

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université M'Hamed Bougara-Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie mécanique-Mécanique des Chantiers Pétroliers

Présenté par :

SEBBANE Zineddine

BERDI Mohamed Taha

THEME

Prédiction et optimisation de l'état de surface des pièces mécaniques par la méthode de régression polynomiale en vue de l'amélioration de sa durée de vie

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Examineur	BLOUL Benattia	MCA	UMBB
Examineur	BETTAYEB Mourad	MCB	UMBB
Encadreur:	HARHOUT Riad	MAA	UMBB

Dédicaces

Je dédie ce travail:

*A mes très chers parents qui m'ont fait de moi un homme, je vous aime
beaucoup.*

A mes sœurs et mon frère.

A toute ma famille

A mon binôme, SEBBANE ZINEDDINE et toute sa famille

*A mes amis : IKBAL, SAAD, DINO, TAYEB, MOHAMED, BOUDJENOUIA,
AYMEN, FAYCAL, RAOUF, MOH JIJEL et tous mes amis de promotion de
2^{eme} année Master, et mes collègues de mécanique des chantiers pétroliers,*

*A SEIFEDDINE, AMINE, HAMZA, YUCEF, ISLAM, SAMIA, mon cher
cousin IBRAHIM et Toute personne qui occupe une place dans mon cœur... je
vous remercie.*

Muhammad Taha

Dédicaces

*Je tiens c'est avec un grand plaisir que je dédié ce modeste travail à l'etre le
plus cher de ma vie, ma mère
A celui qui m'a fait moi un homme, mon père
A mon frère et sœur et à mon cher ami
et binôme Berdi Mohamed Taha
A tous les amis de promotion de 2éme année Master
Et à toute ma famille....*

Zineddine

Remerciement

Nous tenons en premier lieu à remercier Allah pour son aide qu'il nous a accordé afin de mener notre travail à terme.

Nous remercions notre promoteur« Mr. HARHOUT » enseignant du département de génie mécanique (FHC) Boumerdès pour avoir bien voulu encadrer notre projet, pour son aide, ses conseils et ses suggestions.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Enfin je finirai nos remerciements par un grand merci à nos parents, nos sœurs et nos frères, nos amis qui nous ont soutenu et ont su trouver les mots ou simplement être là dans les moments de doute et d'hésitation.

MERCI à tous ...

Nomenclature

Variable	Nom	Unité
V_c	Vitesse de coupe	$m.min^{-1}$
N	Vitesse de rotation	$tr.min^{-1}$
d	Diamètre de la pièce	mm
f	Avance	mm
V_f	Vitesse d'avance	$mm.min^{-1}$
A_p	Profondeur de passe	mm
ε_r	Rayon du bec de l'outil	mm
ε_r	Angle de pointe de l'outil	deg
R_a	Rugosité arithmétique du profil	μm
R_p	Rugosité pic maximal observé	μm
R_t	Rugosité totale	μm
R_q	Rugosité écart moyen quadratique	μm
E	module de Young	MPa
σ	Contrainte	MPa
HB	Dureté Brinell	/
HV	Dureté Vickers	/
HRB	Dureté Rockwell (bille)	/
HRC	Dureté Rockwell (cône)	/
F	Force	KN
S	Section	m^2

Résumé :

Notre projet de fin d'étude est réalisé pour encadrer l'influence des paramètres d'usinage sur la qualité de surface des pièces usinées, et pour cela on a développé un modèle mathématique par « machine learning », ce dernier est un modèle de régression polynomiale construit sous forme d'un algorithme codé par le langage « Python » pour le but de la prédiction et l'optimisation. Les données de cette étude sont inspirées d'une expérience précédente réalisée dans « la faculté des hydrocarbures et chimie – Université de M'hamed Bougara Boumerdès » de part de Mr « Harhout Riad », Les essais sont réalisés sur l'acier AISI 1050, en utilisant des outils de coupe en carbure métallique. L'analyse des résultats a montré que la vitesse de coupe et l'avancement ont l'effet le plus significatif sur la rugosité de surface. Le choix optimal de ces paramètres résulte un meilleur état de surface selon les besoins.

Mots clés : Rugosité, Paramètres de coupe, Machine learning, Régression polynomiale, Python

Abstract:

Our end-of-study project is carried out to frame the influence of machining parameters on the surface quality of machined parts, and for this we have developed a mathematical model by "machine learning", the latter is a polynomial regression model built as an algorithm encoded by the "Python" language for the purpose of prediction and optimization. The data of this study are inspired by a previous experiment carried out in "the Faculty of Hydrocarbons and Chemistry – University of M'hamed Bougara Boumerdès" on the part of Mr "Harhout Riad", The tests are carried out on AISI 1050 steel, using metal carbide cutting tools. Analysis of the results showed that the cutting speed and the feed have the most significant effect on surface roughness. The optimal choice of these parameters results in a better surface finish as needed.

Keywords: Roughness, Cutting parameters, Machine learning, Polynomial regression, Python

الملخص:

تم تنفيذ مشروع نهاية الدراسة لتأطير تأثير إعدادات القطع على جودة سطح الأجزاء المصنعة ، ولهذا قمنا بتطوير نموذج رياضي عن طريق "التعلم الآلي" ، وهذا الأخير هو نموذج انحدار متعدد الحدود تم بناؤه في شكل خوارزمية مشفرة بلغة "Python" لغرض التنبؤ والتحسين. واستلهمت بيانات هذه الدراسة من تجربة سابقة أجريت في "كلية المحروقات والكيمياء – جامعة محمد بوقرة بومرداس" من جانب السيد "حرحوت رياض"، وتم إجراء الاختبارات على فولاذ AISI 1050، وذلك باستخدام أدوات قطع كربيد معدنية. أظهر تحليل النتائج أن سرعة القطع والتقدم لها التأثير الأكثر أهمية على خشونة السطح. يؤدي الاختيار الأمثل لهذه الإعدادات إلى خشونة سطح أفضل حسب الحاجة.

كلمات مفتاحية: خشونة، إعدادات قطع، التعلم الآلي، انحدار متعدد الحدود، Python

Table des matières

Dédicace et remerciements

Nomenclature

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....2

Chapitre I : Généralités sur les surfaces.

Introduction de chapitre :..... 4

I.1. Propriétés mécaniques des métaux..... 4

I.1.1. Elasticité et plasticité 4

I.1.2. Résistance mécanique..... 6

I.1.3. Rigidité 6

I.1.4. Ductilité 6

I.1.5. Ténacité 7

I.1.6. Résistance à la fatigue 7

I.1.7. Dureté 8

I.1.7.1. Types des essais 8

I.2. L'état de surface..... 13

I.2.1. L'état structural et physique 13

I.2.2. Topographie de surface 14

I.2.3. Importance de la Topographie de surface..... 15

I.2.4. Mesure de la rugosité de surface 16

I.2.5. Paramètres de rugosité..... 17

I.3. Les contraintes résiduelles..... 18

I.3.1. L'Origine des contraintes résiduelles 19

I.3.2. Classification	19
I.3.3. Mesure des contraintes résiduelles	21
I.3.3.1 Méthodes non destructives.....	21
I.3.3.2. Méthodes destructives.....	24
Conclusion de chapitre :.....	27

Chapitre II : Intégrité de surface.

Introduction :	29
II.1. Usinage.....	29
II.1.1. Opérations d’usinage.....	29
II.1.2. Machines-outils	30
II.1.3. Outils de coupe.....	31
II.1.4. Tournage.....	32
II.1.5. Les paramètres de coupe en tournage	32
II.1.5.1. Vitesse de coupe	32
II.1.5.2. L’avance par tour.....	33
II.1.5.3. La profondeur de passe.....	33
II.2. Finition de surface	33
II.2.1. Types de finition de surface	34
II.2.2. Équipement de finition de surfaces métalliques.....	34
II.2.3. Galetage.....	35
II.2.4. Surface usinée	37
II.3. Intégrité de surface.....	38
II.3.1. L’influence des procédés de fabrication sur l’intégrité de la surface.....	39
II.3.2. Relevés topographiques – rugosité.....	41
II.3.2.1. Effet de tournage sur la rugosité.....	42
II.3.3. Contraintes résiduelles	44
II.3.3.1. Effet des paramètres du procédé de tournage sur les contraintes résiduelles .	45
II.3.4. Microstructure	47
II.4. Durée de vie en fatigue	48
II.4.1. Courbe de Wöhler	50

II.4.2. Effets de l'intégrité de surface sur la durée de vie	51
II.4.2.1. Effet de la rugosité.....	51
II.4.2.2. Effet des contraintes résiduelles	52
II.4.2.3. Effet de microstructure	54
Conclusion	56

Chapitre III : Modèle de prédiction et d'optimisation de rugosité.

Introduction	57
III.1. Optimisation	57
III.2. Modélisation	58
III.2.1. Etapes de modélisation	58
III.2.2. Types de modélisation	59
III.2.3. Régression	59
III.2.3.1. Régression linéaire	59
III.2.3.2 Régression polynomiale	61
III.3. Machine learning	62
III.3.1 applications de machine learning	63
III.3.2. Régression par machine learning.....	63
Cas expérimental :	65
III.3. Matériaux et conditions d'expériment.....	65
III.4. Mesure de la rugosité.....	66
III.5. Régression polynomiale	67
III.6. Résultats et discussion	70
III.7. Conclusion	84
Conclusion générale.....	86

bibliographie

Annexes

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les surfaces.

Figure I.1 Courbe de traction (contrainte/déformation)	5
Figure I.2 : Courbe de Wöhler.....	7
Figure I.3 : Principe de l'essai de dureté Brinell	9
Figure I.4 : Principe de l'essai de dureté Vickers.....	10
Figure I.5 : Essai de dureté Rockwell.....	11
Figure I.6 : Représentation schématique d'une surface usinée	14
Figure I.7 : Rugosité, ondulation et forme générale d'une surface	15
Figure I.8 : Influence de la topographie sur le comportement des surfaces et du troisième corps.....	15
Figure I.9 : quelques types des rugosimètre de contact.....	16
Figure I.10 : Principe de travail d'un rugosimètre de contact	16
Figure I.11 : Paramètres de rugosité.....	17
Figure I.12 : Classification des contraintes résiduelles en pratique	20
Figure I.13 : Définition schématique des différents ordres de contraintes résiduelles pour un matériau diphasé	21
Figure I.14 : Cycle d'hystérésis magnétique (B-H) et bruit Barkhausen correspondant d'un matériau ferromagnétique.....	22

Chapitre II : Intégrité de surface.

Figure II.1 : Les opérations d'usinage.....	29
Figure II.2 : Composantes d'une machine-outil (fraiseuse).....	30
Figure II.3 : Outil mono-point (gauche) et multipoint (droite)	30
Figure II.4 : Coupe en tournage	31
Figure II.5 : Etat de surface avant et après galetage.....	34
Figure II.6 : Outil de galetage	34
Figure II.7 : Différents types de galetage	35
Figure II.8 : Les différentes couches affectées d'une surface.....	37
Figure II.9 : Schéma de l'intégrité de surface pour pièces usinées	38

Figure II.10 : Les paramètres de tournage.....	40
Figure II.11 : Profil de rugosité et représentations des paramètres de rugosité associés. ..	40
Figure II.12 : configuration de l'arête de l'outil avec chanfrein	42
Figure II.13 : Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface	42
Figure II.14 : Chargement mécanique pur induit la coupe.....	43
Figure II.15 : Chargement thermique pur induit par la coupe.....	44
Figure II.16 : Contraintes résiduelles dans les directions parallèle et transversale causé par le tournage de SAE 1045 pour différents avancement de coupe. La vitesse de coupe est de 90 m/s sans refroidissement.....	45
Figure II.17 : Contraintes résiduelles des éprouvettes tournées.....	46
Figure II.18 : Exemple de changement microstructural à un tour dur d'un acier 52100, micrographie optique.....	47
Figure II.19 : Représentation et définition d'une sollicitation cyclique quelconque.	49
Figure II.20 : Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue.	50
Figure II.21 : Profil de contraintes résiduelles pour une surface avec couche blanche, et une surface sans couche blanche.	54

Chapitre III : Modèle de prédiction et d'optimisation de rugosité.

Figure III.1 : la modélisation dans le Processus de fabrication d'une pièce mécanique [23]	58
Figure III.2 : Exemple d'une régression polynomiale	60
Figure III.3 : Exemple d'une régression polynomiale	61
Figure III.4 : Régression dans machine learning	64
Figure III.5 : Assemblage outil-pièce	66
Figure III.6 : Assemblage de mesure de rugosité	67
Figure III.7 : Les fonctions et libraires utilisées pour la régression polynomiale réalisée par python sur google collaboratory).....	68
Figure III.6 : la distribution des paramètres des coupes par la fonction Box plot (google collaboratory).....	69
Figure III.7 : Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et f – polynôme de degré 1	71
Figure III.8 : Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et f – polynôme de degré 2.....	71
Figure III.9 : Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et f – polynôme de degré 3.....	72

Figure III.10: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et Ap – polynôme de degré 1	73
Figure III.11: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et Ap – polynôme de degré 2	73
Figure III.12: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et Ap – polynôme de degré 3	74
Figure III.13: Evolution de rugosité Ra en fonction de Ap et f – polynôme de degré 1....	75
Figure III.14: Evolution de rugosité Ra en fonction de Ap et f – polynôme de degré 2....	75
Figure III.15: Evolution de rugosité Ra en fonction de Ap et f – polynôme de degré 3....	76
Figure III.16: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc, Ap et f – polynôme de degré 1	77
Figure III.17: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc, Ap et f – polynôme de degré 2	77
Figure III.18: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc, Ap et f – polynôme de degré 3	77
Figure III.19 : l’effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface	78
Figure III.20 : Contribution des paramètres de coupe sur la rugosité de surface	79
Figure III.21 : Effet de la moyenne de vitesse de la coupe sur la rugosité	79
Figure III.22 : Effet de la moyenne l’avancement sur la rugosité.....	80
Figure III.23 : Effet de la moyenne de la profondeur sur la rugosité.....	80
Figure III.24 : <i>la rugosité Ra en fonction de Vc et Ap</i>	81
Figure III.25 : la rugosité Ra en fonction de f et Ap.....	81
Figure III.26 : la rugosité Ra en fonction de f et Vc	82
Figure III.27 : la régression surfacique de la rugosité Ra en fonction de Vc et le f	82
Figure III.28 : la régression surfacique de la rugosité Ra en fonction de Vc et l’Ap	83

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les surfaces.

Tableau I.1 : Comparaison des trois méthodes principales utilisées pour la détermination de la dureté..... 12

Chapitre II : Intégrité de surface.

Tableau II.1 : Synthèse des intégrités de surfaces typiquement obtenues en fonction des procédés et de leurs signatures, appliqués sur une surface issue d'une opération de tournage. Les flèches indiquent le sens de variation de la rugosité par rapport à la rugosité initiale du tournage 39

Tableau II.2 : Limite de fatigue pour des niveaux de rugosités différents..... 51

Chapitre III : Modèle de prédiction et d'optimisation de rugosité.

Table III.1 : Composition chimique de l'acier utilisé 65

Table III.2 : Paramètres de coupe..... 66

Table III.3 : description de données utilisées 68

Table III.4 : Distribution des données après traitement 70

Introduction générale

Introduction

Les procédés de fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de matière sont utilisés largement dans l'industrie. Les pièces obtenues par ces procédés doivent satisfaire à des propriétés géométriques, métallurgiques et à des caractéristiques de qualité. Pour répondre à ces exigences, plusieurs expriments basés sur le choix des conditions de coupe sont souvent nécessaires avant d'aboutir à une pièce satisfaisante.

Actuellement, l'utilisation de ces méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des utilisateurs des outils coupants est coûteuse et donne une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins. Toutefois, le coût très élevé d'un essai limite fondamentalement le nombre d'expériences, tel que pour avoir une pièce respectant les caractéristiques souhaitées et avec un coût acceptable devient une tâche très difficile.

L'importance de bien comprendre les conditions de coupe par certaines limites dépend de type de matériau à usiner, puisqu'il un facteur déterminant de comportement de la coupe. Il est donc d'un grand intérêt de connaître l'interaction entre l'outil et la matière pour établir une base de données. Cela permettra d'identifier les conditions acceptables de coupe dans une matière déterminée.

Un problème fondamental dans l'usinage d'un matériau est la méconnaissance des conditions de coupe optimales. L'objectif de notre étude est de fournir des outils permettant de mieux choisir les conditions de coupe de façon intelligente à partir d'un nombre suffisant d'expériences tout en considérant des intérêts parfois contradictoires, comme l'état de surface des pièces usinées, l'usure de l'outil de coupe et la productivité. Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques, et expérimentales a été mise en œuvre, et cela pour Optimiser le procédé d'usinage.

L'optimisation de procédé d'usinage revient à résoudre un problème d'optimisation. On rencontre deux types de problèmes. Le premier est mono-objectif, où l'on cherche une seule solution optimale. Le deuxième est un problème d'optimisation multi-objectif, dans lequel on cherche un ensemble de solutions optimales, connu sous le nom d'ensemble optimal. Plusieurs méthodes d'optimisation comme les modèles de régression et les surfaces de réponse ont été utilisées en fonction des besoins et des objectifs recherchés, ces méthodes c'est ce qu'on va traiter dans ce projet de fin d'étude qui est construit de trois chapitres, le premier chapitre traite des généralités et des notions de base sur l'état de surface (dureté, ductilité, rugosité, résistance à la fatigue), on parle aussi de microstructure et contraintes résiduelles. Le deuxième chapitre se concentre sur le terme « intégrité de surface », ses paramètres, et les recherches faites dans ce domaine. le troisième chapitre est destiné pour une étude expérimentale pour développer des modèles de régression en utilisant le machine learning afin de prédire l'effet des paramètres de coupes sur la rugosité, pour un choix optimale de ces paramètres.

Chapitre 01 : Généralités sur les surfaces

Introduction de chapitre :

On parle couramment de la durabilité d'un matériau comme s'il s'agissait d'une propriété fondamentale définie comme la période de temps pendant laquelle le matériau accomplira sa fonction utile. La durée de vie d'un matériau en service dépend toujours non seulement des facteurs de charge et d'environnement auxquels il est soumis, mais aussi sur les facteurs d'intégrité tels que l'état de surface qui constitue un facteur très important, et c'est pourquoi il faut toujours prendre en compte les paramètres d'état de surface dès la mise en service d'un élément lorsque on considère la durabilité ou la durée de vie d'un matériau en service. Cependant, l'état de surface d'un matériau joue un rôle primordial sur la durée de vie et la tenue à la fatigue en service du composant.

Pour un meilleur choix des matériaux, plusieurs études et essais ont été réalisés au but de garantir la durabilité du composant et la fiabilité de fonctionnement en tenant compte les facteurs de sécurité.

I.1. Propriétés mécaniques des métaux

Les propriétés mécaniques des métaux reflètent la capacité des matériaux à montrer la résistance aux charges qui leur sont appliquées. Ces capacités sont exprimées par des indicateurs quantitatifs. Et ils sont déterminés par des essais, en fonction de la nature de l'impact de la charge par unité de temps.

Typiquement, les propriétés mécaniques des métaux commencent à décrire à la dureté qui représente la qualité la plus importante de produits. La mesure quantitative de cette capacité est la plus fréquente dans le contrôle de la qualité des produits.

Ces propriétés sont basées principalement sur les concepts usuels d'élasticité et plasticité, qui influent sur l'orientation des cristaux la présence des joints de grains.

I.1.1. Elasticité et plasticité

Parmi les principales caractéristiques de l'état métallique est sa capacité à se déformer sous contrainte. Selon cette valeur, la déformation résultante peut être élastique, c'est-à-dire que si la contrainte est arrêtée, elle sera réabsorbée, ou bien plastique et dans ce cas le solide reste définitivement déformé après l'élimination de la contrainte mécanique appliquée. La caractérisation quantitative de la plasticité est la capacité d'un métal ou d'un alliage donné à supporter plus ou moins de déformation sans se rompre. Cette propriété est spécifique du fait de la nature des liaisons entre les atomes constituant le solide métallique.

Les solides métalliques présentent généralement une résistance significative et une déformabilité élevée. Des tests de traction pour mesurer la déformation et même les différents stades de rupture de tous les matériaux.

L'essai de traction constitue l'essai mécanique le plus classique et le mieux étudié, il consiste à exercer sur une éprouvette, une force croissante ou une déformation constante

qui va la déformer progressivement et la rompre. Cet essai pratiqué sur des éprouvettes, permet de construire une courbe (contraintes/déformation) (Fig.I.1)

Léonardo Da Vinci est le premier qui a abordé la notion de résistance des matériaux et en 1729, la première machine de traction est construite en Hollande [1].

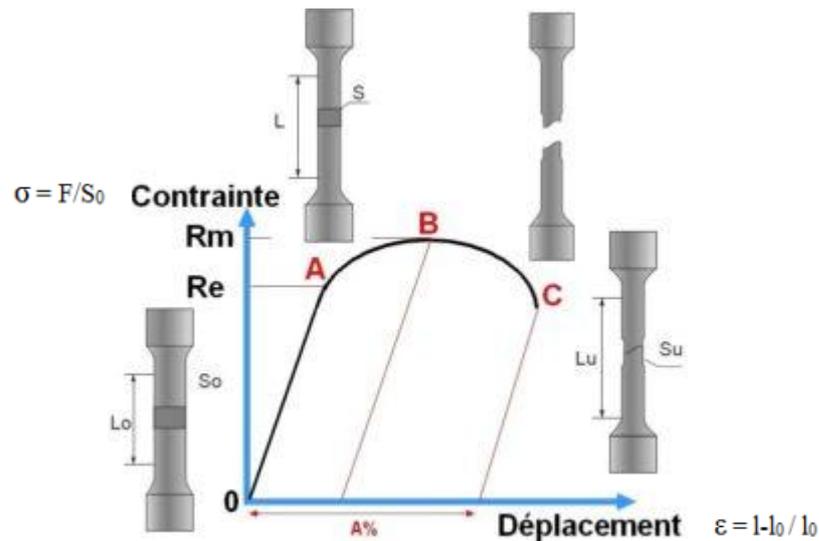


Figure I.1 Courbe de traction (contrainte/déformation)

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- Le module de Young, E , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou en gigapascals (GPa) ;
- La limite d'élasticité (lorsqu'elle existe), R_e , σ_e , σ_y ou f_y (yield stress), qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- La résistance à la traction R_m , σ_m ou f_u (limite ultime), qui définit la limite à la rupture ;
- L'allongement à la rupture $A\%$, qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- Le coefficient de Poisson ν , qui correspond à la proportion entre la déformation transversale (diminution de section) et la déformation longitudinale (allongement relatif) de la pièce dans le domaine élastique.

La plasticité du métal revêt deux aspects principaux :

- Malléabilité : possibilité de réduire le métal en feuille plus ou moins mince.
- Ductilité : l'aptitude de métal à étirer sans rupture.

Ces valeurs sont exprimées par des relations mathématiques ou des lois.

Loi de Hooke :

Dans la première partie rectiligne de la courbe, il y a proportionnalité entre la contrainte et la déformation (au moins en première approximation), c'est la loi de HOOKE, la caractéristique est la pente de cette droite qui est le module d'élasticité. La relation s'écrit sous la forme :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

Où F est la force, S l'aire de la section droite de la pièce, et ce ratio est la contrainte σ . Elle est une grandeur homogène à une pression et s'exprime en Pa.

Si on divise l'allongement Δl par la longueur initiale l_0 , on obtient une grandeur que l'on appelle déformation ou allongement relatif ε (sans dimension).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Et donc la formule de la loi de Hooke devienne :

$$\sigma = E\varepsilon$$

I.1.2. Résistance mécanique

C'est l'aptitude d'une structure à résister les efforts mécaniques extérieurs, cette grandeur est caractérisée par la résistance à la rupture « δ_r » mesurée à la suite d'un essai de traction, c'est la grandeur la plus utilisée pour la majorité des pièces soumises à un chargement statique.

I.1.3. Rigidité

Intervalle de la déformation élastique réversible d'une structure atomique. Cette propriété est liée aux forces inter atomiques dues à la variation de distance entre les atomes. Elle est caractérisée par le module longitudinal de Young où la loi de Hooke est valable. Elle est mesurée suite à un essai de traction.

I.1.4. Ductilité

La ductilité désigne la capacité d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre. La rupture se fait lorsqu'un défaut (fissure ou cavité) devient critique et se propage. Un matériau qui présente une grande déformation plastique à rupture est dit ductile, sinon il est dit fragile. C'est une propriété dite "purement géométrique" : elle ne caractérise qu'un allongement à la rupture [2].

I.1.5. Ténacité

La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation brutale d'une fissure. On peut aussi définir la ténacité comme étant la quantité d'énergie qu'un matériau peut absorber avant de rompre.

I.1.6. Résistance à la fatigue

Le terme résistance à la fatigue vient décrit la déformation et le comportement à la rupture d'un matériau chargé oscillant (dynamiquement) pendant un nombre défini de cycles. Surtout pour les ressorts de compression largement utilisés, il est très important d'enregistrer la résistance à la fatigue.

La résistance à la fatigue est calculée à l'aide du test de Wöhler, à partir des résultats desquels la courbe dite de Wöhler peut être esquissée dans un diagramme de résistance à la fatigue. En fonction de la contrainte de flèche, il indique le nombre de changements de charge que le matériau peut supporter. La courbe de la figure montre également que la rupture aux contraintes bien en dessous de la résistance à la traction R_m se produit.

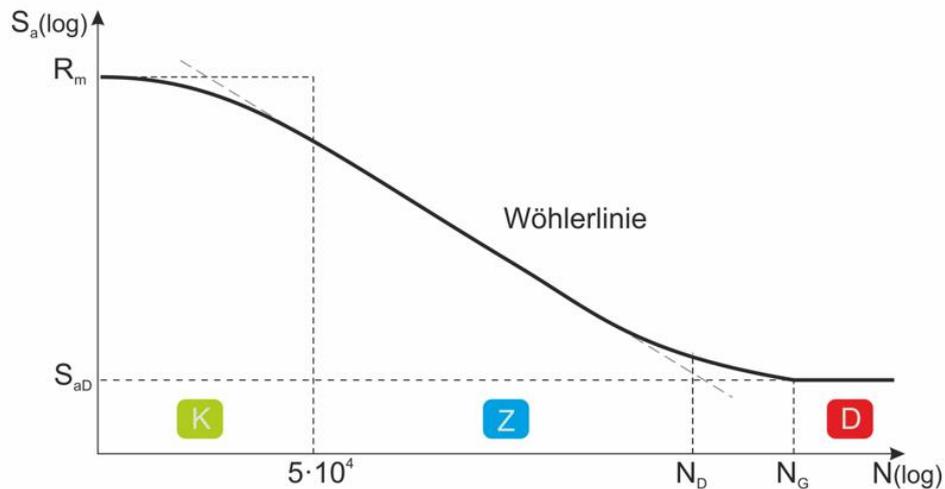


Figure I.2 : Courbe de Wöhler

K indique la plage de résistance à la fatigue à court terme ou de résistance à court terme inférieure à environ 10^4 jusqu'à 10^5 Jeu de swing. Cette fatigue se produit fréquemment, en particulier avec des amplitudes de déformation plastiques élevées, et conduit à une défaillance prématurée. Cependant, la force à court terme est de peu d'importance pour les exigences techniques.

Z caractérise la plage de résistance à la fatigue (courte : résistance à la fatigue) ou de résistance à la fatigue entre 10^4 et selon le matériau environ $2 \cdot 10^6$ jeu de swing. La courbe de Wöhler est presque droite dans une double représentation logarithmique.

D marque la résistance à la fatigue ou la résistance à la fatigue pour faire court. Dans les aciers ferritiques-perlitiques, cela commence à environ 10^6 jusqu'à $5 \cdot 10^6$ la charge change. Une corrosion constante et les températures fortement augmentées auxquelles un composant est exposé font que la résistance à la fatigue ne peut plus être garantie. En plus de la résistance à la fatigue des ressorts de compression fortement sollicités, la relaxation doit également être prise en compte en tant que pourcentage de la perte de force dépendant du matériau.

I.1.7. Dureté

De manière générale, la dureté est la résistance d'un matériau à être marqué par un autre, par une rayure ou pénétration. Bien que le langage commun confonde parfois les notions de dureté et de solidité/résistance/résilience, ce sont des notions décorréelées : l'illustration la plus simple en est le verre, matériau très dur mais très cassant.

Le test de dureté ne fournit qu'une seule valeur. En revanche, le test est très simple à réaliser, aucune machinerie coûteuse n'est utilisée et aucun traitement n'est requis pour l'échantillon, une surface plane de quelques millimètres suffit. C'est une version d'essai pas chère couramment utilisé pour les tests de comparaison et l'inspection de l'effet des traitements thermiques, thermomécaniques ou thermochimiques sur les éprouvettes.

La dureté d'un métal définit la résistance qu'oppose celui-ci à la pénétration d'un corps plus dur. On la détermine au moyen d'essais normalisés (Brinell, Meyer, Vickers, Rockwell) en mesurant la profondeur, le diamètre ou un autre paramètre de l'empreinte faite par un poinçon en fonction de l'essai.

I.1.7.1. Types des essais

- **Essai de dureté Brinell**

Elle a été proposée en 1900 par l'ingénieur suédois Johan August Brinell (1849-1925), travaillant sur la transformation de l'acier selon la température. La norme Brinell a été éditée dès 1924.

La méthode consiste à appliquer sur la surface du matériau dont on veut mesurer la dureté une bille polie de forme sphérique en matériau dur (acier trempé ou en carbure de tungstène) d'un certain diamètre D qui peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5mm et 10mm avec une force F donnée, mesurée en kilogramme-force selon les conventions de notation pendant une durée t. Après retrait on mesure la taille de l'empreinte laissée, une calotte sphérique de diamètre d.

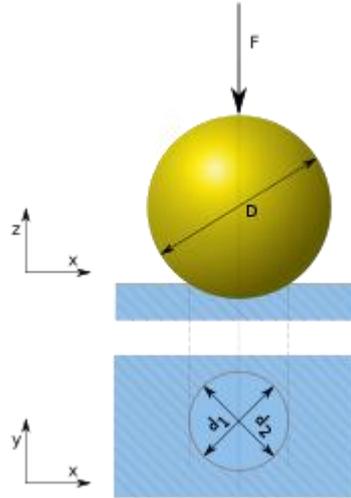


Figure I.3 : Principe de l'essai de dureté Brinell

Les formules permettant d'obtenir une valeur sur l'échelle de Brinell sont les suivantes :

$$HB = \frac{2F}{\pi \times D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Avec : $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Dont :

HB : Dureté Brinell.

F : Force appliquée [kgf]

D : Diamètre de la bille. [mm]

d : Diamètre de l'empreinte laissée par la bille. [mm]

- **Essai de dureté Vickers**

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136°. L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées. Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur d'empreinte. D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester.

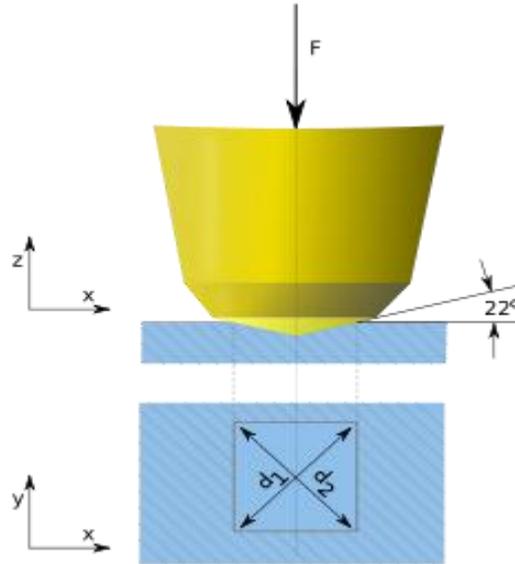


Figure I.4 : Principe de l'essai de dureté Vickers

La dureté Vickers est donnée par la relation suivante :

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

Avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Dont :

HV : dureté Vickers

F : force appliquée (N)

d : moyenne des diagonales de l'empreinte (mm)

g : accélération terrestre (9,806 65 m s⁻²)

- **Essai de dureté Rockwell**

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère HRC (Fig a), ou bien sphérique pour le critère HRB (Fig b) est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de 0,2mm. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre 1,588mm ou 3,175mm. L'essai se déroule en trois phases :

- Application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98 \text{ N}$ (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell ;
- Application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur P_2 ;
- Relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de r étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force F_1 .

La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

Cas de pénétrateur en bille

$$\text{HRB} = 130 - r$$

Cas de pénétrateur cône

$$\text{HRC} = 100 - r$$

Une unité de dureté Rockwell correspondant à une pénétration de 0,002 mm.

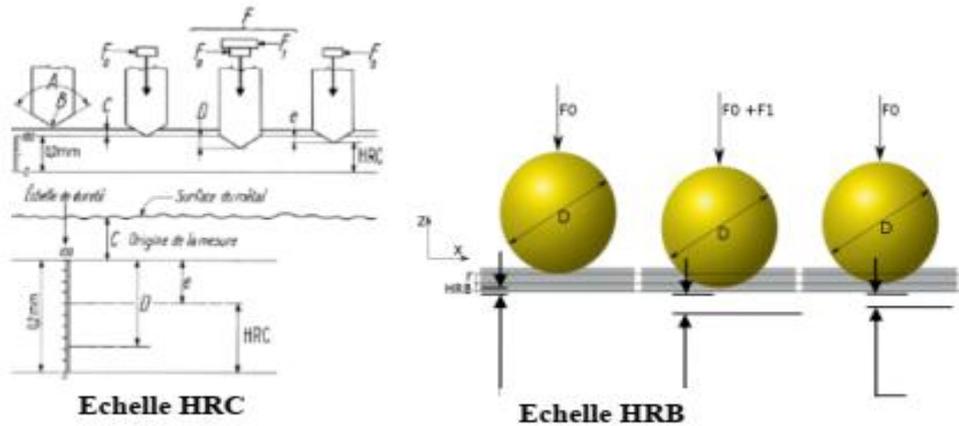


Figure I.5 : Essai de dureté Rockwell

Le tableau suivant résume toutes les informations concernant les essais de dureté :

Tableau I.1 : Comparaison des trois méthodes principales utilisées pour la détermination de la dureté

Type d'essai	Brinell	Vickers	Rockwell
Symbole	HB	HV	HR
Pénétrateur	Bille de diamètre D en acier trempé. Dureté min 6 HB	Pyramide régulière, à base carrée. Angle entre 2 faces opposées : 136°	HRC : cône en diamant, angle au sommet = 120° HRB : bille d'acier
Mode d'application de la charge	Chargement progressif pendant 15 s, maintien 15 s puis décharge	Comme HB	Précharge P_0 , puis charge supplémentaire, et retour à P_0
Valeur mesurée	Moyenne de 2 diamètres perpendiculaires d de l'empreinte	Moyenne des 2 diagonales d	Profondeur de pénétration
Adaptation à la dureté du matériau	Choix de la charge P telle que $0,3 D < d < 0,6 D$	Choix de la charge P telle que $d > 0,4 \text{ mm}$	-
Mesure pour H (voir formules)	P /surface de la calotte sphérique	P /surface de l'empreinte pyramidale	Complément' à la profondeur de pénétration
Application principale	Aciers non trempés, fontes, soudures, métaux non-ferreux	Aciers trempés, aciers à outils	Aciers trempés
Avantages	D étant relativement large HB convient pour les matériaux hétérogènes	Pratiquement indépendant de la charge. Convient bien pour les pièces minces	Mesure la plus simple, la lecture directe permet une acquisition des données automatiques
Inconvénients	HB est fonction de la charge. Formation de bourrelets au bord de l'empreinte	Ne convient pas pour les matériaux hétérogènes (petite empreinte)	Dispersion importante des mesures

Des relations empiriques ont été dérivées par les essais de dureté à partir de corrélation entre la dureté Vickers HV, la dureté Brinell HB et la résistance de la rupture R_m pour différents aciers :

$$R_m = 77,14 + 2,6396 HV + 0,0010 HV^2$$

$$R_m = 164,71 + 2,222 HB + 0,002 HV^2$$

A partir de ces deux relations, il est possible de relier directement les duretés Vickers et Brinell. Différentes autres relations sont proposées dans la bibliographie pour relier les duretés et les caractéristiques mécaniques des matériaux mais ces relations sont empiriques et doivent être utilisées avec prudence.

I.2. L'état de surface

En tribologie, la surface ne définit pas uniquement la zone de séparation des corps, mais concerne toutes les caractéristiques du contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures et les comportements du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure, etc.). Par conséquent, on admettra que les paramètres définissant la surface correspondent à l'ensemble des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, ainsi qu'aux caractéristiques géométriques du contact incluant, par extension, la forme des pièces

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaite, il existe toujours des défauts par suite des erreurs systématiques d'imperfections, admissibles dans la fabrication.

Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations) déjà étudiés dans la partie « contrôle du plan » ou de petits défauts (défauts micro-géométriques) désignés plus communément sous le nom de rugosité.

I.2.1. L'état structural et physique

Les caractéristiques d'une surface diffèrent de celles du matériau d'une part parce que la symétrie de la structure atomique est rompue (modification des forces de liaison, de la concentration en défauts, etc.), d'autre part parce que l'environnement (atmosphère, contraintes appliquées, température, etc.) qui est un facteur décisif avec un effet considérable sur les couches superficielles, en créant des concentrations d'éléments très différentes des valeurs moyennes volumiques.

Après qu'elle ait été « préparée » par (traitements thermiques, usinages...) et placée dans son environnement de travail, une surface est constituée d'une succession de couches représentée comme suivant :

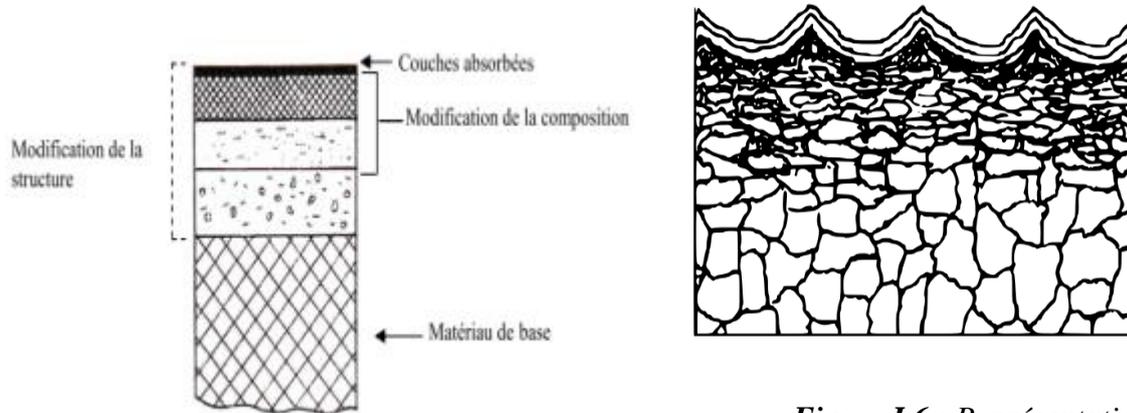


Figure I.6 : Représentation schématique d'une surface usinée

I.2.2. Topographie de surface

Les surfaces ont des espacements réguliers et irréguliers qui ont tendance à former un motif ou une texture sur la surface. Cette texture de surface est générée par une combinaison de divers facteurs qui sont dus soit au processus de fabrication, soit au matériau en cours de finition. Le terme « topographie d'une surface » est constituée d'une combinaison de trois caractéristiques ou défauts : la rugosité de la surface, l'ondulation de la surface et forme de surface. Il concerne donc tous les effets qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique (opérations de mise en forme, de mise à la côte, traitements thermiques, traitements de surfaces), et en particulier :

- La génération de sillons, aspérités, cavités, porosités, etc.
- La génération de défauts de forme (linéarité, circularité, etc.)

La rugosité de surface fait référence aux irrégularités à haute fréquence sur la surface causée par l'interaction de la microstructure du matériau et de l'action de l'outil de coupe.

L'ondulation fait référence aux irrégularités à moyenne fréquence sur la surface sur laquelle la rugosité se superpose. Ces formes peuvent être causées par l'instabilité de l'outil de coupe et des erreurs dans le guidage de la machine-outil.

La forme de surface est la forme générale de la surface en négligeant la rugosité et l'ondulation, La figure montre les composantes de rugosité et d'ondulation d'une surface arbitraire :

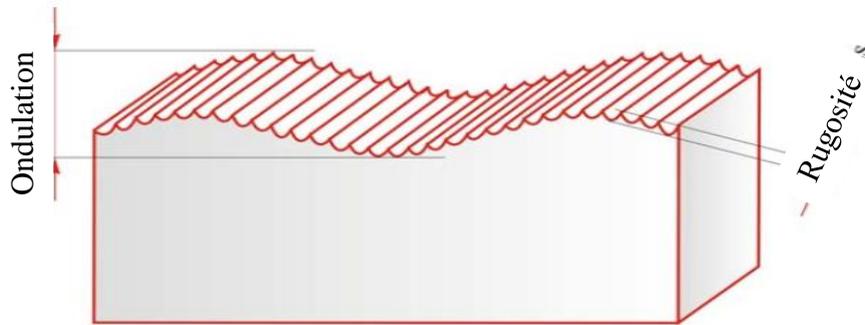


Figure I.7 : Rugosité, ondulation et forme générale d'une surface

I.2.3. Importance de la Topographie de surface

La rugosité est un paramètre important, elle a des effets sur la résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques des matériaux, elle agit aussi sur la plupart des facteurs qui gouvernent le comportement au frottement et à l'usure, et surtout le mode de contact et le comportement du milieu Inter faciale (troisième corps).

La rugosité constitue aussi un facteur déterminant pour la qualité des produits finis (propriétés d'aspect, etc.)

<u>Composantes de la topographie</u>	<u>Exemples de facteurs concernés</u>
Excroissances, aspérités... 	Aire réelle de contact : - Pression-températures superficielles - Adhésion entre les solides
Sillons, cavités, porosités... 	- Rétention-circulation du milieu interfacial (Lubrification-Refroidissement) - Piégage ou évacuation des débris - concentration de contraintes

Figure I.8 : Influence de la topographie sur le comportement des surfaces et du troisième corps.

La définition de la topographie prend en considération toutes les caractéristiques des irrégularités de surface, soit dimensionnelles (par exemple hauteur des « pics »), ou bien géométriques (par exemple forme, acuité des aspérités ou des cavités), et aussi la répartition et l'orientation (préférentielle ou aléatoire, etc.). Les caractéristiques topographiques des surfaces sont caractérisées par l'acuité, la forme, l'orientation des rugosités.

I.2.4. Mesure de la rugosité de surface

La méthode de contact la plus courante pour mesurer la topographie de surface est l'enregistrement de texture de surface à l'aide des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profilomètres, qui relèvent le profil de la surface. Ces appareils impriment un graphique anamorphosé du profil réel palpé (c'est-à-dire que l'agrandissement vertical est plus important que l'agrandissement horizontal). Ce graphique permet de visualiser la forme des irrégularités et d'estimer leur profondeur et leur espacement.



Figure I.9 : quelques types des rugosimètre de contact

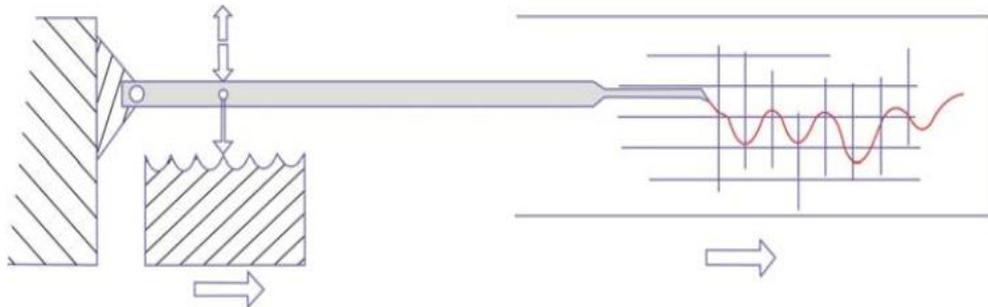


Figure I.10 : Principe de travail d'un rugosimètre de contact

Dernièrement, des techniques de mesure sans contact ont été développées et devenues populaire, en particulier pour les surfaces pouvant être endommagées par la technologie de contact. Les résultats obtenus sont très similaires et les mêmes paramètres de définitions sont utilisés pour les deux méthodes. Parmi les méthodes de non-contact est la mesure « diffraction laser », qui est simple et rapide et ne cause pas un endommagement pour l'échantillon.

I.2.5. Paramètres de rugosité

Pour une analyse effective de rugosité et ondulation, le profil généré par l'instrument de mesure doit être évalué selon des formules mathématiques appelées paramètres de rugosité (surface), pour le but de caractériser les surfaces. L'application de différents types de paramètres de surface peut mieux décrire en discutant les différents types de surfaces produites par les méthodes de finition.

Considérons une coupe locale d'une surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage, la figure suivante représente un profil mesuré par un rugosimètre :

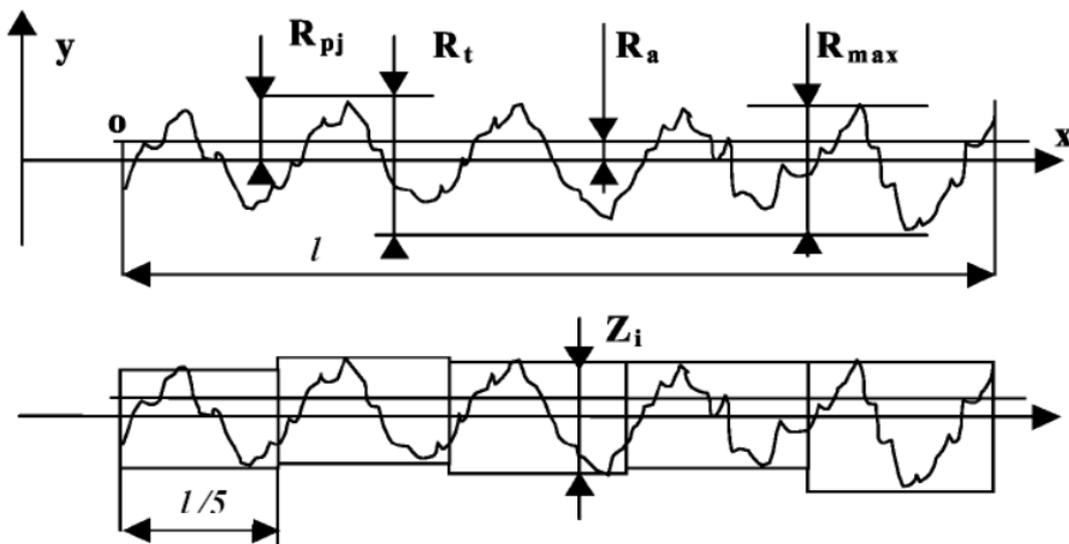


Figure I.11 : Paramètres de rugosité

Soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^l y \, dx = 0$$

Où l est la longueur de palpation

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, soit :

Rugosité moyenne arithmétique R_a dite C.L.A.(Center Line Average), R_a représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

Rugosité moyenne quadratique R_q . dite R.M.S (Root Mean Square). Ce critère représente l'écart moyen quadratique par rapport à OX :

$$R_q = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

Rugosité max. R_{max} , elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité

Rugosité totale R_t représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur de palpage l .

Rugosité R_z , représente la rugosité totale moyenne :

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_1^5 Z_i \quad (\text{voir figure})$$

Pour certaines surfaces, il est préférable de définir la rugosité maximale R_{max} ou bien la rugosité totale moyenne R_z , au lieu de d'utiliser Rugosité moyenne arithmétique R_a , parce que R_{max} mesure les points les plus hauts et les plus bas du profil. Et cela est valide et mieux pour les surfaces soumises au contraintes importantes.

I.3. Les contraintes résiduelles

Dans l'industrie, on rencontre souvent des pièces rompues en service sous des sollicitations très inférieures aux prévisions, parce qu'il existait en leur sein des contraintes, avant même leur intégration dans les machines, sans qu'aucune sollicitation extérieure ne leur soit appliquée. De même lorsqu'on découpe certaines tôles laminées, les plaques obtenues se déforment, parce qu'on y a libéré des contraintes internes. Ces contraintes internes sont appelées "Contraintes résiduelles".

Les contraintes résiduelles sont donc des contraintes existant dans des pièces, en l'absence de sollicitations extérieures. Les contraintes résiduelles dans une surface usinée est l'un des facteurs décisifs de qualité de surface. Toutes les pièces en métal présentent des contraintes résiduelles puisqu'elles apparaissent quel que soit le procédé de fabrication.

Le processus de fabrication est la cause la plus fréquente de contraintes résiduelles. Presque toutes procédés de fabrication, tels que le moulage, le soudage, l'usinage, le

formage, le chauffage Traitement... introduire des contraintes résiduelles dans l'objet fabriqué.

L'effet de ces contraintes peut être bénéfique ou nocif, et ça dépend sur la taille et la répartition de la contrainte causée par la charge. D'une manière générale, les contraintes résiduelles sont nocives, et il existe de nombreux cas documentés où ces contraintes ont été des facteurs principaux contribuant à la fatigue et d'autres défaillances structurelles pendant le service.

I.3.1. L'Origine des contraintes résiduelles

Les origines des contraintes résiduelles sont très diverses. Elles peuvent être classées en trois catégories : origine mécanique, origine thermique et origine métallurgique. Souvent une combinaison de ces différentes causes est à l'origine de l'apparition des contraintes résiduelles.

Les contraintes résiduelles peuvent provenir :

- d'hétérogénéités chimiques ou cristallographiques résultant de traitements thermiques superficiels (nitruration, cémentation...),
- de transformations structurales de la matière avec une chronologie résultant du gradient thermique, provenant par exemple de traitements thermiques,
- de traitements superficiels divers (émaillage, nickelage, chromage, grenailage, martelage),
- d'écoulements plastiques non homogènes au cours d'un chauffage ou d'un refroidissement non uniforme (trempe classique, moulage des matières plastiques ...),
- des différences de coefficients de dilatation et des incompatibilités mécaniques entre les différents composants d'un composite (composites à matrice métallique, organique ou céramique, revêtements céramiques).

Dans tous les cas, les contraintes résiduelles résultent d'hétérogénéités micro- et /ou macrostructurales.

I.3.2. Classification

En raison du caractère polycristallin et hétérogène des matériaux métalliques, les contraintes résiduelles peuvent provenir de déformations aux échelles macro-, micro- et submicroscopiques. En effet, un matériau cristallin est constitué de phases qui, elles-mêmes, sont formées de grains. Chaque grain est un monocristal qui peut être considéré, dans un modèle simple, comme divisé en petits domaines séparés par un réseau de dislocations. Chaque domaine est constitué par un empilement régulier d'atomes, qui peut être défini par un réseau de mailles cristallines identiques. Une telle division, en fonction de l'échelle d'observation, Quelle que soit l'échelle à laquelle on considère le matériau, on peut mettre en évidence des contraintes résiduelles ayant pour origine les déformations assurant la continuité du matériau. Une classification de ces

contraintes en trois ordres liés à l'échelle à laquelle on considère le matériau, a été proposée il y a quelques années par Macherauch et al., puis développée par Kloos, puis Hauk[3]:

- Contraintes résiduelles de l'ordre 1 (type I), sont homogènes sur un très grand nombre de domaines cristallins du matériau, telles contraintes sont également appelées macro-contraintes σ_{RSI} . Les forces liées à cette contrainte s'équilibrent sur tous les plans. Les moments liés à ces forces sont égaux à zéro autour de tous les axes.
- Contraintes résiduelles du second ordre, ou contraintes résiduelles de type II, sont homogènes au sein de petits domaines cristallins du matériau (un seul grain ou phase). Les efforts internes liés à ces contraintes sont en équilibre entre les différents grains ou phases.
- Les contraintes résiduelles du troisième ordre, ou contraintes résiduelles de type III, sont homogènes sur les plus petits domaines cristallins du matériau (sur quelques distances interatomiques). Les forces internes couplées à ces contraintes sont en équilibre dans de très petits domaines (comme autour de dislocations ou défauts ponctuels).

Les contraintes résiduelles de type II et III sont collectivement appelées micro-contraintes σ_{RSII} et σ_{RSIII} . Dans le cas de matériaux réels, l'état réel de contrainte résiduelle à un point provient de la superposition de contraintes de type I, II et III, comme illustré dans la figure :

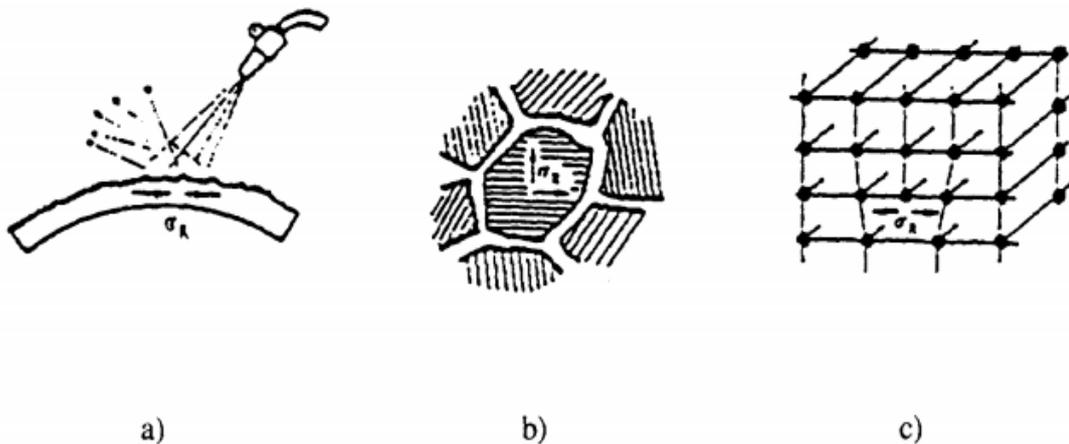


Figure I.12 : Classification des contraintes résiduelles en pratique

- Contraintes macroscopiques d'ordre 1 (échelle du polycristal), mesurables
- Contraintes microscopiques d'ordre II (échelle du grain)
- Contraintes microscopiques d'ordre III (échelle du réseau cristallin)

L'état des contraintes résiduelles dans un matériau réel est la superposition de ces trois ordres de contraintes. Ceci est schématisé, pour un matériau diphasé, sur la figure :

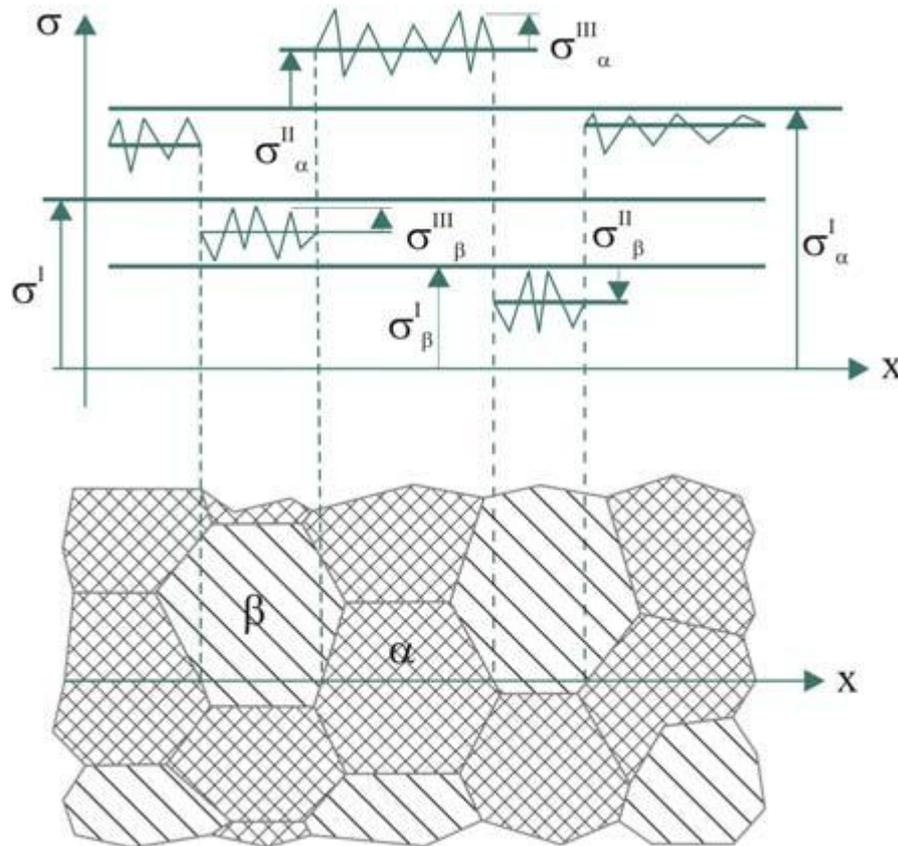


Figure I.13 : Définition schématique des différents ordres de contraintes résiduelles pour un matériau diphasé

I.3.3. Mesure des contraintes résiduelles

De nombreuses méthodes ont été proposées pour mesurer les contraintes résiduelles dans une pièce. Généralement, on classe ces méthodes en deux catégories :

- les méthodes non destructives,
- les méthodes destructives.

I.3.3.1 Méthodes non destructives

Ces méthodes utilisent les relations qui existent entre les caractéristiques physiques ou cristallographiques du matériau et les champs de contraintes résiduelles existant dans la pièce. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

- la méthode par effet Barkhausen,
- la méthode par ultrasons,
- la méthode par diffraction des neutrons,
- la méthode par diffraction des rayons X. Nous décrivons ci-dessous ces méthodes, et plus particulièrement la méthode par diffraction des rayons X, qui est de loin la plus utilisée.

Méthode par effet Barkhausen

Considérons un matériau ferromagnétique soumis à des variations de champ magnétique (ΔH). Au cours du cycle d'hystérésis magnétique, les variations d'induction (ΔB) sont discontinues, du fait du mouvement discontinu des parois des domaines magnétiques. Le bruit Barkhausen correspond aux impulsions de voltage détectées par une sonde proche de la surface (fig). Les défauts cristallins et/ou les contraintes résiduelles provoquent un déplacement de la position de l'un des pics ou du signal global du bruit Barkhausen. La mesure de ce déplacement permet de déterminer les contraintes résiduelles. Cette méthode permet de mesurer les contraintes jusqu'à une profondeur d'environ 0,1 mm en fonction de la fréquence du cycle d'hystérésis magnétique. Cette méthode nécessite un étalonnage. Elle est employée dans les cas où il n'est pas nécessaire d'avoir une grande précision. L'interpolation des mesures est délicate, car le comportement magnétique s'avère très sensible à tous les facteurs métallurgiques (taille de grain, impuretés, structure...).

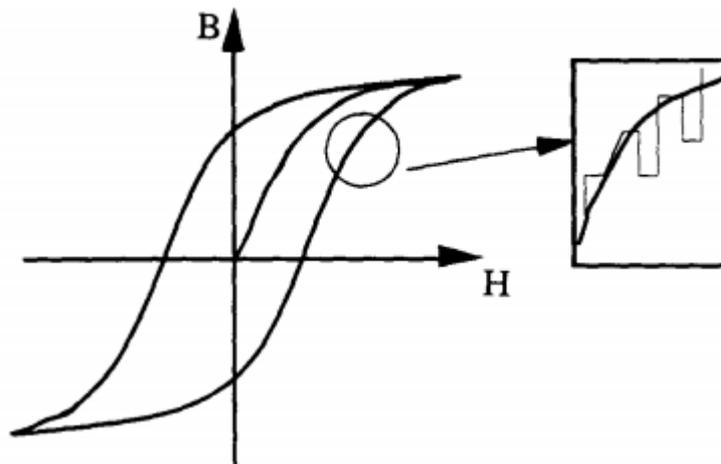


Figure I.14 : Cycle d'hystérésis magnétique ($B-H$) et bruit Barkhausen correspondant d'un matériau ferromagnétique.

Méthode par ultrasons

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de fréquence supérieure à 16KHz (seuil d'audibilité). Un champ de contraintes dans un solide modifie la vitesse des ondes qui s'y propagent. Cet effet n'est prévisible que dans le cadre de l'élasticité non linéaire. Les constantes élastiques correspondantes sont déterminées de façon expérimentale. La mesure des variations de vitesse permet d'accéder aux déformations résiduelles existant dans une pièce. La pénétration des ondes de surface dépend de nombreux paramètres, notamment de la fréquence et du type d'ondes de surface utilisé ; dans le cas des matériaux métalliques, on peut situer cette profondeur de pénétration entre 0,1 et 2 mm. La méthode ne permet actuellement de mesurer que des valeurs moyennes sur des surfaces de l'ordre du cm². Cette méthode ne permet pas encore d'effectuer des mesures quantitatives très précises et elle demande une phase de calibration très rigoureuse qui dépend beaucoup de la nature et de la structure du matériau étudié.

Méthode par diffraction des rayons X

Cette méthode permet d'accéder aux contraintes résiduelles superficielles, aux échelles macroscopique et microscopique. Pour avoir la répartition des contraintes résiduelles dans l'épaisseur, il faut enlever des couches successives de métal par une méthode chimique ou électrochimique ; la méthode devient alors destructive. Grâce aux progrès théoriques et technologiques, cette méthode est aujourd'hui très fréquemment utilisée, tant dans l'industrie qu'en laboratoire.

Les contraintes, appliquées ou résiduelles, sont accompagnées de déformations ; ces déformations correspondent à un changement de distance entre plans atomiques dans un cristal (distance inter-réticulaire) ; connaissant ce changement de distance inter-réticulaire, on peut déterminer les contraintes résiduelles par les équations de la mécanique des milieux continus élastiques. La méthode de diffraction des rayons X permet la mesure de cette distance inter-réticulaire par l'étude du déplacement et de la largeur d'un pic de diffraction lié à une famille de plans cristallins. Le principe de cette méthode est présenté en annexe.

- Avantages et inconvénients :

Cette méthode est une méthode non destructive qui permet d'effectuer des mesures tant en laboratoire qu'in-situ. Cette technique, rapide et précise, donne des informations sur l'état des déformations aux échelles macroscopique et microscopique. Grâce à une petite taille de faisceau ($\Phi=1\text{mm}$), des mesures très locales, dans des endroits non accessibles aux jauges de déformation, deviennent possibles. Cette méthode n'est applicable que pour les matériaux cristallins (métaux, céramiques...). Étant donné la faible pénétration des rayons X, elle permet la mesure des contraintes dans les couches superficielles ($\approx 10\mu\text{m}$). La dimension de la surface d'échantillon impactée est limitée

(< 1mm²), ainsi que la taille de grain qui ne doit pas être trop grande ($\leq 100-200\mu\text{m}$). Différents facteurs (le gradient des contraintes, la texture cristallographique, la rugosité de la surface, un fon taux d'écrouissage...) peuvent perturber les résultats.

-Domaine d'application :

La méthode par diffraction des rayons X présente l'avantage essentiel d'être non destructive ; elle s'applique aux contraintes du domaine élastique ; elle est bien appropriée aux mesures des contraintes résiduelles dans les pièces traitées superficiellement (ayant subi une forte variation des contraintes résiduelles au voisinage de la surface) par grenailage, trempe, cémentation... On l'utilise également dans les joints soudés.

Méthode par diffraction des neutrons

Cette méthode utilise le même principe que la méthode par diffraction des rayons X exposée ci-dessus, mais le faisceau de rayons X est remplacé par un faisceau de neutrons lents. Les neutrons ont une profondeur de pénétration beaucoup plus importante que les rayons X (quelques centimètres au lieu de plusieurs dizaines de microns). Malgré cet avantage, l'application de cette méthode est encore peu développée, car elle nécessite une installation lourde, voisine d'un réacteur nucléaire, et des flux de neutrons importants. Cette méthode offre la possibilité de mesure de variation des contraintes dans l'épaisseur. Sa résolution en profondeur est d'environ 1mm.

I.3.3.2. Méthodes destructives

Ces méthodes sont basées sur des mesures de déformations résultant d'enlèvements successifs de matière. Leur principe est assez simple. Pour pouvoir mesurer les contraintes résiduelles, il faut les faire se manifester, par exemple par un effet de déformation. En enlevant de la matière, on perturbe le champ des contraintes résiduelles qui était à l'origine en équilibre, en l'absence de forces extérieures ; il y a relaxation de ces contraintes. La pièce se déforme alors pour retrouver un nouvel état d'équilibre sous un nouveau champ de contraintes résiduelles. La mesure des déformations de la pièce permet de remonter aux contraintes résiduelles initiales. Les différentes méthodes sont en général désignées par le mode d'enlèvement de matière utilisé :

- la méthode de découpage ou trépanage,
- la méthode de la flèche,
- la méthode du trou (semi-destructive),
- la méthode de Sachs,
- la méthode d'usinage chimique ou électrochimique.

Méthode de découpage ou trépanage

La méthode de découpage ou trépanage procède par une destruction complète de la pièce (découpage dans l'épaisseur). La flèche mesurée après découpage nous permet d'obtenir une valeur moyenne des contraintes résiduelles dans l'épaisseur. Du fait de sa précision insuffisante et de l'introduction de contraintes par l'outil au cours du découpage, l'utilisation de cette technique est peu répandue.

Méthode de la flèche

Cette méthode procède par un enlèvement progressif des couches de matériau (usinage mécanique ou chimique). Après cet enlèvement, la pièce se déforme. La variation de flèche " δ_f " produite par l'enlèvement d'une couche d'épaisseur " δ_e " peut être reliée à la contrainte " $\sigma(e)$ " existant dans la pièce. La mesure d'une telle flèche se fait au comparateur au $1/100^{\text{e}}$ de mm. La dimension doit être choisie de telle sorte que la flèche créée soit parfaitement mesurable (pièce mince plus favorable). Le lissage de la fonction flèche-épaisseur des couches enlevées nécessite généralement un soin particulier. Cette méthode est destinée plus particulièrement aux pièces présentant des contraintes résiduelles superficielles.

Méthode du trou

Cette méthode, semi-destructive, est basée sur le principe de la relaxation des contraintes résiduelles après enlèvement de matière par perçage d'un trou. La méthode du trou traditionnelle consiste à percer un trou jusqu'à une profondeur de 1,2 fois le diamètre du foret. On mesure les déformations locales à l'aide des trois jauges d'une rosette centrée sur le trou. Cela permet de définir les valeurs moyennes des contraintes principales sur la profondeur du perçage, ainsi que leur direction par rapport à un repère de référence.

La méthode du trou incrémental consiste à percer un trou par paliers successifs. A chaque incrément, on mesure les déformations des jauges ; on peut alors déterminer la répartition des contraintes résiduelles dans l'épaisseur de la pièce. Dans ce cas, le problème essentiel est de déterminer les "coefficients d'influence" ou "coefficients d'étalonnage". La méthode du trou est rapide et simple à mettre en oeuvre, mais semi-destructive. La technique du perçage peut introduire de nouvelles contraintes et un échauffement, ce qui risque de fausser les mesures.

Méthode de Sachs

Cette méthode est basée sur la relaxation des contraintes résiduelles résultant d'un enlèvement de matière par perçage mécanique ou par usinage chimique. Le principe et la technique de cette méthode sont similaires à ceux de la méthode du trou, mais la méthode de Sachs est appropriée aux mesures des contraintes résiduelles sur pièces cylindriques.

Elle est destinée spécifiquement au cas des contraintes résiduelles de répartition axisymétrique.

Méthode par dissolution électrochimique

Cette méthode consiste à mesurer la relaxation des contraintes résiduelles à la suite d'un enlèvement électrochimique de couches successives de matière dans une pièce plane. A la suite de cet enlèvement, la pièce se déforme et les déformations résultantes peuvent être mesurées à l'aide de jauges collées sur la face opposée à l'enlèvement. Les contraintes résiduelles dans l'épaisseur sont calculées à partir des déformations mesurées et de l'épaisseur enlevée.

Cette méthode demande une mise en œuvre expérimentale réduite et un faible coût d'équipement. Elle n'est applicable qu'à des pièces planes. Elle permet de déterminer le profil des contraintes résiduelles dans l'épaisseur de la pièce.

Conclusion de chapitre :

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages sont très importantes, puisqu'elles définissent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux mais également leur comportement en service dans des applications industrielles. Le choix du matériau d'une pièce industrielle est lié à ces propriétés mécaniques tel que : résistance, dureté, ductilité. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par des essais mécaniques qui permettront d'apprécier le comportement d'un matériau en service.

Les contraintes résiduelles et la rugosité sont aussi des facteurs très importants lorsque le choix d'un matériau, elles influencent le comportement des composants mécaniques et peuvent donc en compromettre la stabilité structurelle, dimensionnelle, et la résistance à la rupture. Il existe plusieurs méthodes pour les évaluer. Le choix judicieux d'une méthode appropriée à un problème donné est essentiel. Ceci exige une bonne connaissance de chaque méthode ainsi que de ses limitations en application.

Chapitre II

Intégrité de surface

Introduction :

La spécification et la fabrication de surfaces intactes ou améliorées nécessitent une compréhension de la relation entre la métallurgie, l'usinage et le mécanique essai. Pour répondre à cette exigence, une discipline globale connue sous le nom d'intégrité de surface a été introduite et acceptée dans le monde entier. La technologie d'intégrité de surface décrit et contrôle les nombreuses altérations possibles produites dans une couche de surface au cours de la fabrication, y compris leurs effets sur les propriétés des matériaux et les performances de la surface en service. L'intégrité de la surface est obtenue par la sélection et le contrôle du processus de fabrication, en estimant leurs effets sur les propriétés techniques importantes des matériaux de travail, comme les performances en fatigue.

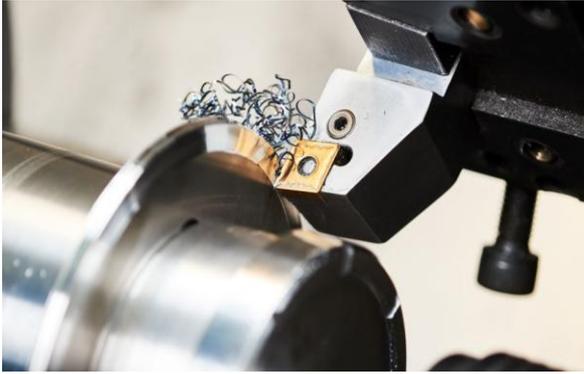
II.1. Usinage

Le terme « usinage » fait référence à un ensemble de processus de fabrication basés sur des machines qui impliquent l'enlèvement contrôlé de matière d'une pièce dans le but de modifier sa taille et/ou sa forme. L'usinage fait partie de la fabrication de nombreux produits métalliques, mais il peut également être utilisé sur d'autres matériaux tels que le bois, le plastique, la céramique et les matériaux composites. Une grande partie de l'usinage moderne est réalisée par commande numérique par ordinateur (CNC), dans laquelle les ordinateurs sont utilisés pour contrôler le mouvement et le fonctionnement des fraiseuses, des tours et d'autres machines de découpe. Cela augmente l'efficacité, car la machine CNC fonctionne sans personnel, réduisant ainsi les coûts de main-d'œuvre pour les ateliers d'usinage.

II.1.1. Opérations d'usinage

Les processus d'usinage peuvent être divisés en trois catégories principales : le tournage, le fraisage et le perçage. Le tournage est un processus d'usinage qui utilise un outil de coupe fixe pour retirer de la matière d'une pièce en rotation. Le fraisage, quant à lui, est un processus d'usinage qui utilise un outil de coupe rotatif pour retirer de la matière d'une pièce fixe. Le perçage est un processus d'usinage qui utilise un outil de coupe rotatif appelé foret pour percer un trou fileté dans une pièce.

Il existe également divers processus d'usinage qui ne relèvent pas de l'une des trois catégories de processus d'usinage mentionnées. Le brunissage, par exemple, est un processus d'usinage qui repose sur un contact glissant pour déformer la surface d'une pièce. Le brunissage est généralement utilisé sur les pièces en plastique pour produire une surface plus lisse. Divers procédés d'usinage comme le brunissage sont uniques car ils ne produisent généralement pas de copeaux. Le tournage, le fraisage et le perçage produisent tous des copeaux en tant que sous-produit. Les divers processus d'usinage, cependant, ne produisent pas de copeaux.



Tournage



perçage



Fraisage

Figure II.1 : Les opérations d'usinage

II.1.2. Machines-outils

Une machine-outil est un équipement mécanique destiné à exécuter un usinage, ou autre tâche répétitive, avec une précision et une puissance adaptées. C'est un moyen de production destiné à maintenir un outil fixe, mobile, ou tournant, et à lui imprimer un mouvement afin d'usiner ou déformer une pièce ou un ensemble fixé sur une table fixe ou mobile (le tour, la fraiseuse, la rectifieuse, la perceuse à colonne...). Une machine-outil comporte, généralement :

- un bâti rigide réalisé avec une grande précision ;
- une table coulissant selon plusieurs axes, guidée par des glissières ;
- une (ou plusieurs) tête équipée de broche permettant de fixer l'outil ;
- plusieurs moteurs (rotation outil, mouvements de table) ;
- des éléments de manœuvre (manuels ou automatisés).

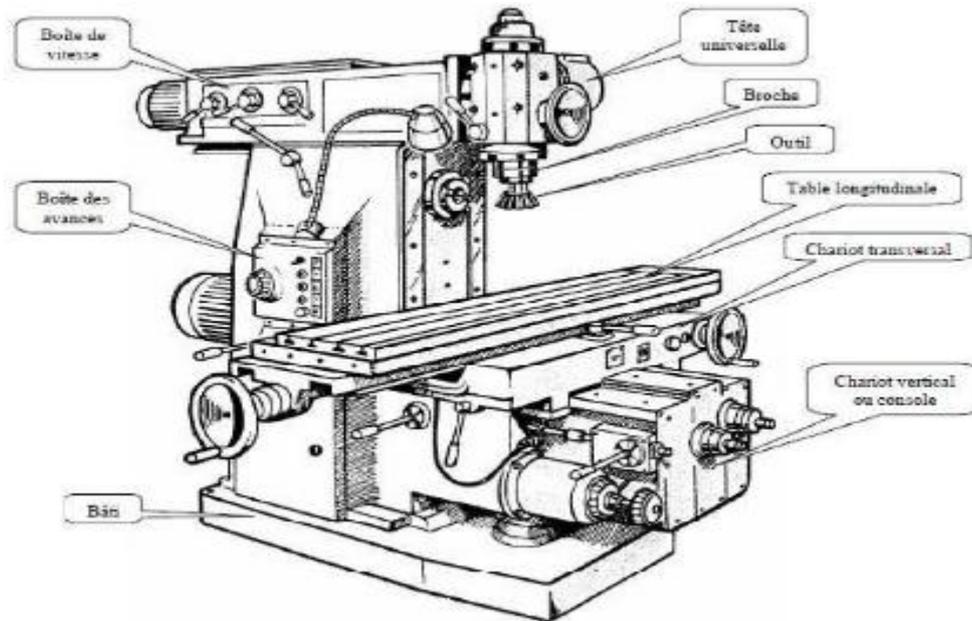


Figure II.2 : Composantes d'une machine-outil (fraiseuse)

II.1.3. Outils de coupe

Un outil de coupe est un outil utilisé pour retirer du matériau de la pièce à usiner au moyen d'une déformation par cisaillement. La coupe peut être réalisée par des outils mono-points ou multipoints. Les outils mono-point sont utilisés pour le tournage, le façonnage, le rabotage et les opérations similaires, et enlèvent de la matière au moyen d'une arête de coupe. Les outils de fraisage et de perçage sont souvent des outils multipoints. C'est un corps ayant des dents ou des tranchants dessus. Les outils de meulage sont également des outils multipoints.

Le matériau de l'outil de coupe doit être plus dur que le matériau à couper, et l'outil doit être capable de résister la chaleur et la force générées lors du processus de coupe du métal. De plus, l'outil doit avoir une géométrie spécifique. La forme souhaitée du matériau déterminera le type d'outils dont nous aurons besoin pour le travail.

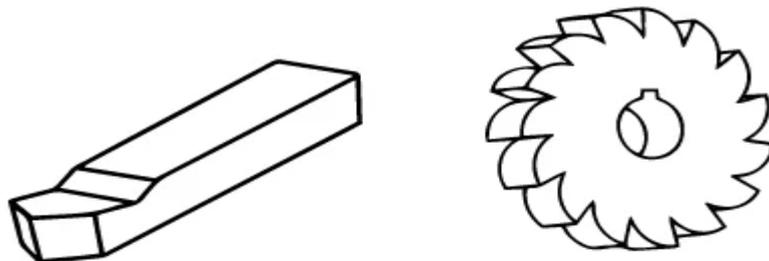


Figure II.3 : Outil mono-point (gauche) et multipoint (droite)

II.1.4. Tournage

La technique du tournage consiste à faire tourner la pièce à usiner autour d'un axe défini. Cet axe est celui de la broche du tour. La pièce à usiner est solidaire de cette broche par un mandrin ou un autre principe de serrage. Le but du tournage est de réaliser des formes de révolution telles que cylindres, cônes, tores et autres formes de révolution complexes. Au cours du tournage on trouve :

- une pièce mobile ;
- un outil à dent unique ;
- une coupe continue.

La figure montre les différents paramètres de coupe au cours d'une opération d'usinage, la pièce est solidaire d'une broche tournante et l'outil se déplace dans un plan. La génératrice de la pièce est donnée par la trajectoire de l'outil dans son plan d'évolution.

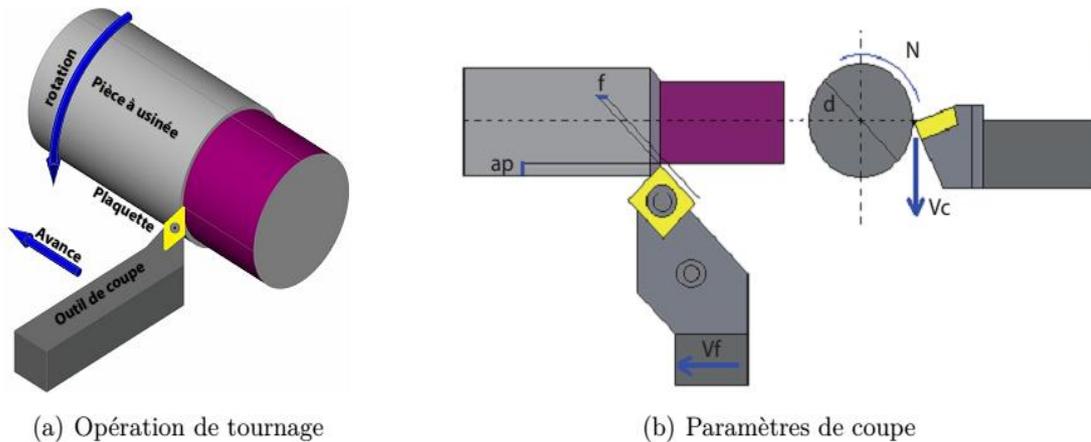


Figure II.4 : Coupe en tournage

II.1.5. Les paramètres de coupe en tournage

La vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sont tous des paramètres à prendre en compte lors de l'usinage. Le matériau de la pièce, le matériau de l'outil et les dimensions influencent ces paramètres.

II.1.5.1. Vitesse de coupe

La vitesse de coupe fait référence à la vitesse à laquelle l'outil coupe dans le matériau de la pièce. Elle dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000}$$

V_c : vitesse de coupe (mm / min)

D : Diamètre de la pièce (mm)

N : Fréquence de rotation (tr / min)

II.1.5.2. L'avance par tour

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée f et est exprimée en mm par tour. Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance V_f . Cette dernière représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce. Elle est donnée par l'équation :

$$V_f = f \times N$$

V_f : vitesse d'avance (mm / min)

f : L'avance (mm)

N : Fréquence de rotation (tr / min)

II.1.5.3. La profondeur de passe

La profondeur de passe représente la différence des rayons avant et après usinage (profondeur de la matière à enlever). Elle est notée a_p et exprimée en mm . En coupe orthogonale, ce paramètre disparaît car il est confondu avec l'avance.

II.2. Finition de surface

La finition de surface fait référence à un vaste éventail de procédés industriels visant à altérer la surface d'un objet fabriqué d'un matériau non-ferreux, généralement fait d'acier inoxydable, de plastique, de bois, d'aluminium, de verre, de matériau composite ou autre. Nous ne considérons pas les surfaces peintes puisqu'elles utilisent un matériau de recouvrement qui n'est pas de la même composition que le substrat.

Les procédés de finition peuvent être utilisés pour rehausser l'apparence d'un objet ou pour obtenir des propriétés spécifiques : résistance à l'usure, adhésion, mouillabilité, soudabilité, conductivité électrique, dureté, friction, etc. Fondamentalement, la finition peut simplement faire référence à retirer tout résidu de matériau présent sur un objet manufacturé suite à un procédé précédent – comme des résidus de soudure, des imperfections de découpe au laser, des bavures, des bords, etc.

II.2.1. Types de finition de surface

Il existe plusieurs types de finitions de surface. Certains procédés de finition sont brevetés ce qui signifie que la recette et les paramètres qui permettent d'atteindre un fini précis sont documentés et protégés par une entité alors que d'autres sont uniquement possibles de réaliser sur certains substrats.

Voici les principales catégories de finis spécialisés :

- Meulé
- Bruni
- Brossé
- Poli terni
- Poli satiné
- Poli brillant
- Avec motifs
- Ondulé
- Mat
- Sablé
- Martelé

Certains finis de surface esthétique peuvent être réalisés avec des procédés de sablage au jet. En voici quelques exemples :

- Le sablage au jet en milieu humide – dans lequel de l'eau est mélangé au média d'abrasif afin d'adoucir l'impact sur la surface – permet de produire un fini brossé ou poli sur des pièces électroniques, des boîtiers d'équipements et divers biens consommateurs.
- Le martelage avec une bille de verre ou une bille d'acier est utilisés pour grenailier un objet et lui donner un aspect martelé.
- Le sablage au jet est également utilisé pour produire un aspect givré sur du verre.

II.2.2. Équipement de finition de surfaces métalliques

Plusieurs outils et machines peuvent être utilisés afin d'obtenir un fini métallique spécifique. Certains outils manuels tels que le papier sablé ou les sableuses manuelles dotées d'une ceinture métallique peuvent être utilisés pour lisser les bords coupants de pièces métalliques. Les polisseuses sont excellentes pour produire des finis polis. Cependant, il n'existe aucun autre équipement de finition qui soit plus efficace que les équipements de sablage au jet lorsque l'application le permet.

Les opérations de finition de surface métallique sont généralement réalisées en cabinet de sablage. Les cabinets de sablage sont très pratiques pour les procédés de finition spéciaux puisque l'opérateur peut travailler librement tout près de sa pièce derrière une vitre de sécurité. Ce type d'équipement a également un très faible encombrement au sol et peut également être utilisé pour d'autres types de traitement de surface.

II.2.3. Galetage

Le galetage est un procédé industriel réalisé en finition et super finition. L'opération est réalisée avec un outil : le brunissoir à galets. Le galetage est une opération de finition qui peut avoir plusieurs objectifs, le renforcement mécanique (tenue en fatigue), la mise en forme par repoussage par un galet de brunissage ou bien encore la super finition (sans modification de cote) afin d'obtenir une très faible rugosité. Le galetage peut remplacer un traitement thermique dans certains cas et est moins onéreux que la rectification.

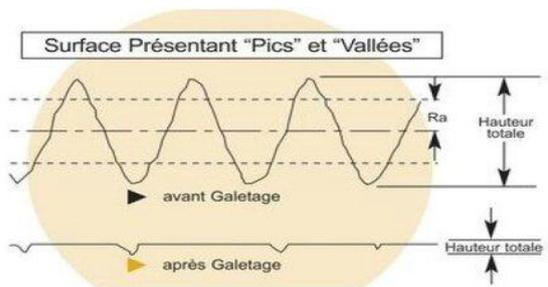


Figure II.5 : Etat de surface avant et après galetage



Figure II.6 : Outil de galetage

➤ Principe de galetage

Le galetage est un usinage sans enlèvement de matière. Ce procédé consiste à compacter fortement la matière en surface d'une pièce, avec des outils spécifiques (galets traités avec une dureté supérieure), afin de lui conférer des propriétés géométriques et mécaniques particulières.

➤ Types de galetage

a) Le galetage de surface :

Il permet d'améliorer la surface du point de vue macro et micro géométrie. Toutefois, la tolérance finale ne dépend pas de cette seule action mais, en premier lieu, de la valeur dimensionnelle de l'opération antérieure, d'usinage par exemple, de la préparation de la surface de la pièce à galetter : tournage fin, rectification normale ou fine. Le galetage est donc fonction de l'approche dimensionnelle fournie par l'ébauche.

b) Le galetage dimensionnel ou de forme:

Le but est de modifier la forme initiale de la pièce, soit pour introduire des corrections volontaires destinées à un usage particulier (cas du galetage de pignons taillés en vue de réduire le bruit en fonctionnement) soit pour ramener la forme initiale dans la tolérance (cas du galetage d'ébauches de rotules obtenues par frappe). La tolérance se situe entre 0.1 et 0.15 mm.

c) Le galetage de renforcement :

Il permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction soumises à des contraintes élevées. Par dépassement local de la limite d'élasticité, il se produit des précontraintes de compression qui ont une influence favorable sur l'endurance du matériau dans les zones soumises à fatigue, notamment alternée (exemple : galetage de congés de raccordement entre une partie cylindrique et un épaulement sur un arbre soumis à des flexions alternées).

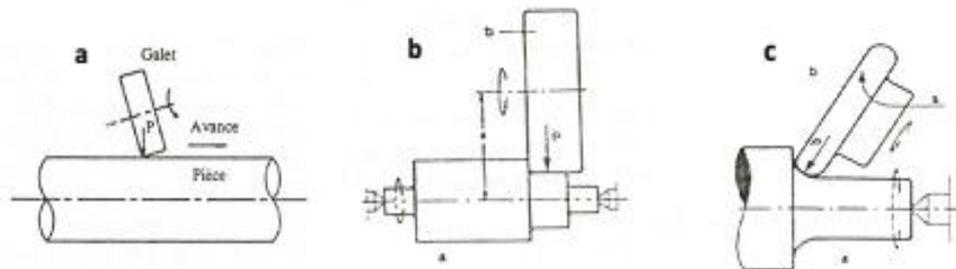


Figure II.7 : Différents types de galetage

➤ Impact sur les propriétés en surface d'une pièce galetée

Les caractéristiques d'une surface galetée sont les suivantes :

- Rugosité réduite (typiquement de $Rz\ 5-15\ \mu\text{m}$ à $Rz < 1\ \mu\text{m}$)
- Une dureté superficielle augmentée
- Une augmentation de la tenue à la corrosion
- Une meilleure tenue en fatigue (notamment lors de sollicitations en flexion alternée)

➤ Pièces galetées

Dans l'industrie mécanique, de nombreuses pièces de révolution sont galetées ; vilebrequin (réduction du risque de fissuration dans les zones très sollicitées), pignons (afin de réduire le bruit en fonctionnement), flans de vis très sollicités, cylindres. Tous les matériaux peuvent faire l'objet d'un galetage si leur dureté ne dépasse pas 45 HRC (avec des outils de galetage traditionnel) et 60 HRC (outils de lissage diamant). Un matériau est apte au galetage si son allongement est supérieur à 5 %. Les géométries qui peuvent faire l'objet d'un galetage sont les géométries généralement cylindriques. Il existe des machines-outils spécifiques dédiées au galetage

II.2.4. Surface usinée

Le terme surface a de nombreuses définitions, parfois c'est un objet géométrique, parfois c'est la frontière physique entre deux environnements. Dans le cadre de cette recherche, le terme surface sera utilisé pour désigner les limites physiques de la pièce considérée, et aussi le matériau directement sous la surface. Cette surface doit donc posséder les caractéristiques adaptées à l'usage à laquelle elle est destinée. La génération d'une surface usinée fait intervenir autant la forme que les traces laissées par le tranchant au contact de la pièce pendant leur mouvement relatif. une surface usinée a une variété de parties constitutives. Ils peuvent être divisés en quatre domaines ou aspects principaux :

- Topographie
- Métallurgie
- Propriétés mécaniques
- Chimie

La topographie et la chimie de la surface à l'interface avec l'atmosphère peuvent être décrites comme la caractéristique externe d'une surface, tandis que la métallurgie et les propriétés mécaniques sous-jacentes représentent les caractéristiques internes,

Le procédé d'usinage modifie généralement la surface et la sous-surface, sur une épaisseur inférieure au millimètre, en un état dit « non standard » que l'on appelle intégrité de surface.

En effet, immédiatement après l'usinage, la nouvelle surface générée va adsorber des éléments et s'oxyder. Les éléments adsorbés proviennent de la vapeur d'eau et des différents hydrocarbures présents dans l'air ou le fluide de coupe. Sous cette couche se trouvent les oxydes dont l'épaisseur peut être stable dans le cas des aluminiums ou bien des aciers inoxydables, ou variable, pour les aciers faiblement alliés. Sous ces premières couches se trouve la couche affectée mécaniquement et thermiquement par le procédé d'usinage. Son épaisseur est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des couches précédentes et peut atteindre plusieurs dixièmes de millimètres. C'est à cette échelle que se situe notre étude. On remarquera par la suite que cette couche de surface affectée mécaniquement et thermiquement peut encore être divisée en fonction de l'apparition d'éventuels changements de microstructure.

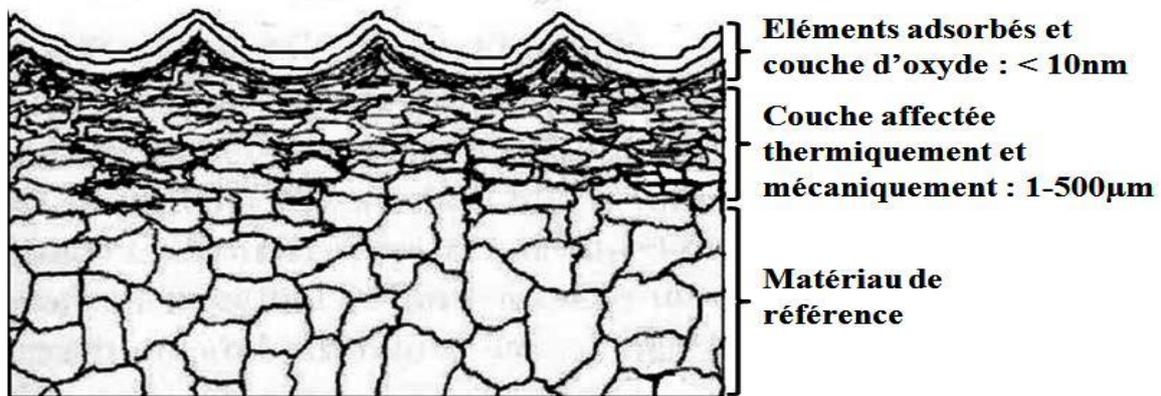


Figure II.8 : Les différentes couches affectées d'une surface

II.3. Intégrité de surface

La définition originale de cette notion, écrite en anglais, est « the inherent or enhanced condition of a surface produced in machining or other surface generation operation » [Field, 1964]. Elle pourrait se traduire par « **l'état intrinsèque ou amélioré d'une surface réalisée par usinage ou par une autre opération de mise en forme** ».

Donc « Field et Kahles » ont décrit l'intégrité de la surface en tant que la relation entre les valeurs géométriques de la surface telles que la rugosité et les propriétés physiques telles que les contraintes résiduelles, la dureté et la structure des couches superficielles. Ces deux facteurs, la topographie de surface et la métallurgie de surface, agissent ensemble et affectent la résistance à la fatigue d'une manière complexe [4].

L'intégrité de surface peut être divisée en deux catégories principales : les caractéristiques topographiques et les caractéristiques matérielles de la couche de surface. La topographie se compose de la rugosité, de l'ondulation, des erreurs de forme et autres défauts (fissures,...). La topographie a été traitée dans le chapitre précédent. Les propriétés matérielles de la couche de surface pouvant être affectées par le procédé de fabrication sont, entre autres, la déformation plastique, les contraintes résiduelles, la dureté, l'état de la microstructure (changement de phase et recristallisation) et la composition chimique.

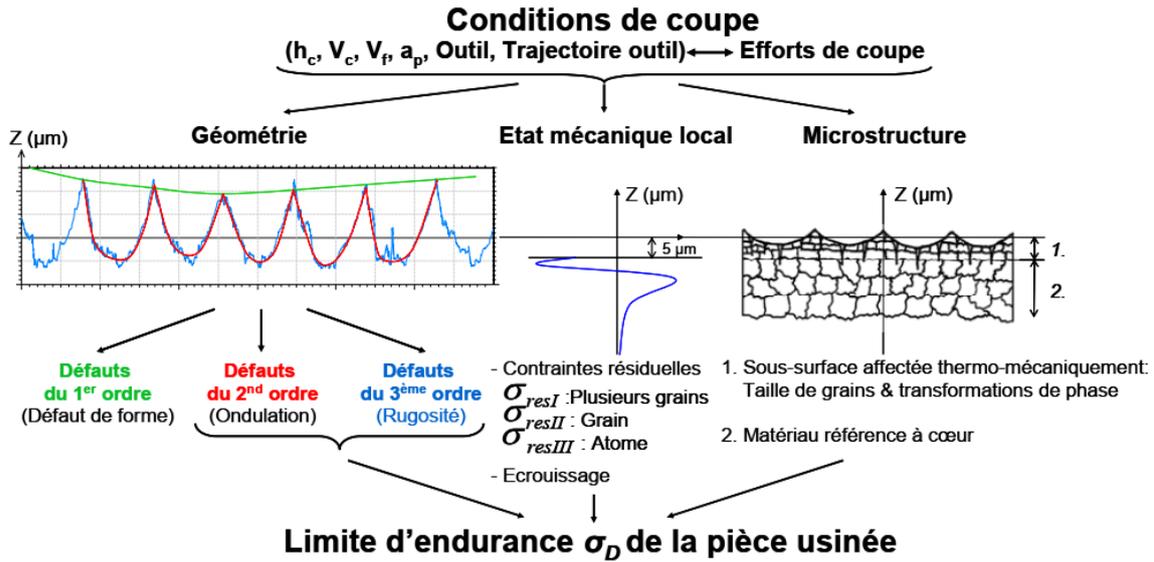


Figure II.9 : Schéma de l'intégrité de surface pour pièces usinées

II.3.1. L'influence des procédés de fabrication sur l'intégrité de la surface

Étant donné que l'influence des procédés de fabrication sur l'intégrité de la surface est très importante pour le contrôle de la qualité de la pièce, il est donc nécessaire de mieux comprendre comment les processus de finition affectent le comportement fonctionnel des pièces usinées. Le comportement d'une pièce usinée est considérablement déterminé par l'état physique de son intégrité de la surface.

La littérature est très riche de résultats sur l'intégrité de surface en général, La comparaison des résultats des différents procédés étudiés permet de voir qu'il est possible, indépendamment de la nature même du procédé, d'obtenir des intégrités de surfaces identiques. Ceci est la preuve que ce n'est donc pas le procédé qui induit l'intégrité de surface, mais la combinaison de chargements mécaniques, thermiques et chimiques, qui vont laisser leur signature sur la surface. Le tableau synthétise les résultats généralement obtenus en terme d'intégrité de surface par l'application de différents chargements à travers les divers procédés présentés précédemment. Il ressort de cette étude que le contrôle de l'intégrité de surface passe donc par la caractérisation et la maîtrise de ces chargements et de leurs conséquences sur le matériau étudié.

Tableau II.1 : Synthèse des intégrités de surfaces typiquement obtenues en fonction des procédés et de leurs signatures, appliqués sur une surface issue d'une opération de tournage. Les flèches indiquent le sens de variation de la rugosité par rapport à la rugosité initiale du tournage

	Procédés	Rugosité	Contraintes résiduelles		Microstructure
			surface	profondeur affectée	
Mécanique	Grenailage	↗	Compression	Compression ($\approx 0,1 - 0,2mm$)	Écrouissage en surface + nanograins
	Galetage	Dépend de l'avance + outil	Compression	Compression ($\approx 0,1 - 0,5mm$)	Écrouissage en surface + microstructure dépendante du matériau
	Toilage	↘	Compression	Compression ($\approx 0,01mm$)	Suppression couche blanche
Thermique	Traitement thermique de surface	/	Compression	Compression (\approx plusieurs mm)	Transformation de phase (dépend du matériau)
	Meulage grande vitesse	↘	Compression	Compression ($\approx 0,1 - 0,2mm$)	Changement de phase
Thermo-mécanique	Tournage	Dépend de l'outil + avance	Traction	Compression ($\approx 0,1 - 0,2mm$)	Affinement taille de grains + couche écrouie
	Meulage	↘	Dépend des conditions (généralement traction)	($\approx 0,1 - 0,2mm$)	Dépend des conditions (Écrouissage de surface)

L'intégrité de surface obtenue en usinage dépend fortement des paramètres de processus employés. Il existe divers paramètres de coupe connus pour avoir un grand impact sur la qualité de surface des pièces usinées. Par conséquent, de nombreuses recherches ont été réalisées afin de quantifier l'effet de divers paramètres de processus de tournage sur l'amélioration de la qualité de surface. Ces paramètres sont classés en trois types : paramètres de configuration, paramètres d'outil et paramètres de pièce.

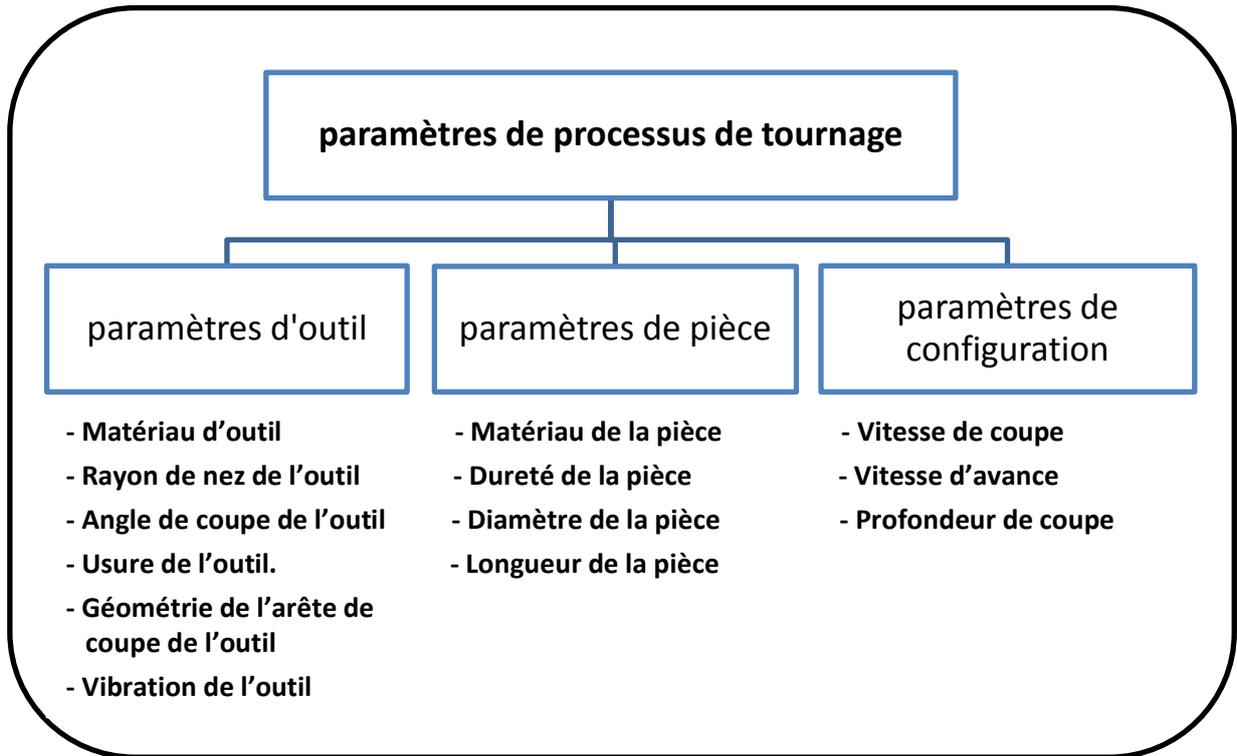


Figure II.10 : Les paramètres de tournage

II.3.2. Relevés topographiques – rugosité

La rugosité est l’un des paramètres les plus importants de l’intégrité de surface qu’on a déjà traité dans le chapitre précédent, il y a plusieurs méthodes pour mesurer la rugosité, les plus utilisés sont celles de profilométrie par contact qui sont largement employées dans les industries de production de pièces usinées. Après acquisition d’un profil primaire, les défauts de forme (1er ordre) et d’ondulation (2^e ordre) sont soustraits afin d’obtenir un profil de rugosité à partir duquel sont calculés les différents paramètres R_a , R_t et R_z

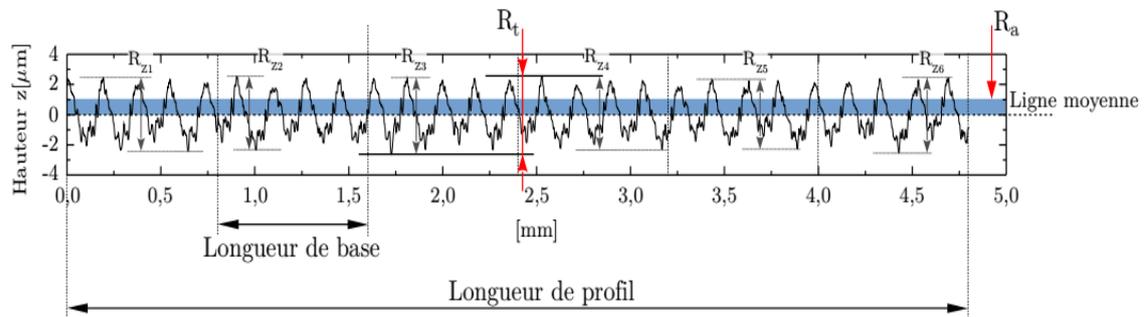


Figure II.11 : Profil de rugosité et représentations des paramètres de rugosité associés.

Ces différents paramètres se calculent de la manière suivante, avec l longueur du profil, $z(x)$ hauteur du profil à la position x , n le nombre de longueurs de base :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx$$

$$R_t = |\max(z(x))| + |\min(z(x))|$$

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^n R_{zi}}{n}$$

$$R_{z_{\max}} = \max(R_{zi})$$

Dans la suite de ce projet de fin d'étude, seules des valeurs de R_a seront présentées puisqu'il s'agit du paramètre de rugosité le plus couramment utilisé pour décrire une surface.

II.3.2.1. Effet de tournage sur la rugosité

Le processus d'usinage ou de finition a le plus grand effet sur la géométrie de la surface. Un facteur majeur est l'action de l'outil de coupe sur le matériau. Des éléments tels que la forme de l'outil, la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de coupe et le fluide de coupe peuvent être variés pour affecter la topographie. D'autres facteurs affectant la surface sont l'instabilité de l'outil de coupe et les erreurs dans le guidage de la machine-outil [5].

Plusieurs recherches ont étudié l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface dans les opérations de tournage. « Thiele et Melkote » ont montré qu'une augmentation du rayon d'arête augmente la rugosité de surface moyenne en raison de l'augmentation de la composante de labour par rapport à la composante de cisaillement de la déformation [6]. « Chou et Evans » ont montré que la rugosité de surface a tendance à augmenter lorsque l'usure de l'outil augmente [7].

De nombreuses tentatives ont été faites pour modéliser la rugosité de surface dans le tournage dur en fonction de divers paramètres de processus. « Whitehouse » a proposé un modèle empirique pour estimer la variation de rugosité de surface par l'équation [8] :

$$R_a = \frac{f^2}{32 \times r_\varepsilon}$$

Dont :

R_a : Rugosité arithmétique

f : L'avance (mm)

r_ε : Rayon du nez de l'outil

Cette relation ne prend en compte que la partie géométrique de la rugosité. La vraie surface finie est une combinaison de la rugosité géométrique et de la rugosité secondaire dérivée de l'écoulement plastique du matériau, le processus d'enlèvement, l'usure de l'outil, le broutage de l'outil ou de la pièce, etc. Cela implique que l'accord entre la rugosité mesurée et les valeurs prédites selon la relation n'est assez bon que pour des niveaux moyens-élevés de Ra. Pour les faibles niveaux de rugosité le modèle sous-estime systématiquement la rugosité de surface réelle, car dans ce cas la rugosité secondaire devient plus importante que la rugosité géométrique.

« Sasahara » a étudié l'effet du rayon du nez de l'outil, de la vitesse d'avance et de deux types d'outils arêtes tranchantes et chanfreinées sur la rugosité de surface d'un acier à 0,45 %C [9].

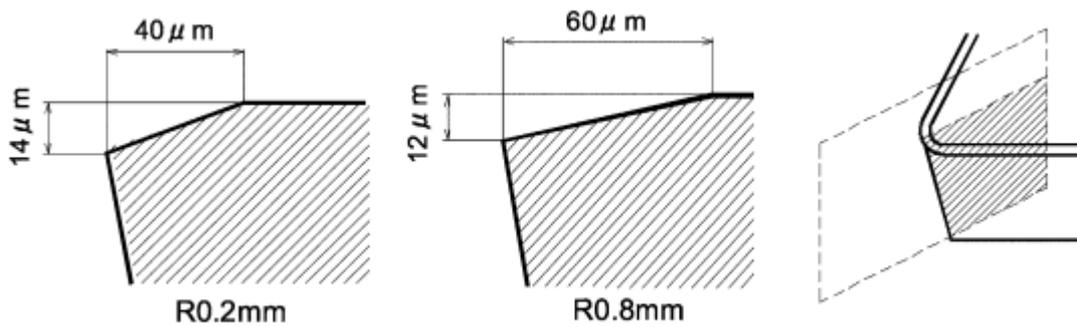


Figure II.12 : configuration de l'arête de l'outil avec chanfrein

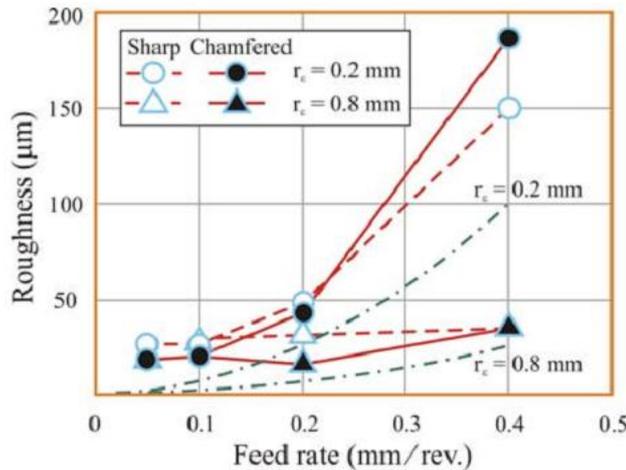


Figure II.13 : Effet des conditions de coupe sur la rugosité de surface

On peut voir que la rugosité de surface augmente lorsque la vitesse d'avance augmente, où le rayon du nez de l'outil devient plus petit.

II.3.3. Contraintes résiduelles

Les contraintes résiduelles sont créées à partir des sollicitations thermomécaniques complexes en usinage. Les déformations plastiques dans les zones de cisaillement engendrent plutôt des contraintes de compression après retour élastique de la pièce, alors que les hautes températures générées par la coupe ont tendance à introduire des contraintes de traction. Ces phénomènes peuvent être représentés de manière schématique par l'évolution des contraintes et des déformations en 1D pour un chargement mécanique pur (Figure II.2) et pour un chargement thermique (Figure II.3). La combinaison de ces deux types de sollicitation peut générer des contraintes

L'écroûissage est uniquement issu des sollicitations mécaniques dues au phénomène de coupe. Il est le résultat de la déformation plastique maximale. Il est étroitement lié aux valeurs des contraintes résiduelles car plus la déformation plastique est importante, plus l'écroûissage est important et plus les contraintes résiduelles générées le sont également.

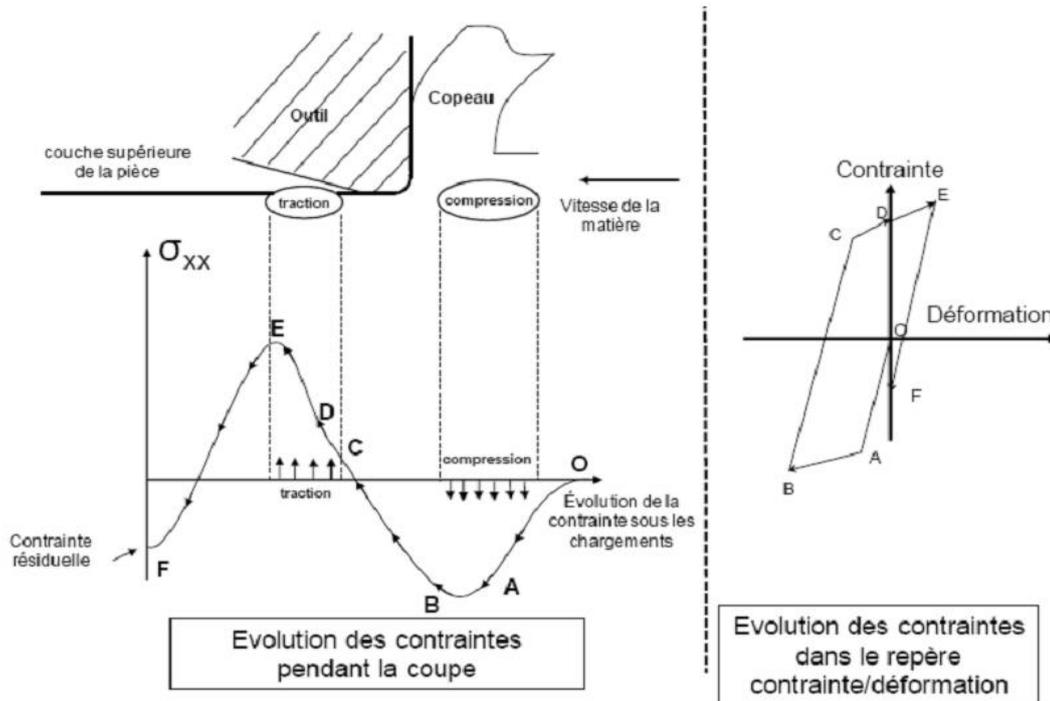


Figure II.14 : Chargement mécanique pur induit la coupe

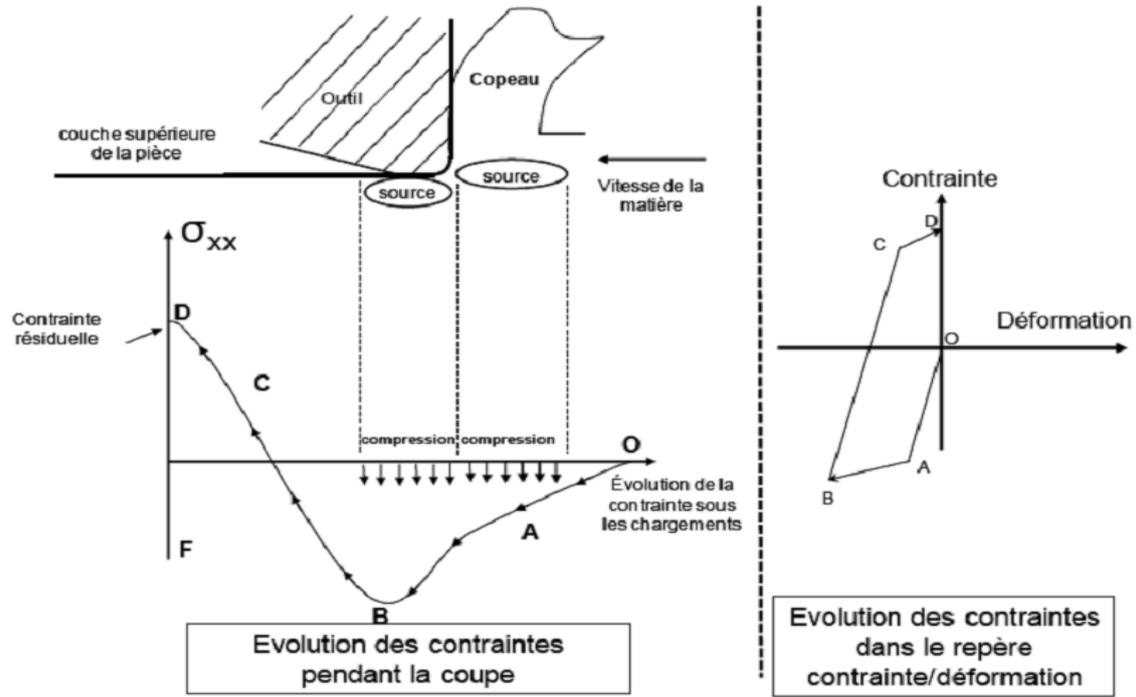


Figure II.15 : Chargement thermique pur induit par la coupe

II.3.3.1. Effet des paramètres du procédé de tournage sur les contraintes résiduelles

L’obtention de l’état mécanique est généralement indissociable de celui de la micro-géométrie. Cependant, la rugosité la plus faible n’est pas forcément associée à des contraintes résiduelles de compression, bénéfiques à la tenue en fatigue. Ainsi, pour garantir la qualité de la pièce usinée d’un point de vue tenue en fatigue, des compromis sont parfois nécessaires pour optimiser la durée de vie d’une pièce.

Les travaux réalisés par « Javidi » dans le cas du tournage d’un acier bainitique montrent que la micro-géométrie obtenue pour un facteur de concentration de contrainte le plus élevé n’engendre pas forcément une durée de vie la plus faible. En effet, pour un chariotage réalisé à l’avance f (mm/tr) constante, la hauteur de crête obtenue R_t augmente lorsque l’on utilise un rayon de bec de plaquette r_ϵ plus faible selon la relation classique suivante [10] :

$$R_t = \frac{f^2}{8r_\epsilon}$$

« Dahlman et Al » ont étudié l’influence de l’angle de coupe, de l’avance de coupe et de la profondeur de coupe sur les contraintes résiduelles dans le tournage. Ils ont montré qu’un angle de coupe négatif plus important induit des contraintes résiduelle de compression plus élevée ainsi qu’une zone affectée plus profonde sous surface [11]. La

position de contrainte maximale est déplacée plus loin dans le matériau en augmentant les angles de coupe. Ils ont également démontré que la profondeur de coupe n'affecte pas les contraintes résiduelles et une vitesse d'avance accrue génère des contraintes résiduelles de compression nettement plus élevées. La figure suivante montre la distribution des contraintes résiduelles affectées par les différentes valeurs d'avancement selon « Scholtes » [12] :

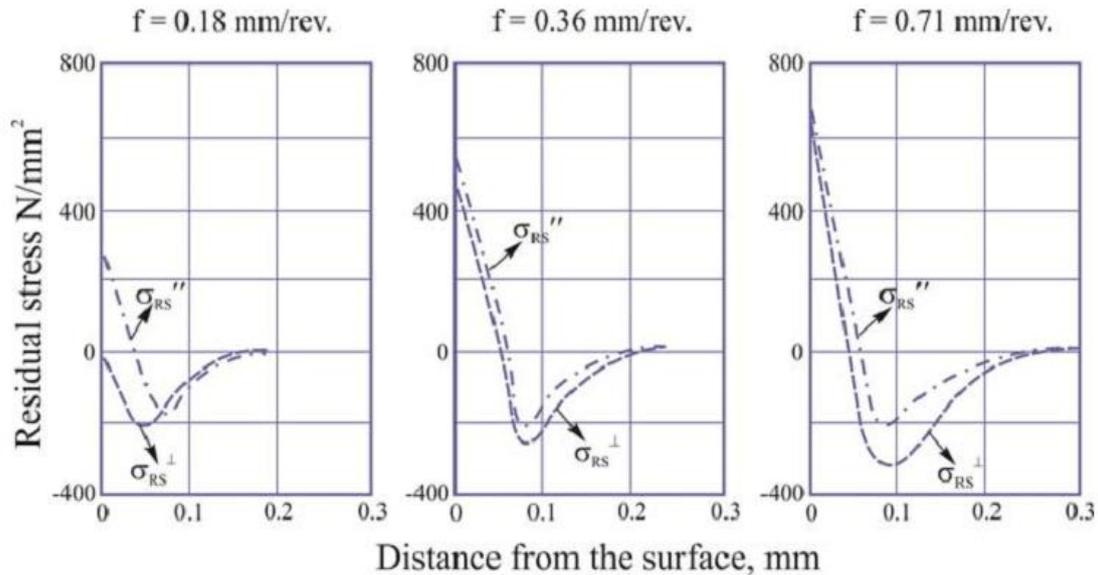


Figure II.16 : Contraintes résiduelles dans les directions parallèle et transversale causé par le tournage de SAE 1045 pour différents avancement de coupe. La vitesse de coupe est de 90 m/s sans refroidissement.

On peut voir que plus la vitesse d'alimentation est élevée, plus les contraintes résiduelles induites sont élevées à la surface ou sous la surface est. La figure précédente montre également que les contraintes de traction apparaissent souvent près de la surface et les contraintes de compression se produisent plus profondément dans le matériau. La distribution des contraintes est affectée par le frottement dans le processus de coupe, qui a tendance à provoquer des contraintes de traction dans la surface près de la couche et par déformation plastique, ce qui provoque des contraintes de compression dans les couches plus profondes.

« Leskovar et Peklenik » a étudié l'effet de la vitesse d'avance f , de la vitesse de coupe V_c et de l'usure de l'outil V_B sur les contraintes résiduelles [13].

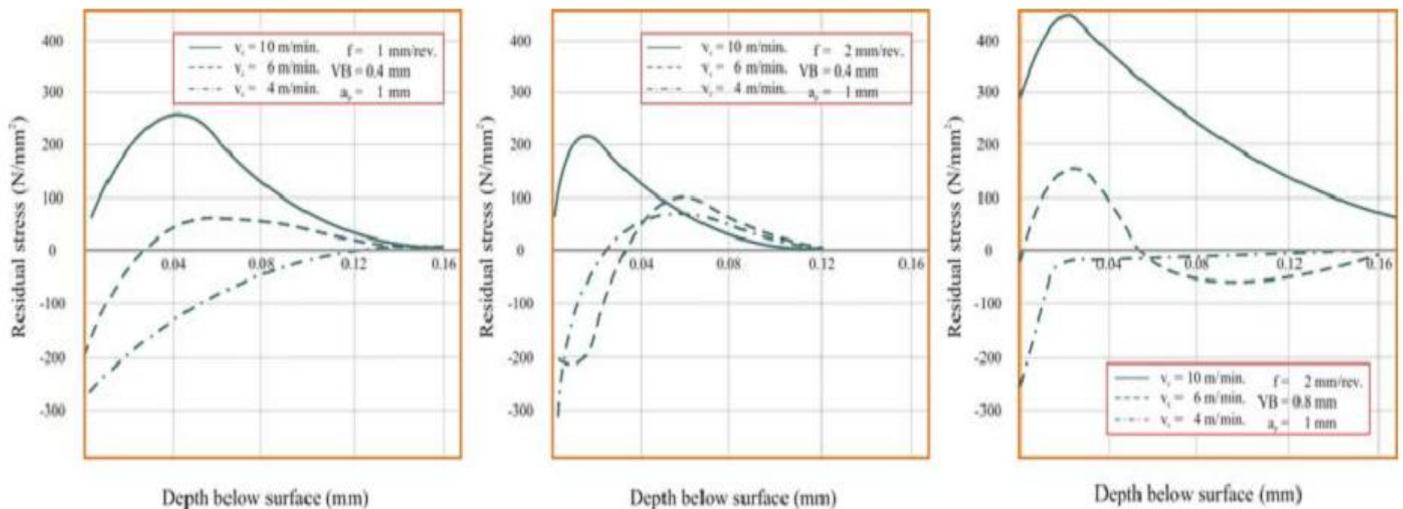


Figure II.17 : Contraintes résiduelles des éprouvettes tournées.

D'après la figure, le tournage génère des contraintes résiduelles de grande intensité dans les couches directement sous la surface, en particulier à des vitesses de coupe élevées. Avec l'usure accrue V_B les contraintes résiduelles augmentent également, atteignant encore plus profondément dans les couches sous le Surface. Ces contraintes accélèrent l'apparition et la diffusion des microfissures.

II.3.4. Microstructure

La texture de surface est générée par une combinaison de divers facteurs qui sont dus soit au procédé de fabrication ou le matériau en cours de finition. Parmi les facteurs dus au matériau, le plus fondamental est la microstructure du matériau.

La microstructure désigne l'organisation du matériau à différentes échelles d'observation : agencement cristallographique, distribution des phases, orientation et taille des grains. Des déformations plastiques intenses, en général associées à un chargement thermique, peuvent altérer cette organisation, et aller jusqu'à induire des transformations de phase au sein du matériau en sous-surface « Mandelin » [14].

Le changement structurel de surface dans les pièces introduites par un processus d'enlèvement de matériau est une conséquence importante de tout processus de finition. Cette modification de surface se produit en raison de travail thermomécanique intense, localisé et rapide entraînant une transformation métallurgique et, peut-être, des interactions chimiques. La surface usinée peut montrer une structure extrêmement différente de la masse.

Une perspective microstructurale des surfaces usinées est la couche blanche. Qui est le résultat d'altération microstructurale. On l'appelle couche blanche parce qu'elle apparaît blanche sous un microscope optique.

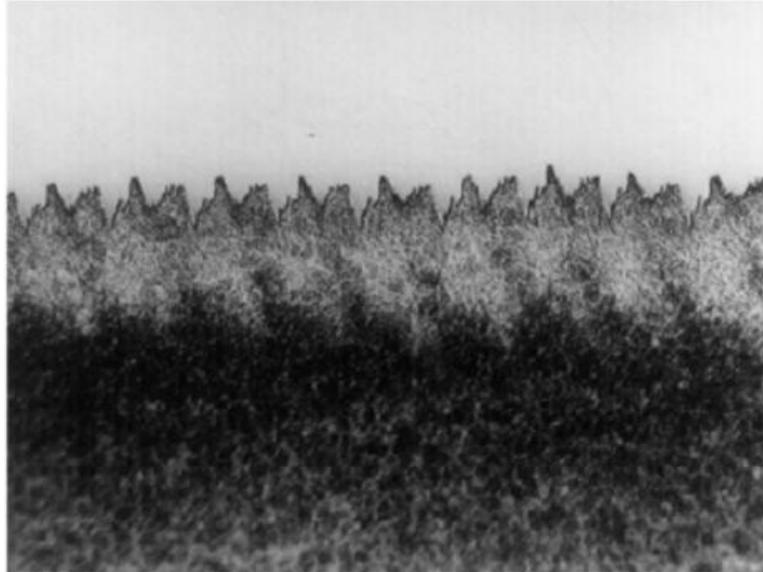


Figure II.18 : Exemple de changement microstructural à un tour dur d'un acier 52100, micrographie optique.

Les couches blanches se trouvent dans de nombreux processus d'enlèvement de matériaux tels que le meulage, L'usinage et le perçage par décharge électrique. Dans le broyage, il été suggéré que les couches blanches ont une structure martensitique non tentée. Dans la coupe des aciers durs, il existe quelques rapports de couches blanches. La plupart ont noté que la couche blanche se produit lors de la coupe d'outils s'est usé jusqu'à un certain niveau, mais n'a pas fourni d'explication approfondie, L'usure des outils a été suggérée comme le paramètre le plus influent sur la formation de couches blanches, bien que souvent, c'était la seule variable étudiée. Cependant, l'explication de la formation de couche blanche était plutôt qualitative et, par conséquent, il n'y avait aucune implication que l'optimisation de structures de surface ou minimisation des couches blanches est possible.

II.4. Durée de vie en fatigue

L'objectif des essais de fatigue est d'étudier le comportement de pièces soumis à une sollicitation périodique. Généralement, les sollicitations imposées lors d'un essai de fatigue sont de forme sinusoïdale. Il est possible d'effectuer les essais à déformation imposée aussi bien qu'à contrainte imposée.

Lorsqu'elles sont soumises à une pression périodique, les pièces peuvent se rompre, même si Pour des niveaux de contraintes inférieurs à la limite élastique du matériau. Ce phénomène est appelé rupture par fatigue. Dans le cas des matériaux métalliques, cette

rupture est généralement soudaine, et il y a deux zones différentes de l'interruption : la zone lisse, Cela correspond à la propagation de la fissure de fatigue elle-même, et une zone La matière semble se déchirer, correspondant à la rupture finale.

Le phénomène de fatigue intervient pour différents niveaux de contraintes qui mènent principalement à deux types de fatigue :

- La fatigue à grand nombre de cycles (FGNC).
- La fatigue à faible nombre de cycles (oligocyclique).

La fatigue avec un grand nombre de cycles est presque élastique, correspondant à un nombre de cycles supérieur à 50000 cycles. De plus, nous considérons une limite d'endurance limitée liées à un nombre de cycle à rupture. A partir de 10^6 ou 10^7 cycles suivant le domaine d'application précédent, on dit que l'endurance est illimitée et que la durée de vie -Si la charge est inférieure à la limite considérée- est indéfinie. D'autre part, La fatigue oligocyclique correspond par définition au domaine à très courte durée de vie. Ou le nombre de cycles inférieur à 50000. La contrainte appliquée est donc supérieure à la limite élastique et se déforme Plastiquement. Elle englobe la « fatigue plastique », cependant il existe par exemple des alliages à haute résistance pour lesquels la fatigue oligocyclique n'implique pas nécessairement de déformation plastique. « Manson et Coffin » [15] ont déterminé expérimentalement la loi caractérisant la durée de vie en fatigue plastique :

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

Avec :

ε'_f = coefficient de ductilité

N_f = nombre de cycle avant rupture

c = paramètre compris entre -0.8 et -0.5

. Ces différents types de fatigue sont généralement représentés par des courbes Décrire le nombre de cycles jusqu'à rupture en fonction de la contrainte appliquée. La figure suivante schématise l'évolution d'une contrainte sinusoïdale quelconque au cours du temps lors d'un essai de fatigue, et les grandeurs permettant de définir ce cycle.

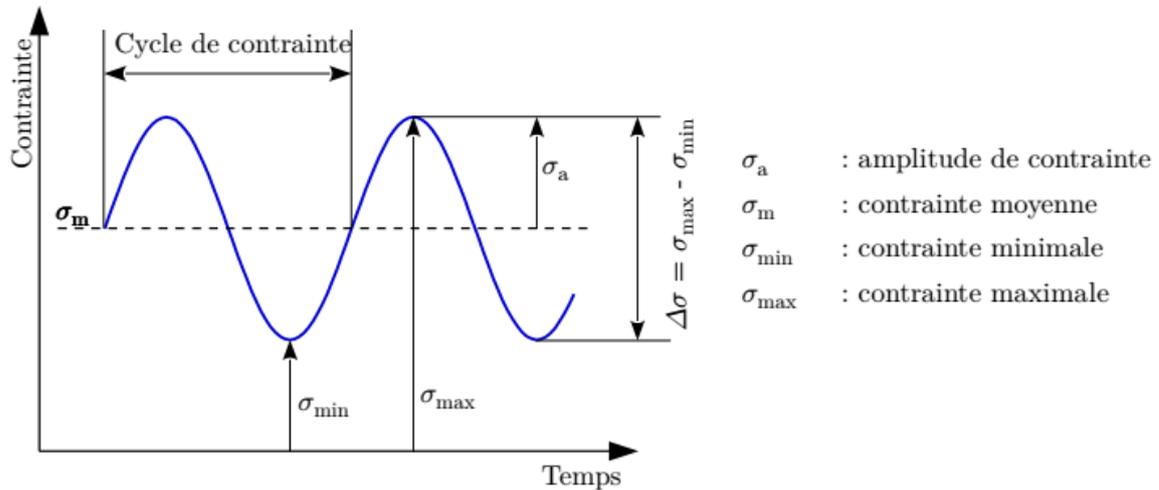


Figure II.19 : Représentation et définition d'une sollicitation cyclique quelconque.

II.4.1. Courbe de Wöhler

La courbe de Wöhler, appelée également courbe contrainte-nombre de cycles permet de rendre compte du nombre de cycles au bout duquel la rupture se produit pour un niveau d'amplitude de contrainte donné. Elle est obtenue à partir d'essais cycliques à rupture sur un lot d'éprouvettes (50 en général afin d'obtenir une bonne incertitude sur les résultats). Trois domaines apparaissent sur cette courbe :

- le domaine plastique oligocyclique où, pour les niveaux de contrainte élevés, la rupture se produit pour de faibles nombres de cycles après déformation plastique ;
- le domaine d'endurance limitée, où la rupture survient après un nombre fini de cycles, qui augmente lorsque la contrainte diminue ;
- le domaine d'endurance illimitée dans laquelle la rupture de la pièce ne survient pas, ou tout du moins, pas avant une durée largement supérieure à la durée de vie prévue de la pièce.

Les représentations des courbes de Wöhler font en général apparaître une asymptote horizontale correspondant à la limite de fatigue σ_D . Dans le cas des aciers, cette asymptote est généralement bien marquée. Déterminer la limite d'endurance d'un matériau pour un nombre de cycles à rupture donné est donc de première importance pour dimensionner les composants et garantir leur tenue en service.

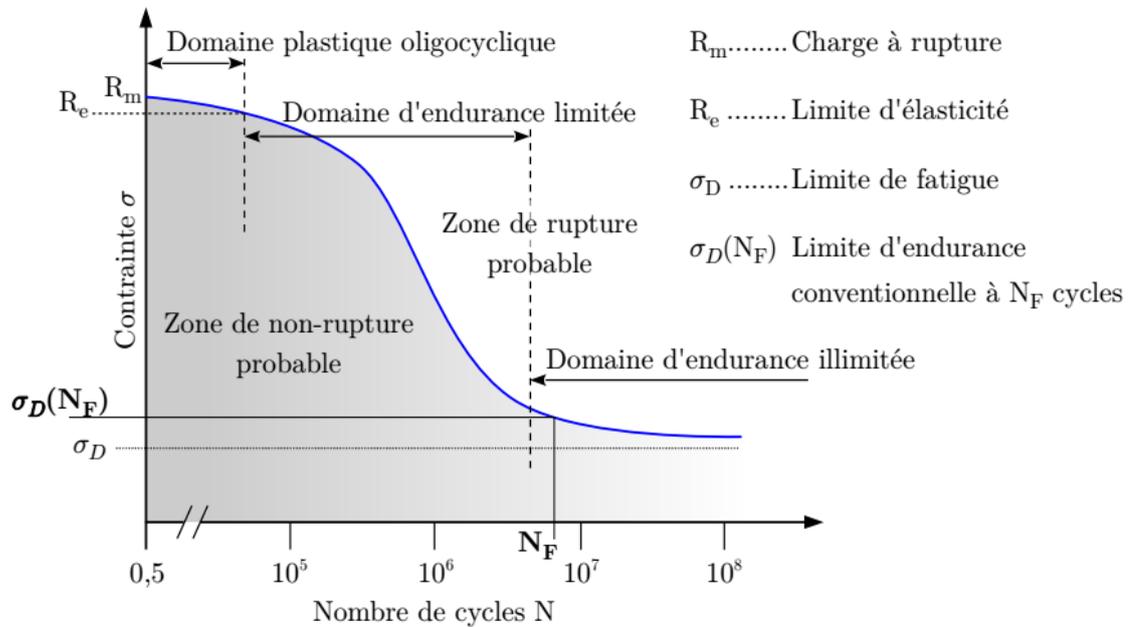


Figure II.20 : Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue.

II.4.2. Effets de l'intégrité de surface sur la durée de vie

Afin d'optimiser la norme de dimension de pièce, il est important de savoir Mieux prolonger la durée de vie des pièces et comprendre les facteurs qui l'affectent, Tenant compte de l'intégrité de la surface lors de l'analyse des résultats. Des recherches connus des effets de la rugosité, des contraintes résiduelles et de la microstructure Aideront à déterminer les facteurs d'influence possibles. Dans la littérature, les travaux réalisés ne prennent souvent en compte qu'un seul paramètre d'intégrité de surface, en s'affranchissant de l'influence des autres par diverses méthodes, voire même en l'occultant.

II.4.2.1. Effet de la rugosité

Dans de nombreux premiers modèles de fatigue, l'effet de la topographie de surface sur la résistance à la fatigue était pris en compte par l'amplitude des paramètres de rugosité de surface, en particulier la rugosité arithmétique moyenne R_a . « Siebel et Gaier » par exemple, ont comparé la résistance à la fatigue avec la profondeur maximale des irrégularités de surface, mesurée par un balayage de rugosité de surface, et ont trouvé une profondeur critique en dessous de laquelle il n'y avait pas de changement dans la résistance à la fatigue et au-dessus de laquelle il y avait une chute linéaire de la résistance à la fatigue [16].

De nombreux chercheurs ont proposé les paramètres de rugosité de surface comme facteur approprié pour corriger la limite d'endurance. En revanche, « Syren » a rapporté que les paramètres de rugosité de surface standard constituent un moyen simple et utile pour quantifier les distributions de hauteur de profil, qui sont importantes pour estimer la résistance à la fatigue, sont cependant relativement insensibles aux caractéristiques spécifiques de la distribution de la hauteur de surface. Il a montré que non seulement la profondeur maximale de l'irrégularité de surface, mais aussi toute la topographie de surface influe la résistance à la fatigue. Cela signifie que les paramètres de la rugosité ne doivent pas être utilisés sur une base individuelle pour évaluer l'effet de l'état de surface sur la résistance à la fatigue [17].

Une étude intéressante faite par « Taylor et Clancy » sur l'impact de la rugosité sur l'endurance d'un acier AISI 4140. Les auteurs de cette étude ont obtenu différentes rugosités à l'aide de divers procédés tels que le fraisage, le meulage ou bien le polissage. Pour s'affranchir de l'influence des contraintes résiduelles, des traitements de relaxation des contraintes ont été effectués. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau suivant où la limite d'endurance du matériau semble bien varier avec la rugosité; avec une chute de la limite d'endurance lorsque la rugosité augmente [18].

Tableau II.2 : Limite de fatigue pour des niveaux de rugosités différents.

Mode d'obtention	R_a [μm]	R_t [μm]	σ_D [MPa]
Polissage	0,1 - 0,3	3 - 5	775
Meulage	0,5 - 1,4	7 - 14	690
Fraisage (fin)	1,0 - 2,2	11 - 15	775
Fraisage (grossier)	1,1 - 1,8	26 - 34	733
Forgeage (fin)	27 - 33	210 - 280	620
Forgeage (grossier)	35 - 44	360 - 390	520

II.4.2.2. Effet des contraintes résiduelles

Lorsqu'une pièce est soumise à un chargement cyclique, même inférieur à la limite d'élasticité du matériau, les contraintes engendrées peuvent créer un endommagement du matériau qui souvent, aboutit à la formation d'une fissure dans la direction perpendiculaire au chargement principal de tension. Si le chargement se poursuit, la fissure se propage sous l'effet des contraintes et la pièce peut éventuellement rompre lorsque la fissure atteint une taille critique. Il s'agit alors d'un bris typique de fatigue. Si l'application de contraintes alternées de tension peut engendrer ce type de bris, les contraintes de compression peuvent, en revanche, contribuer à contrer ce phénomène. En effet, les contraintes de compression

ont tendance à refermer les fissures et défauts, freinant ainsi leur propagation, ce qui contribue à augmenter la longévité de la vie de l'assemblage.

Lorsqu'une pièce ayant un niveau de contraintes résiduelles non nul est soumise à un chargement, les contraintes générées s'ajoutent aux contraintes déjà présentes. Ainsi, si les contraintes résiduelles sont très élevées, comme dans le cas d'une soudure, un assemblage qui ne devait en principe qu'être soumis à un faible chargement peut voir la contrainte locale atteindre des niveaux qui approchent, voire dépassent, la limite d'élasticité du matériau.

Les auteurs ont remarqué une forte dégradation de la résistance à 2×10^6 cycles sous l'effet des contraintes résiduelles, passant de 240 MPa pour les éprouvettes libres de contraintes résiduelles, à 150 MPa pour les éprouvettes contraintes. Ils ont également noté que l'effet des contraintes résiduelles est plus grand lorsque la contrainte alternée externe est plus faible.

Des résultats similaires ont été obtenus par « Gharizadeh, Samali et Saleh (2013) » par le biais de simulations sur des joints soudés bout à bout. Des déformations initiales ont été ajoutées aux modèles afin de simuler un champ contraintes résiduelles. Un chargement alterné a ensuite été simulé afin que les contraintes générées par ce chargement se combinent aux contraintes résiduelles. La vie en fatigue résultante a ensuite été calculée selon l'équation de « Smith, Watson et Topper (1970) ». Cette équation utilise les propriétés du matériau pour établir un lien entre le nombre de cycles à la rupture et le niveau des contraintes présentes dans l'échantillon. « Gharizadeh, Samali et Saleh (2013) » ont trouvé en premier lieu que les contraintes résiduelles ne peuvent être additionnées linéairement aux contraintes appliquées lorsque la somme des deux dépasse la limite d'écoulement du matériau. De ce fait, les contraintes résiduelles ont un effet plus marqué sur la contrainte maximale lorsque la contrainte appliquée est faible. En second lieu, à chargement appliqué égal, la résistance en fatigue des joints soudés diminue à mesure que les contraintes résiduelles de tension augmentent. Cet effet est toutefois plus marqué lorsque le chargement appliqué est faible [19].

On constate donc que les contraintes résiduelles de tension ont un effet négatif sur la vie en fatigue des assemblages soudés. Inversement, des contraintes résiduelles de compressions peuvent permettre d'augmenter la limite d'endurance des aciers. Cela a entre autres été constaté par « Iswanto, Nishida et Hattori (2002) » lors d'une expérience portant sur l'effet des contraintes résiduelles et du durcissement de surface de l'acier inoxydable SUS304 traité par laminage. Ils ont remarqué que la présence de contraintes de compression de l'ordre de $0,75 S_y$ (limite d'écoulement) ont permis de faire passer la limite d'endurance d'un échantillon de 225 à 425 MPa, soit une augmentation de 188 %. Il est cependant difficile d'attribuer cette amélioration uniquement aux contraintes résiduelles puisque la pièce subit également un fort écrouissage [20].

Des travaux par « Mattson et Roberts (1959) » ont justement tenté de démontrer que les contraintes résiduelles ont plus d'influence sur la vie en fatigue d'une pièce que le traitement d'écrouissage de surface qui leur est appliqué. Pour ce faire, ils ont grenailé plusieurs pièces de la même manière, mais en imposant une déformation différente à chacune des pièces au moment du grenailage. Ainsi, le niveau d'écrouissage est similaire dans tous les cas, mais le niveau de contraintes résiduelles créé varie. L'idée est que si les pièces obtiennent toutes une vie en fatigue similaire, ce serait signe que c'est l'écrouissage créé par le grenailage qui dicte la vie en fatigue de la pièce, et non les contraintes résiduelles. Inversement, si les vies en fatigue varient, et d'autant plus si elles varient proportionnellement à la contrainte résiduelle en surface, ce serait signe que c'est ce critère qui influence le plus la vie en fatigue.

II.4.2.3. Effet de microstructure

Les observations microstructurales réalisées montrent que les surfaces usinées présentent, en plus de gradients de propriétés mécaniques et de rugosité, des gradients de microstructures. Ces gradients se caractérisent bien souvent par la présence d'une couche de quelques micromètres d'épaisseur appelée « couche blanche ». La littérature sur le sujet tend à affirmer que la présence d'une « couche blanche » conduit à une diminution importante de la durée de vie en fatigue de roulement. Ces études peuvent être sujet à controverses car l'influence des contraintes résiduelles est assez peu prise en compte dans l'analyse du résultat. Par exemple, les travaux de « Guo & al. » concluent que la « *couche blanche induite par l'usinage peut réduire la durée de vie d'un facteur 8* » dans le cas de la fatigue de roulement. Cependant, l'analyse des profils de contraintes résiduelles d'une surface avec une couche blanche et une autre sans couche blanche présente des différences importantes qui doivent être prises en compte, puisque ces deux surfaces n'ont pas été obtenues avec les mêmes conditions de tournage [21].

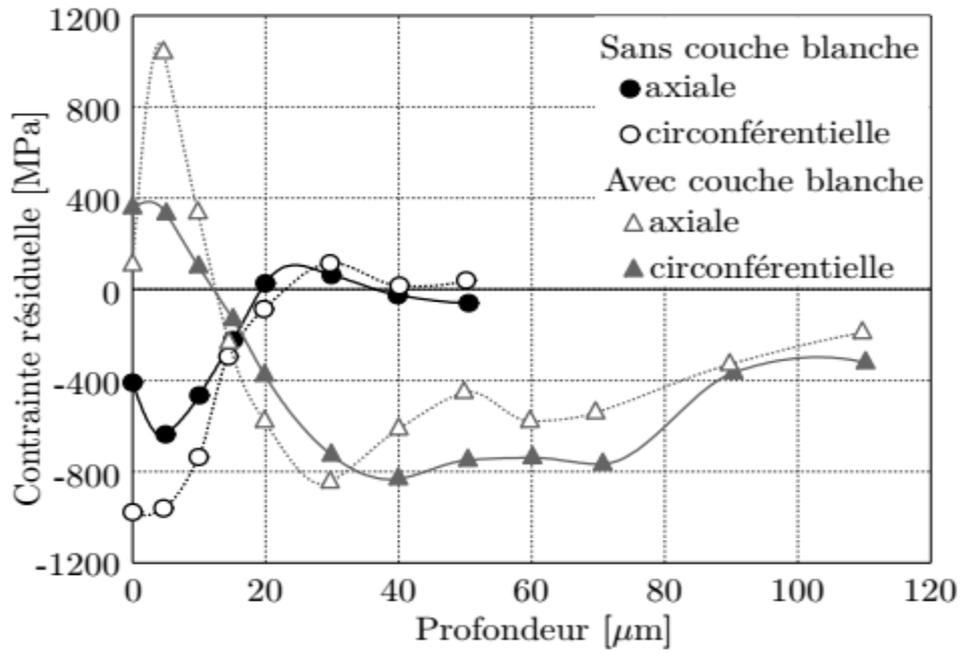


Figure II.21 : Profil de contraintes résiduelles pour une surface avec couche blanche, et une surface sans couche blanche.

Conclusion

L'étude de la bibliographie sur les conséquences des paramètres d'intégrité de surface comme la rugosité, les contraintes résiduelles et la microstructure nous a permis de synthétiser les influences de chacun de ces paramètres. La limite en fatigue décroît lorsque la rugosité augmente puisque cette dernière joue un rôle de concentrateur de contraintes. Les contraintes résiduelles de compression permettent de retarder significativement la propagation des fissures de fatigue. La valeur de la contrainte en surface ne semble pas être suffisante pour décrire le comportement en fatigue. Il est donc important de tenir compte de la forme du profil de contraintes résiduelles sous la surface. Enfin, il est difficile de quantifier l'impact de la microstructure en surface sur la tenue en fatigue puisque cette dernière est intimement liée aux contraintes résiduelles et à la dureté du matériau.

Après l'étude de l'intégrité de surface et son effet sur les pièces mécaniques, il faut modéliser plusieurs phénomènes qui apparaissent lors de l'usinage de ses matériaux, notamment (l'état de surface, efforts de coupe, vibration,...). Cette modélisation est très importante pour la prédiction et l'optimisation de durée de vie des machines.

Chapitre III : Modèle de prédiction et d'optimisation de rugosité

Introduction

Dans le but d'alléger la tâche des experts de l'industrie de fabrication mécanique et d'assurer aux gestionnaires des conditions d'usinage Optimales selon leurs objectifs de gestion, il est nécessaire de développer des modèle d'optimisation pour les paramètres .d'usinage. Ces modèles, une fois développés, devrons être facilement utilisable en pratique afin qu'ils soient vraiment utiles dans l'industrie. Sachant qu'ils disposent de conditions d'usinage optimales, les gestionnaires pourront se consacrer à d'autres aspects de la productivité tels les temps de mise en course, la manutention, le balancement des opérations, la gestion de la qualité, etc. Ce modèle pourra aussi, par la suite, servir d'interface entre un système de contrôle et l'opération de fraisage dans un environnement de production automatisée, comme un système de production flexible par exemple. Et ça exige des connaissances approfondies du procédé de fabrication, des capacités des machines, du dessin et de la programmation assistée par ordinateur ainsi que de l'optimisation.

Le modèle d'optimisation doit s'occuper de deux fonctions objectives: minimiser le coût de production et minimiser le temps de production. Nous allons, dans ce document, développer ce modèle et résoudre le problème d'optimisation.

III.1. Optimisation

L'optimisation est une branche des mathématiques cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction sur un ensemble.

L'optimisation joue un rôle important en recherche opérationnelle (domaine à la frontière entre l'informatique, les mathématiques et l'économie), dans les mathématiques appliquées (fondamentales pour l'industrie et l'ingénierie), en analyse et en analyse numérique, en statistique pour l'estimation, pour la recherche de stratégies dans le cadre de la théorie des jeux, ou encore en théorie du contrôle et de la commande.

Beaucoup de systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique sont optimisés. La qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, du bon choix des variables que l'on cherche à optimiser, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique.

Les premiers problèmes d'optimisation auraient été formulés par Euclide, au iii^e siècle avant notre ère, dans son ouvrage historique *Éléments*. Trois cents ans plus tard, « Héron d'Alexandrie dans *Catoptrica* » énonce le « principe du plus court chemin » dans le contexte de l'optique [22]. Plusieurs problèmes de conception peuvent aussi être exprimés sous forme de problèmes d'optimisation. Cette application est appelée l'optimisation de forme. Un sous-ensemble récent et croissant de ce domaine s'appelle l'Optimisation

multidisciplinaire qui, bien qu'utile en plusieurs problèmes, a été particulièrement appliquée aux problèmes d'ingénierie et technologie spatiale.

III.2. Modélisation

La modélisation est la conception d'un modèle. Selon son objectif et les moyens utilisés, la modélisation est dite mathématique, géométrique, 3D, empirique, mécaniste ou bien cinématique... Elle nécessite généralement d'être calée par des observations ou mesures faites in situ, lesquelles servent aussi à paramétrer, calibrer ou ajuster le « modèle », par exemple en intégrant des facteurs d'influences qui s'avèreraient nécessaires.

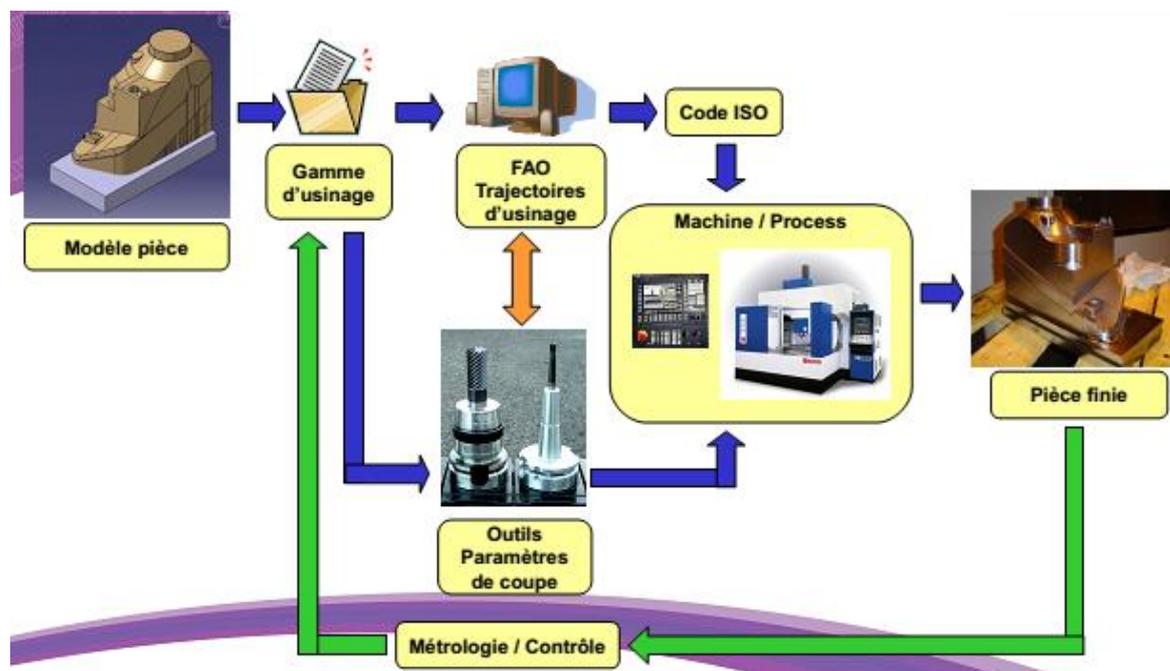


Figure III.1 : la modélisation dans le Processus de fabrication d'une pièce mécanique [23]

III.2.1. Etapes de modélisation

On peut identifier 3 étapes de la modélisation:

- Le modèle interprétatif. Il s'agit de décrire avec ses propres mots en langage naturel l'objet.
- Le modèle fonctionnel. Il s'agit de la description atomique, de l'identification des éléments unitaires et des rapports précis. Le but est de rendre le modèle interprétatif calculable. On passe alors dans la calculabilité.
- Le modèle physique. On implémente le modèle fonctionnel dans une machine pour calculer. Dans un ordinateur par exemple, qui est une machine de Turing réelle.

II.2.2. Types de modélisation

Le terme est employé dans plusieurs domaines, comme la mathématique, l'ingénierie, l'économie et même les sciences humaines, dans notre étude, on s'intéresse que de la modélisation statistique, qui consiste à établir une relation entre variables, sous forme d'équation, que l'on estime sur un jeu de données observées. L'enjeu est d'utiliser cette relation, établie et vérifiée, sur des observations, à des fins de prévision. Et parmi les types de cette modélisation on trouve :

- La régression linéaire, qui permet d'expliquer une variable quantitative à partir de variables explicatives quantitatives (éventuellement qualitatives en sus).
- La classification supervisée, qui permet d'expliquer une variable qualitative à partir de variables explicatives quantitatives (éventuellement qualitatives en sus). Attention, il faut la distinguer de la classification non supervisée qu'est le clustering.
- L'analyse de la variance, pour analyser l'influence d'une ou deux variables explicatives qualitatives sur une variable quantitative.

III.2.3. Régression

Le terme régression a été introduit par Francis Galton, chercheur britannique du XIXe siècle. Il décrivait dans un article scientifique le fait que la taille des enfants nés de parents inhabituellement grands ou petits se rapproche de la taille moyenne de la population [23].

La régression désigne désormais toute méthode statistique qui permet de mettre en relation une variable quantitative, que l'on cherche à expliquer et/ou prévoir, avec un ensemble de variables quantitatives (potentiellement) explicatives. Le modèle de régression le plus connu est le modèle linéaire, simple ou multiple, mais il existe de nombreux autres modèles, parmi lesquels les modèles paramétriques non linéaires et les modèles non paramétriques ou semi-paramétriques. Citons aussi les régressions « Ridge et Lasso », les modèles GAM (additifs généralisés), les arbres de régression (et les forêts aléatoires), etc. Pour cette étude, nous nous cantonnerons au modèle linéaire, simple et multiple. Le modèle de régression le plus connu est le modèle de régression linéaire.

Lorsque le modèle n'est pas linéaire, on peut effectuer une régression approchée par des algorithmes itératifs, on parle de régression non linéaire.

III.2.3.1. Régression linéaire

La régression linéaire est un modèle de régression qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable dite expliquée, et une ou plusieurs variables dites explicatives.

Ce modèle est souvent estimé par la méthode des moindres carrés, mais il existe d'autres méthodes pour estimer ce modèle.

Comme les autres modèle de régression, le modèle linéaire est utilisé pour chercher et prédire un phénomène afin de l'expliquer et comprendre. Il permet également d'estimer l'effet d'une ou plusieurs variables sur une autre en contrôlant par un ensemble de facteurs. Et ça c'est l'objectif de notre étude.

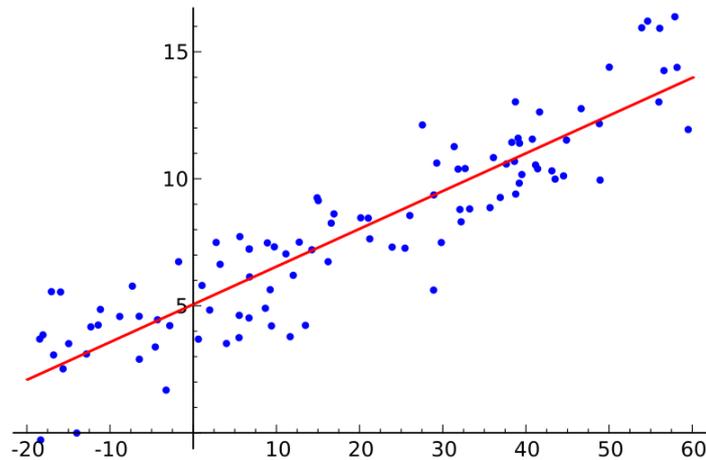


Figure III.2 : Exemple d'une régression polynomiale

Il convient que la forme générale du modèle empirique soit adaptée aux objectifs de l'étude. Trois types de modèle sont envisageables :

➤ **Modèle additif sans couplage (ou des facteurs principaux)**

Lorsque l'objectif consiste à hiérarchiser les effets moyens des facteurs à partir d'une étude de criblage, la forme générale suivante, appelée modèle additif sans couplage, peut être adoptée [25] :

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \cdot x_j + \varepsilon$$

Le coefficient β_0 représente la moyenne arithmétique des réponses mesurées y à partir des N expériences du plan :

$$\beta_0 = \bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y$$

➤ **Modèle additif avec couplage (ou avec interactions)**

Lorsque l'on veut préciser l'effet moyen des facteurs par des interactions d'ordre 1 (interaction entre deux facteurs), la forme générale suivante, appelée modèle additif avec couplage, est envisageable :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon$$

Les termes β_i et β_{ij} symbolisent respectivement les effets moyens des facteurs x_i et les interactions d'ordre un entre les effets des facteurs x_i et x_j .

➤ **Modèle polynomial (ou du second ordre avec interactions)**

Lorsqu'un optimum doit être trouvé, la forme générale suivante, qui présente des termes du second degré, pourra être retenue :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon$$

III.2.3.2 Régression polynomiale

C'est une analyse statistique qui décrit la variation d'une variable aléatoire expliquée à partir d'une fonction polynomiale d'une variable aléatoire explicative. La régression polynomiale est un cas particulier de régression linéaire multiple.

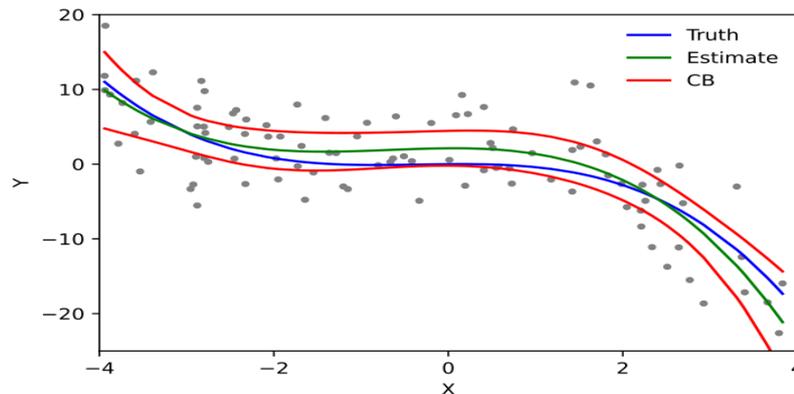


Figure III.3 : Exemple d'une régression polynomiale

Si on appelle (X_i, Y_i) la i -ème réalisation de couple de variables aléatoires, on recherche le polynôme

$$P_n(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1$$

Permettant d'écrire :

$$Y_i = P_n(X_i) + \varepsilon_i$$

Et puisque on peut la considérer une régression linéaire multiple, on peut écrire :

$$Y_i = a_n \cdot X_{i,n} + a_{n-1} \cdot X_{i,n-1} + \dots +$$

Remarque : la régression linéaire est une régression polynomiale de degré 1.

III.3. Machine learning

machine learning, « apprentissage machine », est un champ d'étude de l'intelligence artificielle qui se fonde sur des approches mathématiques et statistiques pour donner aux ordinateurs la capacité d'« apprendre » à partir de données, c'est-à-dire d'améliorer leurs performances à résoudre des tâches sans être explicitement programmés pour chacune. Plus largement, il concerne la conception, l'analyse, l'optimisation, le développement et l'implémentation de telles méthodes.

L'apprentissage automatique comporte généralement deux phases. La première consiste à estimer un modèle à partir de données, appelées observations, qui sont disponibles et en nombre fini, lors de la phase de conception du système. L'estimation du modèle consiste à résoudre une tâche pratique, telle que traduire un discours, estimer une densité de probabilité, reconnaître la présence d'un chat dans une photographie ou participer à la conduite d'un véhicule autonome. Cette phase dite « d'apprentissage » ou « d'entraînement » est généralement réalisée préalablement à l'utilisation pratique du modèle. La seconde phase correspond à la mise en production : le modèle étant déterminé, de nouvelles données peuvent alors être soumises afin d'obtenir le résultat correspondant à la tâche souhaitée. En pratique, certains systèmes peuvent poursuivre leur apprentissage une fois en production, pour peu qu'ils aient un moyen d'obtenir un retour sur la qualité des résultats produits.

Selon les informations disponibles durant la phase d'apprentissage, l'apprentissage est qualifié de différentes manières. Si les données sont étiquetées (c'est-à-dire que la réponse à la tâche est connue pour ces données), il s'agit d'un apprentissage supervisé. On parle de classification ou de classement si les étiquettes sont discrètes, ou de régression si elles sont continues. Si le modèle est appris de manière incrémentale en fonction d'une récompense reçue par le programme pour chacune des actions entreprises, on parle d'apprentissage par renforcement. Dans le cas le plus général, sans étiquette, on cherche à déterminer la

structure sous-jacente des données (qui peuvent être une densité de probabilité) et il s'agit alors d'apprentissage non supervisé. L'apprentissage automatique peut être appliqué à différents types de données, tels des graphes, des arbres, des courbes, ou plus simplement des vecteurs de caractéristiques, qui peuvent être des variables qualitatives ou quantitatives continues ou discrètes.

III.3.1 applications de machine learning

L'apprentissage automatique est utilisé dans un large spectre d'applications pour doter des ordinateurs ou des machines de capacité d'analyser des données d'entrée comme : perception de leur environnement (vision, Reconnaissance de formes tels des visages, schémas, segmentation d'image, langages naturels, caractères dactylographiés ou manuscrits ; moteurs de recherche, analyse et indexation d'images et de vidéo, en particulier pour la recherche d'image par le contenu ; aide aux diagnostics, médical notamment, bio-informatique, chémo-informatique ; interfaces cerveau-machine ; détection de fraudes à la carte de crédit, cyber-sécurité, analyse financière, dont analyse du marché boursier ; classification des séquences d'ADN ; jeu ; génie logiciel ; adaptation de sites Web ; robotique (locomotion de robots, etc.) ; analyse prédictive dans de nombreux domaines (financière, médicale, juridique, judiciaire).

III.3.2. Régression par machine learning

La régression est une méthode d'analyse qui date de plusieurs centaines d'années. Elle fait partie du Machine Learning tel qu'on le présente aujourd'hui car nous y retrouvons les principales caractéristiques à savoir :

- le dataset à analyser ici un nuage de points.
- à partir de ce dataset on réalise une modélisation.

-à partir de ce modèle on peut prédire de nouveaux résultats qui ne sont pas dans le jeu de données initial.

La figure suivante explique le principe de la régression dans machine learning :

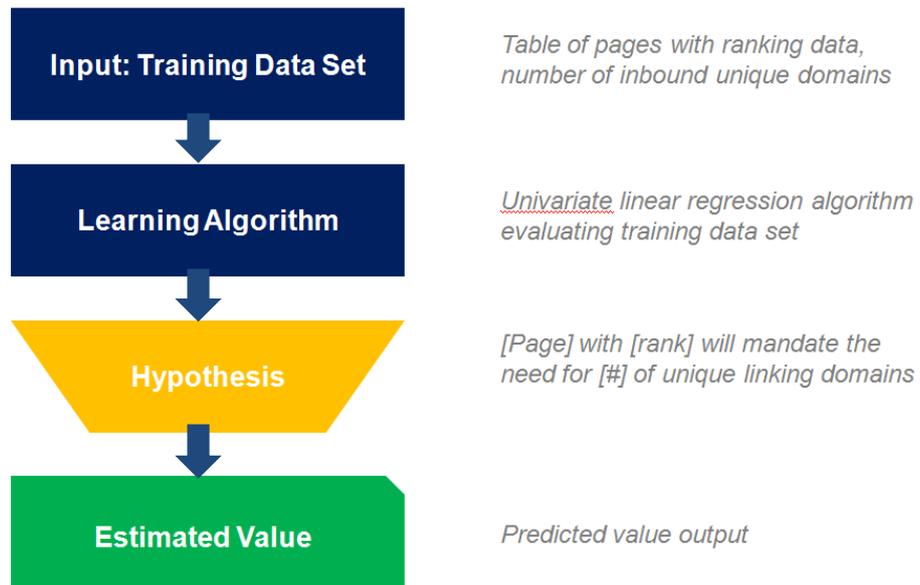


Figure III.4 : Régression dans machine learning

L'étude suivante s'intéresse de la régression polynomiale qu'on va l'utiliser par le langage python

❖ Cas expérimental :

Notre étude dans ce chapitre est basée sur les données de publication réalisé par « Riad Harhout, et Al. »[26], on va utiliser les valeurs de cette publication pour construire un modèle de prédiction et d'optimisation par la régression polynomiale, en utilisant le code "Python".

III.3. Matériaux et conditions d'expériment

Le matériau testé est un acier AISI 1050 traité thermiquement, avec une dureté qui est égale à 188 HV, la composition chimique de cet acier est donnée dans la table suivante :

Table III.1 : Composition chimique de l'acier utilisé

Elements	C%	Mn%	SI%	S%	P%
Composition in %	0.48	0.6	0.25	0.030	0.027

L'échantillon étudié est sous forme de barres laminées cylindriques d'un diamètre de 60 mm, il est souvent utilisé dans l'ingénierie mécanique après normalisation et traitement surfacique, ça résistance est plus haute en comparaison avec l'acier carbonique mais ça ductilité est moins que ce dernier.

Les résultats sont obtenus par le tournage de cet acier avec un outil à plaquettes en carbure P15 type DNMG 15-06-08 à usage général à trois arêtes de coupe et fixé mécaniquement. Cette plaquette tournante a été utilisée pendant toute l'expérience en la faisant tourner pour minimiser l'effet de l'usure des arêtes de coupe.

Le tournage a été réalisé sur un tour universel parallèle de type " MONDIALE GALLIC 16 N Center Lathe ", avec une vitesse de rotation maximale de la broche de 2000 tr/min et un entraînement par moteur de 7.5KW. La pièce a été montée en assemblage mixte pour assurer sa bonne rigidité lors de l'usinage. Lors de cette opération, la lubrification est assurée au moyen d'une pompe électrique pour préserver les caractéristiques mécaniques et métallurgiques du matériau.

Les tests sont réalisés en considérant trois paramètres de coupe : la vitesse de coupe V_c , l'avancement f et le profondeur de coupe A_p avec 05 niveaux de variation (table 2), ça résultent un total de 125 expiments ($5^3 = 125$).



Figure III.5 : Assemblage outil-pièce

Table III.2 : Paramètres de coupe

Depth of cut (mm)	Feed (mm/rev)	Cutting speed(m/min)
0.5	0.05	50
1.0	0.1	100
1.5	0.15	150
2.0	0.2	200
2.5	0.25	250

III.4. Mesure de la rugosité

La rugosité de surface obtenue après usinage dans les conditions mentionnées est mesurée sur les surfaces séparées par des rainures sur la même éprouvette à l'aide d'un rugosi-mètre de type "SURFTEST SJ310" avec capteur électronique inductif diamant.

Les mesures ont été effectuées perpendiculairement à la direction de coupe. Pour éviter les erreurs de mesure de rugosité, le même chemin est utilisé avec une seule direction de la sonde gauche ou droite. Le paramètre moyen de la ligne médiane Ra est utilisé pour caractériser la rugosité. Il est défini comme l'écart arithmétique moyen des crêtes et des sillons. La longueur examinée est de 4,0 mm avec une portée de base de 0,8 mm Cette rugosité a été mesurée directement sur la pièce à usiner, sans démontage du tour, afin de minimiser l'incertitude de mesure due à la poursuite des opérations. Chaque mesure a été répétée au moins trois fois pour augmenter la précision de la valeur moyenne.



Figure III.6 : Assemblage de mesure de rugosité

III.5. Régression polynomiale

La régression polynomiale est une forme d'analyse de régression dans laquelle la relation entre les variables d'entrée et les variables de sortie est modélisée comme un polynôme, notre but est de trouver des polynômes qui décrivent la relation entre les paramètres de coupe et la rugosité, qui vont nous aider pour mieux choisir des conditions de coupe afin d'obtenir un meilleur état de surface et donc prolonger la durée de vie des pièces, optimiser la production et prédire la défaillance.

En utilisant le code python, on a construit un algorithme de prédiction et d'optimisation, qui va générer les polynômes d'estimation de rugosité, l'avantage de python est l'existence d'une librairie indépendante de régression polynomiale. Ce qui facilite notre travail, l'algorithme construit est comme suivant :

```

import pandas as pd
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
import seaborn as sns
import tensorflow as tf
from tensorflow import keras
from keras.layers import Dense,Dropout,Activation,LSTM
from keras.models import Sequential
from sklearn.metrics import mean_absolute_error,mean_squared_error,r2_score
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from math import sqrt
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
import plotly.express as px
from sklearn.svm import SVR
import plotly.graph_objects as go
    
```

Figure III.7 : Les fonctions et libraires utilisées pour la régression polynomiale réalisée par python sur google collaboratory)

➤ **Visualisation des données :**

Une des fonction de « machine learning » est la fonction « box plot » qui permet visualiser les données en introduisant les données suivantes : le max, le min et les quartiles de chaque de notre paramètres sous forme graphique :

Table III.3 : description de données utilisées

	count	mean	std	min	25%	50%	75%	max
Ap	125.0	1.50000	0.709952	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
f	125.0	0.15000	0.070995	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
Vc	125.0	150.00000	70.995229	50.00	100.00	150.00	200.00	250.00
Ra	125.0	2.88568	2.078506	0.62	1.57	2.24	3.23	10.58

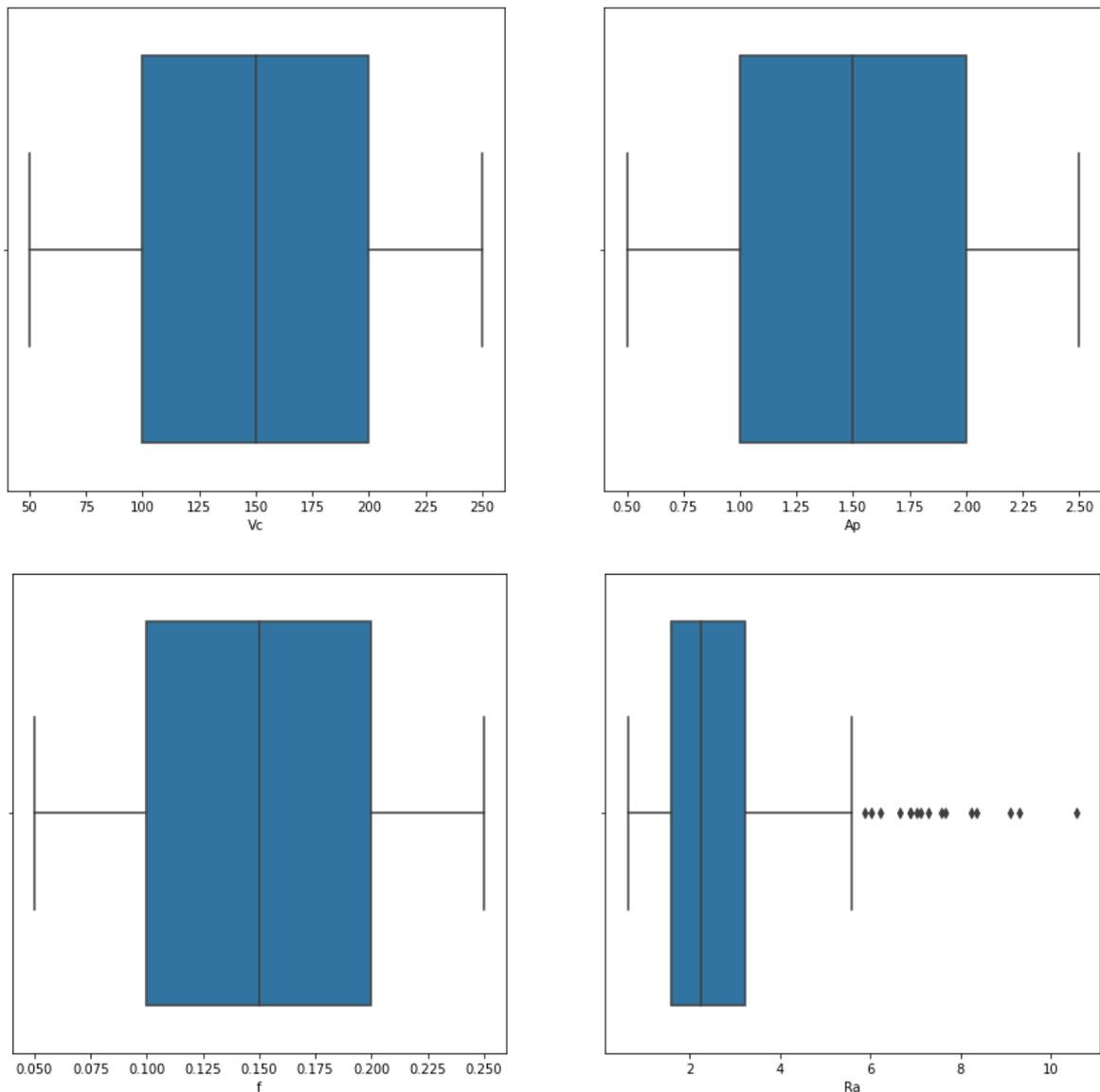


Figure III.6 : la distribution des paramètres des coupes par la fonction Box plot (google collaboratory)

Pour le graphe de **Ra**, en remarque des valeurs à l'extérieur des bornes. Ces valeurs sont appelées 'outliers', ces valeurs peut causer ce qu'on appelle un « overfitting » ou bien un sur-ajustement, cela peut perturber le modèle et il faut éliminer ces perturbations pour améliorer les résultats. Après l'élimination des outliers, la distribution des données devienne comme suivant :

Table III.4 : Distribution des données après traitement

	count	Std	Mean	min	0.25%	0.50%	0.75%	Max
Ap	109	1.495413	0.711985	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
F	109	0.143578	0.071719	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
Vc	109	164.678899	63.938176	50.00	100.00	150.00	200.00	250.00
Ra	109	2.201468	1.019042	0.62	1.51	2.08	2.71	5.58

D'après la table, le nombre des données a diminué de 125 à 109, cela implique l'élimination de 16 valeurs aberrantes.

III.6. Résultats et discussion

On a obtenue trois modèles qui prennent en considération les effets linéaires, quadratiques, cubiques et aussi les effets d'interaction. Ces modèles décrivent la relation entre la rugosité et les paramètres de coupe. Le Python a permet aussi de calculer les coefficients des modèles, coefficients de corrélation R^2 qui définit la variation de résultats de modèles et celle de l'expriment. Lorsque ce coefficient (R^2) s'approche de l'unité, cela signifie que le modèle est parfaitement adapté aux résultats de mesure des réponses de sortie envisagées. Le RMSE (Root Mean Square Error) qui décrit l'erreur et aussi un facteur d'évaluation du modèle. Il est considéré précise lorsque il est compris entre 0.2 et 0.5 Ces derniers permettent d'évaluer notre modèle, les résultats obtenus sont comme suivant :

➤ **La contribution de Vc, et f sur Ra :**

✓ **Le modèle quadratique :**

$$Ra = Vc^2(0.049) + Vc * f(4.08) + Vc(0.00019) + f^2(0.00431) + f(9.58) + 5.91$$

$$RMSE = 0.55$$

$$R^2 = 0.702$$

✓ **Le modèle cubique :**

$$Ra = Vc^3(-0.141) + Vc^3 * f(39.6) + Vc^2(0.0008) + Vc * f^2(-0.04) + Vc * f(-0.02) + Vc(0.000001) + f^3(-0.00005) + f^2(0.144) + f(429) + 7.78$$

$$RMSE = 0.46$$

$$R^2 = 0.79$$

Les représentations de ces modèles sont comme suivantes : (voir annexe 01)

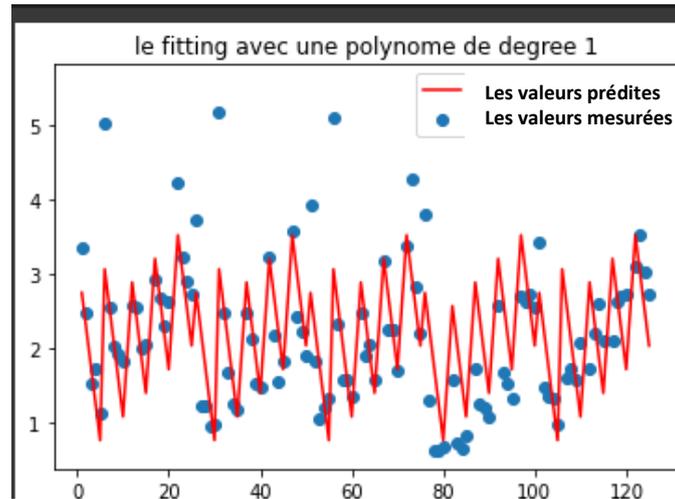


Figure III.7: Evolution de rugosité R_a en fonction de V_c et f – polynôme de degré 1

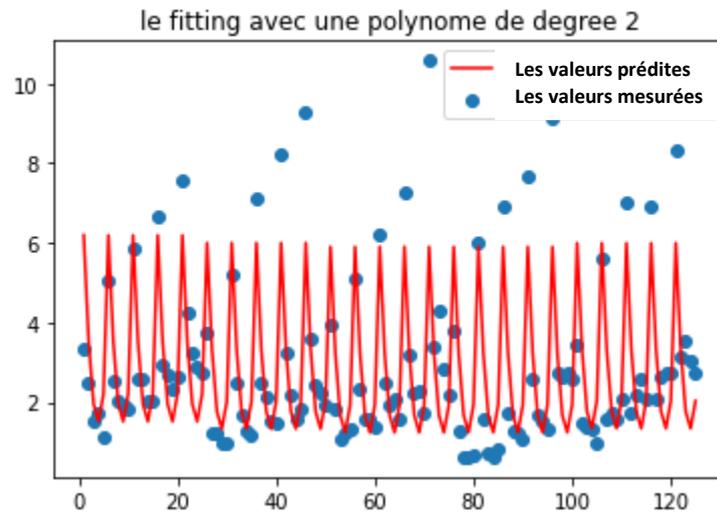


Figure III.8: Evolution de rugosité R_a en fonction de V_c et f – polynôme de degré 2

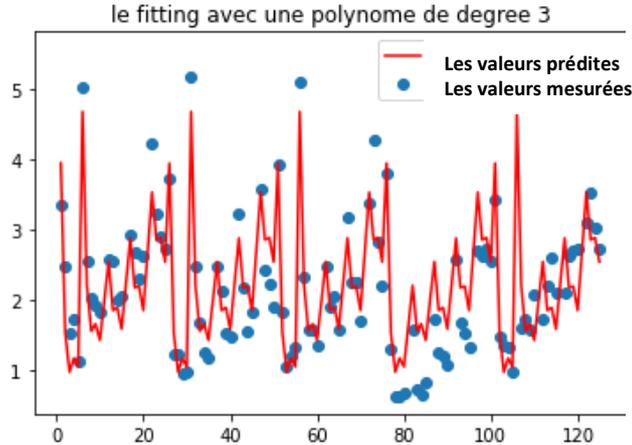


Figure III.9: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et f – polynôme de degré 3

On remarque que le modèle s'améliore en degré 3 et il devient proche de graphe réel, donc l'augmentation de degré de polynôme améliore le fitting.

➤ **La contribution de Vc, et Ap sur Ra :**

✓ **Le modèle quadratique :**

$$Ra = Vc^2(-0.0411) + Vc * Ap(-1.66) + Vc(0.0000923) + Ap^2(0.00186) + Ap(0.4) + 7.027$$

$$RMSE = 0.73$$

$$R^2 = 0.47$$

✓ **Le modèle cubique :**

$$Ra = Vc^3(-0.0873) + Vc^3 * Ap(2.96) + Vc^2(0.0005) + Vc * Ap^2(0.0149) + Vc * Ap(-2.02) + Vc(-0.000000946) + Ap^3(0.0000149) + Ap^2(0.00397) + Ap(0.393) + 6.92$$

$$RMSE = 0.69$$

$$R^2 = 0.52$$

On représente ce modèle graphiquement :(voir annexe 01)

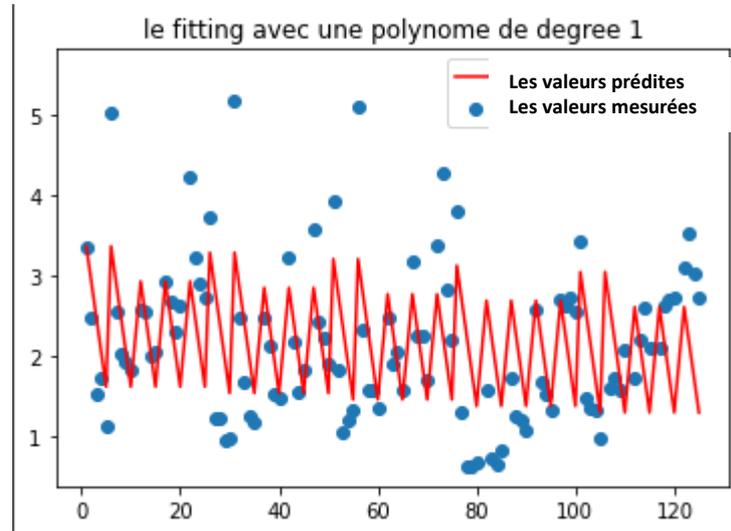


Figure III.10: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et Ap – polynôme de degré 1

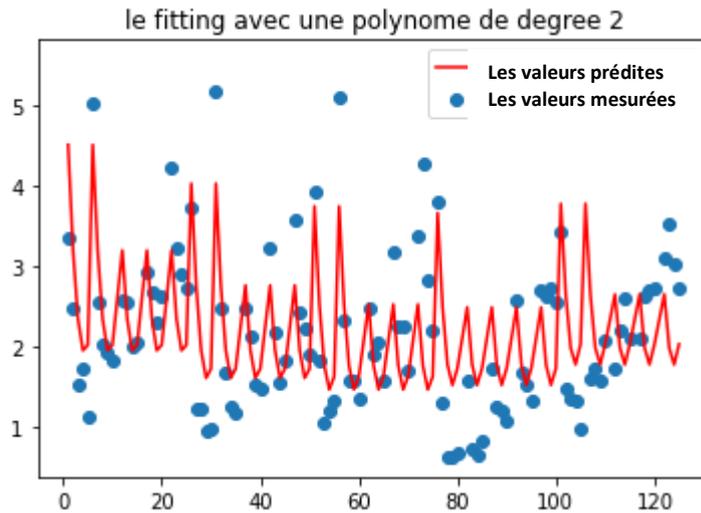


Figure III.11: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et Ap – polynôme de degré 2

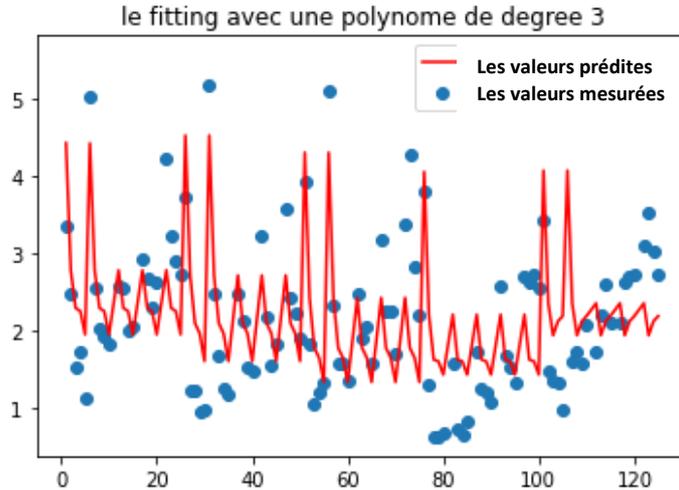


Figure III.12: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc et Ap – polynôme de degré 3

Pour ce cas aussi, et d'après les graphes on constate que le fitting de modèle cubique est beaucoup mieux par rapport au modèles linéaire et quadratique.

➤ **La contribution de Ap, et f sur Ra :**

✓ **Le modèle quadratique**

$$Ra = Ap^2(-1.577) + Ap*f(-3.642) + Ap(0.425) + f^2(0.8855) + f(24.537) + (3.096)$$

$$RMSE = 1.8979$$

$$R^2 = 0.1594$$

✓ **Le modèle cubique :**

$$Ra = Ap^3(1.913) + Ap^3*f(1.913) + Ap^2(-2.031) + Ap*f^2(-3.383) + Ap*f(-313) + Ap(0.53480) + f^3(0.3485) + f^2(10.851) + f(721.8) + 0.13744$$

$$RMSE = 1.893997$$

$$R^2 = 0.1629$$

Les graphes :

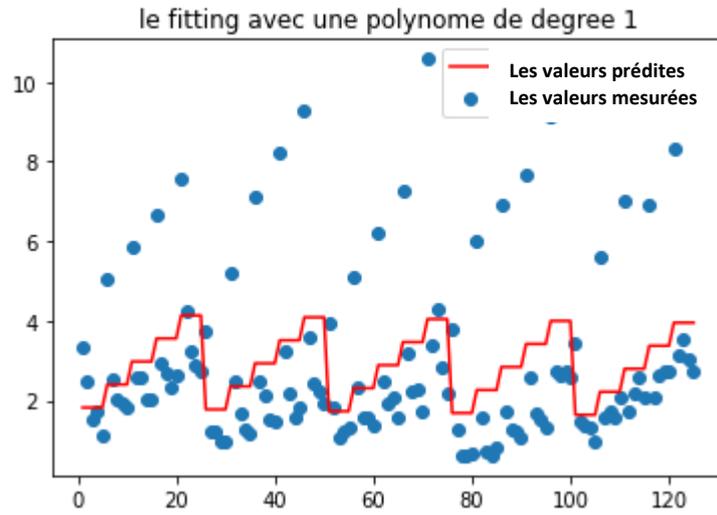


Figure III.13: Evolution de rugosité Ra en fonction de A_p et f – polynôme de degré 1

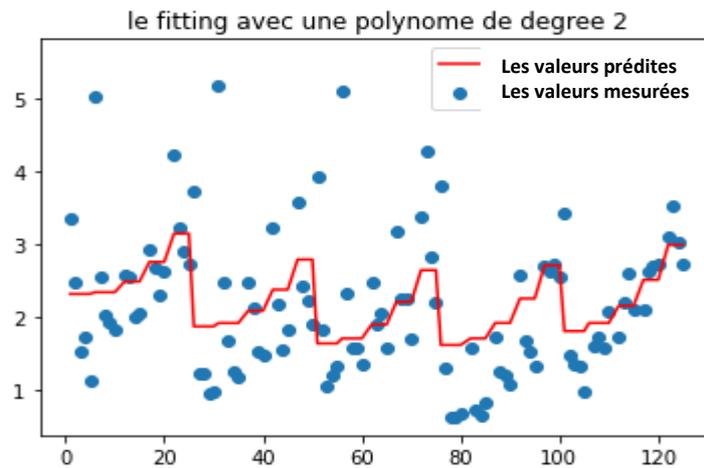


Figure III.14: Evolution de rugosité Ra en fonction de A_p et f – polynôme de degré 2

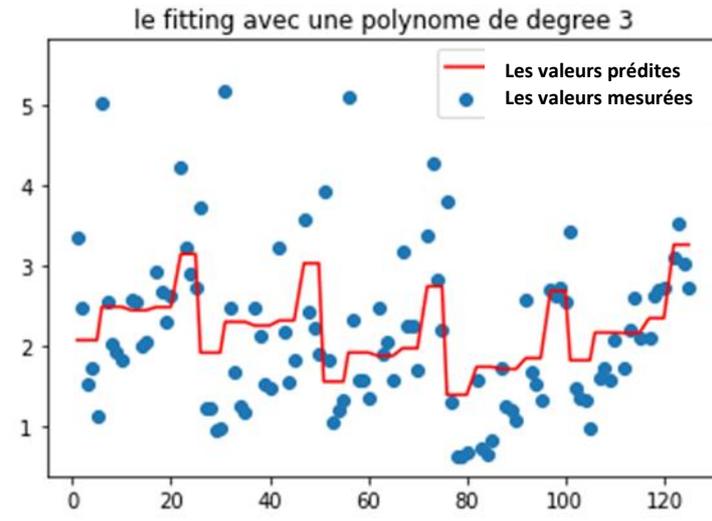


Figure III.15: Evolution de rugosité Ra en fonction de Ap et f – polynôme de degré 3

Le fitting de ce modèle est le plus faible, les valeurs prédites sont relativement loin des valeurs empiriques, malgré que le modèle cubique est relativement bien que les modèles quadratique et linéaire, est c'est parce que la contribution de profondeur dans la rugosité est très faible d'une part, et d'autre part à cause de manque d'échantillon pour les valeurs de Ap

➤ **La contribution de Ap, Vc et f sur Ra :**

✓ **Le modèle quadratique :**

$$Ra = Ap^2(-1.712) + Ap*f(3.201) + Ap*Vc(-5.115*10^{-2}) + Ap*Vc*f(0.39994) + Ap(0.461) + f^2(1.775*10^{-3}) + f(10.1433) + Vc^2(4.4051*10^{-3}) + Vc(1.1799*10^{-4}) + 7.04799$$

RMSE=0.51

R²=0.75

✓ **Le modèle cubique :**

$$Ra = Ap^3(3.30) + Ap^2*f(45.5) + Ap^2*Vc(-0.126) + Ap^2(-1.95) + Ap*f^2(-4.89) + Ap*f*Vc(-0.0164) + Ap*f(-0.0211) + Ap*Vc^2(0.0681) + Ap*Vc(0.000781) + Ap(0.37) + f^3(0.024) + f^2*Vc(0.0041) + f^2(5.42) + f*Vc(0.0000088) + f(422.3) + Vc^3(0.133) + Vc^2(-0.0000643) + Vc(-0.00000142) + 6.09$$

RMSE=0.37

R²=0.86

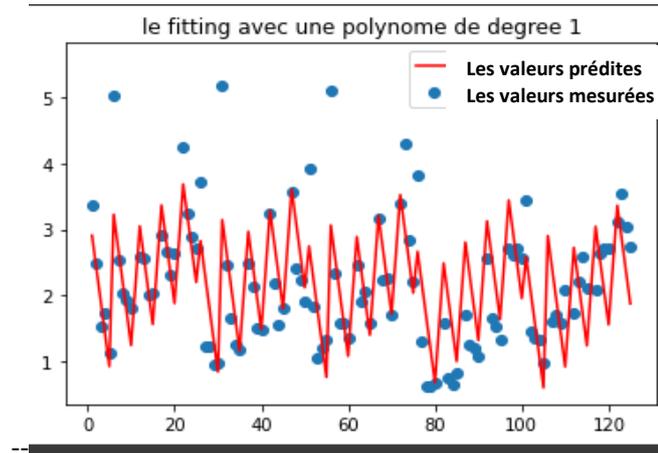


Figure III.16: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc, Ap et f – polynôme de degré 1

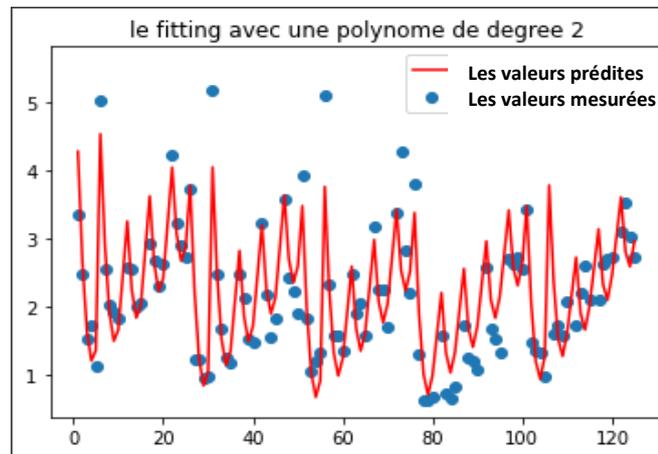


Figure III.17: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc, Ap et f – polynôme de degré 2

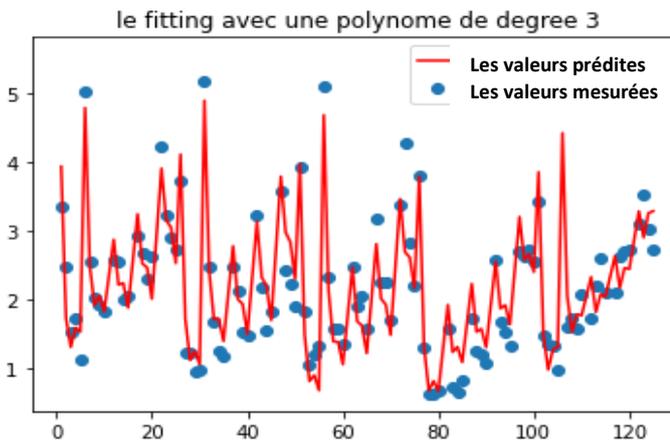


Figure III.18: Evolution de rugosité Ra en fonction de Vc, Ap et f – polynôme de degré 3

D'après les résultats, le modèle cubique est le plus approprié, il donne des valeurs relativement précises en comparaison avec les autres modèles. Dont R^2 dans ce dernier est plus importante par rapport au modèle quadratique, avec une corrélation de 0.86, c'est-à-dire 86% des entrées sont traitées par le modèle. Et au même temps les valeurs de RMSE (0.37) est comprise entre 0.2 et 0.5, qui est très précise empiriquement.

La figure suivante représente une carte de chaleur qu'on a obtenue à l'aide de la fonction « heatmap » qui est une fonction trouvée aussi dans Python permettant de visualiser la contribution de chaque paramètre sur la rugosité, et on peut observer l'effet de façon facile : (voir annexe 02)

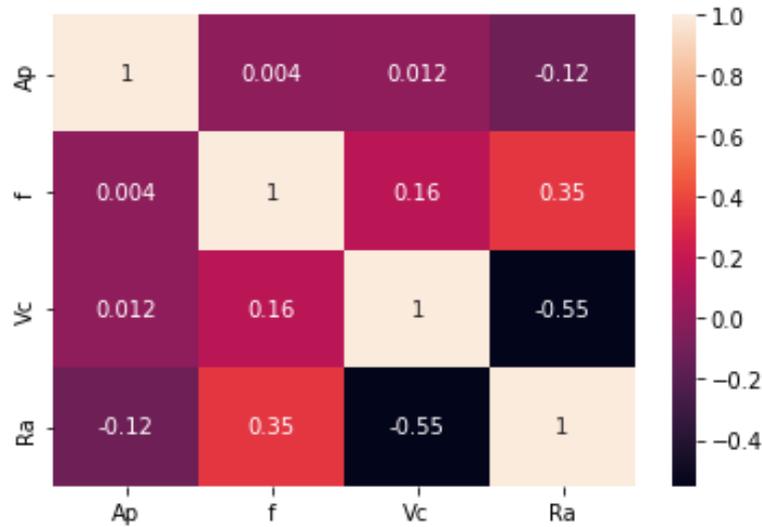


Figure III.19 : l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface

La figure montre que la vitesse de coupe V_c et l'avancement f ont le plus grand effet sur la rugosité, par 55% et 35% respectivement. Avec une petite contribution de la profondeur qui n'affecte pas la surface énormément.

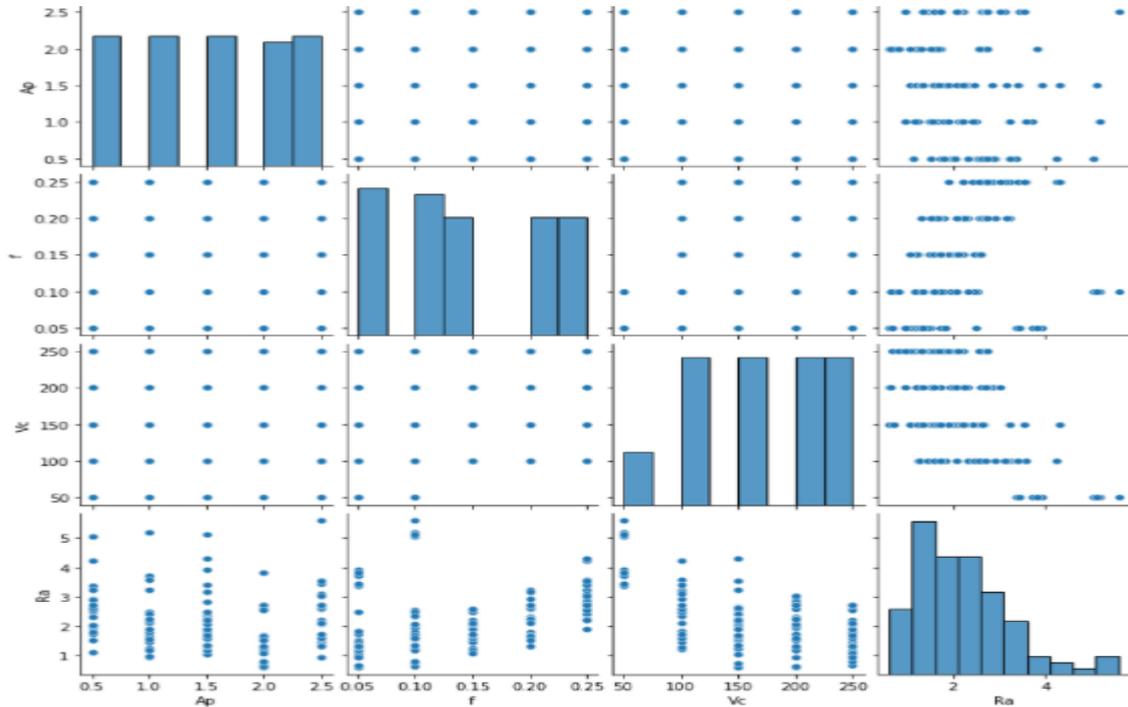


Figure III.20 : Contribution des paramètres de coupe sur la rugosité de surface

On remarque aussi qu'une bonne surface peut être obtenue pour des vitesses de coupe V_c importantes, et il est clair que l'augmentation des vitesses de coupe cause une diminution de la rugosité de surface. La diminution de l'avancement f peut améliorer la qualité de surface, et on remarque aussi que la profondeur a le moindre effet sur la rugosité, les graphes suivants confirment et montrent l'influence de la moyenne des paramètres de coupe sur la rugosité en trois modèles (linéaire, quadratique et cubique) :

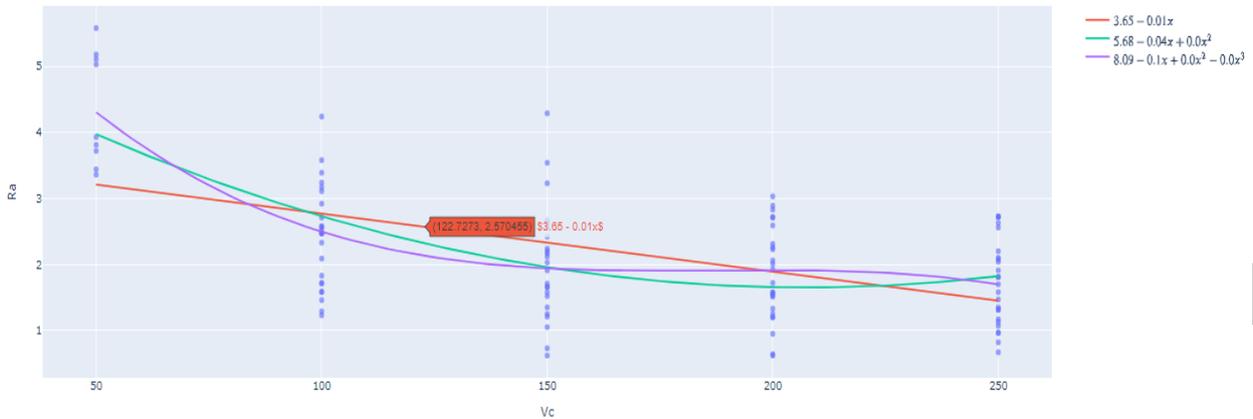


Figure III.21 : Effet de la moyenne de vitesse de la coupe sur la rugosité

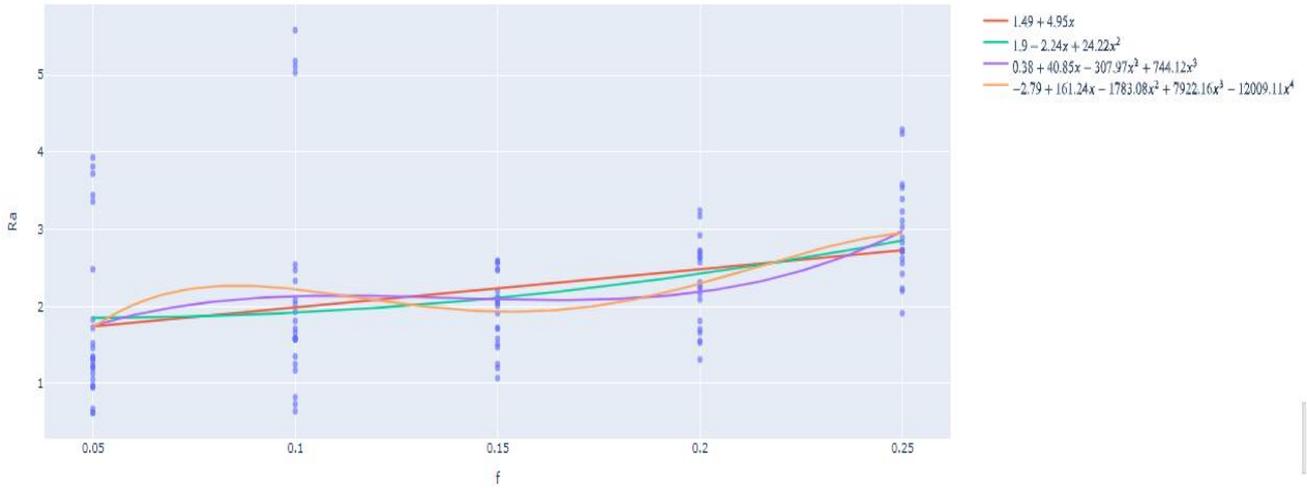


Figure III.22 : Effet de la moyenne l'avancement sur la rugosité

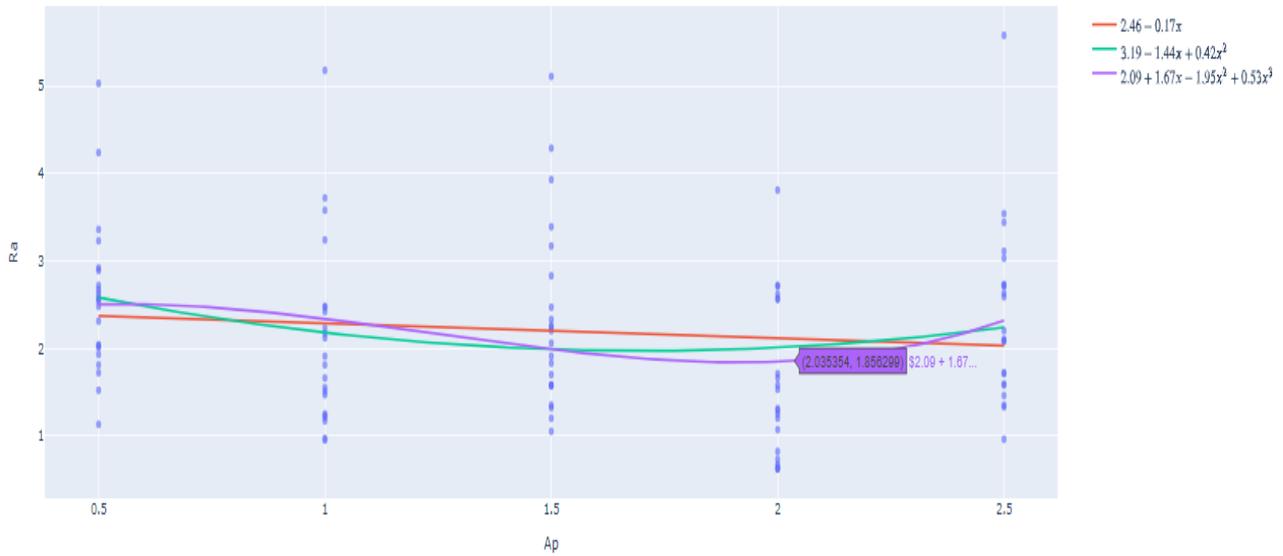


Figure III.23 : Effet de la moyenne de la profondeur sur la rugosité

➤ Les plots 3D :

Les graphes à trois dimensions permettent de faire l'analyse et l'inspection de l'influence de deux paramètres sur la rugosité Ra, les graphes ci-dessous sont plotés en utilisant le python.

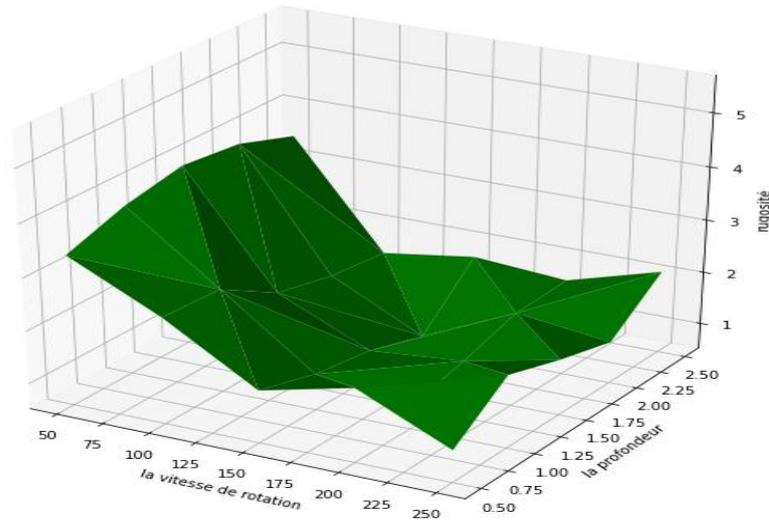


Figure III.24 : la rugosité Ra en fonction de Vc et Ap

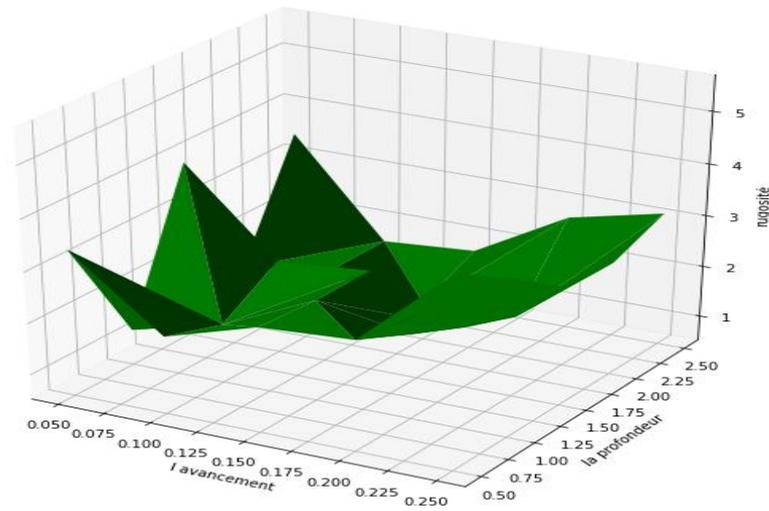


Figure III.25 : la rugosité Ra en fonction de f et Ap

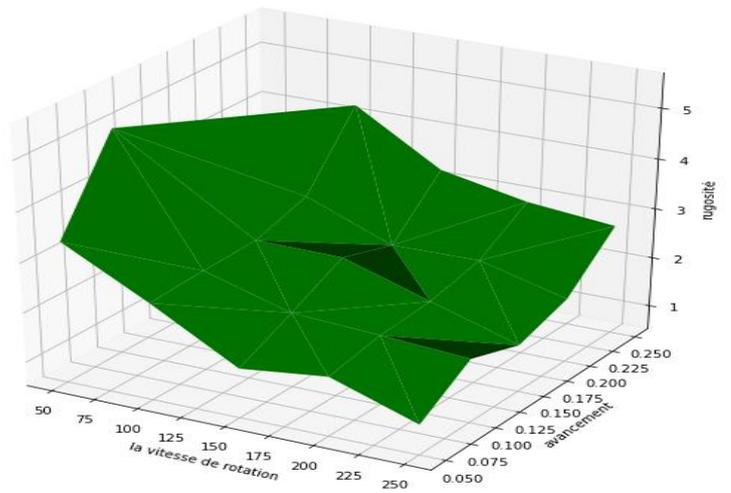


Figure III.26 : la rugosité Ra en fonction de f et Vc

Les figures précédentes illustrent des graphes de surface 3D. Les figures III.24 et III.25 montrent les graphes de rugosité quand l'avancement égale à 0.2 mm/rev et une vitesse de coupe qui égale à 50 m/min, ils indiquent que la profondeur de coupe à un faible effet sur la rugosité.

La figure III.26 donne Le graphe de rugosité lorsque l'avancement et la vitesse de coupe varient, et la profondeur reste constante à 0.5 mm, elle indique que la rugosité diminue avec l'augmentation de vitesse de coupe, en revanche elle augmente en augmentant l'avancement,

➤ La régression surfacique

Le Machine Learning a un modèle linéaire pour les problèmes de classification et de régression. Il peut résoudre des problèmes linéaires et non linéaires et fonctionne bien pour de nombreux problèmes pratiques, ce modèle est appelé « Support Vector Machine » (SVM). L'idée de SVM est simple : l'algorithme crée une ligne ou un hyperplan qui sépare les données en classes. Ou dans notre cas pour régresser les données. On a obtenu les figures suivantes :

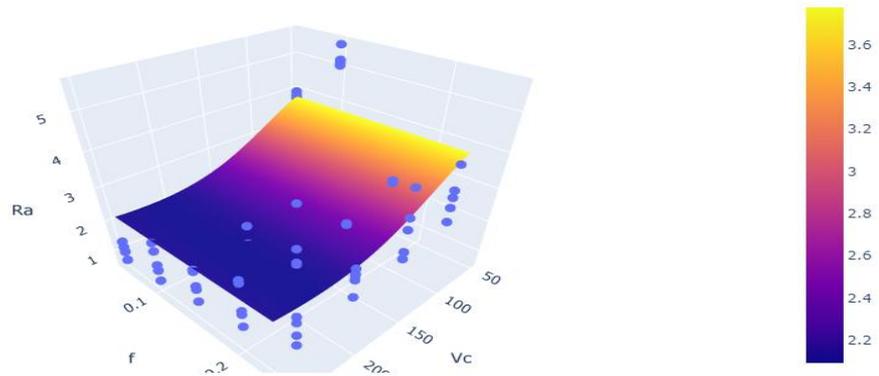


Figure III.27 : la régression surfacique de la rugosité Ra en fonction de Vc et le f

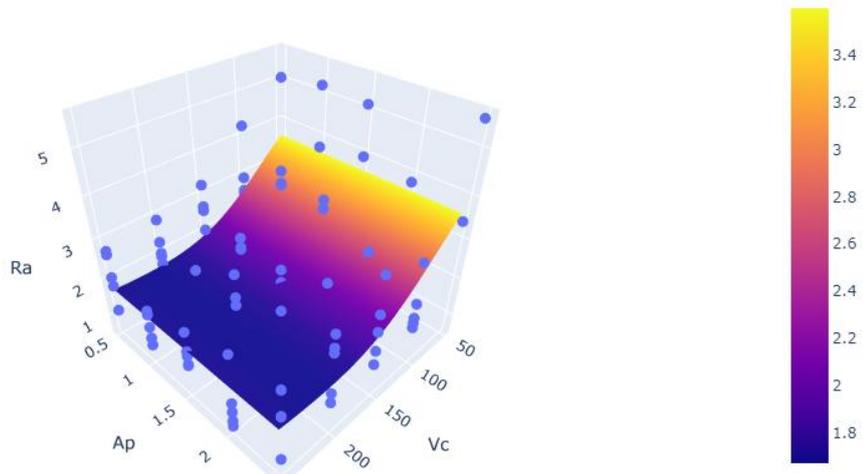


Figure III.28 : la régression surfacique de la rugosité Ra en fonction de Vc et l'Ap

Il est clair que le fitting de modèle de régression surfacique en fonction de Vc et f est efficace par rapport Vc et Ap, ce qui prouve que la vitesse de coupe et l'avancement sont les paramètres dominants qui influent sur la rugosité de surface.

III.7. Conclusion

Dans cette étude, on a essayé de développer des modèles de prédiction pour prédire l'effet de paramètres de coupe sur la rugosité de surface. La modélisation par régression polynomiale nous a permis de déterminer l'influence des paramètres de coupe (profondeur de passe, avance par tour et vitesse de coupe) sur l'état de surface usinée, on a conclu que la vitesse de coupe et l'avancement jouent un grand rôle dans l'influence sur la rugosité de surface, avec une contribution de 55% pour la V_c et 35 % pour l'avancement f . dont la relation entre V_c et la rugosité Ra est inverse et entre l'avancement f et la rugosité Ra est proportionnelle. Le modèle cubique développé

Les modèles développés peuvent être utilisé pour l'optimisation des problèmes économiques d'usinage, en minimisant les couts de productions. Sans oublier l'effet de lubrification qui a contribué à l'obtention de ces résultats.

Le « machine learning » avec ces avantages et ça flexibilité est un domaine très sophistiqué par rapport aux méthodes classiques et il est toujours au cours de développement et il deviendra très intéressant au futur.

Conclusion générale

Conclusion

Notre étude nous a permis de comprendre l'importance de l'intégrité de surface et son effet sur la qualité et la durée de vie des pièces mécaniques. On a vu dans le deuxième chapitre que la rugosité, la microstructure et les contraintes résiduelles qu'il faut bien les comprendre et les prendre en considération lors de l'usinage, car ils sont les facteurs les plus déterminants de l'intégrité de surface. Les paramètres de coupe jouent aussi un rôle important dans l'état de surface des pièces usinées, la vitesse de coupe et l'avancement ont l'effet le plus remarquable sur la rugosité de surface, et ça ce qui a été constaté dans le troisième chapitre.

Un choix optimal de conditions de coupe permet d'optimiser l'état de surface des pièces usinées, d'augmenter la durée de vie des outils de coupe et de diminuer le coût et le temps de production. Les critères pouvant évaluer une opération d'usinage sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif lié à cette opération. La production à moindre coût reste toutefois dépendante aux conditions d'intégrité de surface auxquelles la pièce usinée doit répondre. Les principaux paramètres pris en considération lors de la caractérisation sont :

- l'état de surface obtenu sur la pièce (la rugosité de surface) ;
- la métallurgie et la microstructure de pièce ;
- les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- la durée de vie des outils et l'usure au cours du temps ;
- les vibrations de l'outil et la pièce ;

L'objectif exposé dans cette étude réside dans l'optimisation et le choix de paramètres de coupe lors de l'usinage d'un acier AISI 1050. En modélisant les différents paramètres de coupe (vitesse de coupe, avancement, profondeur) par la méthode de régression polynomiale, et en utilisant l'apprentissage machine « machine learning » par le langage de programmation « Python », les résultats ont montré que la vitesse de coupe et l'avancement ont un effet important sur la qualité de surface usinée.

Le modèle de régression a fourni des graphes et des polynômes et il a aussi contribué à l'optimisation de choix des paramètres d'usinage. Ce type de méthodes est très sophistiqué et peut donner une grande poussée à l'industrie de fabrication mécanique.

Bibliographie des références

[1]: www.cvm-france.com

[2]: Frank MONTHEILLET, Laurent BRIOTTET, « Endommagement et ductilité en mise en forme », *Techniques de l'Ingénieur*, 10 juin 2009

[3]: E. Macherauch and K.H. Kloss, Proceedings of the international conference on residual stresses, Garmisch-Partenkirchen, FRG, (1986) 167-174.

[4]: M. Field and J. Kahles, Review of surface integrity of machined components, *Ann. CIRP*, 20 (1971). P 153.

[5]: Ataollah Javidi, Influence of Machining on the Surface Integrity and Fatigue Strength of 34CrNiMo6 Steel, a thesis in partial fulfilment of the requirements for the degree of a Doctor of Montanistic Sciences, the University of Leoben; july 2008.

[6]: J.D. Thiele and S.N. Melkote, Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 94 (1999) 216-226.

[7]: Y.K. Chou and C.J. Evans, Microstructural effects in precision hard turning, *Manufacturing Science and Engineering*, ASME Bound Volume, MED-Vol., 4 (1996) 237-242.

[8]: D.J. Whitehouse, *Handbook of surface metrology*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1994.

[9]: H. Sasahara, The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45%C steel, *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45 (2005) 131-136.

[10]: Ataollah Javidi, Ulfried Rieger, Wilfried Eichseder, The effect of machining on the surface integrity and fatigue life, Department of Mechanical Engineering, University of Leoben, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Austria Received 26 May 2007; received in revised form 4 December 2007; accepted 10 January 2008, Available online 26 January 2008.

[11]: P. Dahlman, F. Gunnberg and M. Jacobson, The influence of rake angle, cutting feed and cutting depth on residual stresses in hard turning, *J. Mater. Process. Technol.*, 147 (2004) 181-184.

Références

- [12]: B. Scholtes, Residual stresses introduced by machining, *Advances in Surface Treatments*, 4 (1987) 59–71.
- [13]: P. Leskovar and J. Peklenik, Influences affecting surface integrity in the cutting process, *Annals of the CIRP*, 31(1) (1982) 447-450.
- [14]: [Mondelin, 2012] MONDELIN, A. (2012). *Modélisation de l'intégrité des surfaces usinées : Application au cas du tournage de finition de l'acier inoxydable 15-5PH*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon.
- [15]: Manson, S.S and Coffin, L.F., (1954). Behaviour of materials under conditions of thermal stress.
- [16]: E. Siebel and M. Gaier, Influence of surface roughness on the fatigue strength of steels and non-ferrous alloys, *A. Ver. Dtsch. Ing.*, 98 (1956) 1715.
- [17]: B. Syren, Der Einfluss spanender Bearbeitung auf das Biegeverformungsverhalten von Ck 45 in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen, PhD Thesis, TU Karlsruhe, 1975.
- [18]: Taylor D., Clancy O. M. The fatigue performance of machined surfaces. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 14, no 2-3, 1991, p. 329–336, Blackwell Publishing Ltd.
- [19], [20]: Ataollah Javidi, Influence of Machining on the Surface Integrity and Fatigue Strength of 34CrNiMo6 Steel, a thesis in partial fulfilment of the requirements for the degree of a Doctor of Montanistic Sciences, the University of Leoben; July 2008.
- [21]: Vincent 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. *Matériaux*. INSA de Lyon, 2014.
- [22]: Sebastian Xhonneux, « Perception de l'optimisation en mathématiques et en économie au fil des siècles et l'enseignement du théorème de Lagrange », sur *APMEP*, 27 octobre 2008 (consulté le 15 mars 2010).
- [23]: Nicolas Blanchard , Stratégies et techniques d'usinage pour l'amélioration de l'état de surface, Institut Français de mécanique avancée, 11èmes Rencontres des Mécaniciens du CNRS – 24 juin 2010.
- [24]: Francis Galton, Regression toward the mean.
- [25]: Hicham CHIBANE, Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire, UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS

Références

DE TOURS, École Doctorale EMSTU, LABORATOIRE DE MECANIQUE ET RHEOLOGIE, p 56-57.

[26]: Riad Harhout et al, « Predictive Modelling and Optimisation of Surface Roughness in Turning of AISI 1050 Steel Using Polynomial Regression », Université M'hamed Bougara, Boumerdes, Faculty of Hydrocarbons and Chemistry, Oil Equipments Reliability & Materials Research Laboratory (LFEPM), Boumerdes 35000, Algeria,

Annexes

Annexe 01 : code de plot des graphes d'évolution de rugosité en fonction des paramètres de coupe.

```
plt.scatter(df['index'],y,label='les valeurs actueles')
plt.plot(df['index'],y_poly,c='red',label='les valeurs prédites')
plt.title('le fitting avec une polynome de degree 1')
plt.legend()
plt.show()
```

Annexe 02 : code de heat map

```
df.corr()
sns.heatmap(data=df.corr(),annot=True)
```