I.26 : Profil théorique de la surface (R=0).....	33
Figure I.27 : Rugosité théorique.....	34

## Chapitre II : Les vibrations en usinage

Figure II.1: Phénomène de régénération de la surface .....	43
Figure II.2 : Phénomène de couplage des modes .....	44
Figure II.3 : Capteur de vibration 3D, Kistler.....	46
Figure II.4 : Vibromètre Laser .....	48
Figure II 5 : La valeur efficace ou valeur RMS.....	49
Figure II.6 : Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur crête.....	50
Figure II.7: Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes .....	52
Figure II.8 : Spectre enveloppe 0-100 KHz.....	53
Figure II.9 : Impact du préchauffage de la pièce sur le spectre des accélérations.....	55
Figure II.10: Elimination des vibrations par variation de la vitesse de broche.....	57
Figure II.11: Exemple de fraise à pas régulier et à pas variable.....	58
Figure II.12 : Etats des surfaces des pièces après usinage .....	59

## Chapitre III : Procédures expérimentales et méthodologies de recherche

Figure III.1: Fraiseuse à commande numérique .....	60
Figure III.2: Fraiseuse universelle .....	61
Figure III.3 : Eprouvettes d'essai en acier C45, 42CrMo4 et C40. ....	61
Figure III.4 : Photo des plaquettes P25. ....	62
Figure III.5: Photo des plaquettes GC4030. ....	63
Figure III.6: Rugosimètre TR100.....	63
Figure III.7: Vibromètre SCHENCK.....	64
Figure III.8 : Evolution des techniques de surfaces de réponse.....	66
Figure III.9 : Exemple de tracé des effets moyens.....	70
Figure III.10 : Graphe de surface de réponse .....	70

## Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1: Les effets moyens de Ra.....	76
Figure IV.2: Comparaison entre Ra mesurées et Ra prédites.....	78
Figure IV.3: Surfaces de réponse pour Ra.....	79
Figure IV.4 : Valeurs des rugosités Ra et Rz pour les huit essais (fraisage de l'acier 42CrMo4).....	81
Figure IV.5: Les effets moyens de Ra (acier 42CrMo4).....	82

Figure IV.6: Les effets moyens de Rz (acier 42CrMo4).....	82
Figure IV.7: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Ra.....	85
Figure IV.8: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Rz.....	85
Figure IV.9: Surfaces de réponse pour Ra.....	86
Figure IV.10: Surfaces de réponse pour Rz.....	86
Figure IV.11: Graphe d'optimisation des paramètres de coupe (acier 42CrMO4).....	87
Figure IV.12: Axes de la fraiseuse.....	88
Figure IV.13: Les effets moyens de Arms <sub>x</sub> .....	90
Figure IV.14: Les effets moyens de Arms <sub>y</sub> .....	90
Figure IV.15: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Arms <sub>x</sub> .....	93
Figure IV.16: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Arms <sub>y</sub> .....	94
Figure IV.17: Surfaces de réponse pour Arms <sub>x</sub> .....	94
Figure IV.18: Surfaces de réponse pour Arms <sub>y</sub> .....	95
Figure IV.19 : Graphe d'optimisation des paramètres de coupe (acier C40).....	96

---

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Etude et analyse bibliographique

Tableau I.1 : Gammes de vitesse de coupe pour différents matériaux.....	5
Tableau I.2 : Différents céramiques utilisées pour les outils de coupe .....	18

### Chapitre III : Procédures expérimentales et méthodologies de recherche

Tableau III.1 : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'acier C45.....	62
Tableau III.2 : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'acier 42CrMo4....	62
Tableau III.3 : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'acier C40.....	62
Tableau III.4 : Plan d'expérience des aciers C45 et 42CrMo4.....	71
Tableau III.5 : Paramètre de coupe et leurs niveaux pour 16 essais.....	72
Tableau III.6 : Plan d'expérience de Taguchi pour un plan de 16 essais.....	72

### Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV.1 : Plan d'expérience du critère de rugosité l'acier C45.....	75
Tableau IV.2: Analyse de variance pour Ra.....	76
Tableau IV.3: L'erreur pour les huit essais réalisés.....	78
Tableau IV.4 : Conditions d'optimisation.....	80
Tableau IV.5: Optimisation par MSR de la rugosité.....	80
Tableau IV.6: Résultats des essais des deux critères de rugosité.....	80
Tableau IV.7: Analyse de variance pour Ra. ....	83
Tableau IV.8 : Analyse de variance pour Rz.....	84
Tableau IV.9: Conditions d'optimisation.....	87
Tableau IV.10: Optimisation par MSR de la rugosité.....	87
Tableau IV.11: Résultats des essais des deux critères des vibrations.....	89
Tableau IV.12 : Analyse de variance pour $Arms_x$ .....	91
Tableau IV.13: Analyse de variance pour $Arms_y$ .....	92
Tableau IV.14: Conditions d'optimisation pour les vibrations.....	95
Tableau IV.15: Optimisation par MSR des vibrations.....	96



**Liste des abréviations et des symboles**

A :	Surface du copeau [mm]
Anova :	Analyse de variance
aj :	Largeur de coupe radiale [mm]
ap :	Profondeur de passe [mm]
CBN :	Nitride de Bore Cubique
CNC :	Commande numérique avec calculateur
D :	Diamètre de la fraise [mm]
f :	Avance par tour [mm/tr]
fz :	Avance par dent [mm/dent]
h :	Epaisseur de coupe [mm]
h <sub>c</sub> :	Epaisseur effective du copeau [mm]
h <sub>j</sub> :	Epaisseur moyenne de copeau [mm]
k :	Angle de concavité
l :	Longueur de base
L :	Longueur d'évaluation
L <sub>u</sub> :	Longueur d'usinage
MPE :	Méthode des plans d'expérience
MSR :	Méthode de surface de réponse
N :	Vitesse de la broche [tr/min]
PCD :	Diamant polycristallin
POM :	Pièce-Outil-Machine
Q :	Quantité d'enlèvement de matière [mm <sup>3</sup> / min]
r <sub>ε</sub> :	Rayon de pointe d'un outil rond [mm]
Ra :	Rugosité moyenne arithmétique [μm]
Rmax :	Hauteur maximal des irrégularités du profil de rugosité
Rp :	Droite des moindres carrés

---

Rq :	Moyenne quadratique des altitudes du profil par rapport à la ligne moyenne
Rt :	Rugosité totale [ $\mu\text{m}$ ]
Rv :	Profondeur de la vallée la plus profonde par rapport à la ligne moyenne [ $\mu\text{m}$ ]
Rz :	Profondeur moyenne de la rugosité [ $\mu\text{m}$ ]
Te :	Temps d'usinage
UGV :	Usinage à grande vitesse
Vc :	Vitesse de coupe [m/min]
Vf :	Vitesse d'avance [mm/min]
$\varphi_{st}$ :	Angle d'entrée de la dent de la fraise
$\varphi_{ex}$ :	Angle de sortie de la dent de la fraise
$\varphi_s$ :	Angle de cisaillement
$\alpha$ :	Angle de coupe
$Arms_x$ :	Accélération suivant l'axe longitudinal [ $\text{m/s}^2$ ]
$Arms_y$ :	Accélération suivant l'axe transversal [ $\text{m/s}^2$ ]
Z :	Nombre des dents de la fraise

---

## **Introduction générale**

La coupe des métaux comme une science n'a pris naissance que depuis le 19<sup>ème</sup> siècle, un peut en retard par rapport aux autres sciences, mais elle continue à se développer et se perfectionner rapidement jusqu'à l'heure actuelle. Ce développement est dû aux demandes de l'industrie concernant l'augmentation de la productivité et l'amélioration de la qualité des produits obtenus par les procédés d'usinage.

Les techniques d'usinage sont donc en constante évolution, afin de maintenir leurs performances au plus haut niveau et d'être capables de répondre aux nouvelles exigences industrielles, en termes de qualité et de productivité, mais aussi d'impact sur l'environnement et la santé.

Les progrès réalisés dans le domaine de l'automatisation des machines-outils et le développement exceptionnellement rapide des techniques de commande numérique au cours de ces dernières années exigent des conditions optimales de coupe avec la nécessité d'avoir une stabilité de plus en plus élevée des paramètres et des critères sur lesquels ils influent.

L'optimisation conduit à un choix satisfaisant, en même temps, l'augmentation du taux de production et le respect des limitations imposées. Des méthodes d'optimisation sophistiquées ont été mises en application, leur but est l'augmentation de la précision. L'optimisation des conditions de coupe assure un bon usinage, le taux de productivité est plus élevé, les dimensions et l'état de la surface usinée sont respectés, l'outil et la machine sont en sécurité.

Aujourd'hui une grande variété des programmes et des logiciels basés sur des méthodes d'optimisation efficaces sont disponibles, ces logiciels contenant des données de bases qui peuvent être sélectionnées comme des conditions de coupe optimales (Minitab, Catia, Meccano,...). Le choix de la méthode d'optimisation la plus conforme au problème traité, rend la résolution plus facile et plus fiable.

Notre objectif est la mise au point des essais expérimentaux pour évaluer les vibrations et les rugosités lors du fraisage à sec. Dans ce travail nous voulons mettre en évidence les problèmes des vibrations rapportées aux machines-outils : ses origines, ses conséquences sur les états des surfaces des pièces. Le but est d'obtenir un régime optimal afin de minimiser les critères de rugosité et des vibrations, et savoir les paramètres les plus influents sur l'état de surface et sur les vibrations.

Le plan de cette thèse est réparti comme suit :

Le premier chapitre consiste une étude bibliographique. Dans un premier temps nous donnons une description générale de l'usinage et en particulier du procédé de fraisage. Dans un deuxième temps, nous définissons quelques principes concernant les états des surfaces.

Le second chapitre définit le comportement du système Pièce/Outil/Machine (POM), et indique les types des vibrations rencontrées en usinage, leurs causes et leurs conséquences sur les pièces usinées, il présente des méthodes des analyses des vibrations, et des approches pour minimiser leurs conséquences.

Dans le troisième chapitre nous exposons l'ensemble des dispositifs expérimentaux utilisés pour mener cette recherche. Les équipements matériels, les techniques et les méthodes de recherche ainsi que les conditions de coupe utilisées sont présentés.

Le quatrième chapitre comprend l'analyse des résultats trouvés, la validation des modèles mathématiques, la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse, ainsi que l'optimisation des conditions de coupe pour les rugosités et les vibrations par la méthode de surface de réponse.

Bien entendu, le manuscrit se termine par des conclusions et des perspectives. Les conclusions de notre contribution sont soulignées. Ainsi que des perspectives proposées dans ce domaine viennent clôturer cette thèse.

### **Problématique**

De nos jours, les industries de fabrication ont pour objectifs, primordiaux, la réduction des coûts d'exploitation ainsi que l'amélioration de la qualité du produit. Dans les procédés d'usinage, par enlèvement de matière, le coût de l'opération d'usinage et la qualité du produit final sont des contraintes à prendre en compte dans un environnement de plus en plus compétitif, où les investisseurs exigent un meilleur rendement de leurs investissements. Parmi les principales difficultés rencontrées dans l'usinage, celles posées par les phénomènes vibratoires générés par la coupe occupent une place importante. Nous pouvons citer en premier le phénomène bien connu du broutement, dont les conditions d'apparition sont difficilement prévisibles et qui dégrade fortement la qualité de la surface usinée, et accélère l'usure de certains éléments sensibles des moyens de production comme les outils de coupe ou les broches. Mais la nature discontinue et périodique de la coupe est aussi la cause des vibrations. La qualité d'une pièce usinée dépend de plusieurs facteurs : matériau usiné, matériau de l'outil, conditions de coupe, et rigidité du système usinant.

## **Chapitre I : Etude et analyse bibliographique**

### **I.1. Introduction**

L'usinage par enlèvement de copeaux est un des procédés les plus importants dans la fabrication et finition de pièces mécaniques [1,2]. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance économique non négligeable. Pour se convaincre de cette importance économique, il suffit de considérer le volume des dépenses faites aux U.S.A. Pour l'usinage des métaux, il représente 5 % du Produit National Brut ce qui est énorme pour une seule technique [3]. La précision, la fiabilité, la productivité élevée, le temps de cycle et le coût bas de production sont les principales motivations des innovations en technologie de fabrication d'aujourd'hui [4].

Un matériau est la matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme utilise pour produire des objets. Un matériau est défini comme une matière de base choisie en raison de ses propriétés particulières et de la mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. Les propriétés particulières des matériaux sont offertes par la nature chimique des différentes matières premières. Les grands groupes de matériaux utilisés en usinage sont : métalliques, composites, plastiques [5]. Les métaux présentent tous l'éclat métallique sur une coupe fraîche, dû à la réflexion de la lumière sur le nuage d'électrons libres; à l'exception du mercure, les métaux sont solides à température et à pression normales, ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques, particulièrement la ductilité et la malléabilité qui tiennent à la souplesse de la liaison métallique, à cause de la valeur élevée de l'énergie de la liaison intermétallique.

En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux représente l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une surface par enlèvement de matière au moyen d'un outil tranchant. Cette technique ancienne est souvent nommée coupe onéreuse dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière en déchets (copeaux) [6].

### **I.2. Usinage à sec**

Les initiatives gouvernementales concernant la prévention de la pollution et le respect de l'environnement, de la sécurité et de la santé des populations exercent une pression croissante sur l'industrie afin qu'elle minimise ses rejets. Les industries du travail des métaux sont particulièrement concernées, notamment pour l'utilisation des fluides de coupe en usinage.

L'usinage à sec est toujours recommandé, en effet, l'arrosage augmente les variations de température entre l'entrée en coupe et la sortie, ce qui favorise les fissures thermiques.

L'usinage à sec des aciers et des alliages à hautes caractéristiques mécaniques passe par la réalisation de nouveaux revêtements d'outils et l'optimisation des conditions de coupe. Les revêtements doivent être suffisamment résistants et durs pour travailler ces matériaux et avoir des propriétés autolubrifiantes afin de remplacer les fluides de coupe. Certains sont déjà disponibles et d'autres sont à l'étude. L'usinage à sec répond donc pleinement aux contraintes économiques. Il est utilisé dans l'industrie manufacturière pour réduire les frais généraux et la protection de l'environnement [7, 8].

### **I.3. Usinage conventionnel.**

L'usinage conventionnel est caractérisé par les faibles vitesses de rotation de broche (inférieures à 5000 tr/min). Les vitesses de coupe correspondantes varient selon la nature du matériau usiné (généralement de 40 jusqu'à 400 m/min). Les usinages conventionnels sont réalisés par des machines manuelles mais aussi par les machines à commande numériques qui les remplacent de plus en plus [9].

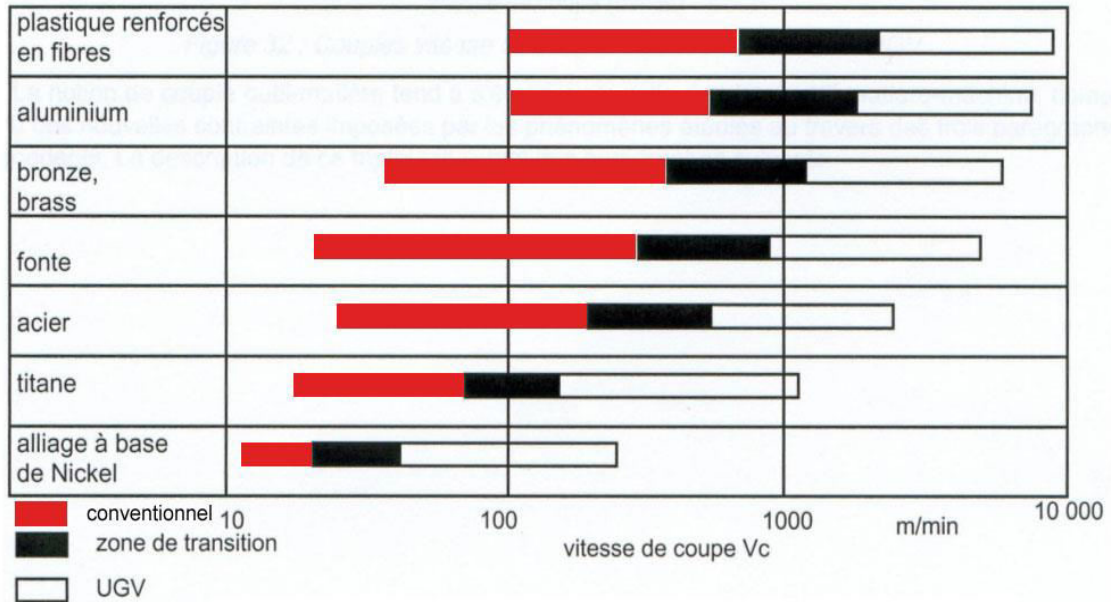
Une grande gamme de matière a été utilisée pour les outils de coupe, la majorité est en "carbure"(carbures de tungstène) ou en aciers "rapides". En plus, des outils en Nitrures de Bore Cubiques (CBN), céramiques ou "cermets" (carbures de titane) sont également utilisés pour ces usinages.

### **I.4. Usinage à grande vitesse.**

L'usinage à grande vitesse regroupe les opérations d'usinage dans les domaines de vitesses de coupe et/ou de fréquences de rotation élevées et supérieures aux vitesses considérées actuellement comme industriellement maîtrisées. Au début, ce procédé a été développé pour l'industrie automobile et la fabrication de moules ou matrices, particulièrement longue et coûteuse. Plus récemment, celui-ci est utilisé dans l'aéronautique pour les pièces en alliages d'aluminium, en composite, en titane mais aussi pour les superalliages à base nickel [10]. Grâce aux vitesses de coupe élevées, les phénomènes de coupe intervenant entre la pièce, l'outil et le copeau sont différents de ceux observés en usinage conventionnel. Depuis 1960, des chercheurs parlent d'une zone critique de transition. Au-delà de cette zone, la coupe est sensée devenir adiabatique (toute la chaleur est évacuée dans le copeau), une lubrification de refroidissement n'est plus forcément nécessaire.

Les efforts de coupe diminuent, l'état de surface devient excellent. Cette frontière varie en fonction des matériaux usinés (**tableau I.1**).

**Tableau I.1** : Gammes de vitesse de coupe pour différents matériaux [10].



L'usinage à grande vitesse assure des gains importants en performances techniques et économiques. Généralement, l'UGV apporte :

- l'acquisition d'un meilleur état de surface de l'ébauche jusqu'à la finition (souvent sur une même machine) ce qui permet une réduction du temps de polissage de finition, voire sa disparition dans la gamme de production ;
- une meilleure répétabilité pour la production de séries et une précision dimensionnelle plus grande ;
- l'obtention de copeaux fragmentés, plus simples à évacuer ;
- une réduction des délais de fabrication, et par conséquent une augmentation de la productivité ;
- une réduction des coûts d'investissement (réduction du stock d'outils, augmentation de la durée de vie des outils...) et des gains par flexibilité de l'outil de production ;
- une réduction des efforts d'usinage ;
- l'usinage de matériaux très durs, difficilement usinés auparavant.

Mais il est aussi générateur de contraintes, on peut citer :

- les opérateurs et programmeurs des machines doivent suivre des formations particulières qui diffèrent considérablement de celles nécessaires pour l'usinage conventionnel ;
- des précautions maximales au niveau de la sécurité doivent être adoptées : les machines doivent être dotées de carters résistant à des sollicitations du type impact ;
- une erreur humaine peut avoir des conséquences très significatives sur la machine, du fait des importantes vitesses et des accélérations mises en jeu lors du déplacement des différents composants [11].

Il faut donc fournir aux préparateurs des outils méthodologiques qui leur permettent de choisir les processus les mieux adaptés et des outils de simulation leur permettant de vérifier que ces choix ne conduisent pas à des situations anormales [9].

### **I.5. Le fraisage**

Le fraisage est l'un des procédés d'usinage les plus répandus dans l'obtention des pièces mécaniques. En effet, il est caractérisé par la flexibilité, la simplicité des opérations, ainsi que par le bas prix de revient de fabrication d'une pièce [12,13]. Le fraisage faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes et l'avance rectiligne de la pièce, il en résulte une trajectoire particulière de chacune des parties actives de l'outil dans le référentiel de la pièce [14]. Deux propriétés qui caractérisent ce procédé sont : la formation du copeau due à la discontinuité de coupe au cours du passage des dents et la complexité des formes des surfaces usinées, qui rendent difficile le contrôle du comportement vibratoire dans les opérations de fraisage [15].

Le fraisage a plusieurs avantages. Parmi lesquels nous citons :

- la bonne finition de surface ;
- la haute précision et la grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes.

Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et de gorges, son efficacité en contournage est remarquable grâce à l'utilisation des techniques de programmation pour les machines à commande numérique (CNC).

Le fraisage est utilisé dans plusieurs applications (domaines aéronautiques, automobiles, énergétiques, moules et matrices...).





Figure I.1 : Domaines d'application du fraisage [7].

### I.5.1. Types d'opération de fraisage

On peut classer les opérations de fraisage en deux catégories :

**I.5.1.a. Surfaçage :** opération en bout (surfaçage de face), la fraise est montée sur une broche avec un axe de rotation perpendiculaire à la surface de la pièce usinée. La surface fraisée résulte d'une action des arêtes de coupe situées sur la périphérie ou le bout de la fraise.

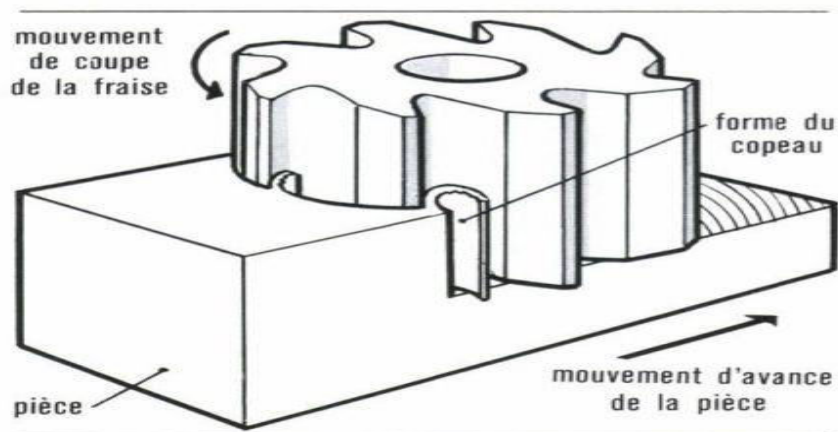
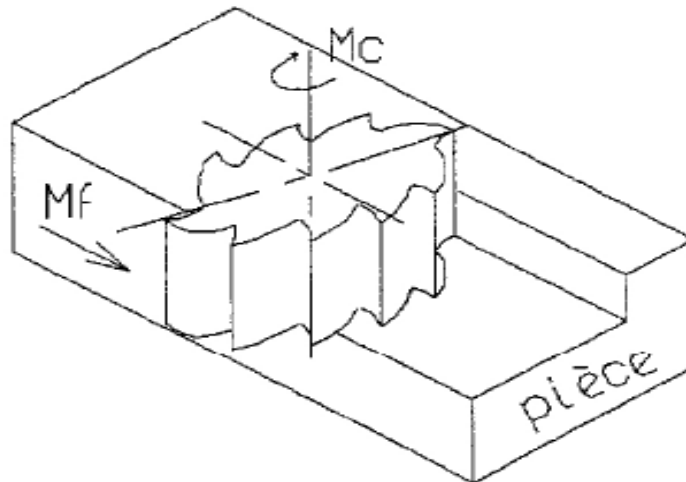


Figure I.2 : Fraisage de face [15].

**I.5.1.b. Plans épaulés :** consiste à usiner deux ou plusieurs plans simultanément dont l'angle entre les deux plans correspondent de la forme de l'outil.



**Figure I.3 :** Plan épaulé.

## **I.5.2. Les paramètres de coupe**

### **I.5.2.1. La vitesse de la broche : N (tr/min)**

Elle indique le nombre des rotations par minute effectuées par la fraise sur la broche.

### **I.5.2.2. La vitesse de coupe : Vc (m/min)**

C'est la vitesse avec laquelle l'arête de coupe travaille la surface de la pièce, il s'agit d'un paramètre d'outil faisant partie des conditions de coupe, qui garantit que l'opération est réalisée de manière efficace et dans le champ d'application recommandé du matériau de coupe. La vitesse de coupe est exprimée [16] par :

$$V_c = \frac{\pi D N}{1000} \quad (I.1)$$

Tel que :

$D$  : le diamètre de la fraise (mm) ;

$N$  : la vitesse de la broche (tr/min) ;

$V_c$  : la vitesse de coupe (m/min).

### **I.5.2.3. La vitesse d'avance Vf (mm/min)**

La vitesse d'avance  $V_f$  correspond au déplacement de la pièce par rapport à l'outil et est exprimée en longueur par unité de temps. Elle est également désignée sous le nom d'avance, tout simplement, ou d'avance de la table.

**I.5.2.4. Avance par tour  $f$  (mm/tr)**

Cette valeur indique de combien la pièce avance au cours d'une seule rotation de la broche. Son expression est fournie par la relation suivante [16]:

$$f = \frac{V_f}{N} \quad (I.2)$$

Tel que :

$f$ : l'avance par tour (mm/tr) ;

$V_f$ : la vitesse d'avance (mm/min).

**I.5.2.5. Avance par dent :  $f_z$  (mm/dent)**

C'est un paramètre important en fraisage, la fraise étant un outil à plusieurs arêtes,  $f_z$  indique la distance linéaire parcourue par la pièce alors qu'une certaine dent est engagée. L'avance par dent représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle est exprimée par [8] :

$$f_z = \frac{V_f}{ZN} \quad (I.3)$$

Où :

$f_z$  : l'avance par dent ;

$Z$  : le nombre de dents de la fraise.

**I.5.2.6. La profondeur de coupe axiale  $a_p$  (mm)**

Correspond à la quantité de métal que l'outil enlève sur la face de la pièce. Elle correspond à la distance à laquelle l'outil est réglé en dessous de la surface non usinée.

**I.5.2.7. La largeur de coupe radiale  $a_j$  (mm)**

Est la largeur sur laquelle le diamètre de la fraise est engagé en coupe. Il s'agit de la largeur de la surface usinée ou, si le diamètre d'outil est plus petit de la largeur couverte par l'outil [7].

**I.5.2.8. L'épaisseur moyenne de copeau  $h_j$  (mm)**

Est utile pour déterminer les forces de coupe spécifiques et effectuer des calculs de puissance. Elle est calculée par rapport au type d'engagement de la fraise.

### I.5.2.9. La surface du copeau A (mm<sup>2</sup>)

C'est la surface de matière enlevée à chaque passage de dent, ce qui correspond à la largeur de coupe multipliée par l'avance par dent [15]:

$$A = ap fz \quad (I.4)$$

Avec

$$fz = \frac{f}{z} \quad (I.5)$$

### I.5.2.10. La quantité d'enlèvement de matière Q (mm<sup>3</sup> / min)

Est le volume de métal enlevé par unité de temps. Ce volume étant le produit de la vitesse de coupe par la surface de copeau. Si la vitesse de coupe est exprimée en *m/ min*, le résultat doit être multiplié par 1000 pour obtenir le volume en mm<sup>3</sup> / min [15] :

$$Q = ap Vc fz = A Vc \quad (I.6)$$

### I.5.2.11. Le temps d'usinage (Te)

Ou temps d'engagement de la fraise est la longueur d'usinage (L<sub>u</sub>) divisée par l'avance de la table [7].

$$Te = L_u / Vf \quad (I.7)$$

## I.5.3. Directions de fraisage

Généralement pour une opération de fraisage, on distingue deux types de fraisage selon la direction du mouvement de coupe :

- Fraisage en opposition : le mouvement de coupe s'oppose au mouvement d'avance de la pièce.

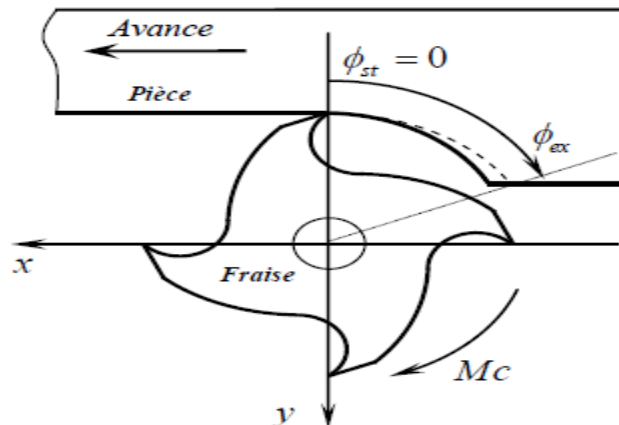


Figure I.4 : Fraisage en opposition [17].

Chaque dent entre dans la matière avec un angle d'entrée ( $\phi_{st}$ ) et sort avec un angle de sortie ( $\phi_{ex}$ ), ces angles sont donnés par les relations suivantes [17] :

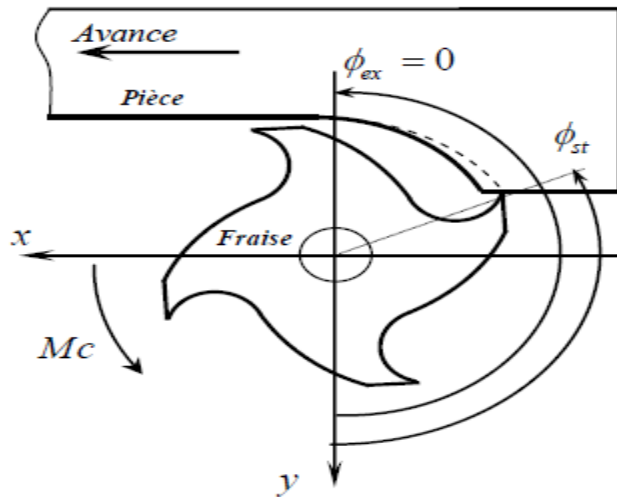
$$\begin{cases} \phi_{st} = 0 \\ \phi_{ex} = \arccos((D - 2d_r) / D) \end{cases} \quad (I.8)$$

Avec :

D: diamètre de la fraise.

$d_r$  : profondeur de coupe radiale.

- Fraisage en avalant : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance de la pièce, vont dans la même direction.



**Figure I.5** : Fraisage en avalant [17].

Les angles d'entrée et de sortie de chaque dent sont donnés par les relations suivantes [17] :

$$\begin{cases} \phi_{st} = \pi - \arccos((D - 2d_r) / D) \\ \phi_{ex} = \pi \end{cases} \quad (I.9)$$

## I.6. Formation du copeau

### I.6.1. Intérêt de la supervision de la formation du copeau

La formation du copeau en fraisage est un phénomène micro-géométrique influant sur plusieurs grandeurs macro-géométriques liées à la qualité de la pièce obtenue. Sa maîtrise contribue à :

- fiabiliser le processus d'usinage ;

- garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (état de surface et précision dimensionnelle) ;
- assurer la productivité ;
- renforcer la sécurité des opérateurs et la cellule d'usinage [18].

### **I.6.2. Phénomène de la formation du copeau**

La formation du copeau fait intervenir un grand nombre de paramètres, tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact outil-matière et les différents paramètres d'usinage. La compréhension des divers phénomènes qui entrent en jeu lors d'une opération de coupe nécessite une observation locale très fine ; deux méthodes expérimentales ont permis de mettre en exergue quelques phénomènes :

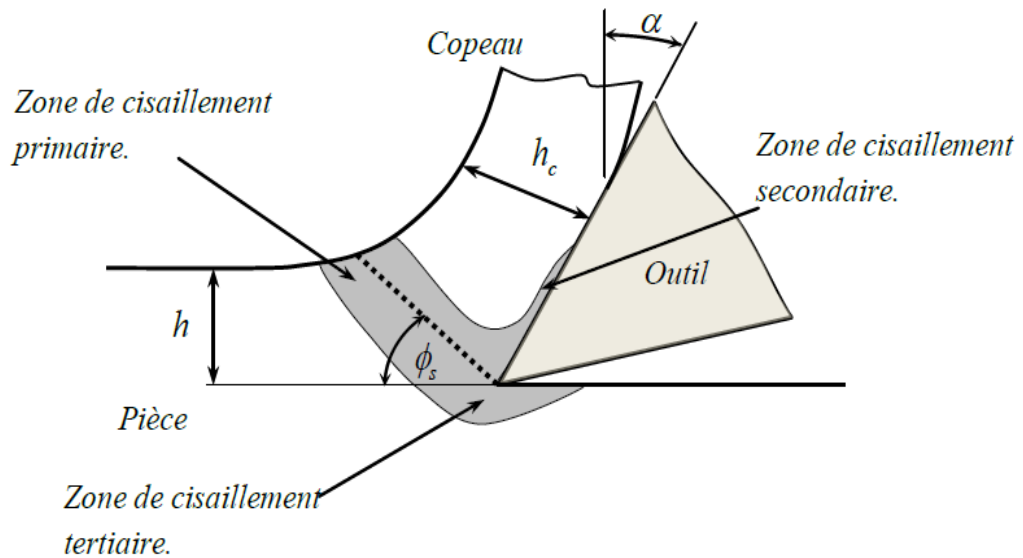
- méthode de visualisation et d'investigation métallographique [9] des essais de coupe brusquement interrompue;
- procédé de micro-cinématographie, qui permet de visualiser la formation du copeau [9,18].

### **I.6.3. Analyse de la formation du copeau**

Les observations micrographiques montrent généralement la présence de 3 zones lors de la formation du copeau (figure I.6).

- Zone de cisaillement primaire : Elle est aussi appelée zone immédiate de formation du copeau et s'étend de l'arête de coupe jusqu'à la surface libre du copeau. Dans cette zone les grains constituant le copeau sont orientés suivant le plan de cisaillement. Le plan de cisaillement fait un angle  $\phi_s$  (angle de cisaillement) avec la surface usinée. Cet angle et l'épaisseur effective  $h_c$  du copeau dépendent de l'épaisseur de coupe  $h$ , de l'angle de coupe  $\alpha$ , du type du matériau usiné et du matériau de l'outil.
- Zone de cisaillement secondaire : Elle est aussi appelée zone d'écrouissage du copeau et se situe à l'interface de l'outil et du copeau. C'est une zone de frottement et de glissement qui est responsable entre autre de l'usure en cratère.
- Zone de cisaillement tertiaire : c'est la zone d'écrouissage de la pièce. C'est une zone de frottement et de glissement entre la face de dépouille et la surface usinée. Elle donne naissance à l'usure en dépouille suite au retour élastique de la matière après le

passage de la pointe de l'outil. Dans cette zone, des singularités d'écoulement peuvent se produire sur la pointe de l'outil.



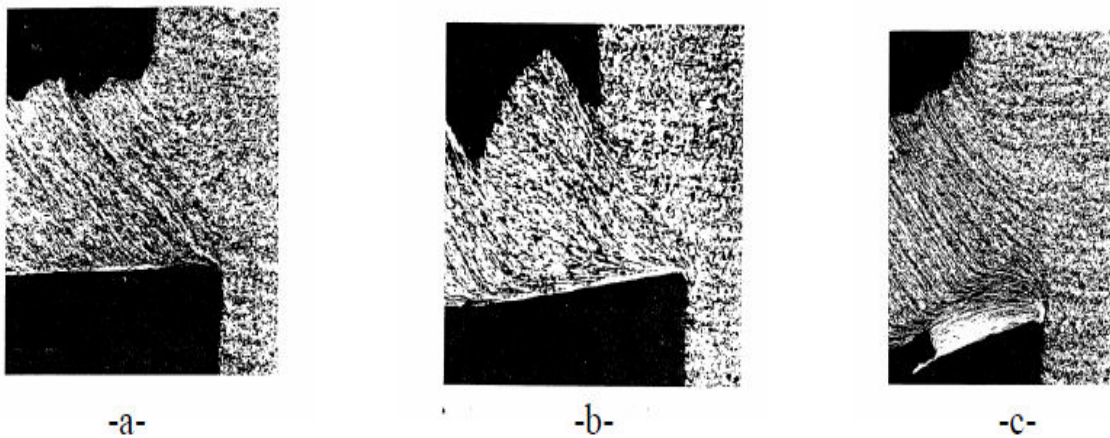
**Figure I.6 :** Principales zones de cisaillement du copeau [17].

#### I.6.4. Formes de copeaux obtenus en usinage

Il existe plusieurs formes du copeau [9], on peut citer:

- ✓ le copeau continu ;
  - ✓ le copeau discontinu (ou festonné) ;
  - ✓ le copeau continu avec arête rapportée ;
  - ✓ le copeau dentelé des aciers.
- **Copeau continu** : est le plus simple à traiter, la matière s'écoule sur l'outil de façon continue et stationnaire. Il se forme par déformation plastique de cisaillement, sans fissuration au niveau de la zone de cisaillement primaire (figure I.7-a-).
  - **Copeau discontinu** : il se caractérise par des profils d'écoulement oscillatoire de la matière lors de la coupe (figure I.7-b-).
  - **Copeau continu avec arête rapportée** : l'un des phénomènes les plus particuliers lors de la formation du copeau est la création d'arêtes rapportées (figure I.7-c-). Un fragment de matériau de la pièce à usiner se fixe dans la zone de l'arête de coupe où les vitesses de glissement sont nulles et forme à l'extrémité de celle-ci un petit tranchant, dont la géométrie évolue continuellement, qui supplée la fonction préliminaire de l'arête de coupe. Ce phénomène d'arête rapportée modifie

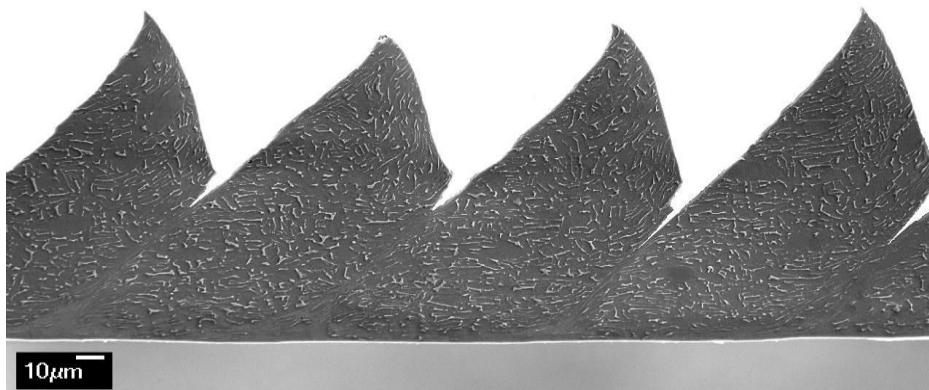
considérablement la géométrie de l'outil, de sorte que tout le processus est influencé par des formes d'élaboration sans cesse différentes.



**Figure : I.7** : Différents types de copeaux [9].

- **Le copeau dentelé des aciers**

Le copeau dentelé dit « dents de scie » il est en majorité formé d'éléments séparés dus plutôt à une rupture du matériau qu'à un cisaillement de celui-ci. Les aciers alliés et les aciers traités thermiquement peuvent présenter un copeau dentelé sous conditions de coupe spécifiques, spécialement à grande vitesse. L'usinage à grande vitesse de ces aciers est difficile à cause de l'usure prématurée de l'outil. Un domaine important de recherche, qui appartient à ce type d'usinage, nommé « hard-cutting ». Il est défini comme l'usinage, avec un outil de géométrie déterminée, de plusieurs types de métaux ferreux trempés avec une dureté entre 50 et 65 Rockwell-C ( $HR_C$ ). La géométrie et le processus de formation du copeau dentelé de ces aciers durs semblent être essentiellement les mêmes que ceux des alliages de titane [9].

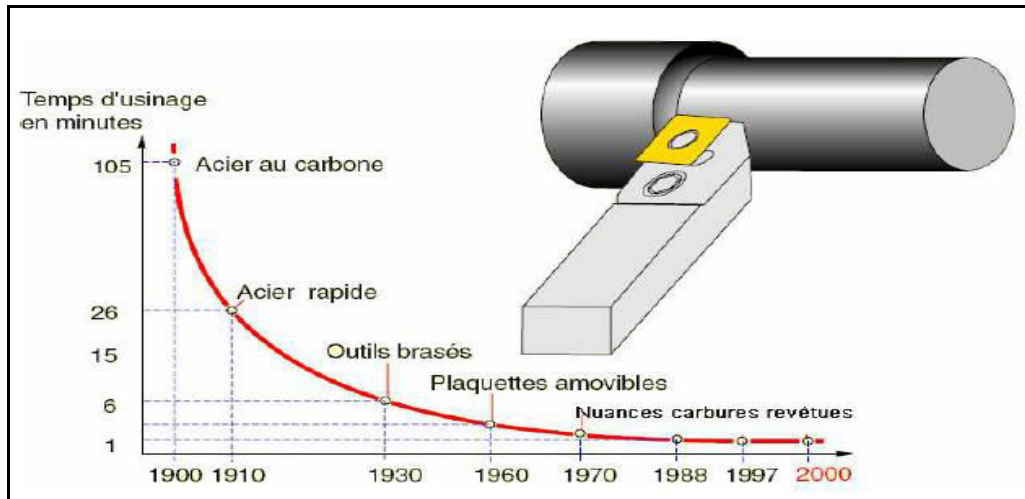


**Figure I.8** : Copeau dentelé [2].



## I.7. Matériaux de coupe.

Les matériaux de coupe actuels sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandaient une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre aujourd'hui moins d'une minute. Cette évolution a été une source de gain de productivité très importante pour l'industrie. Elle a entraîné, au cours du XX<sup>ième</sup> siècle, un doublement de la productivité tous les dix ans [9,19]. La figure I.9 schématise l'évolution des matériaux à outils depuis le XIXe siècle.



**Figure I.9 :** Historique de l'acier au carbure de tungstène revêtu, chariotage d'un cylindre de Ø 100 mm, longueur de 500 mm [20].

Le chemin parcouru entre l'acier au carbone du début de XIXe siècle et les nuances carbure revêtues des années 1980 a conduit à réduire le temps d'usinage, pour une même pièce. Une opération demandant 100 minutes avec un outil en acier à forte teneur en carbone, ne demandait plus que 26 minutes grâce à l'acier rapide, 6 minutes avec des outils en carbure (1930) et 1 minute avec les plaquettes en carbure revêtues multicouches (1970). La poursuite des exigences de productivité et d'utilisation de matériaux de coupe modernes souligne la continuité des recherches sur les outils de coupe [20].

Dans toute opération d'usinage par enlèvement de copeaux, l'outil rencontre quatre contraintes [18] :

- l'usure qui survient essentiellement au niveau de l'arête de coupe ;
- la chaleur engendrée ;
- les chocs ;
- les interactions chimiques possibles avec le matériau usiné.

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

**a. Une dureté élevée:** elle lui donne le pouvoir de pénétrer dans le métal à usiner. La différence entre la dureté de l'outil et celle de la pièce doit être la plus grande possible (supérieure à 3 fois).

**b. Une résistance à l'abrasion élevée:** pour s'opposer à l'usure sur la surface d'attaque de l'outil et sur les surfaces en dépouille et cela, afin de garantir une durée de vie élevée.

**c. Une résistance mécanique élevée :**

- résistance à la flexion élevée;
- résilience élevée pour résister au choc pendant la coupe (rabotage, fraisage);
- résistance à la compression élevée pour résister à la pression du copeau sur la surface d'attaque.

**d. Une résistance à la température élevée:** afin de résister aux températures atteignant les 1000° et plus qui règnent à la pointe de l'outil et qui diminuent sensiblement la résistance mécanique.

- Une conductibilité thermique élevée;
- une densité élevée.

Ces exigences sont nécessaires pour assurer une évacuation rapide du flux de chaleur hors de la zone de coupe.

### **I.7.1. Les carbures métalliques**

Les carbures métalliques ont été développés dans les années quarante. Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie de poudres par frittage et sont constitués de particules dures (70 à 90 %) de différents types de carbures agglomérés par l'intermédiaire d'un liant. Ces types de carbure sont principalement des carbures de tungstène (WC), de titane (TiC), de tantale (TaC) et de niobium (NbC). Les particules dures sont de dimensions variables, comprises entre 1 et 10 microns. Les carbures métalliques sont très utilisés dans l'industrie grâce à ses avantages, qui sont :

- La dureté (HRA 89 à 93).
- La résistance à la flexion importante.
- La bonne conductivité thermique et la petite dilatation thermique.

Ces propriétés des carbures peuvent varier selon :

- le type de particules et leurs dimensions,
- le type et la proportion du liant,
- la technique de fabrication et la qualité du carbure.

On peut distinguer deux groupes de carbures : les carbures de tungstène cobalt (WC-Co) et les carbures anticriquages (carbures de tungstène avec addition d'autres carbures tels que le carbure de titane (TiC ou TaC)).

Les carbures de tungstène cobalt (WC-Co) sont constitués de tungstène et de cobalt et parfois d'une petite quantité de carbures de tantale et de niobium (5 %). Avec la modification du pourcentage de cobalt et de la grosseur des grains de tungstène, on obtient plusieurs grades. Les carbures de tungstène sont les plus durs et le plus résistants. Ils ont été développés pour l'usinage des fontes et des matières non métalliques. Pendant l'usinage des aciers, ces carbures manifestent une tendance au criquage et résistent mal à l'usure en cratère [9].

L'addition d'autres carbures tels que les carbures de titane TiC ou les carbures de tantale TaC a permis de développer un carbure mieux adapté à l'usinage d'acier. Ces carbures sont solubles les uns dans les autres et peuvent former un agglomérat sans aucun liant métallique. Ainsi, le carbure de titane augmente la résistance à criquage, mais diminue la résistance à la flexion, aux chocs et à l'usure abrasive pendant l'usinage avec une vitesse de coupe modérée. Par contre, ils sont très résistants à l'usure par diffusion ce qui facilite l'usinage des aciers avec des vitesses élevées.

Les carbures avec revêtement sont revêtus d'une très fine couche de carbure de titane ou de nitrure de titane. Ils ont permis d'obtenir un excellent compromis entre la résistance à l'usure des plaquettes (liée à la dureté de sa surface) et la résistance à la rupture (lié à la ténacité du corps de la plaquette). Les principaux matériaux utilisés pour le revêtement sont les carbures de titane (TiC), le nitrure de titane (TiN), l'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) et le carbonitrure de titane (TiCN). L'application de différentes couches l'une par dessus l'autre permet de tirer parti des meilleures propriétés de chacun des matériaux entrant dans leur composition. L'épaisseur totale des couches ne dépasse pas en général de 2 à 12 microns. En comparant les plaquettes unicouches et multicouches, les plaquettes multicouches sont plus performantes que celles unicouches [9].

### I.7.2. Les céramiques de coupe

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique. Ils sont très durs et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques couramment utilisées pour les outils de coupe sont réunies dans le tableau I.2.

Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes. Un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

Les outils en céramique peuvent être revêtus. Le revêtement le plus utilisé est le nitrure de titane TiN. La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou l'alumine  $Al_2O_3$ .

**Tableau I.2 :** Différents céramiques utilisées pour les outils de coupe [9].

Céramiques oxydées	Céramiques mixtes		Céramiques non oxydées
Céramiques Blanches	Céramiques mixtes noires	Céramiques renforcées vertes ( whiskers)	Sialons gris
$Al_2O_3$	$Al_2O_3$ -TiC (30 %)		
$Al_2O_3 + ZrO_2$	$Al_2O_3$ -TiN-TiC	$Al_2O_3$ -fibres SiC	base $Si_3N_4$
	$Al_2O_3$ -WC, TaC		

En général les céramiques de coupe :

- présentent une grande dureté, d'où un très bon comportement en frottement et une grande résistance à l'usure ;
- conservent leur dureté à chaud dans des températures très élevées, il n'y a pas des soudures entre les copeaux et la face de coupe ;
- ont une très bonne stabilité chimique ;
- présentent une fragilité relative ne les prédisposant pas à être exposés aux chocs dans des conditions d'utilisation sévères.

### I.7.3. Les cermets

Le nom cermet provient de (céramique / métal) car il s'agit d'un matériau constitué de particules de céramiques (les carbures de titane) dans un liant métallique qui est le cobalt.

Les cermets possèdent une ténacité faible, ce qui les rend particulièrement sensibles aux chocs mécaniques et thermiques. Les cermets présentent une plus grande dureté à chaud que les carbures, donc une résistance plus élevée aux fortes températures, ce qui permet souvent

d'augmenter les vitesses de coupe, d'obtenir une meilleure durée de vie, ainsi que l'obtention d'un excellent état de surface [21]. Les cermets ont des applications très diverses (tournage, fraisage, etc.), ils sont utilisés pour la finition et l'usinage de précision demandant de grandes vitesses de coupe et de faibles avances. Leur emploi diminue ou supprime le collage de copeaux, évitant ainsi les arrachements sur les matériaux malléables et conduit à une longue durée de vie [22,23].

#### I.7.4. Les Nitrures de Bore

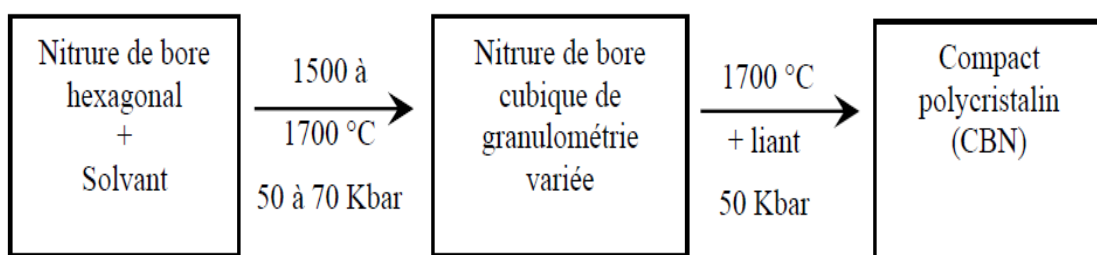
Le nitrure de bore ne se trouve pas dans la nature. Il est élaboré par synthèse [6]. On distingue deux formes :

- nitrure de bore à structure cubique (CBN) qui est la forme la plus dure (même structure que le diamant) ;
- nitrure de bore à structure hexagonale de faible dureté.

Le CBN possède une dureté à chaud plus élevée, et il peut être utilisé jusqu'à 2000°C, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion et est relativement fragile, mais toutefois moins que les céramiques [21].

L'aptitude du CBN à usiner les aciers traités et la qualité des surfaces obtenues permettent d'envisager dans certains cas le remplacement de la technique d'usinage par rectification. L'usinage avec les outils au CBN permet de travailler sans liquide de coupe, la chaleur engendrée à l'interface pièce outil passant dans le copeau.

Le passage de la structure hexagonale à la structure cubique se fait à des températures supérieures à 1500°C et des pressions comprises entre 50 et 100 Kbar permettant d'obtenir des liaisons solides entre les cristaux de bore cubiques et le liant céramique ou métallique. Ces cristaux disposés de manière cubique peuvent être modifiés en changeant les dimensions des cristaux ainsi que le type et la qualité de liant. On peut donc obtenir des différentes nuances appropriées pour différentes opérations d'usinage [24].



**Figure I.10 :** Procédé d'obtention du CBN [24].

### **I.7.5. Les diamants**

C'est le plus dur des matériaux ; il possède plusieurs formes :

- les diamants synthétiques (ou naturels) en cristaux déposés sur un support métallique ou carbure avec un liant électrolytique (Ni) ;
- les diamants polycristallins (PCD) obtenu par frittage des grains des diamants synthétiques. Le PCD est souvent lié, lors du frittage, à un support (une plaquette) à base de carbure de tungstène [25].

### **I.8. Usure des outils**

L'usure des outils est un phénomène facilement observable. C'est un processus de destruction des couches superficielles, qui conduit à la modification progressive de la forme et de l'état des surfaces d'un outil. Cette modification provoque des changements de propriétés de l'outil ce qui diminue sa capacité d'usinage. L'usure des outils est la conséquence de divers mécanismes mécaniques (abrasion, attrition) ou bien physico-chimique (usure par diffusion), et chaque mécanisme d'endommagement agit sur l'outil à des niveaux différents selon les conditions spécifiques de l'usinage [24,26]. Les principaux mécanismes d'usure dominants sont: l'usure par abrasion, l'usure par diffusion et par adhésion.

- L'usure par adhésion

Le copeau glissant sur la face de coupe engendre une pression locale. Elle favorise l'apparition de jonctions entre les deux composants en contact. De par le mouvement de coupe, ces véritables microsoudures se créent et se rompent en continu. Plusieurs cas sont observables en fonction des résistances mécaniques. Si la jonction ou la microsoudure est moins résistante que l'outil ou le matériau usiné, la rupture apparaît au centre de la microsoudure et l'usure est bien souvent négligeable. Dans le cas d'une jonction plus résistante que le matériau usiné, la rupture a lieu dans le copeau. Dans le cas de faibles vitesses de coupe, les fragments adhèrent à l'outil et une arête rapportée peut se former. De hautes pressions et de faibles vitesses de coupe permettent ainsi la création de jonctions, le mécanisme d'usure par adhésion est également associé à celui de l'arête rapportée.

- L'usure par abrasion

L'usure par abrasion apparaît sur les faces de coupe et en dépouille des outils de coupe.

Les surfaces abrasées présentent des sillons parallèles à la direction d'écoulement. Ils sont principalement causés par des inclusions siégeant dans le matériau à usiner. Les particules

dures de carbure, de nitrate ou d'oxyde provenant de la pièce frottent sur les faces de coupe et de dépouille et génèrent ainsi l'usure.

- L'usure par diffusion

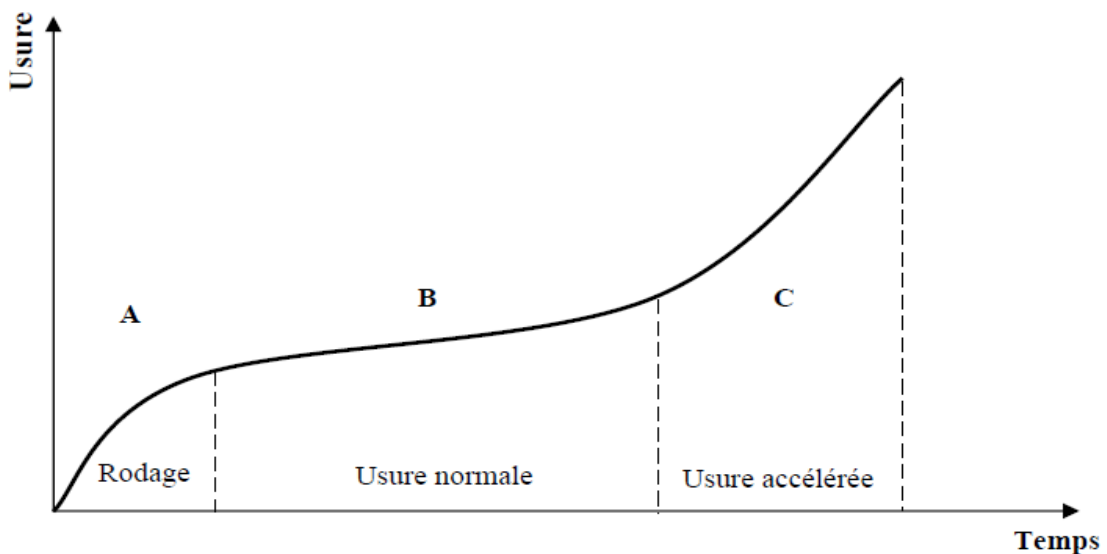
Les très hautes températures et les pressions induites par l'usinage favorisent les phénomènes de diffusion. Les grains de carbure et d'autres constituants migrent de la surface de l'outil vers le copeau. Au même instant, la diffusion inverse des constituants de la matière usinée vers l'outil est observée. L'écoulement continu du copeau favorise les échanges des constituants à travers la diffusion et creuse un cratère à la surface de l'outil. La perte de matière provoque alors l'affaiblissement de la résistance mécanique de la surface de l'outil [26].

L'usure des outils de coupe influe sur de nombreux paramètres du processus d'usinage [24] tels que :

- la géométrie de l'outil ainsi que sur la qualité de la pièce [27] ;
- précision dimensionnelle des pièces usinées ;
- l'augmentation de la température dans la zone de coupe ;
- les efforts nécessaires à la coupe ;
- durée de vie de l'outil ;
- prix de revient de produit ;
- productivité du travail.

### I.8.1. Relation usure-temps

L'évolution de l'usure dans le temps est illustrée par la courbe sur la figure suivante :



**Figure I.11 :** Evolution de l'usure dans le temps [24].

- **La zone A** : nommée la période de rodage, c'est la période d'usure initiale, l'usure est provoquée par l'élimination des aspérités laissées après le réaffûtage de l'outil.
- **La zone B** : c'est la période d'usure normale, elle est caractérisée par l'évolution lentement de l'usure qui est influencée par les conditions de coupe. C'est la période importante qui définit la vie d'un outil.
- **La zone C** : C'est la période d'usure catastrophique de l'outil. L'outil perd ces capacités de coupe à cause de l'union de l'usure sur la face en dépouille et celle sur la face d'attaque provoque l'émoissage de l'arête tranchante.

### **I.8.2. Influence de l'usure de l'outil sur la pièce**

Les influences de l'usure de l'outil se traduisent sur les écarts de géométrie et de rugosité, allant jusqu'à la détérioration de la pièce lors de défaillance brutale de l'outil. L'amélioration des matériaux outils a permis de réduire l'usure. Le suivi de l'usure permet de surveiller le processus d'usinage [7,28].

## **I.9. L'état de surface**

### **I.9.1. Définition**

Le but de tout usinage d'un matériau est d'en générer une forme utilitaire répondant aux demandes des clients. Cette forme a une surface fonctionnelle et l'action de l'usinage est de créer cette surface avec les dimensions et les qualités exigées par son usage futur. On conçoit l'importance de l'état de surface de la pièce usinée. C'est un des domaines de forte influence du revêtement [29].

Une surface se définit comme l'interface entre la pièce et son environnement, elle contient l'ensemble des caractéristiques géométriques nécessaires au pilotage de l'outil [30,31]. Il existe deux procédés pour engendrer la surface en usinage:

- par travail de forme : c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface obtenue ;
- par travail d'enveloppe : c'est la trace de l'arête de l'outil qui donne la surface finale [32].

Une surface usinée, métallique ou non, observée par l'œil peut paraître absolument lisse. Mais une simple observation à l'aide d'un microscope optique suffit souvent pour se convaincre du contraire. Une surface technique est effectivement constituée des différents d'aspérités dont les variations d'altitude sont de quelques micromètres pour les surfaces les plus fines à quelques fractions de millimètre pour les plus grossières (diamètre

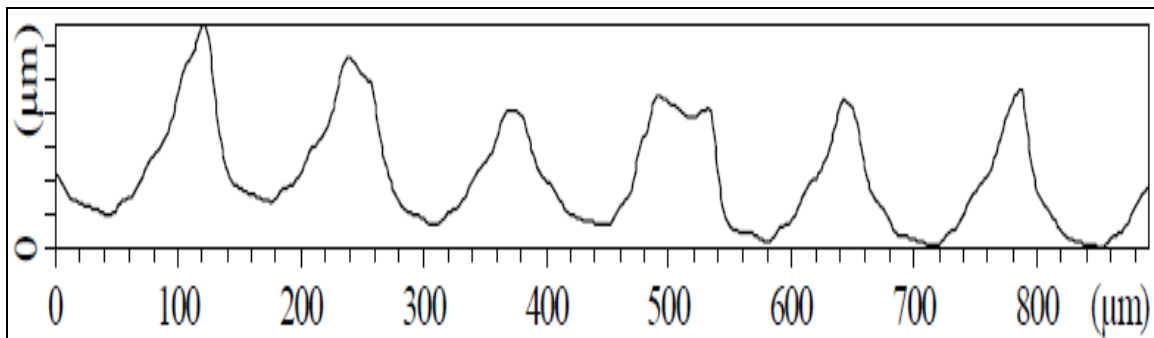


d'un cheveu  $\approx 100 \mu\text{m}$ ). On parle alors d'une surface rugueuse [33].

### I.9.2. La rugosité

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique dû au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc). Elle est mesurée avec des appareils appelés profilomètres qui relèvent le profil de la surface [21, 34]. En 1933, Abbott et Firestone découvrirent le premier profilomètre par contact. Au début, il permettait de mesurer et de quantifier de manière objective un profil extrait d'une surface rugueuse. Cette technique a subi de nombreuses améliorations et est aujourd'hui très utilisée.

Le principe de mesure consiste à déplacer sur la surface un palpeur muni d'un stylet équipé d'une pointe en diamant tronquée par une calotte sphérique de diamètre 2 à 15  $\mu\text{m}$ . Le palpeur est maintenu au contact de la pièce par un effort normal constant de l'ordre du milli Newton. La vitesse de déplacement du palpeur est généralement comprise entre 0,3 et 0,5 mm/s afin de limiter les effets dynamiques comme le décollement du stylet ou les variations de l'effort normal. Un capteur inductif fournit une tension électrique proportionnelle au déplacement vertical de la pointe qui est ensuite intégré pour obtenir le profil.



**Figure I.12** : Un profil total mesuré à l'aide d'un profilomètre à contact sur une pièce [33].

### I.9.3. Les facteurs influant sur la rugosité

La rugosité est influencée fondamentalement par les paramètres de coupe et la géométrie de l'outil. D'autres facteurs peuvent influencer la rugosité sont les vibrations et la tendance au collage de la matière sur l'outil (arrête rapportée) [35].

#### I.9.3.1. Avance et profondeur de passe

Les grandes avances conduisent à un mauvais état de surface, la matière est attaquée par chocs, l'outil ne touche pas toute la surface. La valeur de la profondeur de passe a peu d'influence sur la rugosité, c'est l'usure de l'outil qui croît avec la section du copeau.

### I.9.3.2. Vitesse de coupe

Pour des vitesses de coupe importantes, le profil de la pièce est sensiblement le même que celui de l'outil. Tant que le profil de l'outil est lisse, même si l'outil est usé, l'état de surface ne sera pas dégradé, en fait, l'état de surface s'améliore avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Pour des vitesses basses, il se produit une adhérence du copeau.

En général, la rugosité est influée par la vitesse d'avance avec un pourcentage de 32,5% plus que l'influence de la vitesse de coupe de 28,5% [16].

### I.9.3.3. La géométrie de l'outil

La position des parties actives ou plaquettes amovibles ne sont pas sans défauts. Il existe des écarts entre la position réelle et théorique. Ces défauts liés au battement axial et radial modifient la section du copeau et la distribution des efforts de coupe. Cela engendre des écarts de géométrie et d'états de surfaces. L'espacement inégal entre les dents de la fraise génère des irrégularités de profil. En 1996, des chercheurs utilisent l'espacement ou le pas variable entre les dents en fraisage de bout. Ainsi, les efforts de coupe sont redistribués dynamiquement ce qui limite les nuisances vibratoires et réduit les écarts géométriques [28].

En tournage, la présence d'un rayon de bec  $r$  (ou chanfrein de bec) diminue la hauteur des stries.

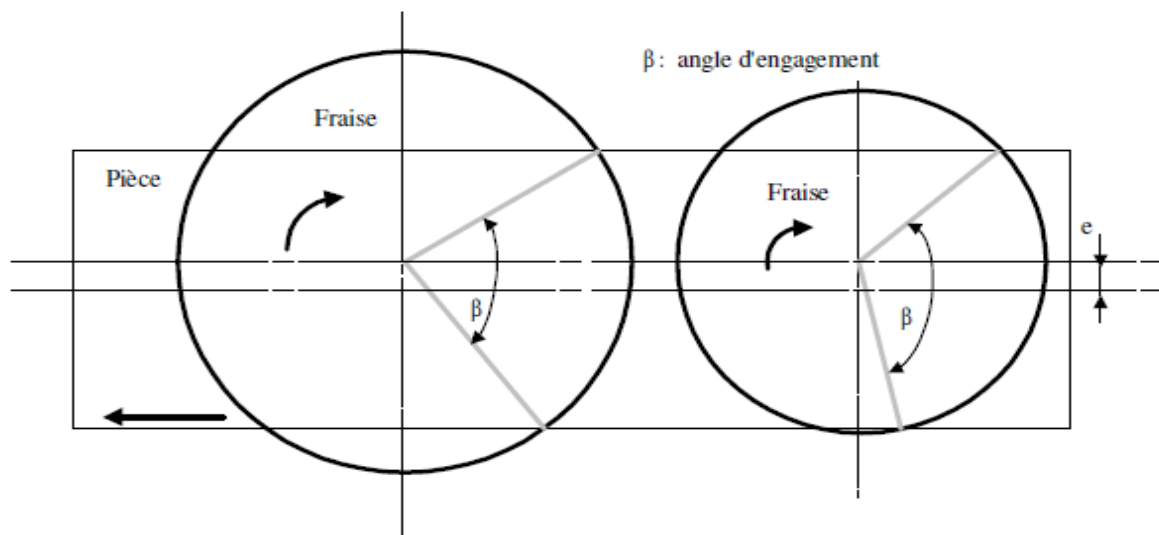


Figure I.13 : Influence de la géométrie de l'outil de coupe [28].

### I.9.3.4. Le mode d'usinage

Les deux modes de fraisage (en bout et en roulant) influent différemment sur l'état de surface.

- Fraisage en bout : la hauteur des stries dépend de l'avance par tour et de l'angle de dépouille.
- Fraisage en roulant : où il faut choisir, pour des vitesses d'avances égales, des fraises à grands diamètres. Les surfaces les plus précises sont celles usinées en fraisage en roulant et en concordance.

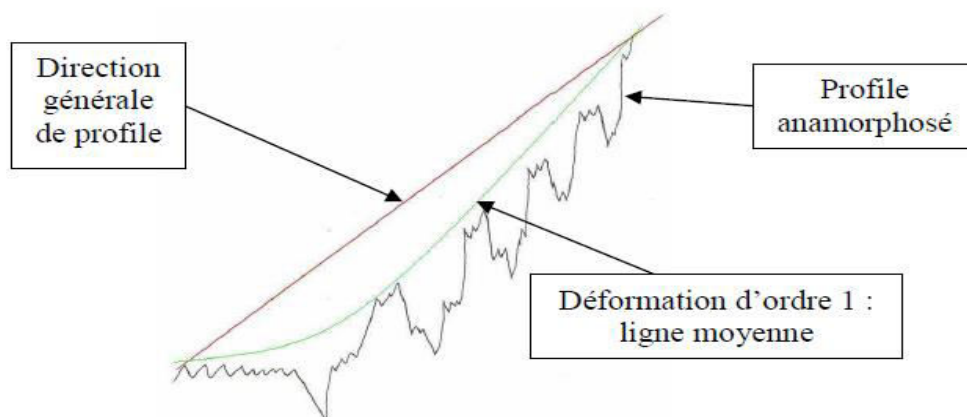
#### I.9.4. Défauts de surface

Les surfaces usinées ne peuvent être parfaites; elles présentent au contraire des défauts de très faible amplitude correspondant aux sillons laissés par l'outil. Ce sont les défauts micro géométriques qui caractérisent l'état de surface.

**Ordre 1:** Ecart de forme ou de position, il s'agit d'un défaut global de la pièce. Il s'exprime en termes des dimensions principales de cette pièce. Il est représenté par la ligne moyenne [21].

Ces défauts peuvent être dus aux causes suivantes :

- un manque de précision de la machine-outil ;
- une erreur de positionnement ;
- 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 position de l'outil ;
- la déformation de la pièce après démontage [contraintes internes (ex : température)] ;
- la déformation de la machine due à l'action de la pièce sur l'outil ;
- les défauts au niveau des guidages ;
- l'évaluation de la surface.



**Figure I.14 :** Défaut d'ordre 1 [21].

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

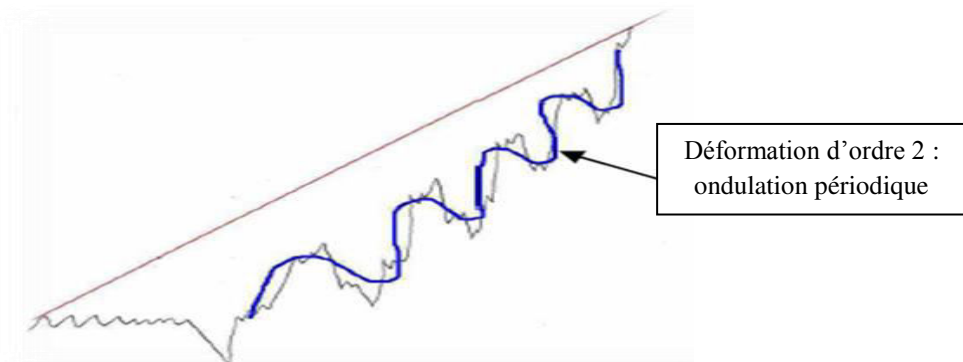
- Les défauts de planéité.
- Les défauts de rectitude.
- Les défauts de circularité.

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

- l'étanchéité : statique (pas de mouvement entre les pièces) ;
- dynamique (mouvement entre deux pièces) ;
- les frottements : roulement, glissement ;
- durée de vie des organes.

**Ordre 2** : ondulations, ce défaut possède un caractère périodique, il introduit par les phénomènes vibratoires basse fréquence qui se traduisent par un manque de rigidité au niveau de :

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



**Figure I.15** : Défaut d'ordre 2 [21, 36].

L'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 1.

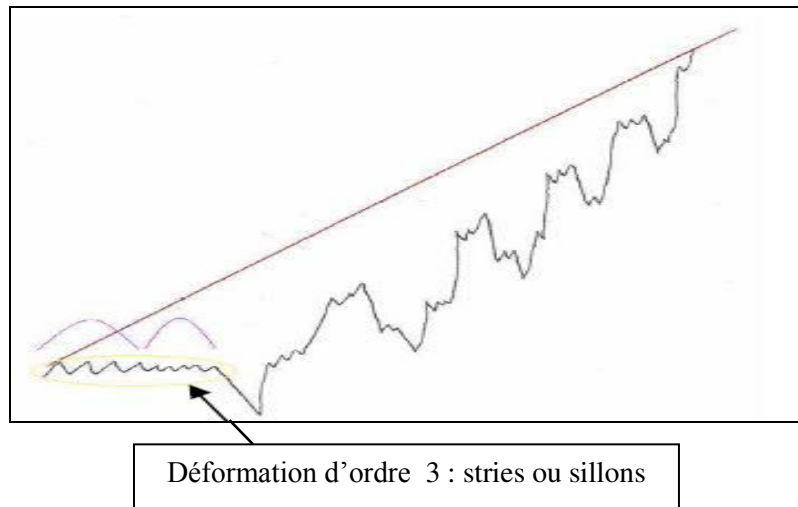
**Ordre 3** : rugosité du premier ordre périodique ou pseudo-périodique, ce défaut induit par :

- les phénomènes vibratoires hauts fréquence ;
- les stries ou sillons dus au passage de l'outil ;
- la méthode d'usinage de pièce.

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

- l'étanchéité : statique (pas de mouvement entre les pièces) et dynamique (mouvement entre deux pièces) ;
- les frottements fluides ;

- les problèmes de revêtement .

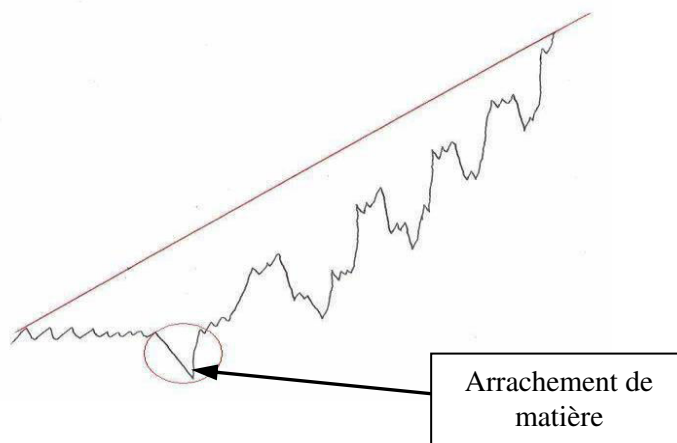


**Figure I.16** : Défaut d'ordre 3 [21].

**Ordre 4** : arrachement de matière, ou rugosité du deuxième ordre, aperiodique, les causes de ce défaut sont :

- la rupture du matériau lors du départ du copeau ;
- le mauvais affûtage de l'outil ;
- les chocs de l'outil sur la pièce (au montage par exemple) ;
- les empreintes du système de serrage.

L'influence de ces défauts est la même que pour l'ordre 3.



**Figure I.17** : Défaut d'ordre 4 [21].

### I.9.5. Différents types de lignes

La direction générale du profil est équivalente à la ligne des moindres carrés du profil.

### I.9.5.1. Longueur de base, et longueur d'évaluation

- La longueur de base : est définie par l'outil de mesure symbolisé par  $l$ .
- La longueur d'évaluation : est la longueur totale à mesurer symbolisé par  $L$ .

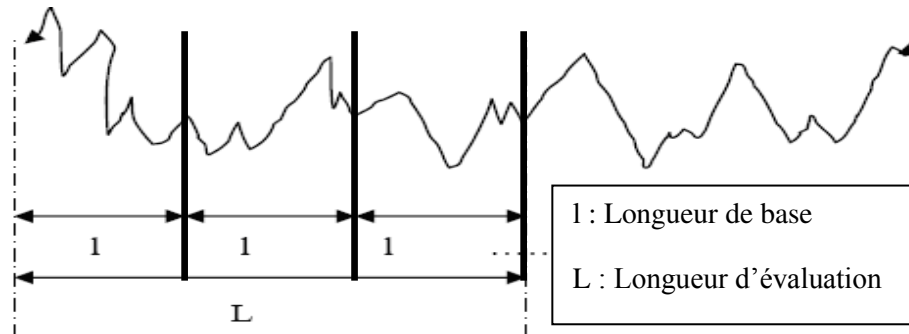


Figure I.18 : Longueurs d'évaluation et longueur de base [36].

### I.9.5.2. Lignes de référence

Ce sont les lignes à partir desquelles les paramètres du profil sont déterminés.

- Les lignes moyennes :

- ✓ moyennes arithmétique ;
- ✓ moyenne des moindres carrés.

- Les lignes enveloppes :

- ✓ enveloppe supérieure ;
- ✓ enveloppe inférieure.

- **La ligne moyenne arithmétique** : c'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base ( $l$ ), la somme des aires entre elles et le profil soit égale de part et d'autre.

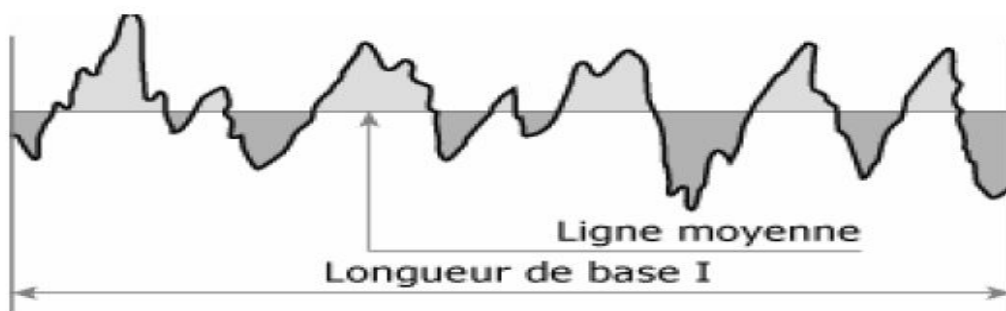
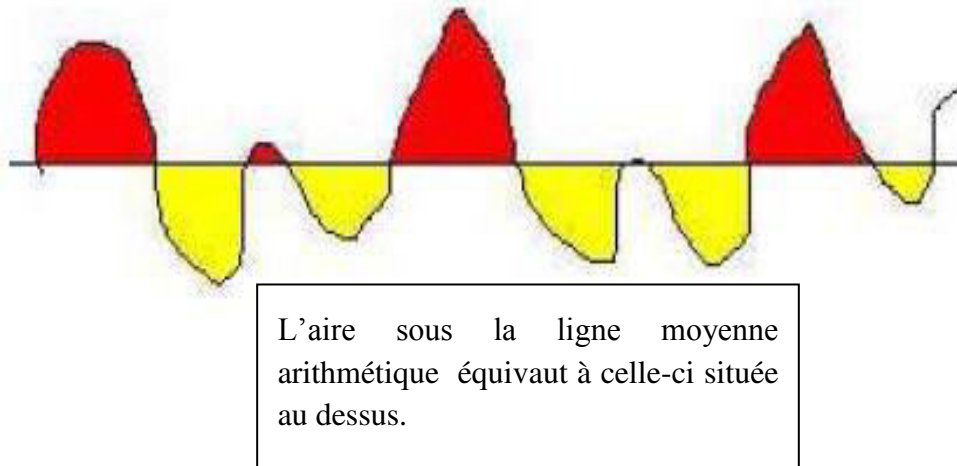


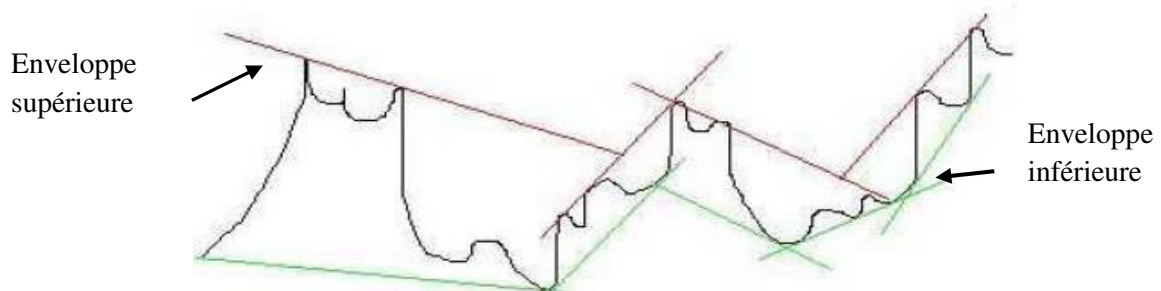
Figure I.19 : Ligne moyenne arithmétique [21].

- **La ligne des moindres carrés** : c'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (l), la somme des carrés des écarts entre elles et le profil soit minimale de part et d'autre.



**Figure I.20** : Ligne des moindres carrés [36].

- **La ligne enveloppe supérieure** : c'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies locales du profil.
- **La ligne enveloppe inférieure** : c'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus bas des creux locaux du profil. Le problème est que tous les points ne sont pas pris en compte (très aléatoire).



**Figure I.21** : Ligne enveloppe inférieure et supérieure [21, 36].

### I.9.6. Quantification

On dénombre deux méthodes de séparation des écarts géométriques afin de quantifier les surfaces. Ces deux techniques sont généralement connues par la dénomination des normes correspondantes : norme ligne moyenne et norme motifs.

### I.9.6.1. Méthode de la ligne moyenne

Le profil total est décomposé en profil de rugosité et en profil d'ondulation. La longueur d'onde du filtre est généralement de 0,8 mm, adapté à la plupart des usinages conventionnels.

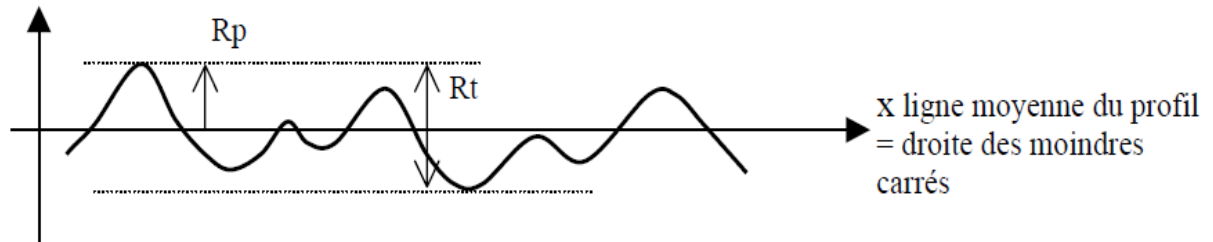
#### Paramètres de la norme ligne moyenne

Pour chaque élément du profil, on distingue alors deux types de paramètres :

- **Les paramètres géométriques**

$R_t$  : est l'étendue des mesures d'altitude du profil. C'est la hauteur entre le pic le plus élevé et le creux le plus profond [37].

$R_p$  : est l'altitude du point le plus élevé du profil par rapport à la ligne moyenne (ou droite des moindres carrés).



**Figure I.22:** Paramètres géométriques de la ligne moyenne [33].

- **Les paramètres statistiques**

$R_a$  : est la moyenne arithmétique de la valeur absolue des altitudes du profil par rapport à la ligne moyenne. Ce paramètre est représentatif de l'amplitude verticale de dispersion des altitudes autour de la ligne moyenne. Soit  $z(x)$  l'altitude du point d'abscisse  $x$  et  $L$  la longueur explorée par le stylet,  $R_a$  est alors défini par [33] :

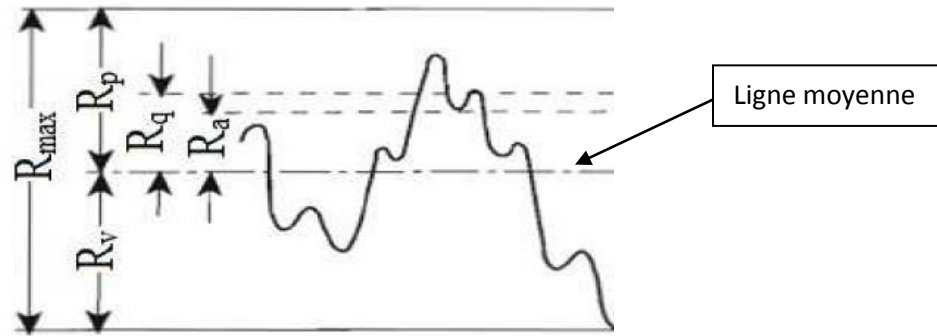
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (\text{I.10})$$

$R_q$  : est la moyenne quadratique des altitudes du profil par rapport à la ligne moyenne. Ce paramètre est représentatif de la dispersion en altitude des points du profil.

$R_v$  : la profondeur de la vallée la plus profonde par rapport à la ligne moyenne.

$R_{max}$  : C'est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité  $R_{max}$  étant pris sur une saillie et un creux consécutif.





**Figure I.23** : Différents paramètres utilisés pour décrire la rugosité de surface [37].

### I.9.6.2. Méthode des motifs

Le profil mesuré est redressé par la droite des moindres carrés puis est numérisé avec un pas de discrétisation ne devant pas excéder  $4 \mu\text{m}$ . Ensuite on applique un algorithme de reconnaissance de forme permettant d'identifier les aspérités de dimensions les plus significatives. Cette technique décompose le profil en une succession de motifs élémentaires chacun composé de deux sommets locaux entourant un creux local de sorte que la hauteur du motif ne dépasse pas 5% de l'amplitude moyenne de rugosité mesurée sur des blocs de longueur  $250 \mu\text{m}$ .

Les motifs sont alors regroupés 2 par 2 sauf à enfreindre l'une des quatre règles suivantes :

- Condition d'enveloppe : pas de combinaison si le pic commun est plus haut que les deux autres.
- Condition de largeur : la combinaison de deux motifs ne peut excéder une largeur de  $500 \mu\text{m}$ .
- Condition d'agrandissement : Les plus petits pics sont éliminés en recherchant le plus grand motif possible.
- Condition de profondeur relative : pas de combinaison si les profondeurs des vallées adjacentes dépassent de plus de 60% la plus petite hauteur du motif considéré.

Après la réalisation de la procédure de reconnaissance de forme, on obtient les motifs de rugosité (figure I.24). On définit alors les paramètres de rugosité  $R$ ,  $SR$ ,  $AR$  et  $SAR$ .

- $R$  est la moyenne des profondeurs de rugosité mesurées sur les motifs de rugosité.
- $SR$  est l'écart-type des profondeurs de rugosité mesurées sur les motifs de rugosité.
- $AR$  est la moyenne des largeurs de motifs.
- $SAR$  est l'écart-type des largeurs de motifs.

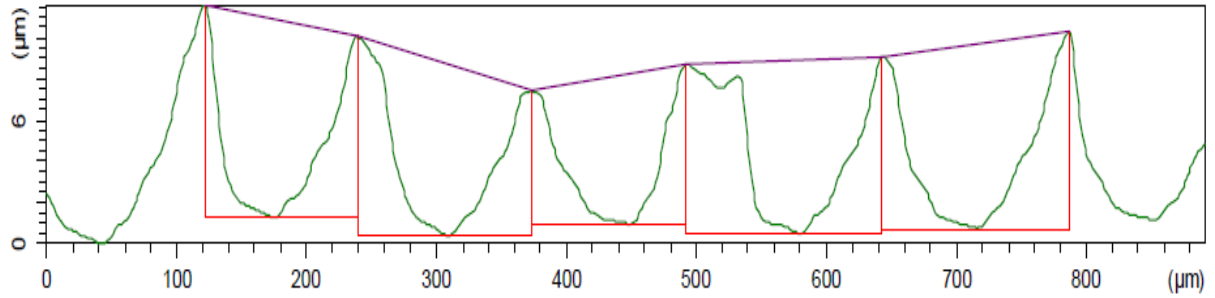


Figure I.24 : Exemple des motifs de rugosité sur une pièce tournée [33].

### I.9.7. Mesure de la rugosité

Lorsque les comparaisons visuelles et tactiles ne sont pas suffisantes pour distinguer une différence de rugosité entre deux surfaces, on utilise un rugosimètre qui détermine de manière sûre et précise un certain nombre de paramètres de rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ...).

Parmi les applications industrielles nécessitant l'utilisation d'un rugosimètre on peut citer les domaines suivants:

- **mécanique:** l'optimisation de la rugosité permet un meilleur ancrage mécanique, notamment au sein de dispositifs où les forces de friction jouent un rôle fonctionnel prépondérant (ex: cônes morses) ;
- **qualité:** l'utilisation d'un rugosimètre permet le contrôle de la qualité de finition en bout de chaîne de production, permettant de détecter et de corriger d'éventuels problèmes survenus durant l'usinage ;
- **collage et revêtement:** le contrôle et la correction de rugosité permet d'augmenter la surface réelle de contact, qui peut être ainsi équivalente à 10 ou même 100 fois la surface apparente ;
- **recherche:** la mesure de la rugosité permet d'évaluer la qualité d'un nouvel enduit ou procédé de traitement de surface [36].

### I.9.8. Modélisation de la rugosité

Théoriquement la connaissance de l'avance ( $f$ ) ainsi que la géométrie de l'outil permet de calculer la profondeur maximale des sillons marqués sur la surface usinée.

#### I.9.8.1. Cas de tournage

En tournage, la rugosité totale  $R_t$  de la surface obtenue peut être déterminée à partir d'un profil géométrique idéal donné par la figure I.25.

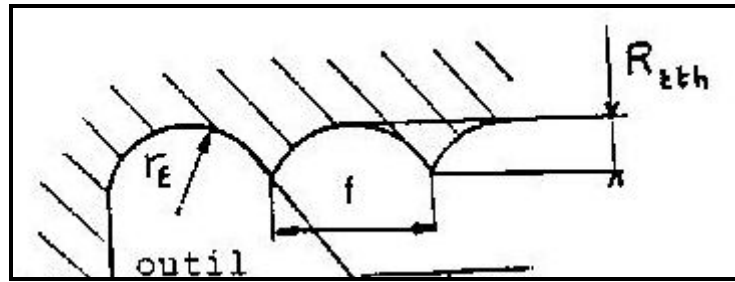


Figure I.25 : Sillons théoriques [18].

$$Rt_{(théorique)} = r_\epsilon \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{f^2}{4r_\epsilon^2}} \right] \quad (I.11)$$

Tel que :  $r_\epsilon$  est le rayon de pointe d'un outil rond [18].

Si l'avance est petite devant la valeur de  $r_\epsilon$ , l'équation (I.10) serait comme suit:

$$Rt_{(théorique)} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (I.12)$$

A partir de l'équation (I.11), une approximation largement utilisée [18] pour évaluer la rugosité moyenne arithmétique (Ra) se présente sous la forme :

$$Ra_{(théorique)} = \frac{f^2}{32r_\epsilon} \quad (I.13)$$

### I.9.8.2. Cas de fraisage

- En fraisage de face et dans des conditions idéales, le profil de la rugosité théorique mesuré parallèlement à la direction de l'avance et coïncident avec l'axe de rotation de la fraise est une fonction de l'avance par dent, et de l'angle de concavité du tranchant (figure I.26).

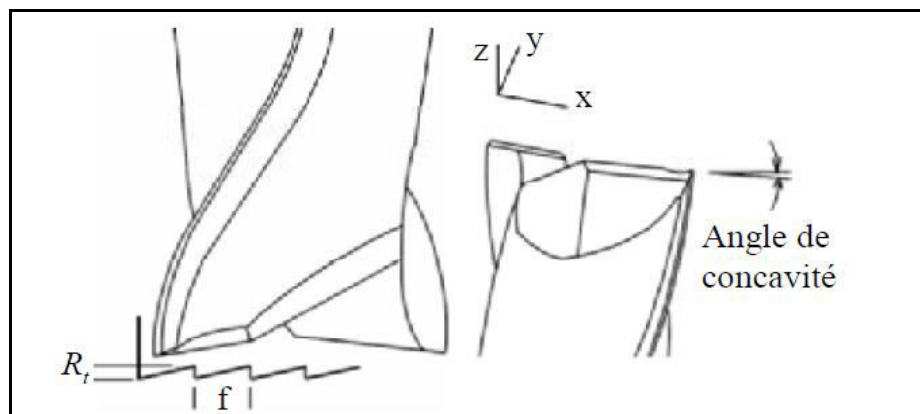


Figure I.26 : Profil théorique de la surface (R=0) [38].

Pour un rayon de tranchant  $R=0$ , la valeur de la rugosité est donnée par [38] :

$$R_t = \frac{fz}{\cot k} \quad (\text{I.14})$$

Où  $fz$  est l'avance par dent, et  $k$  est l'angle de concavité.

La rugosité arithmétique moyenne  $R_a$  peut être écrite comme suivant [38] :

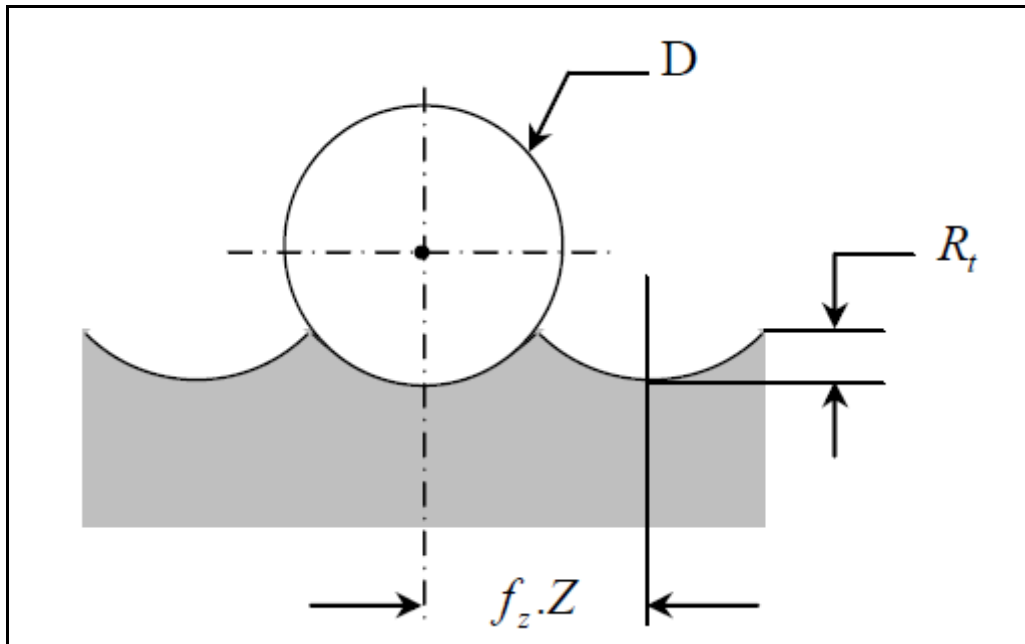
$$R_a = \frac{fz}{4 \cot k} \quad (\text{I.15})$$

Afin d'améliorer la rugosité, on peut utiliser un petit angle de concavité et des petites avances dans le modèle théorique.

- Avec une fraise à faux rond (figure I.27), la valeur de la rugosité théorique est donnée par [38] :

$$R_t = 125 \frac{fz^2 Z^2}{R} \quad (\text{I.16})$$

Tel que :  $Z$  est le nombre des dents.



**Figure I.27 :** Rugosité théorique [38].

- Dans le cas d'une fraise sans faux-rond, la surface produite est une suite de cycloïdes et la rugosité théorique s'exprime par l'équation I.16 [38] :

$$Rt = 125 \frac{fz^2}{\frac{D}{2} \pm \frac{fz \cdot Z}{\Pi}} \quad (I.17)$$

Tel que : + ; fraisage en opposition, - ; fraisage en avalant.

### **I.10. Influence du système " Pièce-Outil-Machine " sur la rugosité.**

Une bonne rigidité de la machine-outil est évidemment une condition très importante pour l'obtention d'une bonne qualité de surface des pièces usinées. Les vibrations éventuelles et le broutage vont se traduire essentiellement par des défauts du second ordre (ondulation).

Dans les opérations de tournage dur, avec lesquels on obtient des finitions de surface proches de ceux de la rectification, la rigidité du système pièce/outil/machine conduit à des variations de plus de 50 % des paramètres de rugosité obtenus en passant d'une machine très rigide à une machine plus souple [24].

### **I.11. Travaux concernant l'étude de la rugosité**

Khairi Yusuf et al [39] ont étudié les paramètres de coupe (vitesse de coupe, l'avance, la profondeur et le type de l'outil) en utilisant la méthode de Taguchi afin d'optimiser la rugosité de surface. Ils montrent que les facteurs les plus significatifs sur la qualité des surfaces étaient principalement la vitesse de la broche, puis le type de l'outil, et après l'avance suivie par la profondeur de passe choisie. F. Dweiri et al [40] ont étudié l'effet des paramètres d'usinage (la vitesse de coupe, l'avance par dent, la profondeur de passe et le nombre de dent) sur la rugosité de surface. Leur étude a montré que l'utilisation d'une fraise à quatre dents donne la valeur minimale de Ra (0,224 µm), et l'utilisation d'une fraise à deux dents engendre une rugosité égale à 0,327 µm. M. Aguiar et al [41] ont étudié la rugosité de surface en fraisage, et ont déduit que la qualité de surface n'a pas augmenté de manière significative avec le temps de coupe dans la plupart des conditions testées.

### **I.12. Conclusion**

L'analyse bibliographique montre l'importance de l'usinage dans l'industrie, et en particulier l'opération du fraisage. Nous avons présenté dans ce premier chapitre les différents types de fraisage, aussi nous avons défini les formes de copeaux obtenues en usinage et les matériaux de coupe utilisés. Dans la deuxième partie, nous avons étudié l'état de surface des pièces usinées, sa définition, ses défauts, les facteurs influents sur ce paramètre, les méthodes de quantification, et on a terminé par l'influence du système « POM » et du régime de coupe

sur la rugosité. Cette analyse nous a montré la complexité de l'usinage, qui s'explique par les propriétés physico-mécaniques très différentes. Cette variabilité de capacité et de performance de coupe leur permet de générer des qualités microgéométriques diverses sur les surfaces des pièces usinées.

## Chapitre II : Les vibrations en usinage.

### II.1. Introduction

Parmi les principales difficultés rencontrées en usinage, celles posées par les phénomènes vibratoires générés par la coupe occupent une place très importante. Les problèmes des vibrations en usinage, sont apparus dès le début du XXe siècle. Frederick Winslow Taylor en 1907 évoquait le broutement en usinage comme l'un des problèmes les plus délicats à traiter. Au cours du XXe siècle, il a été constaté que trois types de vibrations sont présents dans le cas d'une opération d'usinage, les vibrations libres, les vibrations forcées, et les vibrations auto-entretenues [1].

La nature discontinue et périodique de la coupe en fraisage est aussi la cause de vibrations systématiques de l'ensemble Pièce-Outil-Machine (POM) [42]. Ces dernières accroissent principalement le défaut de forme de la surface usinée, et ce d'autant plus que la fréquence d'excitation de la coupe (la fréquence de passage des dents de l'outil coupant) est proche d'une fréquence propre du système POM.

Le processus de coupe représente un ensemble de phénomènes physico-chimiques et particulièrement dynamiques, déterminés par des déformations élastiques, plastiques et élastovisco-plastiques, des phénomènes thermiques, de frottement, etc. Ceux-ci ont lieu dans la zone de contact outil-pièce-copeau. La coupe est influencée principalement par les propriétés du matériau à usiner, la géométrie de l'outil, les conditions de coupe, les conditions de lubrification et les paramètres dynamiques (raideur, amortissement) du système usinant [1, 43].

### II.2. Identification du système « Pièce/Outil/Machine »

Ce concept définissant le système « Pièce / Outil / Machine » identifié par l'acronyme (POM) ou « Workpiece/Tool/Machine » (WTM) a été formulé en vue de proposer une prédiction du comportement dynamique des machines-outils. On peut dire que ce concept de POM est généralisable à tous les procédés et techniques d'usinage. L'intérêt d'un tel concept est de le décliner tant en expérimentation (identification) qu'en simulation (prédiction), en évaluant les caractéristiques situées de manière partielle ou complète selon les respects de spécifications en fabrication [1].

Malgré leurs diversités apparentes, les machines-outils ont pratiquement les mêmes structures et sont composées des mêmes éléments de base [43].

La constitution générale d'une machine-outil permet de distinguer deux éléments :

- Éléments indépendants de l'opération d'usinage.
- Éléments dépendants de l'opération d'usinage.

### **II.2.1. Éléments indépendants de l'opération d'usinage**

- **Bâti** : le rôle du bâti est multiple. D'une part, il sert d'intermédiaire entre le sol et les éléments actifs de la machine, d'autre part, il réalise la liaison entre la pièce à usiner et les outils.
- **Chariot-glissière** : la glissière confère au chariot un seul degré de liberté correspondant à une translation. Il est communément convenu que la liaison idéale chariot-glissière doit être sans jeu et ne faire intervenir qu'un frottement de type hydrodynamique. Dans la réalité, il convient de noter la présence de jeux et de frottements de types plus complexes.
- **Broche** : dans l'usinage par enlèvement de copeaux, la broche considère comme un élément important dans les machines-outils. Dans la boucle de rigidité influençant la position relative de la pièce et de l'outil, la broche est l'un des éléments les moins rigides. La précision d'usinage va donc être en grande partie déterminée par la rigidité de la broche. La broche est un corps tournant qui possède un seul degré de liberté par rapport à la structure de la machine. La machine comporte les paliers qui retirent à la broche cinq degrés de liberté. Ces paliers ont une grande importance pour la qualité de la machine. Ils doivent être rigides et ne doivent présenter que de très faibles jeux, afin d'éviter des mouvements relatifs non souhaités entre la broche et le bâti donc entre la broche et la pièce. Assez souvent la broche est cependant l'élément le plus souple de la machine.
- **Commande de puissance** : la commande de puissance de la machine pose des problèmes qui ont pour origine la liaison entre le moteur et la broche. Deux techniques principales sont utilisées. La courroie qui paraît être arrivée au bout de son potentiel tant en vitesse qu'en puissance transmise et la transmission directe qui présente des problèmes sérieux dus à l'encombrement qu'elle impose à la broche ou à l'ensemble moteur-broche quand ils sont montés en ligne.
- **Directeur de commande** : le rôle de directeur de commande est l'animation de l'ensemble de la machine. En particulier, c'est lui qui assure le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce selon la trajectoire prévue. Il est responsable du maintien



des conditions de coupe à leurs valeurs programmées. Le directeur de commande opère en boucle fermée au niveau de l'asservissement en position et en vitesse pour chacun des axes de la machine. Mais cela signifie seulement qu'il asservit la position d'un point particulier de la chaîne cinématique (chariot, vis à billes,...) pour chaque axe numérisé. Il n'y a pas de mesure directe de la position de l'outil par rapport à la pièce. Cette position est donc tributaire des déformations qui interviennent à la fois en deca (déformation du bâti, des glissières, de vis à billes,...) et au-delà (déformation de la broche, des chariots, des outils, des pièces et des porte-pièces) des mouvements asservis.

### **II.2.2. Éléments dépendants de l'opération d'usinage**

- Pièce : la pièce est considérée comme une partie intégrante du système d'usinage. Il ne sert à rien d'avoir une machine de très grande rigidité et très haute qualité si la pièce à usiner se déforme sous l'effet des efforts de coupe ou de bridage. Les pièces peuvent être réparties en trois catégories : pièces massives, pièces flexibles et autres. Les pièces massives, peu déformables, ne jouent pas un rôle important dans la dynamique du système POM autrement que par leur masse qui abaisse les fréquences propres. Les pièces flexibles sont celles, au contraire, qui confèrent au système POM l'essentiel de ses caractéristiques : raideur, modes propres, amortissement, etc. La flexibilité peut être seulement locale, dans le cas d'un usinage de voile mince par exemple. Ces deux cas conduisent à des simplifications de la modélisation du système POM. Les autres types de pièces constituent des cas intermédiaires.
- Outil de coupe : l'outil de coupe peut être unique ou multiple. Il représente la partie essentielle dans l'étude du comportement statique et dynamique d'une machine-outil. C'est par l'étude du phénomène d'interaction de l'outil avec la pièce que nous obtenons les forces de coupe engendrées durant l'usinage. Les outils peuvent se répartir en trois catégories : indéformables (fraises à surfacer), souples (barres d'alésage longues, fraises deux tailles longues, fraises de finition, fraises hémisphériques dans le cadre d'usinage de moule, etc.) et intermédiaires.
- Porte-outil : la liaison entre l'outil et la machine est assurée à l'aide du porte-outil. Le concept de l'interface (cône, denture, liaison prismatique, etc.) confère au porte-outil des caractéristiques particulières de raideur et d'amortissement qui sont très dépendantes de la qualité, de la géométrie et de l'état d'usure de l'interface [1,43].

- Porte-pièce : le porte-pièce assure le maintien en position de la pièce par rapport à l'élément auquel il est rattaché (broche ou chariot). Les actions qu'il exerce sur la pièce contribuent à la fois à la déformer, à la renforcer et à augmenter la rigidité. Sur le plan dynamique, la prise en compte globale de l'ensemble (pièce, porte-pièce) est nécessaire sauf dans le cas des pièces particulièrement déformables ne pouvant pas être soutenues.

### **II.3. Différents types de vibrations en usinage**

Une vibration est une variation avec le temps d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique lorsque la grandeur est alternativement plus grande ou plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence [44].

Les phénomènes vibratoires qui apparaissent lors d'une opération d'usinage (fraisage, tournage, perçage...) ont toujours existé et ils ont toujours été un problème pour les industriels. En effet ces vibrations influent sur l'état de surface des pièces usinées et font chuter les durées de vie des outils et de la broche. Ceci fait de l'étude des vibrations d'usinage une thématique consistante [45, 46].

En usinage trois types de vibrations sont recensées : les vibrations libres, les vibrations forcées, et les vibrations auto-entretenues [15].

#### **II.3.1. Les vibrations libres**

Il s'agit de vibrations d'une structure (outil, broche, pièce) en réponse à un choc ou un lâcher. Ces vibrations peuvent être déclenchées par un seul impact et elles s'amortissent d'elles mêmes en fonction du comportement dynamique et de l'amortissement du système. Dans le cas de l'usinage, que ce soit en tournage ou en fraisage, elles sont généralement utilisées pour la caractérisation du système, lors d'un sonnage ou test du marteau [1, 15, 46].

#### **II.3.2. Les vibrations forcées**

Les vibrations forcées sont la réponse vibratoire d'un système mécanique à une excitation périodique. Elles sont propres à la coupe discontinue comme le fraisage, mais elles peuvent apparaître aussi lors du tournage de pièces n'ayant pas de symétrie de révolution. Ces vibrations sont le résultat de l'excitation périodique de la coupe, qui résulte dans le cas du fraisage, du passage successifs des dents lors d'une excentration de la chaîne cinématique (outil, plaquette, porte-outil, pièce, broche), ou hétérogénéité de la matière usinée. Dans la mesure du possible, il est recommandé d'avoir une coupe la plus continue possible pour

limiter l'impact de ce type de vibration. La position relative de l'outil par rapport à la surface usinée est constante à chaque passage de dent dans la direction normale à l'avance. Les vibrations sont en phase avec la fréquence de passage des dents. Par conséquent, à chaque tour d'outil, l'enlèvement de matière est identique ce qui n'implique pas d'irrégularités lors de l'usinage, donc l'influence de ces vibrations sur la qualité de l'état de surface final est négligeable. Cependant, si celles-ci sont assez importantes, nous pouvons observer un défaut de forme (ordre 1) de la surface usinée.

Nous ne prendrons donc pas en compte ces vibrations [47].

On introduit d'autres sources possibles de vibrations forcées comme :

- ✓ des irrégularités géométriques de la pièce ;
- ✓ des effets de faux-rond et de balourds ;
- ✓ une usure excessive ou la casse d'une des dents dans le cas du fraisage.

Cependant elles restent secondaires par rapport à l'irrégularité de la coupe, mais ne doivent pas être oubliées dans certaines circonstances comme par exemple :

- ✓ un outil tournant à très grande vitesse en fraisage ;
- ✓ une pièce déformée par le serrage des mors en tournage.

Lors de l'entrée ou de la sortie de l'outil dans la matière, lorsque le régime permanent n'est pas encore établi, la combinaison des vibrations libres (dues à l'impact de l'outil dans la matière) et des vibrations forcées (dues à la rotation de l'outil) entraîne la plupart du temps des broutements et des bruits désagréables [1].

### **II.3.3. Les vibrations auto-entretenues**

Aussi nommées auto-vibrations, vibrations régénératives, elles ont pour source le passage d'un régime de coupe stabilisé à un régime de coupe instable. La structure vibre à des fréquences distinctes de la fréquence de passage de dent en fraisage ou de broche en tournage, c'est-à-dire le régime dynamique de la coupe est différent du régime dynamique de l'outil [48]. Elles sont la cause du phénomène appelé broutement « chatter ». A ce phénomène est attribuée l'apparition de mouvements d'amplitude élevée entre l'outil et la pièce usinée, au point d'interrompre la coupe [2]. Ce phénomène est fortement redouté des industriels car il entraîne généralement :

- ✓ des états de surface fortement dégradés (ordre 3 et 4), en générant des stries sur la pièce ;

- ✓ un bruit très désagréable lors de l'usinage. Même si ce point n'a pas de conséquence sur la qualité de la pièce finie, il est à prendre en compte par rapport à l'environnement de travail des opérateurs [1,48] ;
- ✓ une augmentation de l'usure de l'outil coupant, et la dégradation de la broche [49] ;
- ✓ une augmentation des efforts de coupe provoquant la rupture de l'outil [14].

Ces problèmes ont été étudiés dès le milieu du XXe siècle, dans le but de comprendre les phénomènes aboutissant à l'apparition du broutement, et de développer des méthodes de prédiction [1,48].

On distingue deux catégories de ces vibrations auto-entretenues. Elles peuvent être d'origines régénératives et non-régénératives.

### **II.3.3.1. Broutement d'origine régénératif**

Le broutement régénératif, doit son origine dans la régénération de la surface précédemment usinée. Dans le cas d'un usinage par enlèvement de matière, l'outil ré-usine la surface de la passe précédente. Cette surface a été générée en présence de vibrations forcées. Ces vibrations produisent une surface aux ondulations régulières.

Dans le cas de l'apparition de broutement, les fréquences de passage de dent et de vibrations d'outil sont différentes, un déphasage va apparaître entre la surface usinée à la passe  $n$  et à la passe  $n-1$ . Ce déphasage résulte une variation de l'épaisseur de copeau, donc des efforts de coupe.

### **II.3.3.2. Broutement d'origine non-régénératif**

Le broutement d'origine non-régénératif a plusieurs causes :

- les non-linéarités apparaissant lors d'un usinage très instable. Dans certains cas, l'outil aura tendance à sortir de la matière lorsque les vibrations sont trop importantes.

Ceci entraîne un comportement non-linéaire du système pièce outil.

- Le couplage des modes des vibrations : chacun des axes de l'outil ou de la machine possède des modes de vibrations qui peuvent s'influencer.
- D'autres phénomènes non-linéaires dus à la coupe de la matière comme : le talonnage entre l'outil et la pièce ou les effets thermomécaniques liés à la formation du copeau [48].

### II.3.3.3. Régénération de la surface

Selon la communauté scientifique la régénération de la surface usinée est considérée comme la principale cause des vibrations auto-entretenues, entraînant le broutement. Sous l'effet de différents paramètres (entrée dans la matière, inclusion dans la matière, etc.), les conditions d'engagement de l'outil varient, induisant une variation des efforts de coupe [50].

L'outil entre alors en vibration sous l'effet de cette variation d'effort de coupe, ce mouvement vibratoire de l'outil implique une première ondulation de la surface usinée. Lorsque la dent suivante (en fraisage) ou l'outil (en tournage) repasse sur cette surface ondulée, l'épaisseur nominale de copeau est variable. Cette nouvelle variation de l'effort de coupe va de nouveau entraîner un mouvement vibratoire de l'outil, impliquant une nouvelle surface ondulée (figure II.1). Ce phénomène est la source de l'auto-entretien des vibrations.

Il existe deux évolutions pour l'amplitude des vibrations. Si le déphasage qui existe entre la surface précédemment usinée et la surface actuelle générée par l'outil (ou la dent) est suffisamment faible, la section de copeau varie peu au cours de l'usinage. Dans ce cas, le système subit davantage des vibrations forcées, ayant en pratique peu de conséquences sur la surface usinée. C'est notamment ce régime de coupe qui est souvent choisi pour limiter les conséquences des vibrations auto-entretenues. En fraisage, les vibrations forcées et auto-entretenues sont difficiles à séparer. En pratique, il est arbitraire de les dissocier si clairement. Au contraire, si le déphasage est assez grand, la variation de la section de copeau est suffisamment importante pour que la variation d'efforts de coupe entretienne et amplifie les vibrations jusqu'à ce que l'outil sorte de la matière. Dès lors, la qualité de la surface obtenue est fortement dégradée et l'usure de l'outil augmente anormalement.

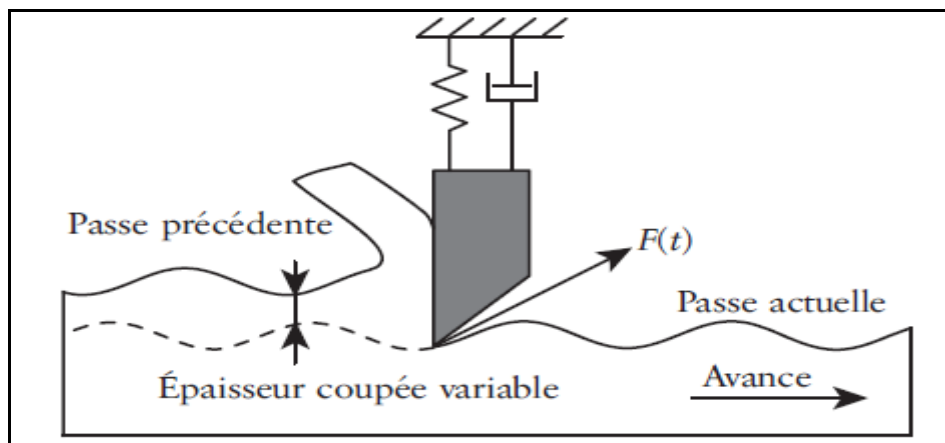


Figure II.1: Phénomène de régénération de la surface [50].

### II.3.3.4. Couplage des modes

Les vibrations auto-entretenues ont été expliquées par le phénomène de couplage de modes [43,47].

Ce phénomène intervient lorsqu'il y a couplage entre deux modes propres orthogonaux de l'outil. Il en résulte un mouvement relatif elliptique entre la pièce et l'outil qui génère une variation de l'épaisseur de copeau, et donc une variation de l'effort de coupe. Cette variation d'effort entretient ainsi le mouvement de l'outil (figure II.2). Ce phénomène intervient en même temps que la régénération de la surface, et amplifie celle-ci. Le couplage des modes n'intervient plus avec un système à un degré de liberté [47].

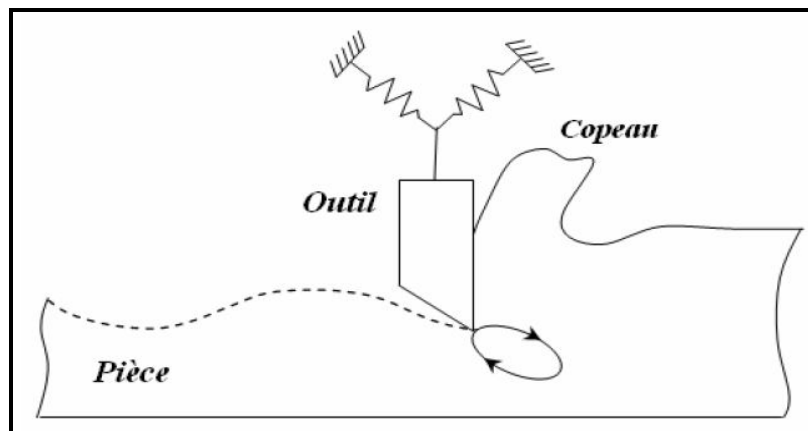


Figure II.2 : Phénomène de couplage des modes [43].

## II.4. Sources des vibrations du système POM

Les causes d'excitation du système MPO peuvent être directement liées à l'usinage ou provenir d'autres sources comme les défauts d'équilibrage, les défauts liés à la chaîne cinématique et les oscillations provenant de l'asservissement de pilotage. Les différentes causes peuvent évidemment se superposer. Dans notre étude, seule les causes liées à l'usinage seront prise en compte. Nous pouvons les résumer en quatre points :

- le premier est la coupe elle-même, soit en raison de l'hétérogénéité du matériau qui conduit à une répartition statistique des micro-duretés, ou de l'instabilité de l'écoulement du copeau. Les fréquences d'excitation sont généralement assez élevées, de quelques kHz à quelques dizaines de kHz ;
- le deuxième est dû aux discontinuités d'usinage. Il se rencontre en fraisage et en tournage discontinu. Chaque choc, à l'établissement ou à la rupture du contact entre une arête de coupe et de la pièce, conduit à un régime transitoire. La fréquence des chocs dépend de la

vitesse de rotation de la broche, du nombre d'arête et de la configuration de la pièce. Elle varie de 10 Hz à 1 kHz;

- le troisième est celui d'une excitation périodique. Il peut prendre la forme d'une variation continue et cyclique de la sollicitation. C'est le cas du tournage d'une pièce excentrée ou la reprise d'un alésage dont l'avant trou est excentré. Le comportement est différent selon la valeur relative de la vitesse de rotation par rapport aux fréquences propres du système MPO. Il est également possible d'avoir une répétition de discontinuités. Si la durée du phénomène transitoire est courte, il s'agit d'une succession de discontinuités sans interférences entre elles;

- Le dernier, appelé phénomène de régénération, est lié au fait qu'à chaque tour, l'outil ré-usine la surface qu'il a généré au tour précédent, comme nous l'avons expliqué dans la partie II.3.3.3.

Dans tous les cas, le comportement dynamique de ce système dépend d'un couplage qui s'établit entre la réponse de la structure mécanique et l'interaction de l'outil avec la pièce [1].

## **II.5. Méthodes de mesure des vibrations**

La mesure des vibrations est très importante pour l'étude de celle-ci, il faut être capable de les mesurer dans un environnement difficile, du fait de la configuration de la machine (mouvements des axes), de la lubrification, du bruit ambiant et de la projection de copeaux [47]. Parmi les mesures des vibrations les plus fréquentes, nous avons les mesures directes avec contact et sans contact, et les mesures indirectes.

### **II.5.1. Mesures directes**

La mesure des vibrations est majoritairement effectuée par des capteurs qui mesurent directement les déplacements, vitesses ou accélérations de la pièce ou de l'outil pendant l'usinage.

- **Mesure avec contact**

Le capteur de vibrations est le premier maillon de la chaîne de mesure. L'accéléromètre ou capteur piézoélectrique est le plus largement utilisé. Le principe d'un accéléromètre est de générer un signal électrique proportionnel au niveau de vibration. Les accéléromètres sont très appréciés car ils possèdent une large bande de fréquence présentant une excellente linéarité,

permettent l'intégration du signal pour obtenir la réponse en vitesse ou en déplacement et sont d'une excellente précision et fiabilité.

La façon d'utiliser l'accéléromètre joue un rôle primordial dans la prise de mesure. En effet, le mode de fixation et l'emplacement du capteur influent sur les résultats. La fixation sur la structure doit être réalisée à partir d'une liaison parfaite [51]. Son utilisation pose plusieurs contraintes :

- ✓ premièrement, il est impossible à utiliser lorsqu'on veut mesurer les vibrations de l'outil, car celui-ci est en rotation. Il faut donc le placer sur la tête de la broche pour capter le signal de l'outil transmis à celle-ci ;
- ✓ deuxièmement, la masse de l'accéléromètre n'est pas nulle, et dans le cas de l'usinage de petites pièces, on ne mesure plus le comportement de la pièce, mais le comportement de la pièce et du capteur. Donc il faut faire attention à l'endroit où est placé le capteur, pour éviter tout risque de collision entre l'outil et celui-ci.

Bien qu'il n'y ait pas contact entre le capteur et le corps à mesurer, les capteurs de déplacement (capacitif, inductif) sont également considérés comme des capteurs avec contact, dans le sens où ils doivent être placés à proximité du corps à mesurer (quelques dixièmes de millimètres). Ces capteurs ne posent pas le problème de la masse ajoutée comme les accéléromètres.

Par contre, la très faible distance de mesure peut entraîner des collisions sous l'effet de l'amplitude des vibrations, qui peuvent endommager le capteur [47].



**Figure II.3** : Capteur de vibration 3D, Kistler [52].



- **Mesure sans contact**

Les capteurs sans contact peuvent mesurer les vibrations du système usinant à une distance importante (plusieurs mètres). Ceci ne pose pas le problème de l'interaction entre le capteur et la pièce à mesurer. Les moyens de mesure sans contact sont ainsi beaucoup utilisés en usinage. Le son diffusé par les vibrations constitue une information riche permettant de connaître précisément les fréquences excitées. La mesure acoustique s'effectue à distance à l'aide d'un microphone ou une sonde d'intensité acoustique, ce sont des capteurs de pression très courants, de taille réduite et facilement utilisables. L'avantage de ces capteurs est la sensibilité aux bruits environnants. Ainsi, ils capteront aussi bien les vibrations de la pièce que les vibrations de l'outil. Mais ils possèdent 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. Ce sont des instruments très précis qui mesurent des vibrations à travers une large gamme d'amplitudes et de fréquences. L'instrument incorpore un laser dont le faisceau est concentré sur l'objet à mesurer. Il s'agit d'un capteur qui mesure la vitesse de déplacement par effet Doppler. Contrairement aux capteurs acoustiques, le vibromètre laser ne mesure que le corps sur lequel il est pointé. Il faut donc au préalable savoir qui de la pièce ou de l'outil va vibrer. En pratique, les vibrations étant transmises dans les deux corps, il est possible de mesurer les vibrations de l'outil en pointant la pièce, mais le signal est plus faible. Ce capteur peut mesurer les vibrations depuis l'extérieur de l'enceinte de la machine, le faisceau laser passant à travers les vitres. Mais, il est très difficile de réaliser des mesures d'usinage sous lubrification, car le faisceau n'étant pas réfléchi correctement par la surface du corps à mesurer [47].



**Figure II.4:** Vibromètre Laser [53].

### II.5.2. Mesures indirectes

Il s'agit ici de mesures de grandeurs indirectement liées aux déplacements, vitesses, accélérations du système usinant. Les mesures les plus courantes sont les mesures des efforts de coupe de l'outil sur la pièce. Les efforts de coupe sont directement liés aux déplacements relatifs entre l'outil et la pièce par le biais de la loi de coupe. Ainsi, on mesure aussi bien les vibrations de l'outil que les vibrations de la pièce [47].

L'effort de coupe est mesuré à l'aide d'un dynamomètre, c'est un capteur présenté sous la forme d'une platine sur laquelle est montée la pièce, et qui est installée sur la table de la machine. Ce capteur mesure 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, car les informations mesurées sont fréquemment polluées par la mise en vibration des modes de la platine, qui se superposent aux vibrations issues de la coupe. Par conséquent, il est extrêmement difficile d'accéder à certains phénomènes exceptionnels extrêmement courts : talonnage, sortie de la matière, coupe d'épaisseurs de copeaux très faibles [46].

Enfin, la rugosité est le moyen le plus utilisé pour qualifier la qualité d'un usinage. Cette mesure s'effectue après usinage à l'aide d'un rugosimètre.

L'utilisation de critère de rugosité [50] permet ainsi simplement de vérifier si la pièce est vibrée. Ce moyen de mesure indirect des vibrations est le plus important pour l'industriel, car il conditionne la qualité de la surface usinée. Il faut toujours garder cela à l'esprit quand on parle, par exemple, de vibrations stables ou instables.

## II.6. Analyse des vibrations

Il existe deux techniques d'analyse vibratoire permettant de détecter et de diagnostiquer l'apparition des défauts dans les machines : méthodes temporelles et méthodes fréquentielles.

### II.6.1. Les méthodes temporelles

Elles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Cette méthode applique des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut [21, 54].

#### II.6.1.1. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien qu'il présente des inconvénients. Il est sensible à l'effet de masque, c'est à dire qu'il peut s'avérer inefficace à l'apparition de certains défauts et il s'écrit sous forme discrétisée [54] :

$$V_{\text{efficace}} = V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

$x(n)$  : est le signal temporel mesuré.

$N_e$  : représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

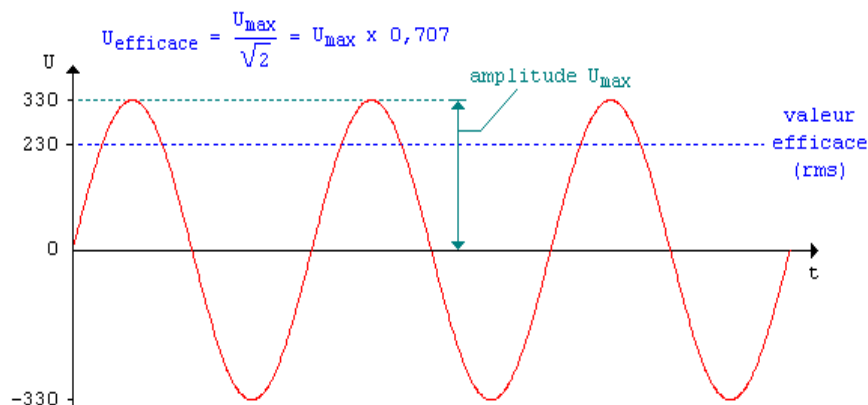


Figure II.5 : La valeur efficace ou valeur RMS [55].

### II.6.1.2. Les indicateurs crêtes

Le facteur crête est utilisé pour représenter un signal induit par des forces impulsives telles que les écaillages de roulements. Le facteur crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace [21] :

$$\text{Facteur crête} = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} = \frac{\sup |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (\text{II.2})$$

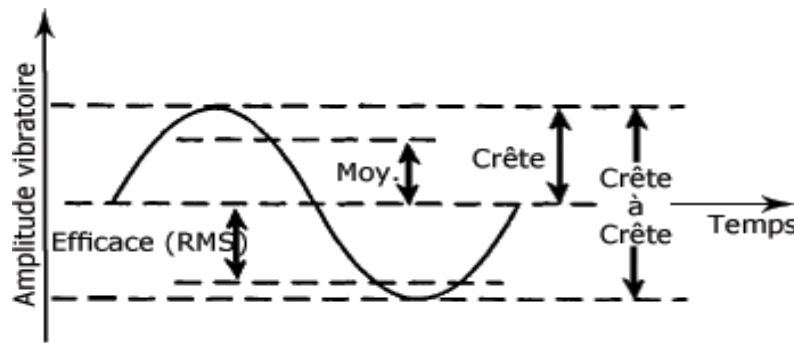


Figure II.6: Valeur crête et efficace.

Le facteur crête comporte l'avantage de détecter les défauts avant la valeur efficace.

### II.6.1.3. Le Kurtosis

Le Kurtosis est le moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut [54].

$$\text{Kurtosis} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2} \quad (\text{II.3})$$

Où  $M_4$  et  $M_2$  sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2,  $x(n)$  est le signal temporel,

$\bar{x}$  est la valeur moyenne des amplitudes,  $N$  est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal. Le principale avantage du Kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état la machine, de matériel, de roulement, ... etc.

Il doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs, ce qui oblige un emploi du Kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic [21,54].

## II.6.2. Les méthodes fréquentielles

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques à l'aide de l'analyse de leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques [54].

### II.6.2.1. L'analyse en fréquence

L'intérêt de cette analyse est donc d'éliminer les bruits qui perturbent la lecture du signal (climatique, par exemple) dont témoigne une courbe, et de distinguer les différents éléments qui interfèrent dans la composition de ce signal.

La transformation de Fourier est l'une des méthodes utilisées fréquemment en analyse spectrale [21].

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.4})$$

Où  $X(f)$  est la transformée de Fourier,  $t$  est la variable temps,  $f$  est la variable fréquence qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence  $f$ , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut.

Dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT) sur des signaux numérisés [21] :

$$X(k \Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (\text{II.5})$$

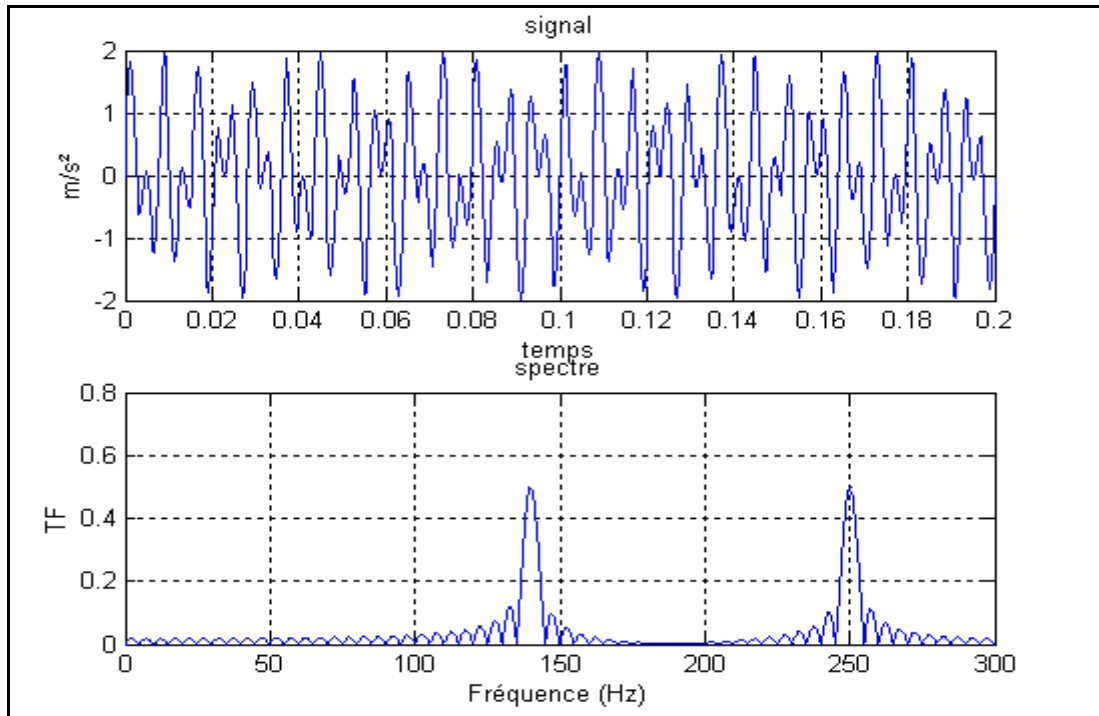
Où

$X(k \Delta f)$  : est la transformée de Fourier discrète rapide,  $t_e$  est la période d'échantillonnage du signal temporel,  $n$  est le numéro de l'échantillon.

$k$  : est le numéro de la ligne fréquentielle.

$\Delta f$  : est l'intervalle entre deux raies fréquentielles.

$N$  : est le nombre d'échantillons prélevés.



**Figure II.7** : Transformée de Fourier d'une somme de deux sinusoïdes [54].

La formule de Parseval (équation II.6), permet de rendre compte du fait que, le premier membre étant par définition l'énergie temporelle du signal [21].

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x(n)|^2 = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} |X(f)|^2 df \quad (\text{II.6})$$

$|X(f)|^2$  s'interprète comme la distribution de l'énergie le long de l'axe des fréquences. On appelle densité spectrale de puissance (DSP) ou spectre de puissance, le carré du module de la transformée de Fourier, rapportée au temps d'observation (équation II.7) [21]. Elle présente l'avantage d'être corrélée à la sévérité d'un défaut. Elle est la représentation fréquentielle (spectre de puissance) la plus utilisée dans le diagnostic vibratoire des éléments des machines tournantes, des roulements, des outils de coupe, etc...

$$DSP(f) = \frac{|X(f)|^2}{d} \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

$DSP(f)$  : est la densité spectrale de puissance.

$X(f)$  : est la transformée de fourier du signal,  $d$  est la durée d'observation.

La mesure n'étant réalisée que sur un échantillon de signal de durée finie, la précision se trouve limitée. Le spectre est constitué de raies élargies, entourées de lobes latéraux. Il faut donc nécessairement introduire une fenêtre de pondération pour réduire l'effet des ondulations dues à la troncature du signal :

$$DSP_p(f) = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(k) - x(k) \cdot e^{-j2\pi fk} \right|^2 \quad (\text{II.8})$$

Où :

$DSP_p(f)$  : est la densité spectrale de puissance pondérée.

$x(k)$  : représente le signal discret à analyser.

$f(k)$  : la fenêtre de pondération.

$N$ : le nombre d'échantillons prélevés dans le signal temporel.

### II.6.2.2. L'analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure [21].

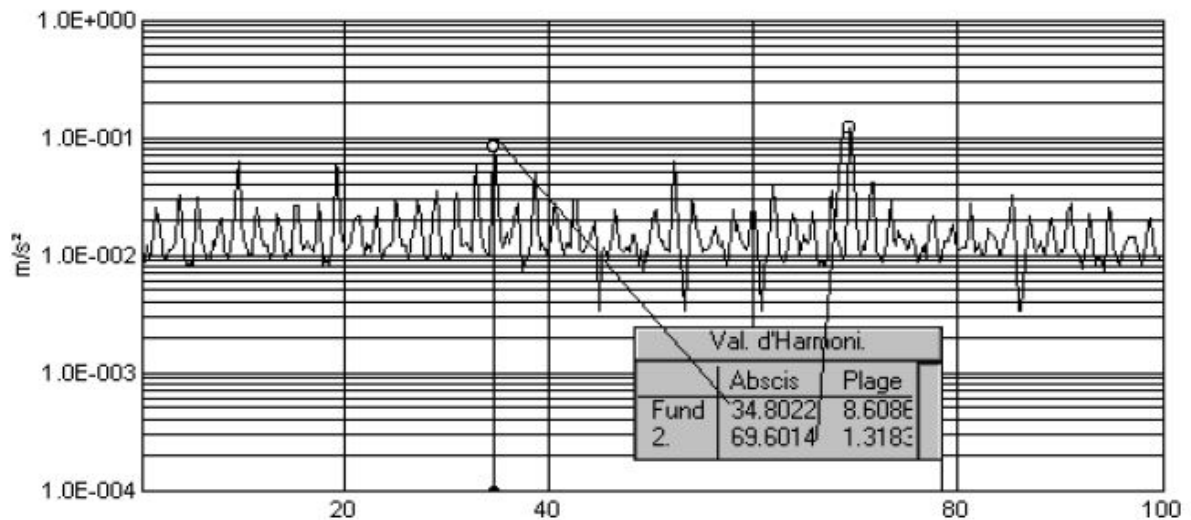


Figure II.8 : Spectre enveloppe 0-100 KHz [54].

Elle repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure.

Ainsi, il devient alors possible d'extraire des informations basses fréquences difficiles à détecter sur une porteuse haute fréquence comme la montre la figure ci-après.

### II.6.2.3. Le cepstre

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier [54] (équation II.9):

$$C [s(t)] = TF^{-1} \log |TF [s(t)]|^2 \quad (\text{II.9})$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les fréquences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée [21].

## II.7. Quelques approches pour l'élimination des vibrations

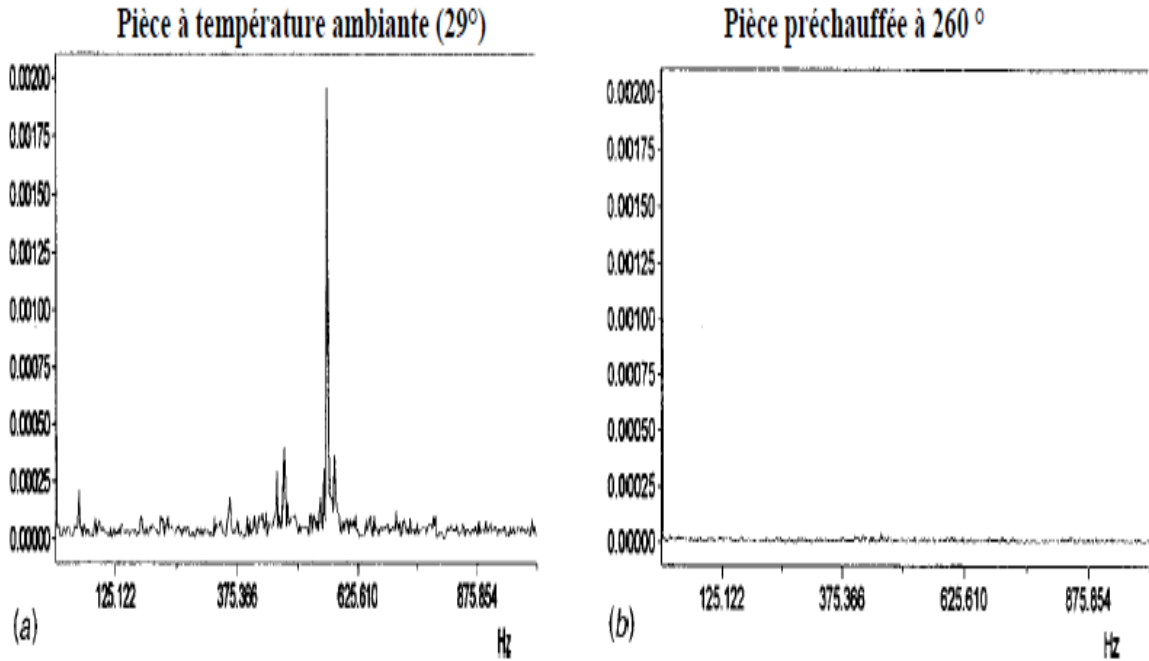
### II.7.1. Systèmes amortissants

L'ajout d'amortissement permet de réduire l'amplitude des vibrations. Il est connu expérimentalement et montré théoriquement que l'ajout d'amortissement dans le système usinant limite les vibrations d'usinage [56]. Afin d'obtenir un résultat satisfaisant, il faut idéalement parvenir à ajouter de l'amortissement à l'élément le plus souple du système, et de façon à maximiser la dissipation d'énergie. À l'opposé, ajouter de l'amortissement à un élément rigide n'apporte aucun gain. De même, si l'amortissement n'est pas placé dans la bonne direction, il ne sert à rien.

### II.7.2. La modification des efforts de coupe

Les efforts de coupe étant l'élément moteur des vibrations, on peut les réduire en facilitant les conditions de formation du copeau. L'effet de la température du métal usiné sur les vibrations a été étudié en fraisage. La pièce est usinée en bout au moyen de plaquettes rectangulaires, à température ambiante (29°), puis après préchauffage par induction (260°) [46]. Dans ce cas l'amplitude des pics d'accélérations vibratoires peut diminuer jusqu'à 98 % (figure II.9). La mise en œuvre de dispositifs de chauffage est contraignante. Son implantation dans un contexte de production n'est pas envisageable pour tous les métaux. Elle l'est encore moins avec l'emploi de lubrifiant. Cette méthode d'usinage permet surtout de montrer la forte incrimination de l'interaction outil-copeau, et des efforts de fraisage dans l'instabilité.





**Figure II.9 :** Impact du préchauffage de la pièce sur le spectre des accélérations [46].

### II.7.3. Variation de la vitesse de broche

Cette méthode consiste à faire varier sinusoidalement la vitesse de broche autour d'une valeur moyenne, avec une amplitude et une fréquence données. Cette variation harmonique de la vitesse de rotation va ainsi perturber le phénomène de régénération de la surface en générant une fréquence de dent variable. Il s'agit d'appliquer à la broche une consigne de vitesse de la forme [47]:

$$S(t) = S_m [1 + \alpha \sin(2\pi f_s t)] \quad (\text{II.10})$$

Où  $S_m$  est la valeur moyenne de la vitesse de rotation,  $\alpha$  le rapport d'amplitude, et  $f_s$  la fréquence du signal. Cette méthode de réduction des vibrations n'a pas encore trouvé sa place dans le milieu industriel, car elle souffre de nombreux points faibles, à cause de la difficulté de déterminer de la fréquence d'oscillation  $f_s$ , et du rapport d'amplitude  $\alpha$ . Il n'y a pas de méthode systématique permettant de déterminer ces paramètres [42].

Ils dépendent du comportement dynamique du système, et sont limités par le temps de réponse du système de pilotage de la broche, et de sa précision. Le système de pilotage se comporte comme un filtre passe-bas, limitant ainsi la fréquence de variation de la consigne  $f_s$ . La broche ne peut suivre une consigne de vitesse dont la fréquence excède une certaine

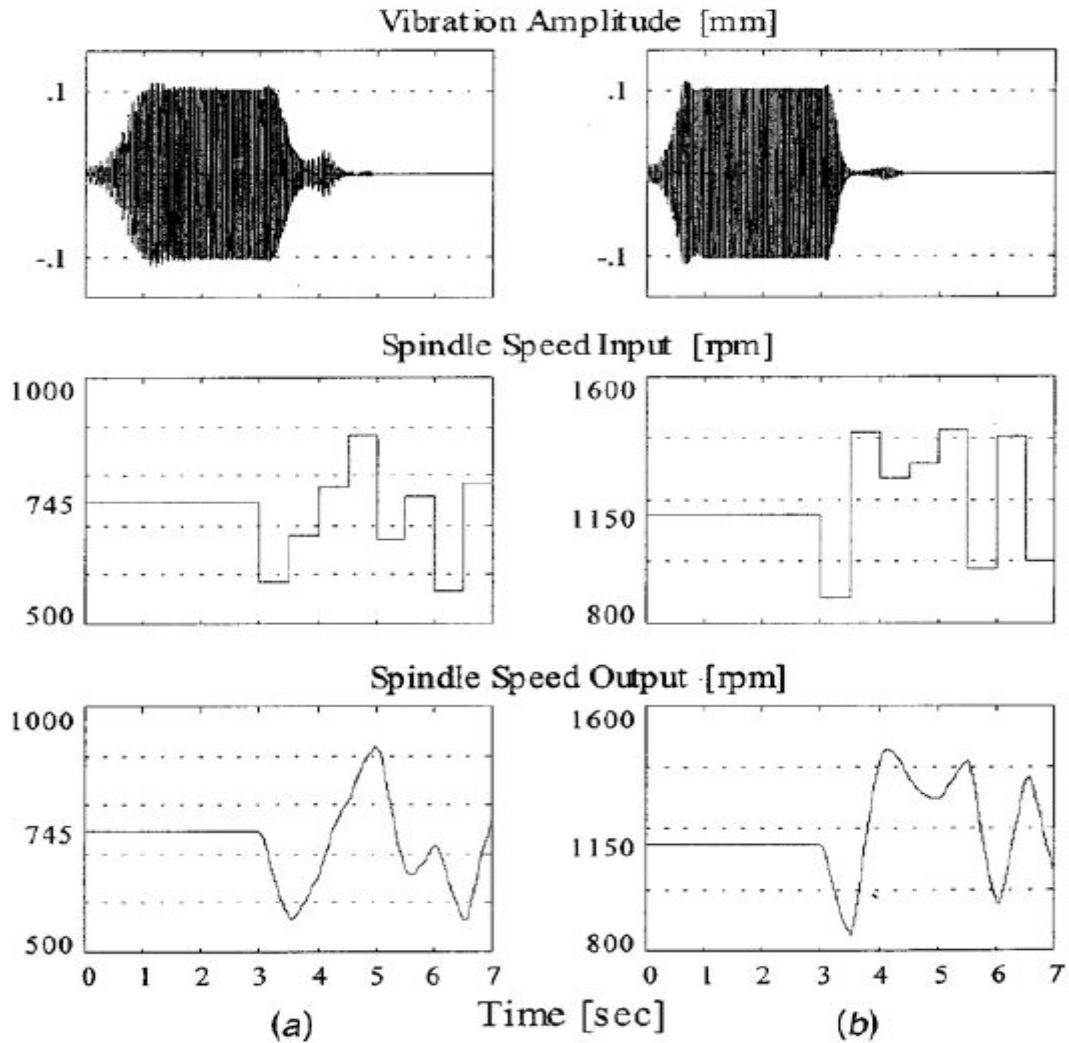
valeur. Le rapport d'amplitude  $\alpha$  est limité par les caractéristiques du système de pilotage, et ne doit donc pas dépasser une certaine valeur.

L'usinage à vitesse de rotation variable peut également faire apparaître des vibrations plus importantes qu'à vitesse constante dans le cas où les paramètres ne sont pas soigneusement déterminés, ce qui implique une parfaite connaissance de la dynamique du système usinant et du système de pilotage de la broche.

Des chercheurs proposent d'appliquer à la broche une variation de vitesse aléatoire et multi-niveaux de la forme [47] :

$$S(t) = S_m [1 + \alpha M(t, z)] \quad (\text{II.11})$$

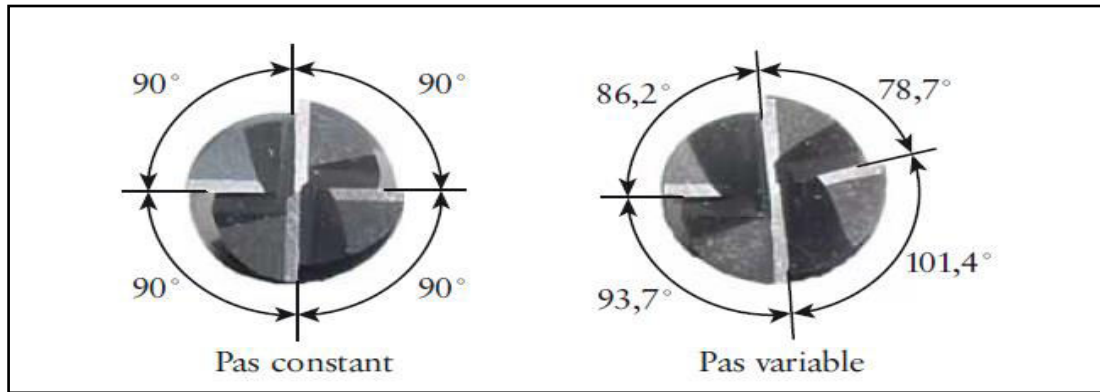
Où  $S_m$  est la valeur moyenne de la vitesse de rotation,  $\alpha$  le rapport d'amplitude maximum autorisé par les caractéristiques de la broche, et  $M(t ; z)$  le terme aléatoire paramétré par  $z$ , le pas de temps uniforme. Cette méthode permet, par rapport à une variation sinusoïdale de la vitesse, d'éviter la mise au point des paramètres. Les auteurs montrent que de bons résultats sont obtenus grâce à cette technique.



**Figure II.10** : Elimination des vibrations par variation de la vitesse de broche [47].

#### II.7.4. Outils de coupe spéciaux

Une autre technique permettant de limiter l'effet régénératif consiste à utiliser des outils de coupe spéciaux. L'utilisation de fraises à pas variable permet pour des outils à plusieurs dents et pour des conditions de coupe données de supprimer les vibrations [57]. Un décalage de la position angulaire entre les différentes dents permet de varier le temps entre deux coups de dent. Donc, la régularité de la coupe est modifiée, et la régénération de la surface en est perturbée [50].



**Figure II.11** : Exemple de fraise à pas régulier et à pas variable [50].

Cette méthode est actuellement peu utilisée en industrie, car elle engendre une augmentation importante du nombre d'outils, peu compatible avec les objectifs de rationalisation des références outil. La technique de fraises à pas variable s'avère particulièrement intéressante dans l'usinage de parois minces [47].

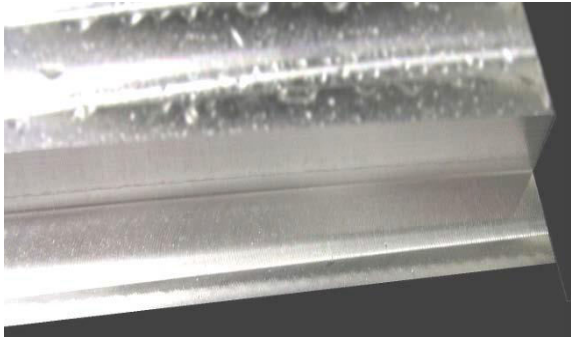
### II.8. Influence du régime de coupe sur les vibrations

H.Yengui[15] a étudié le comportement dynamique du système POM en fraisage, il a identifié les paramètres responsables de l'augmentation des vibrations du système étudié à l'aide de la réalisation d'un plan d'expériences. Ces paramètres sont essentiellement la profondeur de passe et l'avance de coupe. L'augmentation des valeurs de vitesse d'avance et de profondeur de passe possède un grand impact sur l'amplification des vibrations (environ 378,74% par rapport à l'état de référence pour la vitesse d'avance et 416,22% par rapport à l'état de référence pour la profondeur de passe). Tandis que l'augmentation de la valeur de vitesse de coupe n'a pas un grand impact sur l'amplification des vibrations dans les deux directions X et Y (environ 261,85% par rapport à l'état de référence). S.Seguy [50] a été étudié les vibrations en usinage et en particulier en fraisage. Afin de réduire les vibrations, il a développé des solutions pratiques d'optimisation, par une adaptation de la vitesse de rotation de la broche ou encore par une variation continue de la vitesse de rotation.

### II.9. Influence des vibrations sur l'état de surface

Les vibrations, phénomène dit aussi broutement a des beaucoup inconvénients, les vibrations dégradent la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Ils diminuent la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil [21]. Il en existe deux types de vibrations qui influent directement sur l'état de surface, les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau).

Nous avons décrit ces deux types du broutement dans la partie : **II.3**. Différents types de vibrations en usinage.



(a) absence du phénomène de broutement



(b) présence du phénomène de broutement

**Figure II.12** : Etats des surfaces des pièces après usinage [17].

## II.10. Conclusion

L'étude théorique présentée dans ce chapitre permet de soulever diverses problématiques et lacunes, liées aux vibrations d'usinage. Nous avons défini les phénomènes vibratoires qui apparaissent lors d'une opération d'usinage, et nous avons classé ces vibrations en trois types : vibrations libres, vibrations forcées, et vibrations auto-entretenues (régénératives). Ensuite la principale cause du broutement a été étudiée, c'est le phénomène de régénération de surface, qui a des conséquences négatives sur la qualité des pièces usinées. Dans un deuxième temps, nous avons présenté les méthodes d'analyse des vibrations, les méthodes temporelles qui utilisent des indicateurs scalaires, et les méthodes fréquentielles basées sur la transformée de Fourier. Ces méthodes fréquentielles sont souvent utilisées pour les machines comportant beaucoup de composants mécaniques. Des techniques de suppression des vibrations ont été présentées dans ce deuxième chapitre. Enfin nous avons exposé l'influence du régime de coupe sur les vibrations, et aussi des vibrations sur les états des surfaces des pièces.

## Chapitre III : Procédures expérimentales et méthodologies de recherche

### III.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, l'ensemble des outils mis en œuvre pour la réalisation des expériences dans le but de déterminer l'influence des paramètres de coupe sur les vibrations et sur les rugosités des pièces usinées. Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences. Les essais nécessaires à notre étude ont été effectués au niveau du complexe Arcelor Mittal à Annaba, et au laboratoire de mécanique et structures LMS, département de génie mécanique, faculté des sciences de l'ingénierat, université 8 mai 1945 de Guelma.

### III.2. Description du protocole expérimental

#### III.2.1. Machines-outils

L'usinage des deux aciers C45 et 42CrMo4 a été réalisé sur une fraiseuse à commande numérique (TNC 355 de HEIDENHAIN) de marque DX, d'une puissance de 12,2 KW, d'une vitesse maximale de 2000 tr/min et avec rotation de la table de 360°. (figure III.1). L'usinage de l'acier C40 a été effectué sur une fraiseuse universelle (figure III.2).



**Figure III.1:** Fraiseuse à commande numérique.



**Figure III.2:** Fraiseuse universelle.

### III.2.2. Matière à usiner

Les éprouvettes des essais (figure III.3) sont en trois types d'acier :

- acier C45 (XC 48 selon la NF A 35-552) de type non allié pour traitement thermique, est produit et commercialisé principalement sous forme de barres laminées rondes ;
- acier 42CrMo4 est un acier faiblement allié au chrome et au molybdène, est très employé en mécanique, pour des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux, vilebrequins, engrenages etc... ;
- acier C40 est un acier non allié fin.

La composition chimique et les caractéristiques mécaniques de ces aciers sont données dans les tableaux (III.1, III.2 et III.3).



**Figure III.3 :** Eprouvettes d'essai en acier C45, 42CrMo4 et C40.



**Tableau III.1** : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'acier C45.

Composition chimique %						
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr
0.45÷0.49	0.85	0.22	0.024	0.023	0.128	0.45÷0.49

**Tableau III.2** : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'acier 42CrMo4.

Composition chimique %									
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
0,417	0,168	0,668	0,024	0,010	0,139	1,116	0,163	0,197	0,017

**Tableau III.3** : Composition chimique et caractéristiques mécaniques de l'acier C40.

Composition chimique %							
C	Mn	S	P	Si	Cr	Ni	Mo
0,37÷0,44	0,50÷0,80	0,045	0,045	0,40	0,40	0,40	0,10

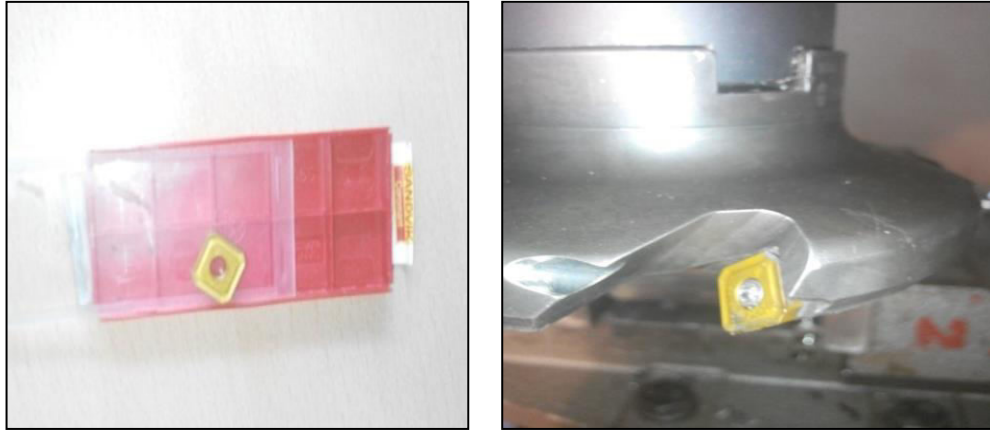
### III.2.3. Outils de coupe

L'usinage sur la machine à commande numérique a été effectué à l'aide des plaquettes de carbure de tungstène P25 ayant une bonne résistance à l'usure avec un revêtement de type TiAlN, cette nuance a été élaborée pour le fraisage à sec de presque tous les matériaux du domaine de l'acier, de la fonte et de matériaux non ferreux.

**Figure III.4** : Photo des plaquettes P25.

Pour l'acier C40, des plaquettes Corom 245 de nuance GC4030 ont été utilisées, elles sont amovible de forme carrée.

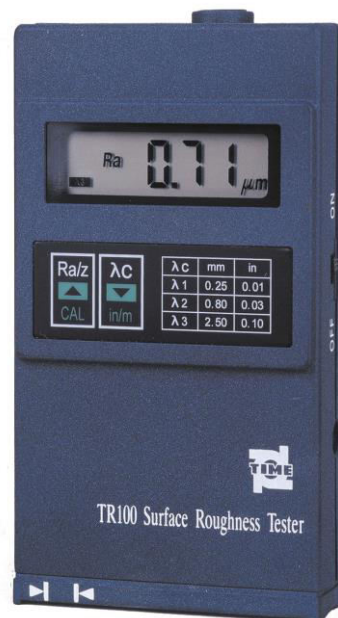




**Figure III.5:** Photo des plaquettes GC4030.

### III.2.4. Appareil de mesure de l'état de surface

La mesure de la rugosité a été réalisée au moyen d'un rugosimètre de type TR100, c'est un appareil compact de mesure rapide et pratique de rugosité Ra et Rz. La mesure est effectuée par un micro-capteur en forme de diamant se déplaçant sur une longueur de 6 mm sur la surface du matériau testé, ayant une vitesse de déplacement de 1 mm/sec et doté d'un système à palpeur inductif. L'étendue de mesure pour Ra est de 0,05 jusqu' à 15  $\mu\text{m}$  et pour Rz est de 0,1 jusqu'à 50  $\mu\text{m}$  (figure III.6).



**Figure III.6:** Rugosimètre TR100.

### III.2.5. Instrument de mesure des vibrations

La mesure des vibrations durant l'opération de surfacage à été effectuée à l'aide d'un vibromètre SCHENCK. Le SmartBalancer de Schenck est un instrument de mesure les vibrations globales et dépister l'analyse de fréquence de FFT. Il constitue de deux canaux de mesure parallèles, et toutes les mesures sont tracées graphiquement. Les résultats peuvent être stockés sur une carte instantanée compacte comme pdf ou peuvent être imprimés.



**Figure III.7:** Vibromètre SCHENCK.

### III.3. Méthodologie de recherche

L'expérience se définit comme suit : "c'est un fait provoqué ou attendu pour vérifier une hypothèse, une loi, et arriver ainsi à une connaissance théorique de la façon dont se passent les choses"[58]. Les étapes de faire des expériences sont :

- la connaissance du problème ou sujet de l'expérience et aussi l'objectif de celle-ci ;
- la définition des variables qui sont la réponse du système aux conditions expérimentales (variables dépendantes) et les variables qui influencent la variation de réponse (variables indépendantes) ;
- réaliser les essais.

Cette manière de réaliser une expérience peut être utilisée aux cas simples (une ou deux variables indépendantes et dépendantes). Mais en général la nature des problèmes nécessite la considération de l'influence d'un grand nombre de variables sur les différentes réponses d'un système. C'est la raison pour laquelle nous sommes obligés d'utiliser un plan d'expérience [58]. Le plan d'expériences est la solution pour la planification d'expériences afin que les

données appropriées soient collectées et que les résultats des analyses statistiques soient valides [13]. La méthode des plans d'expériences permettent :

- une optimisation efficace de n'importe quel élément de la coupe ;
- une visualisation intuitive des effets ;
- une prise en compte des interactions ;
- la réalisation d'un modèle mathématique-empirique du système.

La méthode des plans d'expérience (MPE) cherche à déterminer une relation entre deux types de grandeurs :

- la réponse: qui correspond à la grandeur étudiée ;
- les facteurs: qui correspondent aux grandeurs modifiables par l'expérimentateur et sensées influencer sur les variations de la réponse [59].

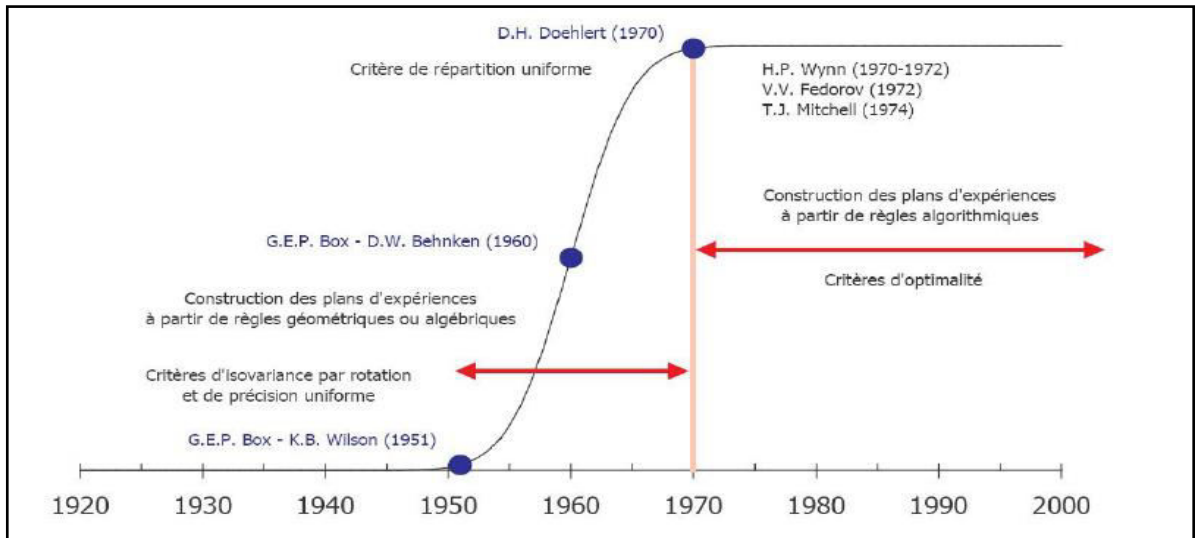
Afin d'étudier l'influence d'un ou plusieurs facteurs d'entrée ( $V_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$ ) sur un paramètre de sortie ( $R_a$  ou RMS) nous pouvons utiliser une des deux méthodes suivantes :

- méthode de surface de réponse (RSM) ;
- méthode de Taguchi.

### **III.3.1. Méthode de surface de réponse (RSM)**

Les plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses sont apparus dans la seconde moitié du XXème siècle [59]. Il s'agit de dispositifs expérimentaux plus coûteux car nécessitant davantage d'essais, mais permettant de répondre à un objectif spécifique qui correspond à la recherche d'un optimum. Le modèle à la construction de ce type de plan est de forme polynomiale du second degré. Les plans mis en place avant 1970 sont utilisables dans des domaines isotropes. En présence d'une ou plusieurs contraintes rationnelles, il faut alors avoir recourt à la recherche d'un plan optimal basée sur l'utilisation d'un algorithme d'échange dont la technique est apparue après 1970. Dans tous les cas, l'analyse des résultats d'essais, passant par le calcul des coefficients du modèle, nécessite la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés.

L'évolution des plans d'expériences pour l'étude de surfaces de réponse s'étend de 1950 à 1970 comme l'indique la figure III.8 :



**Figure III.8 :** Evolution des techniques de surfaces de réponse [59].

La méthodologie de surface de réponse (MSR) permet d'optimiser (maximiser/minimiser) une ou plusieurs variables des réponses [59]. Cette méthodologie a été utilisée et elle a fait ses preuves lors de différentes recherches : les contraintes résiduelles, la rugosité de surface usinée, la durée de vie d'outil, les forces et la puissance de coupe [13]. Le principe est de faire une modélisation de la surface de réponse expérimentale [60]. Elle est utilisée pour déterminer la relation entre les paramètres indépendants du système avec la réponse souhaitée [61], ce qui permet d'explorer l'effet de ces paramètres sur les réponses considérées. La relation entre les conditions de coupe et les paramètres technologiques d'usinage est représentée dans la relation III.1 [62] :

$$Y = f(x_i) \tag{III.1}$$

Où  $Y$  est la réponse désirée,  $f$  est la fonction de réponse, et  $x_i$  représente les paramètres d'entrée.

La méthode de surface de réponse permet à travers un modèle polynomial le plus souvent, de traduire les variations d'une réponse dans un domaine expérimental.

La méthode des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses nous permettra d'obtenir des modèles de la forme suivante [59] :

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i + \sum_{i=1}^k \alpha_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \alpha_{ij} x_i x_j \tag{III.2}$$

Dans lequel :  $\alpha$  représente les coefficients du modèle à identifier ;

$\alpha_0$ : la constante ;

$\alpha_i$ : les coefficients associés aux facteurs ;

$\alpha_{ii}$ : les coefficients associés aux termes quadratiques ;

$\alpha_{ij}$ : les coefficients associés aux interactions d'ordre 1;

$k$ : désigne le nombre de facteurs  $x_i$  pris en considération dans le modèle.

L'approximation de  $Y$  est proposée à l'aide d'un modèle mathématique non linéaire, qui convient pour l'étude des effets des quadratiques ou des interactions des paramètres de régime de coupe sur les caractéristiques d'usinabilité.

### **III.3.2. Méthode de Taguchi**

Dans les années 70, le Docteur Genichi Taguchi a su rendre les plans des expériences plus lisibles et exploitables pour l'industrie où l'on peut les retrouver actuellement à tous les niveaux [62]. La méthode Taguchi a un très bon potentiel pour optimiser les expériences, cribler les variables indépendantes afin de déterminer les niveaux des influences de chacune sur les réponses et prédire les comportements du système observé aux conditions désirables [58]. La méthode de Taguchi consiste à utiliser des tableaux spéciaux nommés "Tableaux orthogonaux" qui diminuent le nombre des expériences [63].

Pour notre étude, et dans la deuxième partie des essais, nous avons utilisé le plan  $L_{16}(3^4)$  : trois facteurs et quatre niveaux.

### **III.3.3. Traitement des résultats**

Il est possible d'estimer la validité des essais par le biais de l'analyse de la variance (ANOVA), l'analyse de régression, l'analyse des surfaces des réponses

#### **III.3.3.1. Analyse de la variance**

L'analyse de la variance, « *Analysis of Variance* » dans la littérature anglosaxonne; son appellation est couramment abrégée en ANOVA. Cette méthode doit son nom au fait qu'elle utilise des mesures de variance afin de juger du caractère significatif ou non. Le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième. Les composantes factorielle et résiduelle seront mathématiquement représentées par des carrés moyens, c'est-à-dire des

variances [59]. En définitive, l'objectif de l'analyse de la variance est de pouvoir tester de manière absolue l'influence des facteurs sur les variations d'une réponse donnée.

Dans notre étude, cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5 % et pour un niveau de confiance de 95 %. Le tableau ANOVA indique les valeurs des degrés de liberté (DF), la somme des carrés des écarts (SS), les moyens des carrés (MS), le test de Fisher ou la propriété statistique (F) et la contribution en pourcentage (PC %) de chaque facteur tels que :

$$SS_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III.3})$$

Où :  $\bar{y} = 1/N \sum_{i=1}^N y_i$  est la moyenne des réponses [61].

$y_i$ : est la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur  $f$  prend son  $i^{\text{ème}}$  niveau.

$N$ : le nombre total des expériences.

$N_{nf}$ : le niveau de chaque facteur  $f$ .

Les moyens des carrés sont déterminés en divisant la somme des carrés des écarts par le degré de liberté [61]:

$$MS_i = \frac{SS_i}{DF_i} \quad (\text{III.4})$$

La valeur de la propriété statistique (F) est calculée par le ratio suivant :

$$F_i = \frac{MS_i}{MSe} \quad (\text{III.5})$$

Avec MSe est le carré moyen résiduel.

La dernière colonne du tableau ANOVA détermine la contribution en pourcentage (PC %) de chaque facteur, ainsi des différentes interactions et quadratiques indiquant le degré d'influence sur les résultats. Plus le pourcentage de contribution (PC %) est grand plus le facteur a un effet sur les paramètres étudiés [64]. La formule de calcul du pourcentage de contribution est de la façon suivante [61] :

$$PC\% = \frac{SS}{SS_{total}} \times 100 \quad (\text{III.6})$$

Avec :  $SS_{total}$  est la somme totale des carrés des écarts.

### III.3.3.2. Analyse de régression

L'analyse de régression des réponses étudiées donne les équations des modèles complets, le coefficient  $R^2$  peut s'interpréter comme le quotient des variances expliqué par la variance des réponses mesurées, ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination varie entre 0 et 1 [59]. Si la valeur du coefficient de détermination  $R^2$  est proche de l'unité, c'est que le modèle est bon et significatif [61,64], c'est-à-dire les réponses calculées par le modèle sont proches de celles mesurées lors de l'expérimentation. Cette valeur se calcule à partir de la relation III.7 [59,64] :

$$R^2 = 1 - \frac{SS\ erreur}{SS\ total} \quad (III.7)$$

Avec : *SS erreur* est la somme des erreurs des carrés des écarts.

### III.3.3.3. Analyse graphique du modèle

L'analyse graphique des résultats des essais permet une restitution plus visuelle des résultats des essais et de leurs analyses.

#### III.3.3.3.1. Graphe des effets moyens

L'effet moyen d'un facteur est la variation de la réponse observée ou modélisée lorsque le facteur change de modalité [59]. Le tracé des effets moyens des facteurs consiste à reporter les valeurs calculées à la dernière ligne de la grille de dépouillement en regard de chacune des modalités des facteurs.

Pour chacun des facteurs, on relie par un trait les moyennes des résultats d'essais correspondant à chacune des modalités.

La représentation des effets par un segment de droite permettant de juger du signe et de l'amplitude de ces derniers est conventionnellement admise dans la littérature et dans la plus part des logiciels. Il ne faut en aucun cas que cette représentation laisse suggérer une quelconque interpolation entre les modalités des facteurs, que ces derniers soit quantitatifs ou qualitatifs.

L'effet moyen d'un facteur est défini à partir de la différence observée ou modélisée d'une variable de réponse, lorsque ce facteur subit un changement de modalité. La grille de dépouillement et le tracé des effets moyens facilitent l'estimation et la visualisation des effets moyens. Le tracé des effets moyens facilite la restitution de l'information.

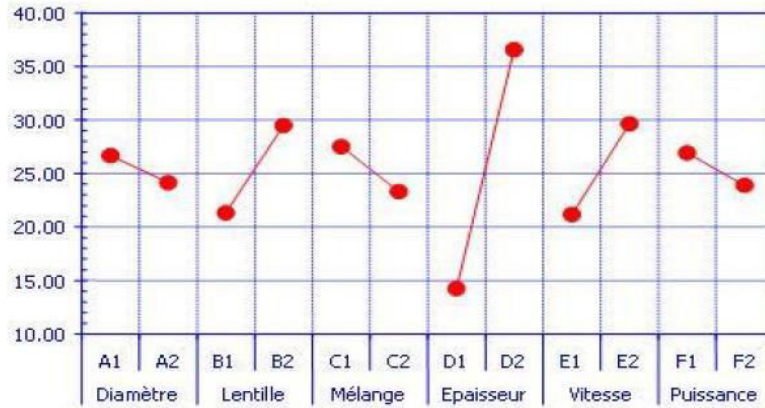


Figure III.9 : Exemple de tracé des effets moyens [59].

### III.3.3.2. Notion des surfaces de réponse

Parmi les grands avantages de la méthode des plans d'expériences est la présentation des résultats sous forme du graphique « la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) ». Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative. La surface de réponse, comme celle présentée en figure III.10, matérialise la surface de régression à partir d'un graphique dans un espace à trois dimensions. Le plan horizontal de la figure matérialise le domaine de variation de deux facteurs ; l'axe vertical matérialise la variation de la réponse à partir du modèle.

Les graphiques permettent également de manière plus communicative lors d'une réunion de tirer plus rapidement des conclusions [59,62].

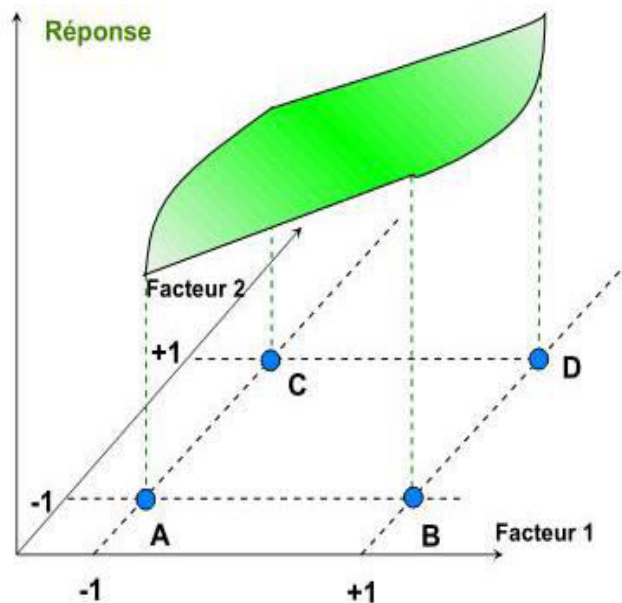


Figure III.10 : Graphe de surface de réponse [65].



#### **III.3.3.4. Validation du modèle**

Pour valider ces modèles, il est nécessaire d'étudier la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurés) et prédites des réponses. Si les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches, on peut conclure que les modèles issus de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats précis.

#### **III.4. Planification des expériences**

Comme nous avons dit au premier chapitre l'usinage à sec est utilisé dans l'industrie manufacturière pour réduire les frais généraux et la protection de l'environnement [7]. Par conséquent, les essais de fraisage ont été réalisés sans refroidissement.

Les expériences sont réalisées en deux parties :

##### **III.4.1. Essais des matériaux C45 et 42CrMo4**

##### **III.4.2. Essais du matériau C40**

Pour étudier l'impact des conditions de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$ ), nous avons utilisé le plan de Taguchi avec trois facteurs de 4 niveaux. La procédure expérimentale consiste à réaliser des passes de surfacage en variant les conditions de coupe et on mesurant les valeurs des rugosités et des vibrations. Dans cette étude, la table orthogonale standard de Taguchi (16 essais) est

adoptée comme plan expérimentale (tableau III.6). Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le tableau III.5 :

**Tableau III.5 :** Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais.

Niveau	Vc (m/min)	Vf (mm/min)	ap (mm)
1	80	50	0,2
2	110	100	0,4
3	160	200	0,8
4	310	400	1,6

**Tableau III.6:** Plan d'expérience de Taguchi pour 16 essais.

N° essai	VC (m/min)	Vf (mm/min)	ap (mm)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les matériaux de coupe, la composition chimique des matériaux usinés, les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été désignées. Dans le chapitre IV qui suit, nous présenterons une analyse des résultats expérimentaux trouvés, lors de l'usinage des trois aciers utilisés dans notre étude.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

### IV.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur les critères de rugosité de surface ( $R_a$  et  $R_z$ ), et les vibrations lors de l'usinage à sec des trois types d'acier : C45, 42CrMo4 et C40. Les expériences relatives au suivi de la rugosité de l'état de surface sur les aciers C45 et 42CrMo4 ont été réalisées au niveau du complexe Arcelor Metal Annaba, alors que celles concernant l'acier C40 ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS), Université 8 mai 1945, Guelma. Nous déterminons les modèles mathématiques qui permettent d'exprimer la relation entre les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$ ) et les paramètres technologiques d'usinage étudiés (rugosité de surface et vibrations). L'analyse de la variance (ANOVA), la détermination des constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse ont été réalisés à l'aide d'un logiciel statistique «*Minitab16*». L'optimisation des conditions de coupe pour les rugosités et les vibrations a été faite par la méthode de surface de réponse.

### IV.2. Analyse des résultats des rugosités

Lors des expériences, nous sommes préoccupés d'étudier également l'influence des éléments du régime de coupe ( $V$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) sur les paramètres de rugosité.

#### IV.2.1. Discussion des résultats de l'usinage de l'acier C45

#### **IV.2.1.1. Analyse de la variance**

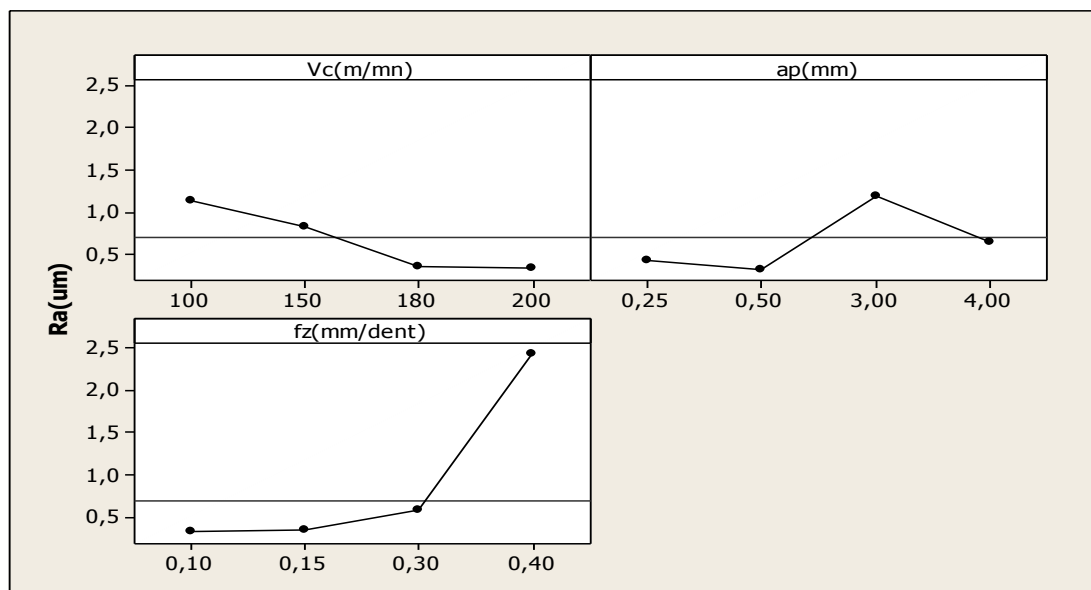
Les résultats présentés dans le tableau IV.2 sont analysés par le logiciel Minitab. 16 en appliquant l'analyse de variance (ANOVA). L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence des paramètres d'entrée sur la rugosité à partir d'une série d'expérience. Cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5 % et pour un niveau de confiance de 95 %. Dans ce tableau sont indiquées les valeurs des degrés de liberté (DF), la somme des carrés des écarts (SS), les carrés moyens (MS), la propriété statistique (F) et la contribution en pourcentage (PC %) de chaque facteur, ainsi que les différentes interactions indiquant le degré d'influence sur les résultats. Plus le pourcentage de contribution (PC %) est grand, plus le facteur a un effet sur le paramètre étudié.

Le tableau IV.2 résume les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité  $R_a$ . D'après ce tableau, le facteur de l'avance par dent a une grande influence sur la rugosité de surface  $R_a$  avec une contribution de 49,71%. Ensuite vient la vitesse de coupe avec une contribution de 28,07%, et en dernier lieu l'interaction  $fz \times \alpha p$  avec une contribution de 9,78%. Des résultats similaires ont été rapportés dans les références [66,67,68].

**Tableau IV.2:** Analyse de variance pour Ra.

Source	DF	SS	MS	F	PC %
<b>Modèle</b>	6	3,65938	0,609896	28,3537	99,42
<b>Vc</b>	1	1,03355	0,014307	0,6651	28,078
<b>ap</b>	1	0,01846	0,146960	6,8321	0,501
<b>fz</b>	1	1,83003	0,005332	0,2479	49,717
<b>Vc×ap</b>	1	0,29795	0,004268	0,1984	8,094
<b>Vc×fz</b>	1	0,11916	0,003526	0,1639	3, 237
<b>ap×fz</b>	1	0,36023	0,360230	16,7469	9, 786
<b>Erreur (ε)</b>	1	0,02151	0,021510		
<b>Total</b>	7	3,68089			

La figure IV.1 illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité Ra. D'après cette figure on remarque que l'avance par dent a un effet significatif sur la rugosité. Plus l'avance augmente, plus l'état de surface augmente. L'augmentation de la vitesse de coupe, diminue de la valeur de la rugosité. Cependant la profondeur de passe ne présente pas un effet important sur la rugosité de surface.

**Figure IV.1:** Les effets moyens de Ra.

#### IV.2.1.2. Analyse de régression du critère de rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe (Vc, fz et ap)

L'analyse de régression de critère de rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe (Vc, fz et ap) donne l'équation du modèle complet IV.1.  $R^2$  est un coefficient de détermination multiple des réponses mesurées. La valeur de  $R^2$  varie entre 0 et 1. Si elle est proche de 1 le modèle est bon et significatif.

L'équation (IV.1) exprime le modèle linéaire avec interaction de la rugosité de surface Ra.

$$\begin{aligned} Ra = & -0,682864 + 0,00887596 Vc - 1,81435 ap - 4,5569 fz - 0,00199795 Vc \times ap \\ & + 0,0225686 Vc \times fz + 7,64262 ap \times fz \end{aligned} \quad (IV.1)$$

$$R^2 = 99,42 \%$$

La valeur du coefficient de détermination ou de corrélation pour le modèle de la composante de la rugosité Ra est égal à 0,99. Cela nous donne que 99,42 % des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 0,58 % restent par conséquent inexpliquées. Cette valeur du coefficient de détermination montre que les mesures des rugosités obtenues sont modélisées de façon très satisfaisante par le modèle obtenu.

#### IV.2.1.3. Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées

Pour valider le modèle, il est nécessaire d'étudier la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) du critère de rugosité et celles estimées (prévues) par le modèle mathématique obtenu. D'après la figure IV.2, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants.

#### **IV.2.1.4. Analyse des surfaces des réponses**

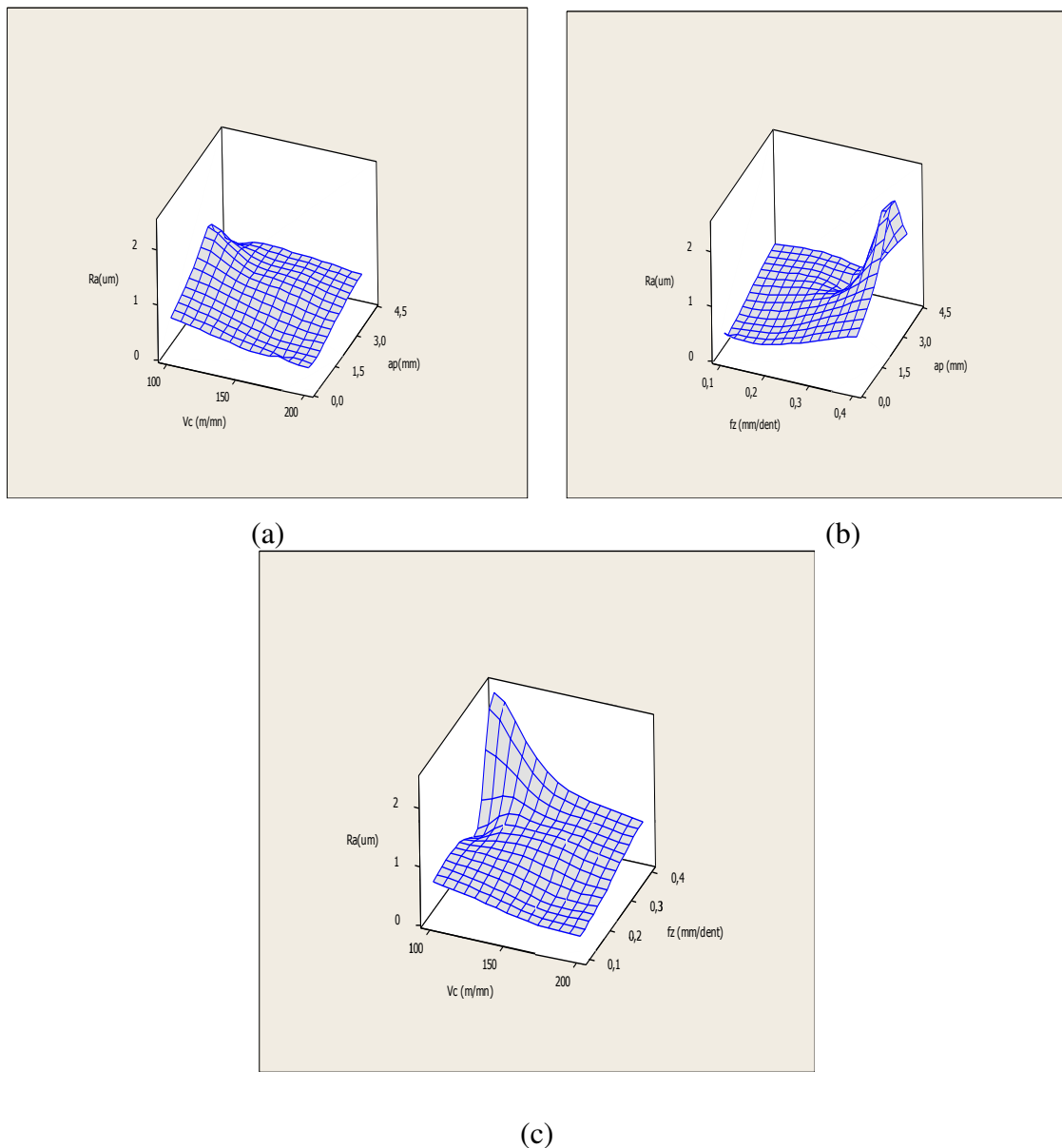
Les surfaces de réponses peuvent présenter les variations des réponses en fonction de seulement deux facteurs à la fois, les autres facteurs étant réglés sur une valeur fixe. La figure IV.3 montre la représentation tridimensionnelle des surfaces des réponses.

La figure IV.3 (a) représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique Ra. D'après cette représentation la combinaison de la profondeur de passe la plus petite et la vitesse de coupe la plus grande donne la meilleure rugosité.



La figure IV.3 (b) représente l'influence de l'avance par dent et la profondeur de passe sur la rugosité. Il apparaît que les avances et les profondeurs les plus petites donnent des rugosités très petites.

La figure IV.3 (c) représente l'influence de l'avance  $f_z$  et la vitesse de coupe  $V_c$  sur la réponse. Cette représentation montre que les rugosités sont minimums lorsque les vitesses sont plus grandes et les avances sont plus petites.



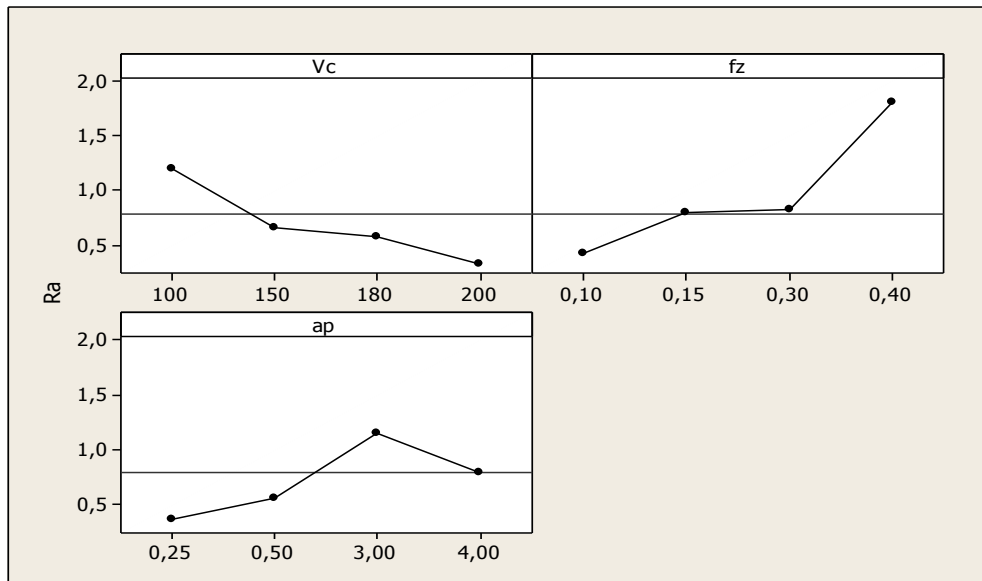
**Figure IV.3:** Surfaces de réponse pour  $R_a$ .

#### IV.2.1.5. Optimisation des conditions de coupe pour la rugosité de surface $R_a$

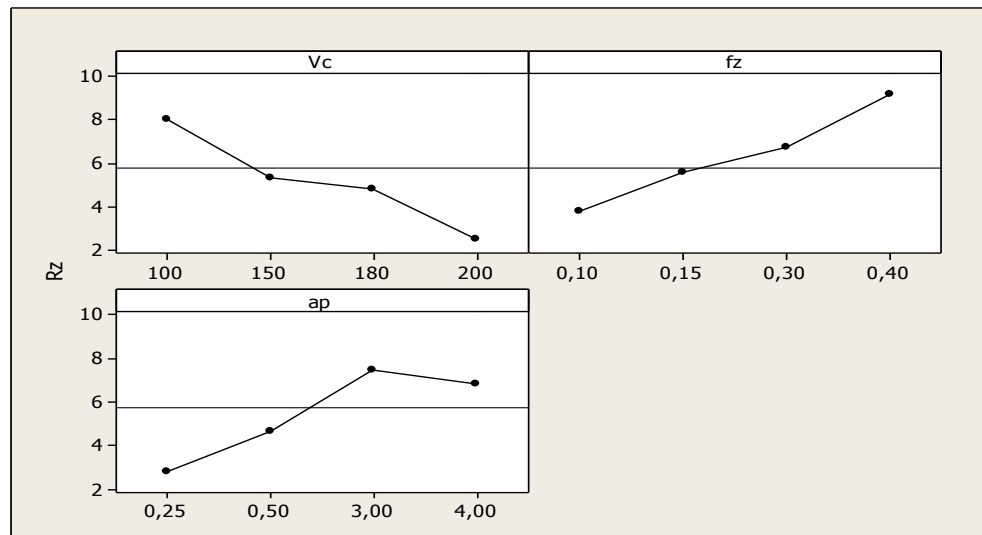
#### **IV.2.2. Discussion des résultats de l'usinage de l'acier 42CrMo4**

L'influence des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe sur les rugosités ( $R_a$  et  $R_z$ ), sont portés sur les figures IV.5 et IV.6.

D'après ces deux figures, on remarque que les rugosités ( $R_a$  et  $R_z$ ) augmentent avec l'accroissement de l'avance par dent et la diminution de la vitesse de coupe. Des résultats similaires ont été trouvés dans les travaux [69,70]. Donc pour atteindre une meilleure rugosité, on doit choisir les bonnes valeurs des vitesses de coupe et des vitesses d'avance [71].



**Figure IV.5:** Les effets moyens de Ra (acier 42CrMo4).



**Figure IV.6:** Les effets moyens de Rz (acier 42CrMo4).

#### IV.2.2.1. Analyse de la variance

Les tableaux IV.7 et IV.8 présentent les résultats de l'analyse de variance de l'acier 42CrMo4 pour les deux critères de rugosité (Ra et Rz). D'après le tableau IV.7, on peut voir la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus important qui affecte Ra, ce résultat est en parfaite conformité avec les conclusions citées dans la littérature [72]. La contribution de la vitesse de coupe est 56,55%, suivi par les contributions de la profondeur de passe et l'avance par dent qui sont : 25,30 % et 12,30 % respectivement. Les interactions ( $V_c \times f_z$ ,  $V_c \times a_p$  et  $f_z \times a_p$ ) n'ont pas d'influence significative.

**Tableau IV.7:** Analyse de variance pour Ra.

Coefficients de régression estimés pour Ra		Analyse de variance pour la rugosité Ra					
Termes	Coefficients	Source	DF	SS	MS	F	PC %
<b>Constante</b>	-0,43454	<b>Modèle</b>	6	1,47101	0,245169	4,08114	96,07
<b>Vc</b>	0,00198	<b>Vc</b>	1	0,86586	0,000714	0,01188	56,55
<b>fz</b>	7,99989	<b>fz</b>	1	0,18844	0,016432	0,27353	12,30
<b>ap</b>	0,02420	<b>ap</b>	1	0,38742	0,000026	0,00044	25,30
<b>Vcxfz</b>	-0,00494	<b>Vcxfz</b>	1	0,02046	0,000169	0,00281	1,34
<b>Vc×ap</b>	-0,00281	<b>Vc×ap</b>	1	0,00861	0,008415	0,14007	0,56
<b>fz×ap</b>	-0,18741	<b>fz×ap</b>	1	0,00022	0,000217	0,00361	0,014
		<b>Erreur (ε)</b>	1	0,06007	0,060074		
		<b>Total</b>	7	1,53109			

Le tableau IV.8 résume les résultats d'analyse de la variance **ANOVA** pour la rugosité Rz. Le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface Rz est la vitesse de coupe avec une contribution très élevée de 72,28 %, suivi par la profondeur de passe et l'interaction fz×ap avec des contributions de 7,70 % et 1,24 % respectivement, l'avance par dent affecte la rugosité avec une contribution de 1,13 %.

**Tableau IV.8** : Analyse de variance pour Rz.

Coefficients de régression estimés pour Ra		Analyse de variance pour la rugosité Rz					
Termes	Coefficients	Source	DF	SS	MS	F	PC %
<b>Constante</b>	12,1389	<b>Modèle</b>	6	31,1725	5,19541	0,837117	83,40
<b>Vc</b>	-0,0547	<b>Vc</b>	1	27,0161	0,54266	0,087436	72,28
<b>fz</b>	41,4090	<b>fz</b>	1	0,4240	0,44026	0,070938	1,13
<b>ap</b>	-0,6371	<b>ap</b>	1	2,8780	0,01812	0,002920	7,70
<b>Vcxfz</b>	-0,1296	<b>Vcxfz</b>	1	0,2950	0,11628	0,018735	0,79
<b>Vc×ap</b>	0,0106	<b>Vc×ap</b>	1	0,0936	0,12051	0,019417	0,25
<b>fz×ap</b>	-8,6894	<b>fz×ap</b>	1	0,4657	0,46566	0,075031	1,24
		<b>Erreur (ε)</b>	1	6,2063	6,20632		
		<b>Total</b>	7	37,3788			

#### IV.2.2.2. Analyses de régression des critères de rugosité

L'analyse de régression des critères de rugosité (Ra et Rz) en fonction du régime de coupe (Vc, fz et ap) donne les équations des modèles complets IV.2 et IV.3. Les coefficients des modèles mathématiques des rugosités Ra et Rz sont mentionnés dans les tableaux IV.7 et IV.8 respectivement.

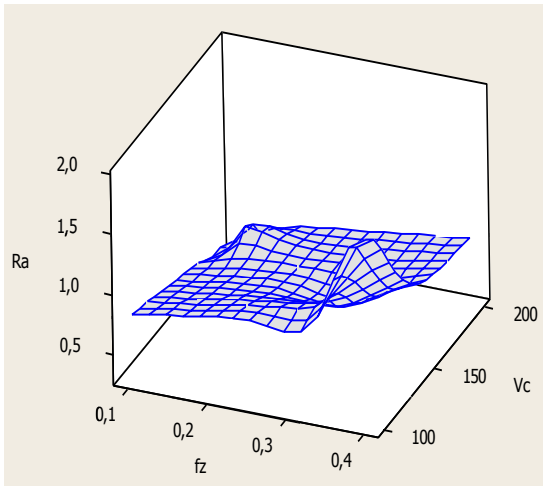
$$\begin{aligned} Ra = & -0,434537 + 0,00198273 Vc + 7,99989 fz + 0,024201 ap - 0,00493852 Vcxfz \\ & - 0,00280526 Vc×ap - 0,187408 fz×ap \end{aligned} \quad (IV.2)$$

$$\begin{aligned} Rz = & 12,1389 - 0,0546648 Vc + 41,409 fz - 0,637103 ap - 0,129598 Vcxfz + \\ & 0,010616 Vc×ap - 8,68938 fz×ap \end{aligned} \quad (IV.3)$$

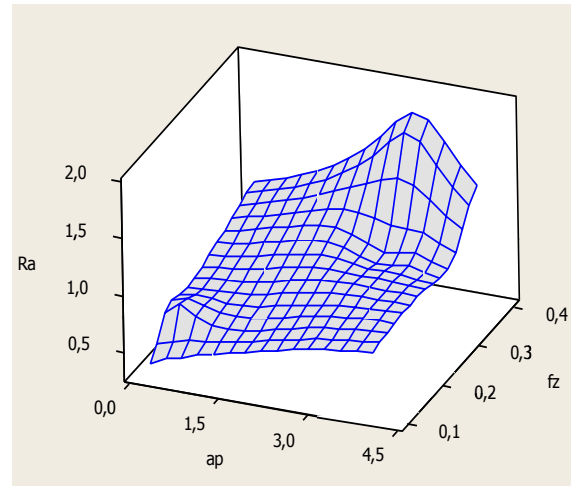
Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des composantes de la rugosité sont :  $R^2 = 96,08\%$  pour la rugosité Ra et  $R^2 = 83,40\%$  pour la rugosité Rz. Les valeurs du coefficient de corrélation sont élevées, donc les modèles relativement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentales.

#### **IV.2.2.3. Analyse des surfaces des réponses**

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de passe) sur les critères de rugosité  $Ra$  et  $Rz$ , les surfaces de réponse (3D) sont tracés dans les figures IV.9 et IV.10. Les résultats d'ANOVA montrent que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur l'évolution de la rugosité de surface. À partir du tracé des interactions, on peut observer que, les rugosités de surface ( $Ra$  et  $Rz$ ) diminuent rapidement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, et la diminution de l'avance par dent.

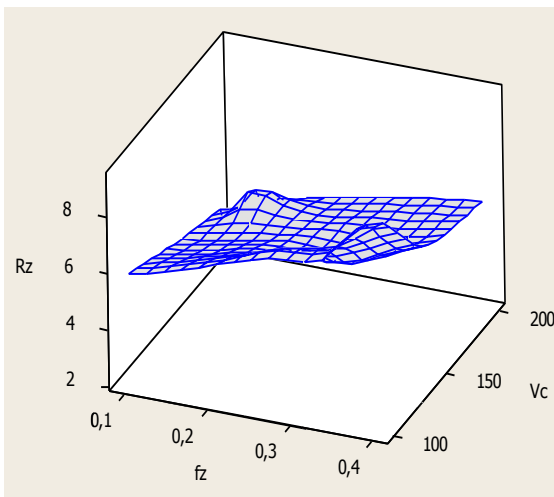


(a)

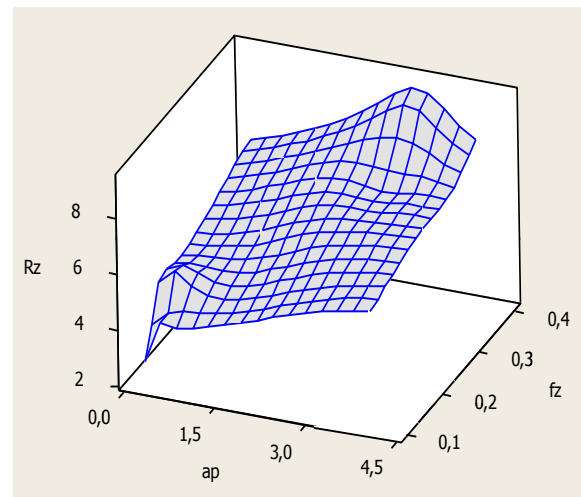


(b)

**Figure IV.9:** Surfaces de réponse pour Ra.



(a)



(b)

**Figure IV.10:** Surfaces de réponse pour Rz.

**IV.2.2.4. Optimisation des conditions de coupe pour les critères de rugosité (Ra et Rz)**





### IV.3. Analyse des résultats des vibrations

Les résultats des vibrations concernant l'acier C40 sont montrés dans le tableau IV.11.

$Arms_x$ : indique les vibrations suivant l'axe longitudinal.

$Arms_y$  : indique les vibrations suivant l'axe transversal.

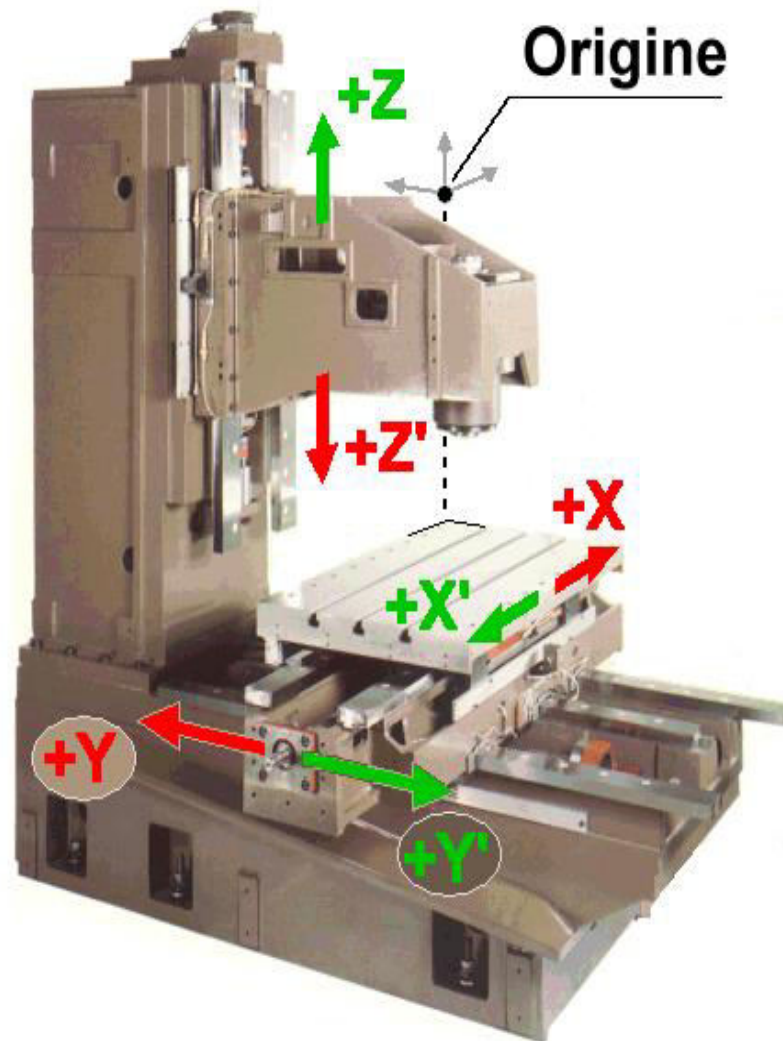


Figure IV.12: Axes de la fraiseuse.

**Tableau IV.11:** Résultats des essais des deux critères des vibrations.

N° Essai	Vc (m/min)	Vf (mm/min)	ap (mm)	Arms <sub>x</sub> (m/s <sup>2</sup> )	Arms <sub>y</sub> (m/s <sup>2</sup> )
1	80	50	0,2	0,672	0,751
2	80	100	0,4	1,307	1,092
3	80	200	0,8	1,388	1,303
4	80	400	1,6	2,346	2,296
5	110	50	0,4	0,795	0,821
6	110	100	0,2	0,842	0,852
7	110	200	1,6	1,925	2,735
8	110	400	0,8	2,697	2,059
9	160	50	0,8	0,919	1,299
10	160	100	1,6	1,904	3,131
11	160	200	0,2	1,272	1,335
12	160	400	0,4	2,051	2,095
13	310	50	1,6	3,687	4,521
14	310	100	0,8	2,664	3,759
15	310	200	0,4	3,017	3,343
16	310	400	0,2	3,37	3,917

L'influence des différentes combinaisons des éléments du régime de coupe sur les critères de vibrations (Arms<sub>x</sub> et Arms<sub>y</sub>), sont portés sur les figures IV.13 et IV.14.

Les résultats obtenus dans la figure IV.13 montrent que la valeur de l'amplitude des vibrations suivant l'axe longitudinal s'augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe, et on voit ça clairement entre les vitesses 160 m/min et 310 m/min. De même l'accroissement de la vitesse d'avance et la profondeur de passe entraînant l'augmentation des vibrations (Arms<sub>x</sub>).

La figure IV.14 présente l'effet des paramètres de coupe sur les vibrations suivant l'axe transversal, on voit que la vitesse d'avance n'a pas un effet significatif sur les vibrations  $Arms_y$ , par contre les deux autres paramètres ( $V_c$  et  $ap$ ) ont un effet considérable sur le critère de vibration. On remarque que les amplitudes des vibrations ( $Arms_y$ ) augmentent avec l'augmentation de la vitesse de coupe et la profondeur.

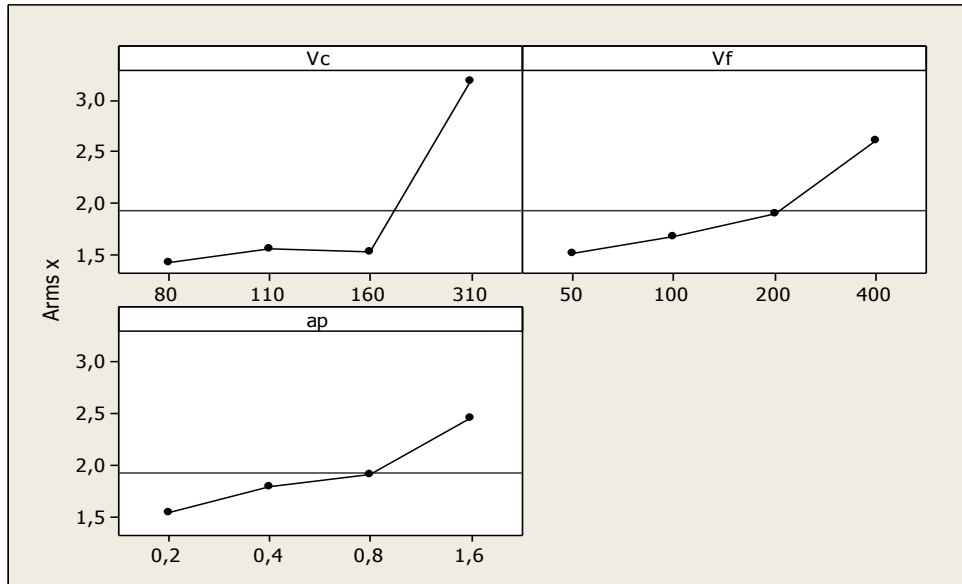


Figure IV.13: Les effets moyens de  $Arms_x$ .

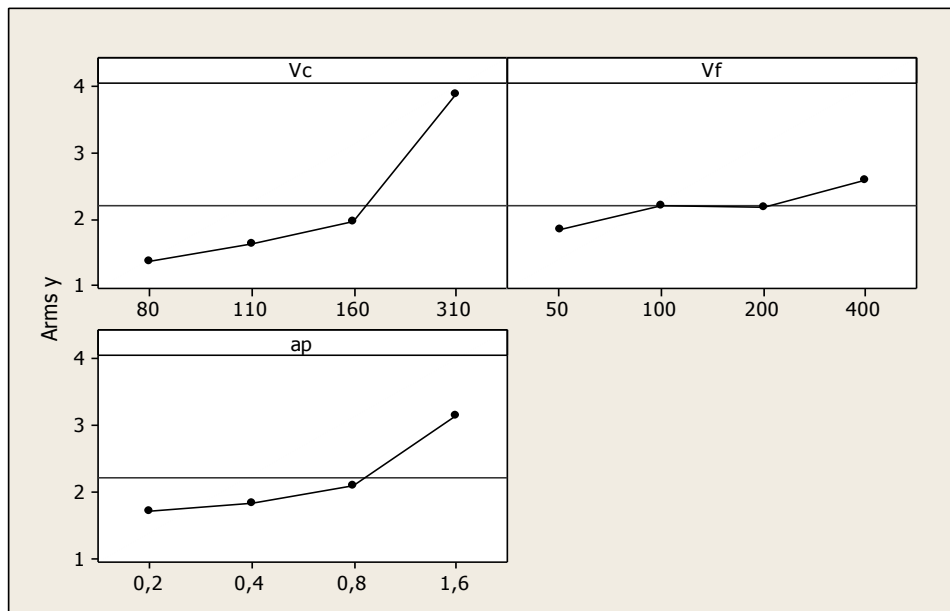


Figure IV.14: Les effets moyens de  $Arms_y$ .

### IV.3.1. Analyse de la variance

Les tableaux IV.12 et IV.13 présentent les résultats de l'analyse de variance de l'acier C40. D'après le tableau IV.12, on peut voir qu'apparemment la vitesse de coupe ( $V_c$ ) est le facteur le plus important qui affecte  $Arms_x$ . Sa contribution est 56,12% ; suivi par la vitesse d'avance et la profondeur de passe avec des contributions de 20,16% et 12,94% respectivement. En dernier lieu vient le quadratique  $V_c \times V_c$  avec une contribution de 3,17%.

**Tableau IV.12:** Analyse de variance pour  $Arms_x$ .

Coefficients de régression estimés pour $Arms_x$		Analyse de variance pour la rugosité $Arms_x$					
Termes	Coefficients	Source	DF	SS	MS	F	PC %
<b>Constante</b>	1,55819	<b>Modèle</b>	9	13,5248	1,50276	27,8044	97,65
<b>Vc</b>	-0,00910	<b>Vc</b>	1	7,7719	0,09254	1,7123	56,12
<b>Vf</b>	-0,00476	<b>Vf</b>	1	2,7915	0,01873	0,3466	20,16
<b>ap</b>	-2,46418	<b>ap</b>	1	1,7916	0,08025	1,4848	12,94
<b>Vc × Vf</b>	0,00012	<b>Vc × Vf</b>	1	0,0384	0,010272	1,9006	0,28
<b>Vc × ap</b>	0,03442	<b>Vc × ap</b>	1	0,3834	0,13129	2,4292	2,77
<b>Vf × ap</b>	0,01763	<b>Vf × ap</b>	1	0,1970	0,09098	1,6834	1,42
<b>Vc × Vc</b>	-0,00006	<b>Vc × Vc</b>	1	0,4398	0,02979	0,5512	3,17
<b>Vf × Vf</b>	-0,00004	<b>Vf × Vf</b>	1	0,0122	0,11069	2,0481	0,09
<b>ap × ap</b>	-2,25101	<b>ap × ap</b>	1	0,0991	0,09908	1,8332	0,71
		<b>Erreur</b>	6	0,3243	0,05405		
		<b>Total</b>	15	13,8491			

Le tableau IV.13 résume les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour les vibrations transversales. Le facteur le plus important qui affecte la vibration  $Arms_y$  est la vitesse de coupe avec une contribution très élevée de (68,62 %), suivi par la profondeur de passe avec un pourcentage de contribution égale à 22,63. Et comme nous l'avons vu

précédemment au graphe des effets moyens, la vitesse d'avance n'a pas un effet significatif sur les vibrations suivant l'axe transversal. Ainsi que les autres facteurs n'ont pas un effet considérable.

**Tableau IV.13:** Analyse de variance pour  $Arms_y$ .

Coefficients de régression estimés pour $Arms_y$		Analyse de variance pour la rugosité $Arms_y$					
Termes	Coefficients	Source	DF	SS	MS	F	PC %
Constante	0,613635	Modèle	9	22,2969	2,47743	39,3033	98,33
Vc	0,003187	Vc	1	15,5599	0,01135	0,1801	68,62
Vf	-0,000502	Vf	1	0,9498	0,00021	0,0033	4,19
ap	-0,330378	ap	1	5,1314	0,00144	0,0229	22,63
Vc × Vf	0,000055	Vc×Vf	1	0,1982	0,02097	0,3327	0,87
Vc × ap	0,013064	Vc × ap	1	0,1686	0,01892	0,3001	0,74
Vf × ap	0,005415	Vf × ap	1	0,0436	0,00858	0,1361	0,19
Vc × Vc	-0,000007	Vc × Vc	1	0,1581	0,00052	0,0082	0,70
Vf × Vf	-0,000017	Vf×Vf	1	0,0815	0,02198	0,3487	0,36
ap × ap	-0,542037	ap×ap	1	0,0057	0,00575	0,0911	0,02
		Erreur	6	0,3782	0,06303		
		Total	15	22,6751			

### IV.3.2. Analyses de régression des critères des vibrations

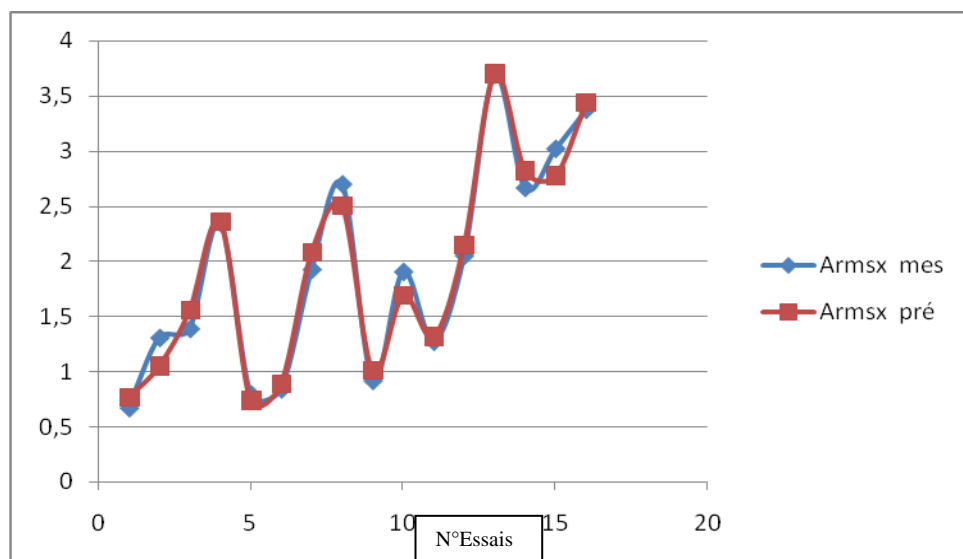
L'analyse de régression des critères des vibrations ( $Arms_x$  et  $Arms_y$ ) en fonction du régime de coupe (Vc, Vf et ap) donne les équations des modèles complets IV.4 et IV.5. Les coefficients des modèles quadratiques des vibrations suivant l'axe longitudinal et les vibrations suivant l'axe transversal sont mentionnés dans les tableaux IV.12 et IV.13 respectivement.

$$\begin{aligned} \text{Arms}_x = & 1,55819 - 0,00909845 V_c - 0,00476209 V_f - 2,46418 a_p - 5,5853e-005 \\ & V_c \times V_c + 0,000121772 V_c \times V_f + 0,0344171 V_c \times a_p - 3,80681e-005 V_f \times V_f + \\ & 0,0176321 V_f \times a_p - 2,25101 a_p \times a_p \end{aligned} \quad (\text{IV.4})$$

$$\begin{aligned} \text{Arms}_y = & 0,613635 - 0,00318671 V_c - 0,000501933 V_f - 0,330378 a_p - 7,34749e-006 \\ & V_c \times V_c + 5,50177e-005 V_c \times V_f + 0,0130643 V_c \times a_p - 1,6963e-005 V_f \times V_f + \\ & 0,00541502 V_f \times a_p - 0,542037 a_p \times a_p \end{aligned} \quad (\text{IV.5})$$

Les valeurs des coefficients de détermination pour les modèles des composantes des vibrations  $\text{Arms}_x$  et  $\text{Arms}_y$  sont :  $R^2 = 97,66\%$  et  $R^2 = 98,33\%$  respectivement. Les valeurs du coefficient de corrélation sont très élevées, donc les modèles relativement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentales.

Les figures IV.15 et IV.16 montrent que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées des deux critères des vibrations sont très proches, ce qui permet de conclure que les modèles étudiés par la méthodologie de surface de réponse (MSR) donnent des résultats efficaces.



**Figure IV.15:** Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour  $\text{Arms}_x$ .

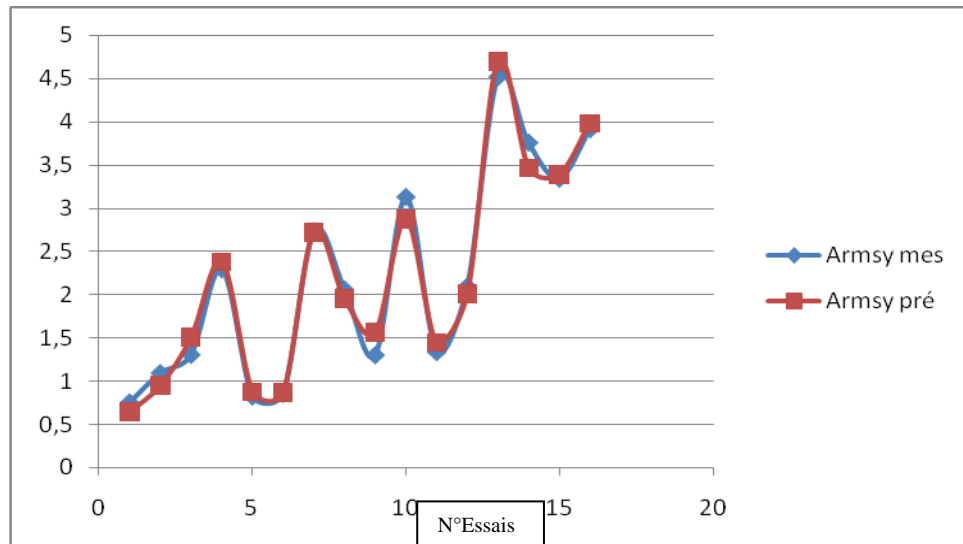


Figure IV.16: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Arms<sub>y</sub>.

### IV.3.3. Analyse des surfaces des réponses

Pour étudier l'influence des paramètres de coupe (la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe) sur les critères des vibrations, les surfaces de réponse (3D) sont tracés dans les figures IV.17 et IV.18. Les résultats d'ANOVA montrent que la vitesse de coupe est le facteur le plus influent sur l'évolution des vibrations. À partir du tracé des interactions (figures IV.16 et IV.17), on peut observer que, les vibrations Arms<sub>x</sub> augmentent rapidement avec l'augmentation de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance, et les valeurs minimums des vibrations Arms<sub>y</sub> sont obtenues pour les faibles valeurs des vitesses de coupe avec les faibles valeurs des profondeurs de passe

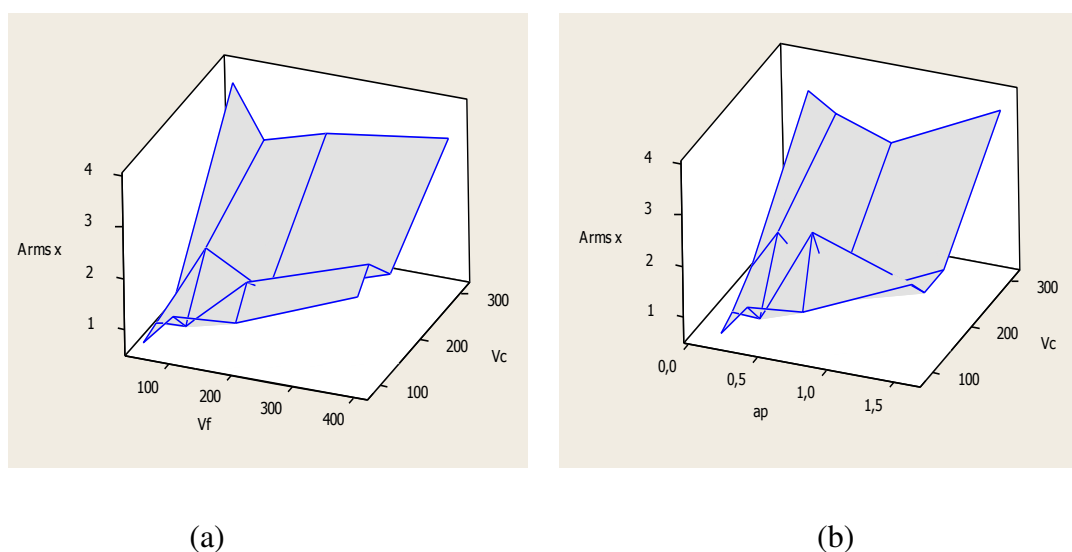
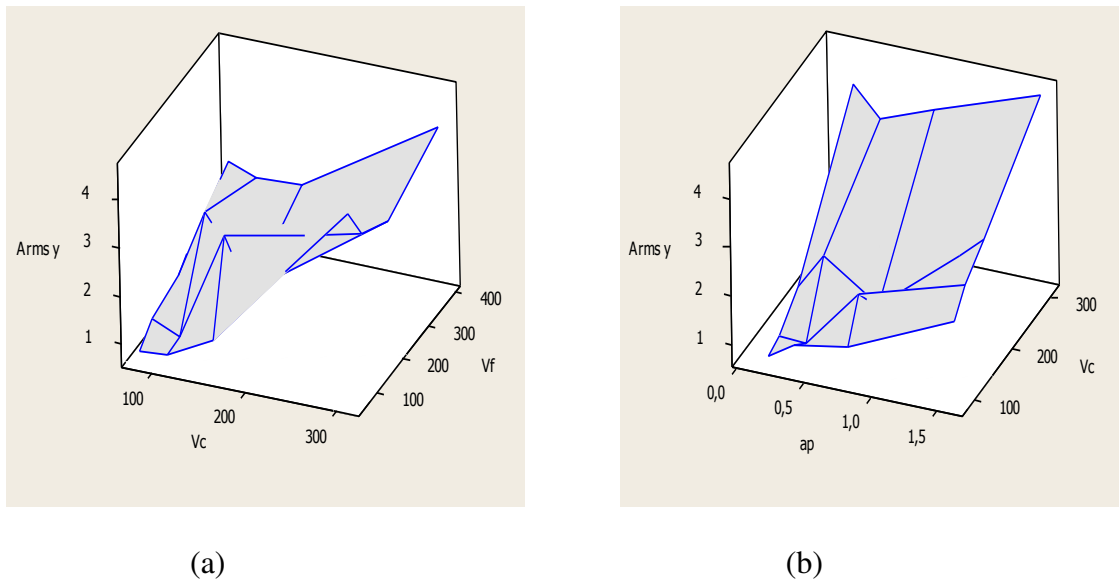


Figure IV.17: Surfaces de réponse pour Arms<sub>x</sub>.





**Figure IV.18:** Surfaces de réponse pour  $Arms_y$ .

#### IV.3.4. Optimisation des conditions de coupe pour les critères des vibrations

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, l'application de l'analyse de la variance ANOVA, l'analyse de régression en fraisage des trois aciers : C45, 42CrMo4 et C40 a permis d'obtenir des modèles mathématiques avec interactions et quadratiques pour les critères de la rugosité de surface ( $R_a$ , et  $R_z$ ), et pour les composantes de l'accélération ( $Arms_x$  et  $Arms_y$ ) en fonction des paramètres d'usinage. L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- l'analyse statistique de la variance ANOVA a confirmé que l'avance par dent ( $f_z$ ) a la plus forte influence sur le critère de rugosité de surface ( $R_a$ ) pour l'acier C45 suivi par la vitesse de coupe ( $V_c$ ). Les influences sont 49,717%, 28,078% respectivement ;

- pour l'acier 42CrMo4, la vitesse de coupe a la plus forte influence sur les deux critères de rugosité de surface, les influences sont : 56,55 % pour la rugosité Ra et 72,28 % pour la rugosité Rz ;
- l'analyse de la variance des données d'usinage a confirmé que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) possède l'influence la plus élevée sur les vibrations avec des contributions (  $Arms_x$  : 56,12 %,  $Arms_y$  : 68,62 %) suivi par la vitesse d'avance ( $V_f$ ) pour le critère  $Arms_x$  avec un pourcentage de contribution de 20,16 %, et par la profondeur de passe ( $a_p$ ) pour le critère  $Arms_y$  avec une contribution de 22,63 % ;
- la comparaison des résultats expérimentaux et ceux estimés par le modèle MSR montre clairement que le modèles issu d'usinage de l'acier C45 donne des résultats excellents ( $R^2$  (Ra)= 99,42 %) par rapport au modèle issu d'usinage de l'acier 42CrMo4 ( $R^2$  (Ra)= 96,08 %).

## Conclusions générales et perspectives

Les travaux effectués dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'étude des influences des paramètres de coupe discontinu sur les critères de rugosité et des vibrations. Cette étude est basée sur une investigation expérimentale du procédé d'usinage des matériaux par le fraisage. Elle a été menée suivant deux axes principaux. Le premier est relatif à l'étude des rugosités des pièces et le deuxième correspond aux vibrations pendant l'usinage. Les expériences ont été menées conformément à la méthode de Taguchi combinée avec la méthode de surface de réponse. Un plan de huit expériences a été adopté pour l'étude de rugosité, et un autre de 16 essais a été mené pour l'analyse des vibrations. Les essais ont été réalisés sur trois types différents d'aciers. Ces matériaux sont très employés dans l'industrie mécanique.

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

- Les meilleures rugosités de surface ont été obtenues pour les faibles valeurs des avances et de grandes valeurs des vitesses de coupe.
- La profondeur de passe n'a pas un effet considérable sur les critères de rugosité, sauf pour la rugosité arithmétique ( $R_a$ ) de l'acier 42CrMo4 où il a un effet considérable avec un pourcentage de contribution (25,30%).
- En comparant les valeurs expérimentales et prédites des critères de rugosité pour les deux matériaux (C45 et 42CrMo4), on remarque qu'ils sont en bonne corrélation.
- Les coefficients de déterminations ( $R^2$ ) des différents modèles sont élevés, ce qui prouve que ces modèles sont en bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.
- L'analyse graphique des surfaces des réponses montre que les meilleures valeurs des vibrations suivant l'axe longitudinal sont obtenues pour les faibles valeurs des vitesses de coupe et des vitesses d'avance. Ainsi que les meilleures valeurs des vibrations suivant l'axe transversal sont obtenues pour les faibles valeurs des vitesses de coupe et les faibles valeurs des profondeurs de passe.
- L'optimisation par la méthode de surface de réponse (MSR) permet de déterminer les conditions de coupe acceptables par rapport aux critères de rugosité et des vibrations.

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

- Etude de l'évolution de la température de coupe et des contraintes résiduelles en fonction des conditions de coupe.
- Etude des influences des paramètres de coupe sur les rugosités en fraisage avec micro-lubrification et micro-pulvérisation localisée.
- L'application des autres méthodes d'optimisation telle que (La logique floue et les algorithmes génétiques etc.).
- Etude de l'influence des paramètres de coupe sur l'usinabilité des aciers.

---

## Références bibliographiques

- [1] **A.Lagred.** Contribution à l'analyse du comportement dynamique des structures des éléments des machines. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2010
- [2] **L.R. Castro Martinez.** Identification des sources de vibration en usinage. Etude expérimentale et numérique. Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine – Metz. France. 2006.
- [3] **M.Benghersallah.** Recherche sur le fraisage des matériaux durs avec les matières de coupe modernes : Application à l'UGV des superalliages. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2010.
- [4] **T.Erkan.** Méthodes de suivi de l'état des machines-outils par palpation d'artefacts. Thèse de doctorat. Université de Montréal. 2010.
- [5] **L.Laouar.** Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 Optimisation et caractérisation. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba .Algérie. 2007.
- [6] **S.Mekhilef.** Etude des nouveaux matériaux de coupe et Leur aptitude à l'usinage. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2007.
- [7] **L.Boumeribaa.** Etude de l'effet de la variabilité du matériau des fraises sur le comportement micro-géométrique des pièces usinées. Thèse de magister. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2011.
- [8] **A.M-Pantel.** Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : applications à l'identification paramétrique des lois de comportement. Thèse de doctorat. Université de Franche-Comté. 2009.
- [9] **S.Belhadi.** Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : Etude expérimentale de la formation du copeau. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2009.
- [10] **N.Guillemot.** Prise en compte de l'intégrité de surface pour la prévision de la tenue en fatigue de pièces usinées en fraisage. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan. 2010.
- [11] **J.D.Puerta Velasquez.** Étude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V. Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine de Metz. 2007.
- [12] **W. Bouzid, A. Zghal, L. Saï.** Optimisation de la rugosité des surfaces fraisées. Revue de Mécanique Appliquée et Théorique. Vol. 1, 5. 341-356. 2003.
- [13] **A. Hadj Ali.** Étude de l'influence des conditions de coupe en usinage 5 axes sur l'intégrité des surfaces par la méthode des surfaces de réponse. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure. Université du Québec. Montréal. 2005.

- [14] **F.Girardin.** Etude de l'usinage des matériaux performants et surveillance de l'usinage. Thèse de doctorat. Institut National des sciences appliquées de Lyon. 2010.
- [15] **H.Yengui .** Modélisation du comportement dynamique non linéaire d'un système machine – outil – pièce lors d'une opération de fraisage. Thèse de doctorat. Ecole centrale des arts et manufactures « Ecole Centrale Paris ». 2010-2011.
- [16]**N.Zeghichi.** Optimisation multicritère des conditions de coupe en fraisage par algorithmes génétiques et la méthode de Nelder Mead. Thèse de magister. Université de Biskra. 2004-2005.
- [17] **A.Ben Ali.** Modélisation et simulation du broutement pour l'opération du fraisage en utilisant un modèle de force de coupe prédictive. Thèse de magister. Université de Batna. 2012.
- [18] **M.A.Yalesse.** Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 2005.
- [19] **S.Benchiheb.** Etude de l'interaction « outil - pièce » lors de l'usinage des matériaux durcis. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 2010.
- [20] **B. Vasques.** Etude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage à sec. Thèse de doctorat. Université François –Rabelais de Tours. 2008.
- [21] **N.Chouikhi.** Diagnostic des états de surface par analyse vibratoire dans les procédés d'usinage. Thèse de magister. Université Badji Mokhtar Annaba.Algérie. 2008.
- [22] **A.Sebhi.** Etude tribologique des outils de coupe et aciers. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbès – Sétif. 2013.
- [23] **R.Mohammad.** Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2011.
- [24] **F.Mahfoudi .**Etude de l'influence de la machine-outil sur les paramètres technologiques en particulier lors de l'usinage des matériaux durs. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie.2010.
- [25] **D.Iliescu.**Approches expérimentale et numérique de l'usinage a sec des composites carbone/epoxy. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 2008.
- [26] **V.Wagner.** Amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire : le Ti5553. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2011.
- [27] **N.Belhamra.** Réalisations et caractérisations de revêtements durs à base de nitrures et de carbures : Applications à l'usinage des métaux. Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en sciences. Université Mohamed Khider – Biskra. 2014.

- [28] **M.Al-Ahmad**. Industrialisation de procédé : contribution à la maîtrise de l'opération de tréflage ou fraisage vertical-approches analytique et expérimentale. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 2008.
- [29] **C.Pagès**. Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lyon. Paris. 2003.
- [30] **V.Chomienne**. Etude de l'influence de l'intégrité de surface en tournage de l'acier 15-5PH sur la tenue en fatigue en flexion rotative. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2014.
- [31] **C. Tournier**. Contribution à la conception des formes complexes : La surface d'usinage en fraisage 5 axes isocrête. Thèse de doctorat. Ecole Normale Supérieure de Cachan. 2001.
- [32] **R. Serra, W. Rmili, A. Ouahabi**. Suivi de l'usure des outils de coupe en tournage à sec de la fonte FT25 par analyse vibratoire. 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique Marseille. 2009.
- [33] **T.D. Silva Botelho**. Contribution à l'étude du comportement élastique de surfaces métalliques rugueuses revêtues d'un métal de faible dureté. Thèse de doctorat. Université de Poitiers. 2004.
- [34] **A.Crolet**. Contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système « Pièce-Outil-Machine » sur la qualité de surface obtenue en tournage de super finition. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine. 2008.
- [35] **B. Bloul, B. Aour, A. Bourdim, R. Harhout**. Modélisation de l'état de surface d'une pièce rectifiée en utilisant ANN. 31<sup>ème</sup> Congrès International sur les ingénieries civile, mécanique et électrique pour l'énergie CMEEE – Marrakech. 2015.
- [36] **M.Bourebja**. Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique. Thèse de magister. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2010.
- [37] **M. Shahzad**. Influence de la rugosité et des traitements d'anodisation sur la tenue en fatigue des alliages d'aluminium aéronautiques 2214 et 7050. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2011.
- [38] **R.Berghida**. Impact de la signature des outils de coupe sur la variation de la géométrie des pièces mécaniques. Thèse de magister. Université Mentouri-Constantine. 2006.
- [39] **K .Yusufl, Y.Nukman, T.M.Yusof, S. Z.Dawal, H.Qin Yang, T. M. I Mahlia., K. F. Tamrin**. Effect of cutting parameters on the surface roughness of titanium alloys using end milling process, Scientific Research and Essays, Vol.5, (10), pp.1992-2248. 2010.
- [40] **F.Dweiri, M.Al-Jarrah, H.Al-Wedyan**. Fuzzy surface roughness modeling of CNC down milling of Alomic-79, Materials Processing Technology, Vol. 133, pp. 266-275. 2003.



- [41] **M.M.Aguiar, A.E. Diniz, R.Pederiva.** Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tool, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 68. 2013.
- [42] **S.Cohen Assouline.** Simulation numérique de l'usinage à l'échelle macroscopique : Prise en compte d'une pièce déformable. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Centre de Paris. 2005.
- [43] **C.F.Bisu.** Etude des vibrations auto-entretenues en coupe tridimensionnelle : nouvelle modélisation appliquée au tournage. Thèse de doctorat. Université Bordeaux 1 et Université Politehnica Bucarest. 2007.
- [44] **S.Belhour.** Contribution à l'optimisation de la maintenance prédictive par l'utilisation du logiciel Omnitrend (système on line) Cas : Cimenterie Hamma Bouziane. Thèse de magister. Université de Mentouri de Constantine. 2008.
- [45] **G.Rebergue . J.P.Costes. Q.Hardoin.** Calcul des lobes de stabilité en fraisage appliqué aux fraises disques. 22ème Congrès Français de Mécanique Lyon. 2015.
- [46] **T.Wehebe.** Étude des vibrations de pièce mince durant l'usinage par stéréo corrélation d'images. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2010.
- [47] **M. Vincent Thevenot.** Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques. Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Toulouse. 2005.
- [48] **V.Moreau.** Etude dynamique de l'usinage de l'interaction Pièce-Outil par mesure des déplacements : Application au fraisage et au tournage. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. 2010.
- [49] **S.Seguy. L.Arnaud. G.Dessein. T.Insperger. G.Peigné.** Influence d'une vitesse de rotation variable sur les vibrations d'usinage en UGV. Assises MUGV-Nantes. 2008.
- [50] **S.Seguy.** De l'adaptation à la variation continue de la vitesse de broche afin de contrôler le broutement en fraisage de parois minces : modélisations et études expérimentales. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2008.
- [51] **X. Chimentin.** Localisation et quantification des sources vibratoires dans le cadre d'une maintenance préventive conditionnelle en vue de fiabiliser le diagnostic et le suivi de l'endommagement des composants mécaniques tournants : application aux roulements à billes. Université de Reims Champagne Ardenne. 2007.
- [52] **M.Ritou.** Surveillance d'usinage en fraisage de pièces complexes par un suivi de la broche. Thèse de doctorat. Diplôme délivré conjointement par l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes. 2006.
- [53] **K. Venkata Rao. B.S.N. Murthy. N. Mohan Rao.** Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring. *Measurement* 46 4075–4084. 2013

- [54] **P.Estocqu.** Une approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulements à billes. Université de Reims Champagne Ardenne. 2004.
- [55] **S.Sellami. Mecibeh.** Analyse vibratoire de fatigue par piqures de transmission par engrenages. 2<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Mécanique (ICM'15), Constantine, Algérie. 2015.
- [56] **L. Arnaud.** Vibrations d'usinage- Comment les identifier et les limiter, mise en forme des matériaux par usinage. Edition T.I.Paris, France, pp. 1-16.BM7030. 2012.
- [57] **L. Arnaud. G. Dessein.** Application de la théorie des lobes de stabilité au fraisage de parois minces. IDMME. Clermont-Ferrand, France. 2002.
- [58] **F.Dolatabadi.** Etude de l'influence du mode de lubrification sur les performances d'usinage du composite à matrices d'aluminium. Thèse de doctorat. Université de Montréal. 2010.
- [59] **F.Rabier.** Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. 2007.
- [60] **H.Chibane, R.Serra, A.Morandean, R. Leroy.** Choix de conditions de coupe en usinage des composite par analyse vibratoire. Comptes Rendus des JNC 17. Poitiers, France. 2011.
- [61] **L. Bouzid, M.A.Yallese, K.Chaoui,T.Mabrouki, L.Boulanouar.** Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology. Journal: Engineering Manufacture, Vol. 229(1) 45–61. 2015.
- [62] **F.Z.Choumane.** Elimination des métaux lourds et pesticides en solution aqueuse par des matrices argileuses. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen. Algérie. 2015.
- [63] **L.Bouzid, S.Boutabba, M.A.Yallese, S.Belhadi, F.Girardin.** Simultaneous optimization of surface roughness and material removal rate for turning of X20Cr13 stainless steel. Journal international: Adv Manuf Technol 74:879–891. Springer-Verlag London. 2014.
- [64] **Z.Hessainia, M.A.Yallese, O.Zerti.** Application de la méthode de régression linéaire multiple pour la détermination des modèles des efforts de coupe en tournage dur. 2<sup>ème</sup> Conférence Internationale de Mécanique (ICM'15), Constantine, Algérie. 2015.
- [65] **L.Bouzid.** Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologique d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13- Thèse de doctorat. Université 8 mai 1945 de Guelma. Algérie. 2015.
- [66] **S.Rawangwong, J.Chatthong, W.Boonchouytan, R.Burapa.** Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear. Energy Procedia 56,448 – 457. 2014.

- [67] **S.Nizam Sadiq, T R.Raguraman, D.Thresh Kumar, R.Rajasekaran, T T M.Kannan.** Optimisation of milling parameters of ohns Steel using TiALN coated cutter by design of experiment technique, Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol.3, (1), 2278-0149. 2014.
- [68] **T.Kivak.** Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. Measurement 50 19–28. 2014.
- [69] **M.R. Soleymani Yazdi, A. Khorram.** Modeling and optimization of milling process by using RSM and ANN Methods, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol.2, No.5, 2010.
- [70] **S. Lakshmanan, M. Anthony Xavier.** Performance of coated and uncoated inserts during intermittent cut milling of AISI 1030 steel. Procedia Engineering 97. 372 – 380. 2014.
- [71] **S.Sheth .P M George.** Experimental investigation and prediction of flatness and surface roughness during face milling operation of WCB material. Procedia Technology 23. 344 – 351. 2016.
- [72] **M. S. Sukumar, P. Venkata Ramaiah, A. Nagarjuna.** Optimization and Prediction of Parameters in Face Milling of Al-6061 Using Taguchi and ANN Approach. Procedia Engineering 97.365 – 371. 2014.

**Tableau 1 : Tableau des valeurs prédites des critères des vibrations de l'acier C40.**

<b>N° Essai</b>	<b>Vc (m/min)</b>	<b>Vf (mm/min)</b>	<b>ap (mm)</b>	<b>Arms<sub>x</sub> mes (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Arms<sub>y</sub> mes (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Arms<sub>x</sub> pré (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Arms<sub>y</sub> pré (m/s<sup>2</sup>)</b>
<b>1</b>	80	50	0,2	0,672	0,751	0,7708	0,6397
<b>2</b>	80	100	0,4	1,307	1,092	1,0509	0,9478
<b>3</b>	80	200	0,8	1,388	1,303	1,5579	1,5044
<b>4</b>	80	400	1,6	2,346	2,296	2,3585	2,3790
<b>5</b>	110	50	0,4	0,795	0,821	0,7392	0,8735
<b>6</b>	110	100	0,2	0,842	0,852	0,8911	0,8675
<b>7</b>	110	200	1,6	1,925	2,735	2,0798	2,7216
<b>8</b>	110	400	0,8	2,697	2,059	2,5028	1,9514
<b>9</b>	160	50	0,8	0,919	1,299	1,0122	1,5659
<b>10</b>	160	100	1,6	1,904	3,131	1,6907	2,8708
<b>11</b>	160	200	0,2	1,272	1,335	1,3179	1,4442
<b>12</b>	160	400	0,4	2,051	2,095	2,1483	2,0056
<b>13</b>	310	50	1,6	3,687	4,521	3,7006	4,7018
<b>14</b>	310	100	0,8	2,664	3,759	2,8223	3,4673
<b>15</b>	310	200	0,4	3,017	3,343	2,7774	3,3861
<b>16</b>	310	400	0,2	3,37	3,917	3,4357	3,9824