REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MÉDÉA
FACULTE DE TECHNOLOGIE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

EN GENIE MECANIQUE

OPTION: **SCIENCE DES MATERIAUX**

Thème

Influence des paramètres de coupe sur l'état de surface en tournage

Par :

BOUGRADA MOHAMED

et

FERRAH MOHAMED

Devant le jury :

Dr. ZIRARI. M	MCA U. MEDEA	Président
M^{er}. BOUGHEDAOUI.R	MAA U. MEDEA	Rapporteur
Dr. GUEMANA. M	MCA U. MEDEA	Examinateur

Année Universitaire : 2016/2017

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Département de Génie Mécanique - Université Dr Yahia Fares Médéa et la partie expérimentale au sein de l'entreprise POVAL de Berrouaghia dont je remercie vivement le personnel.

Je tiens à témoigner de ma reconnaissance envers mon directeur de mémoire Mer R.BOUGHEDAOUI pour sa confiance, l'intérêt qu'il a porté à mon travail et ses qualités humaines.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à Monsieur ZIRARI MOUNIR, Chef de département mécanique à l'Université de Médéa, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Mes remerciements vont également au Dr ACHACHE HABIB, maître de conférences à l'université de Médéa et Monsieur M. GUEMANA, maître de conférences à l'université de Médéa, pour avoir consacré de leur temps à l'examen de mon travail.

Un grand merci à tous mes amis de l'université.

J'adresse mes vifs remerciements à mes enseignants du département Génie Mécanique pour m'avoir encouragé pour mener à bien mes études durant ces cinq dernières années

Dédicace

Nous tient à dédier le fruit de ce travail à nos parents. À nos frères, À nos sœurs, À nos familles, A nos amis et spécialement ben mehiriz Mohamed, et romaissa À tous.

Table des matières

Index des figures
Index des tableaux
Liste des symboles
Présentation de l'entreprise POVAL de Berrouaghia 1
Introduction 3
1. **chapitre 01 : Notions d'usinage** : 6
1.1. Introduction 6
1.2. Définition de l'usinage 6
1.3. Définition du tournage 6
1.4. Principe de tournage 7
1.5. Les Machines de tournage 7
Les Machines de tournage 7
1.5.1. Classification des machines de tour 8
a. Les tours parallèles 8
b. Les tours à copier 8
c. Les tours semi-automatiques 8
d. Les tours automatiques 8
e. Les tours automatiques multibroches 9
f. Les tours à commande numérique 9
1.6. Opérations de coupe 9
a. Ebauche 9
b. Finition 9
1.6.1. Support et entraînement des pièces sur un tour 9
1.6.1.1. Montage en l'air 9
1.6.1.2. Montage mixte 10
1.6.1.3. Montage entre-pointes 10
1.7. Différentes opérations de tournage 11
1.7.1. Chariotage 11
1.7.3. Dressage 11
1.7.4. Perçage 12
1.7.5. Rainurage 12
1.7.6. Chanfreinage 12
1.7.7. Tronçonnage 13
1.7.8. Filetage 13
1.8. Les outils de coupe 13

1.8.1. Géométrie de l'outil de coupe 13
1.8.2. Déférent types des outils 15
1.8.3. Matériaux de l'outil 16
1.8.4. Choix d'un outil de coupe à plaquette rapportée 19
1.8.5. Processus de sélection 20
1.9. Paramètres de coupe 21
1.9.1. Vitesse de coupe 21
1.9.2. Vitesse d'avance Vf et avance par tour f 22
1.9.3. Profondeur de coupe a_p 23
1.10. Conclusion 23
2. **chapitre 02 : Etats de surface** 25
2.1. Définition 25
2.2. Rôle et fonctions de surface 25
2.3. La rugosité 26
2.3.1. Définition 27
2.4. Différents types de surfaces 27
2.4.1. Surface de référence 27
2.4.2. Surface spécifiée 27
2.4.3. Surface associée 27
2.4.4. Surface mesurée 28
2.4.5. Surface réelle 28
2.5. Défauts de surface 28
2.5.3. Ordre 3 30
2.5.4. Ordre 4 31
2.6. Principaux paramètres de la rugosité [53] 31
2.7. Mesure de la rugosité 32
2.7.1. La rugositèste 33
2.7.2. Rugosimètre 34
2.8. Indications des exigences d'états de surface 35
2.9. Différents types de lignes 36
2.9.1. Longueur de base, d'évaluation 36
2.9.2. Lignes de référence 36
3. **chapitre 03 : Partie expérimentale** 39
3.1. Matériel utilisé 39
3.1.1. Machine-outil 39
3.1.2. Outil de coupe utilisé 40

3.2. Matériau usiné 40
3.2.1. Normes européennes 40
3.2.2. Caractéristique chimique 40
3.2.3. Caractéristique mécanique 40
3.3. Mesure de rugosité 41
3.4. Plan des essais 42
4. **chapitre 04 : Approches théorique des efforts de coupe :** 47
4.1. Introduction : 47
4.2. Les différentes échelles d'étude : 47
4.2.1. Approches liées à l'échelle microscopique : 48
4.2.2. Approches liées à l'échelle mésoscopique : 48
4.2.3. Approches liées à l'échelle macroscopique : 48
4.4. Les différentes méthodes de modélisation des efforts : 50
4.4.1. Les méthodes empiriques : 51
4.4.2. Les méthodes analytiques : 58
4.4.3. Les méthodes numériques et simulation : 62
4.5. Application de simulation : 66
4.5.1. Modélisations adoptées : 66
4.5.2. Description du mouvement : 66
4.5.3. Modélisation de la pièce : 66
4.5.4. Modélisation de l'outil : 67
4.5.5. Modélisation de l'interface : 68
4.5.6. Paramètres de la coupe : 69
4.5.7. Conclusion sur le modèle : 69
4.6. Présentation du logiciel ABAQUS 70
4.6.1. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS : 70
4.6.2. Base de l'interface d'ABAQUS : 70
4.7. Présentation du logiciel ABAQUS CAE : 71
4.7.1. Les Modules : 71
4.8. Résultats de la simulation : 76
Conclusions générales et perspectives 78

Index des figures

Figure 1. 1 Opération de tournage 7
Figure 1. 2 Composantes de tour 8
Figure 1. 3 Montage en l'air 10
Figure 1. 4 Montage mixte 10
Figure 1. 5 Montage entre-pointe 10
Figure 1. 6 opération Chariotage 11
Figure 1. 7 opération d'Alésage 11
Figure 1. 8 opération de Dressage 11
Figure 1. 9 opération de Perçage 12
Figure 1. 10 opération de Rainurage 12
Figure 1. 11 opération de Chanfreinage 12
Figure 1. 12 opération de Tronçonnage 13
Figure 1. 13 opération de Filetage 13
Figure 1. 14 Éléments de l'outil 14
Figure 1. 15 Eléments de référence 14
Figure 1. 16 angles d'arête 15
Figure 1. 17 types d'outils porte-plaquettes. 16
Figure 1. 18 les matériaux d'outil solen la ténacité et la dureté 17
Figure 1. 19 Céramiques. 18
Figure 1. 20 outil de coupe à plaquette rapportée 20
Figure 1. 21 Le choix des conditions de coupe. 21
Figure 1. 22 Vitesse d'avance Vf. 22
Figure 1. 23 Différente types d'avance 22
Figure 1. 24 Paramètres de coupe 23
Figure 2. 1 l'état de surface..... 25
Figure 2. 2 Représentation de la surface de référence 27
Figure 2. 3 Surface spécifiée et surface associée 27
Figure 2. 4 Surface réel 28
Figure 2. 5 Ordre 1 29
Figure 2. 6 Ordre 2 30
Figure 2. 7 Ordre 3 30
Figure 2. 8 Ordre 4 31
Figure 2. 9 Écart moyen arithmétique Ra 32
Figure 2. 10 Ecart Rz, Rt 32
Figure 2. 11 Rugoteste type G – type S 33
Figure 2. 12 Le Rugotest N° 3 34
Figure 2. 13 la Rugosimètre 34
Figure 2. 14 profilomètre 35
Figure 2. 15 Position de différentes exigences d'état de surface 36
Figure 2. 16 Longueurs d'évaluation et de base 36
Figure 2. 17 Ligne des moindres carrés 37
Figure 2. 18 Ligne enveloppe inférieur et supérieur 37
Figure 3. 1 Tour universel (DLZ 500)..... 39
Figure 3. 2 l'outil en carbure (302 R K22) 40
Figure 3. 3 Montage et préparation de la pièce 41

Figure 3. 4 Comparateurs de rugosité viso-tactiles TGL 0-4763 41
Figure 3. 5 Evolution de rugosité en fonction de vitesse de coupe 42
Figure 3. 6 Evolution de rugosité en fonction vitesse d'avance 43
Figure 3. 7 Evolution de rugosité en fonction de profondeur 44
Figure 4. 1: Les différentes approches de la modélisation des efforts de coupe ……47
Figure 4. 2: Différentes échelles de l'étude de la coupe, ... 49
Figure 4. 3: Configurations de la coupe orthogonale, ... 49
Figure 4. 4: Paramètres de la coupe orthogonale, ... 50
Figure 4. 5: Zones caractérisant le processus de coupe 51
Figure 4. 6: Evolution de la rugosité en fonction des efforts de coupe 54
Figure 4. 7: Evolution de la rugosité en fonction des efforts de coupe (variation de Vf) 56
Figure 4. 8: Evolution de la rugosité en fonction des efforts de coupe (diminution de ap) 58
Figure 4. 9: Modèle de cisaillement dans le plan de Merchant, **.** 60
Figure 4. 10: Définition du cercle des efforts de Merchant 60
Figure 4. 11: Configurations du modèle de Kim, ... 65
Figure 4. 12: Méthodes de séparation copeau/pièce 65
Figure 4. 13: Modèle ALE à tendance Lagrangienne. 69
Figure 4. 14 : Le module PART 71
Figure 4. 15: Le module PROPERTY 71
Figure 4. 16: Le module ASSEMBLY 72
Figure 4. 17: Le module STEP 72
Figure 4. 18 : Le module INTERACTION 73
Figure 4. 19 : Le module LOAD 73
Figure 4. 20 : Le module MESH 74
Figure 4. 21 : Le module JOB 74
Figure 4. 22 : Le module VISUALIZATION 75
Figure 4. 23 : Le module SKETCH 75

Index des tableaux

Tableau 2. 1 les défauts macroscopiques et microscopique..... 28

Tableau 2. 2 Symboles de base 35

Tableau 3.1 Caractéristique de machine-outil…….……..….39

Tableau 3. 2 variation de vitesse de coupe Vc (m/min)..... 42

Tableau 3. 3 variation de vitesse d'avance Vf (mm/min) 43

Tableau 3. 4 variation de profondeur (mm) 44

Tableau 4. 1 résultat de calcule les efforts de coupe avec variation de Vc……54

Tableau 4. 2 Résultat de calcule les efforts de coupe avec variation de Vf..... 56

Tableau 4. 3 résultat de calcule les efforts de coupe avec variation de a_p 58

Tableau 4. 4 Caractéristiques du matériau de la pièce XC 45 (AISI 1045) 67

Tableau 4. 5 Caractéristiques matériau de l'outil Carbure **.**..... 68

Tableau 4. 6 Caractéristiques de frottement acier AISI 1045 outil carbure 68

Tableau 4. 7 Paramètres de la coupe orthogonale**.**..... 69

Liste des symboles

M ……...Point de l'arête de l'outil de coupe.
$\vec{V}$……Vecteur du sens de coupe.
$\vec{f}$…….Vecteur du sens d'avance.
Pb ……. Plan de base, surface d'appui de l'outil.
Pr ……Plan de référence.
Pf ……...Plan de travail conventionnel.
Ps ……Plan d'arête principale de l'outil.
γ …….Angle de coupe orthogonal (degré)
β …… Angle de taillant orthogonal (degré)
α ……Angle de dépouille orthogonal (degré)
Kr ……..Angle de direction d'arête (degré)
εr ……Angle de bec (degré)
λ …… Angle d'inclinaison d'arête (degré)
Vc ……..Vitesse de coupe (m/min)
Vf……Vitesse d'avance
a_p …….Profondeur de coupe (mm)
f ……...avance par tour

D …… Diamètre de la pièce à usiner en (mm)

n ……..Vitesse de rotation en (tr/min)
π ……..Constante

l ……Longueur de base

L ……..Longueur d'évaluation
Ra …….Ecart moyen (µm)

Rt …….. Hauteur maximale du profil

τ ……..Contrainte de cisaillement,

σ …….. Contrainte de traction-compression

μ ……Coefficient de frottement outil/copeau

ϕ ……angle de cisaillement

T_{melt} …… …La température de fusion

T_0 …….La température ambiante.

σ ……. La contrainte équivalente

$\left(\bar{\varepsilon}\right)^n$ ……. La déformation plastique équivalente

w …….Largeur du copeau, (mm)
Ks …….. Pression spécifique de coupe
A_0..... La surface de la section coupée

As ……..La surface de la zone de cisaillement

δ ……Pente d'affûtage de l'outil.

ξ …….. Constante qui dépend de la distribution des efforts

ملخص

اعداد هذه المذكرة يتضمن بحث مرجعي يخص حالة السطح وتأثير معايير القطع على هذه الأخيرة

في الفصل الأول تطرقنا الى أساليب التصنيع بصفة عامة وأدوات القطع مع خصائصها ومعايير القطع

وفي الفصل الثاني على حالة السطح وأهميتها في التصنيع مع كيفية قياس خشونة السطح اما في الفصل الثالث قمنا بتطبيق بعض التجارب بتغيير معايير القطع وملاحظة تأثيرها على حالة السطح وفي الأخير قمنا بمحاكات عملية القطع المتعامد خلال بضع ثواني

Résumé

La préparation de cette note comprend une recherche de référence pour le cas de la surface et l'effet des paramètres de coupe sur ce dernier

Dans le premier chapitre traite de la fabrication en général et des outils de coupe avec leurs caractéristiques et critères pour les méthodes de coupe

Dans le deuxième chapitre sur l'état de la surface et son importance dans l'usinage avec la façon de mesurer la rugosité de la surface, soit au cours du troisième chapitre, nous avons mis en place des expériences en modifiant les paramètres de coupe et notez son impact sur la surface et dans ce dernier cas

Nous faire une simulation de processus de coupe orthogonale en quelques secondes par logiciel Abaqus

Abstract

The preparation of this note includes a reference study on the surface condition and the impact of the cutting criteria on the latter

In the first chapter we discussed the methods of manufacturing in general and cutting tools with their characteristics and cutting standards

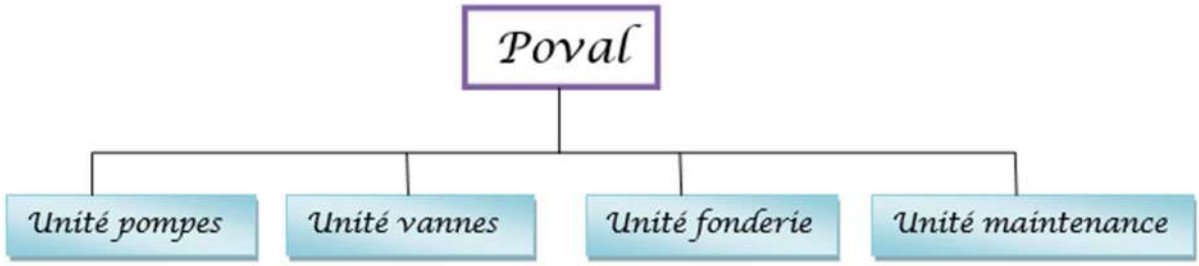
And in the second chapter on the state of the surface and its importance in manufacturing with how to measure the roughness of the surface, but in the third chapter we applied some experiments by changing the parameters of the pieces and note the impact on the state of the surface and the latter

We simulated the cutting process within a few seconds with the abaqus program

Présentation de l'entreprise POVAL de Berrouaghia

La réalisation de POVAL a été décidée dans le cadre de programme spécial posé par le gouvernement en 1969 en faveur de la wilaya de Médéa.

POVAL se compose de 4 unités :



A) Bâtiment fonderie et vannes :

A cet effet un contact produit en main a été signe le 16/03/70 avec INVESTEXPORT (R.D.A) représentant les donneurs de licencies GISAG pour la fonderie et MAW pour les robinets de vannes.

b) Bâtiment pompes :

Le contact a été signé le 16/06/1975 avec le partenaire INVESTEXPORT (R.D.A) et STROJEXPORT (TCHECOSLOQUE) sa réalisation s'est effectuée entre 1975-1985.

c) bâtiment maintenance :

Les contacts ont été signés avec INVESTEXPORT (R.D.A) pour la partie fabrication des pièces de rechanges (P.R) et la rénovation des équipements 26/10/1978 ainsi que la partenaire série RENAULT POUR la maintenance des véhicules le 25/06/1979.

Cout d'investissement :

- Fonderie et vanne 410MPA ;
- Pompe et maintenance 1030MPA ;
- L'effectif de POVAL et environ 2800 travailleurs ;
- La superficie totale est de 44 h ;

Le démarrage :

-Atelier fonderie → A.F « fonte » le 13/03/1975.

→ A.F « acier » le 09/197.

-Atelier vannes → 04/1975

→ B.T entretien véhicules le 06/1982.

-Atelier maintenance → B.T maintenance le 09/1982.

2. production :

a) Fonderie :

- Pièces brutes pour la fabrication des pompes et des vannes ;
- Pièces brutes sur command.

b) Pompe :

- Groupes moto pompe horizontaux ;
- Pompes hydrocarbures ;
- Pompes pour eaux chargées ;
- Groupes électro pompes horizontaux ;
- Circulateur d'eau chaude.

c) Vannes :

- Matériel de lutte contre l'incendie ;
- Robinets vannes pour eau ;
- Robinets vannes a soupape ;
- Pièces spéciales pour conduite d'eau ;

d) Maintenance :

- Maintenance des machines-outils et des équipements ;
- Maintenance du matériel roulant ;
- Fabrication de P.R ;
- Fabrication des pièces à la commande ;
- Sous-traitance en usinage mécanique ;

Réseau de distribution :

Agriculture - hydraulique - industrie bâtiment – hydrocarbures.

Introduction :

L'enlèvement de matière par outil coupant a toujours occupé une place prédominante parmi les procédés de mise en forme des matériaux. La qualité des surfaces usinées a toujours été une préoccupation majeure pour les fabricants. A l'heure actuelle, les opérateurs des machines-outils se trouvent dans l'obligation de produire des pièces mécaniques dont les tolérances géométriques, dimensionnelles et rugosités sont de plus en plus faibles .cette tendance s'accentue et s'accélère du fait de l'amélioration des techniques et des procédés d'obtention des pièces brutes car elles atteignent des précisions équivalentes à des usinages classiques.

Pour répondre aux besoins du marché industriel, il est impératif de maitriser la globalité du processus de fabrication des pièces mécaniques. Cependant, Le domaine de l'usinage rencontre un ensemble de phénomènes parasite pas toujours évidents à quantifier et qui peuvent réduire à néant les efforts consentis à la réalisation de pièces dont l'état de surface est de meilleures qualités. L'un de ces phénomènes est l'apparition des vibrations, dont l'origine de certains est restée longtemps incompréhensible. L'amplitude de ces vibrations varie avec les paramètres de coupe, mais d'une façon difficilement maîtrisable. Les usineurs sur machines-outils conventionnelles connaissent empiriquement les solutions à ce problème et ceci en modifiant les paramètres de coupes dans le sens qui mène à une stabilité de l'usinage pendant l'opération, ce qui exige la présence d'une main d'œuvre qualifiée en face de la machine d'une façon permanente. Les solutions applicables dans les conditions de l'usinage conventionnelles conduisent souvent à diminuer la productivité, ce qui est très acceptables lors de la fabrication au régime unitaire, mais il ne l'es pas dans le cas d'une production automatisé très avancées comme dans le cas de l'usinage sur les machines-outils à commandes numériques. L'objectif de ce travail consiste à éclairer mieux ce problème et donner une approche quand à une solution éventuelle pour le cas du tournage. Les principaux facteurs qui influent sur la qualité de la surface usinée sont cités par les spécialistes d'usinage comme suite :

1. l'épaisseur de copeau
2. la largeur de copeau
3. le choix de la vitesse de rotation de la broche
4. le choix de la vitesse d'avance de l'outil
5. la géométrie de l'outil
6. la flexibilité de l'outil ou celle de la pièce
7. la nature du matériau constituant les arêtes de coupes
8. la nature du matériau usiné
9. les efforts de coupe

Une des orientations privilégiées dans les milieux industriel et académique réside dans la mise en place d'un système intégré de prédiction des différents phénomènes mis en jeu lors des opérations d'usinage en générale et de tournage en particulier. Prédire l'apparition d'instabilités, évaluer les interactions instantanées au sein du système Pièce-Outil-Machine, déterminer l'état de surface final de la pièce usinée… sont autant d'objectifs visés dans le milieu de la coupe.

La prévision des efforts de coupe et la simulation des opérations d'usinage sont essentielles pour optimiser les procédés et ainsi contribuer à améliorer la fiabilité, la précision et la productivité de l'usinage. La connaissance des efforts permet de déterminer la déflexion de l'outil ou des parois usinées. Elle est une étape préalable à l'étude des vibrations et de l'usure des outils. Ceci permet de définir la durée de vie des outils, la qualité des surfaces et les conditions de coupe optimales. La connaissance des efforts de coupe peut également s'avérer être un apport non négligeable dans le domaine de la conception d'outil : en adaptant la géométrie des arêtes coupantes de l'outil, il est possible d'améliorer la tenue de l'outil en cours d'usinage suivant les efforts auxquels il sera soumis.

Afin de déterminer ces efforts de coupe, il est possible d'établir des modèles qui permettent de calculer les efforts de coupe avec une bonne précision. Dans la littérature, des modèles ont été établi permettant d'approcher avec une certaine précision les efforts de coupe. On constate que plus les modèles sont raffinés plus on approche les conditions de coupe optimales qui nécessitent une connaissance préalable des constantes caractéristiques du couple Outil / Matière. Les modèles les plus simples ne prennent en compte qu'un ou deux coefficients, telle la pression spécifique de coupe qui est très souvent disponible dans des bases de données, mais ne permettent pas de calculer l'évolution temporelle des efforts de coupe dans les configurations d'usinage très variées que l'on rencontre en pratique.

Chapitre 01

Notion d'usinage

1. Notions d'usinage :

1.1. Introduction :

L'usinage par enlèvement de matière est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Leur principe est d'enlever la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

L'usinage a un coût : temps de travail, surépaisseur de matière à enlever, usure de la machine-outil, consommables (outil, lubrifiant, courant électrique), coût du stock (la pièce en cours de fabrication est une dépense qui ne sera compensée qu'au moment de la vente, elle nécessite une surface supplémentaire d'atelier pour le stockage et le cheminement). On ne pratique donc que les usinages nécessaires. [1]

1.2. Définition de l'usinage :

Le procédé d'usinage par enlèvement de copeaux se fait par action mécanique d'un outil coupant. La force appliquée induit la formation, d'un ou plusieurs copeaux. L'outil va mettre en forme la pièce usinée par passes successives. Cette opération d'usinage est réalisée sur une machine-outil. [2]

1.3. Définition du tournage :

Est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal de ce procédé.

Le but du tournage est de réaliser des formes de révolution tels que cylindres, cônes et autres formes de révolution complexes. Le tournage est une technique de coupe un peu particulière dans le domaine de l'usinage car :

C'est la seule pour laquelle on a à la fois :

- une pièce en rotation
- un outil à dent unique
- une coupe continue (le copeau défile en continu sur la face de coupe de l'outil)

Ces spécificités font que cette technique, très simple, est la plus utilisée et la mieux indiquée pour les axes de recherche liés à la coupe: paramètres, critères de performance, outils, matériaux, durée de vie des outils,…etc. [3]

1.4. Principe de tournage :

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe *Mc*.

L'outil est animé d'un mouvement de translation parallèle ou oblique par rapport à l'axe de rotation c'est le mouvement d'avance *Mf*.

Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution tels que cylindre, cône, sphère, etc.

Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [4].

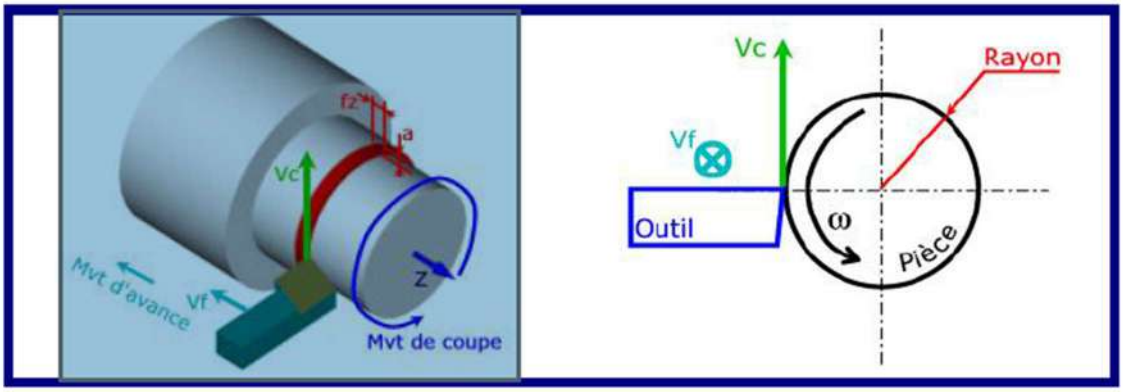


Figure 1. 1: Opération de tournage [5]

1.5. Les Machines de tournage :

Les Machines de tournage nommées les tours (voir Figure. 1.2) permettent de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage) : cylindres, cônes. L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions (longitudinale et transversale). Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche. [6]

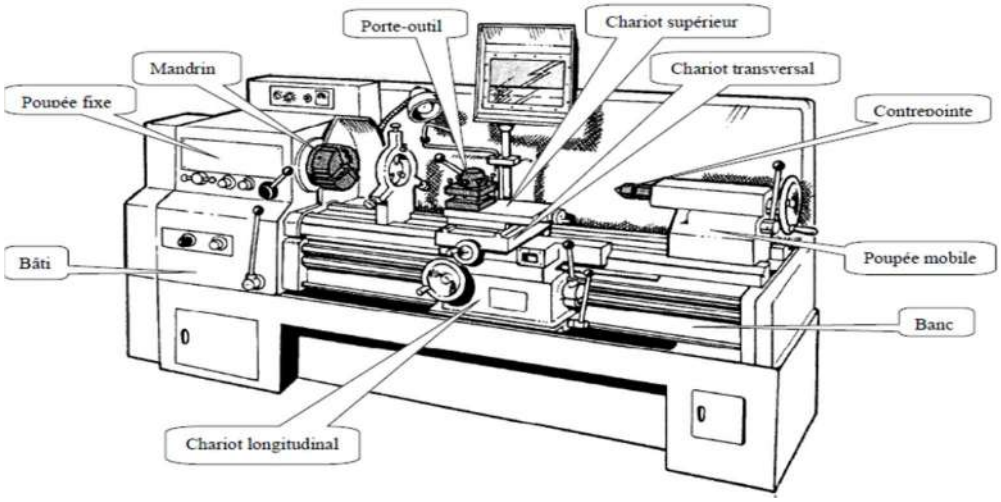


Figure 1. 2 : Composantes de la machine de tournage[6]

1.5.1. Classification des machines de tour :

Les machines-outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont:

a. Les tours parallèles:

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe. [7]

b. Les tours à copier :

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque. [7]

c. Les tours semi-automatiques :

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série. [7]

d. Les tours automatiques :

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est

spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries. [7]

e. Les tours automatiques multibroches :

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches. [7]

f. Les tours à commande numérique :

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives. [7]

1.6. Opérations de coupe :

a. Ebauche :

C'est l'opération qui consiste à enlever le maximum de copeaux en un minimum de temps sans s'intéresser à l'état de surface. Il faut donc choisir de grandes profondeurs de passe et de grandes avances [37].

b. Finition :

C'est l'opération qui consiste à finir la pièce aux cotes prescrites. Il faut donc choisis des grandes vitesses de coupe et de petites avances en obtiens des surfaces de grandes qualité.

1.6.1. Support et entraînement des pièces sur un tour :

Il existe trois principaux montages de la pièce à usiner sur le tour :

1.6.1.1. Montage en l'air :

C'est un montage sur mandrin effectué pour les pièces courtes (L< 4D), une des extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre reste libre [37].

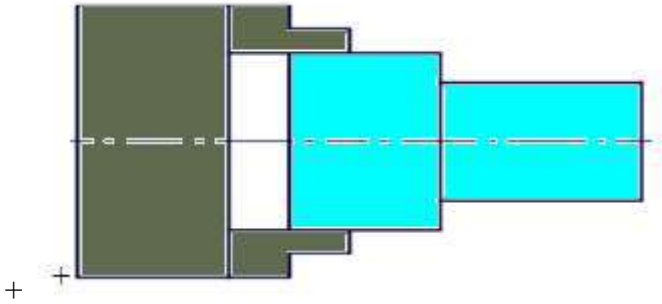


Figure 1. 3: Montage en l'air

1.6.1.2. Montage mixte :

Il est utilisé pour des pièces relativement longes (4D < L < 8D). Une des deux extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre extrémité est soutenue par de la poupée mobiles [37].

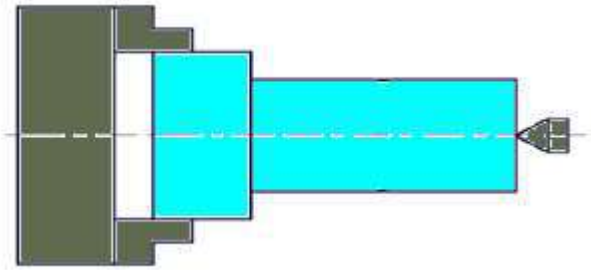


Figure 1. 4: Montage mixte

1.6.1.3.Montage entre-pointes :

Pour l'usinage des pièces longes (L>8D), en utilise le montage entre pointes. La pièce est soutenues par ses deux extrémités par deux pointes plus lunette [37].

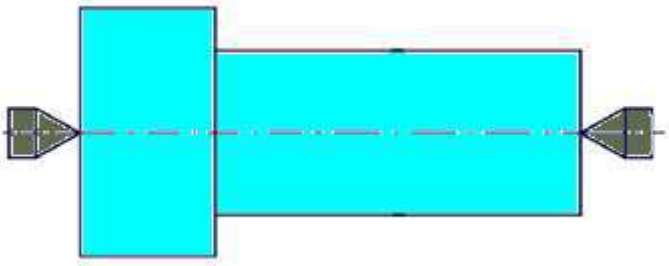


Figure 1. 5: Montage entre-pointe

1.7. Différentes opérations de tournage :

1.7.1. Chariotage :

Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.

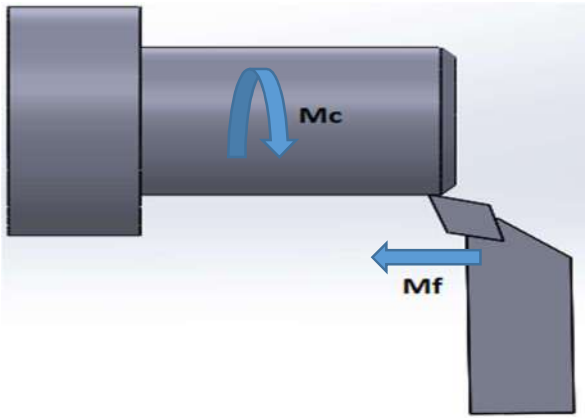


Figure 1. 6: opération Chariotage

1.7.2. Alésage

Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.

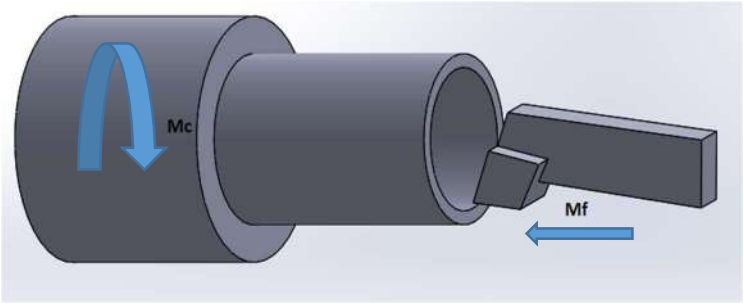


Figure 1. 7: opération d'Alésage

1.7.3. Dressage :

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure.

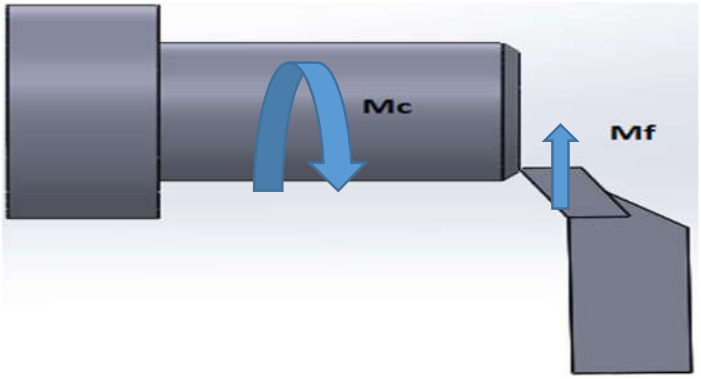


Figure 1. 8: opération de Dressage

1.7.4. Perçage :

Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'une forêt.

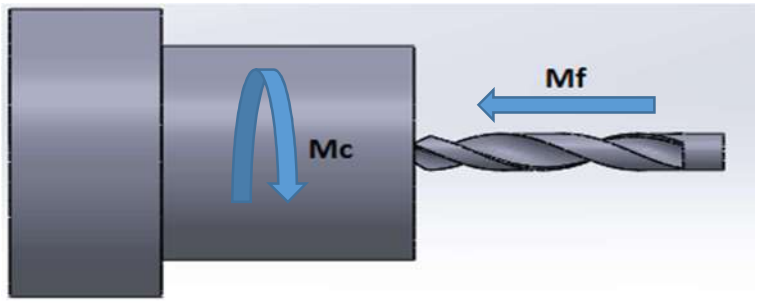


Figure 1. 9: opération de Perçage

1.7.5. Rainurage :

Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple.

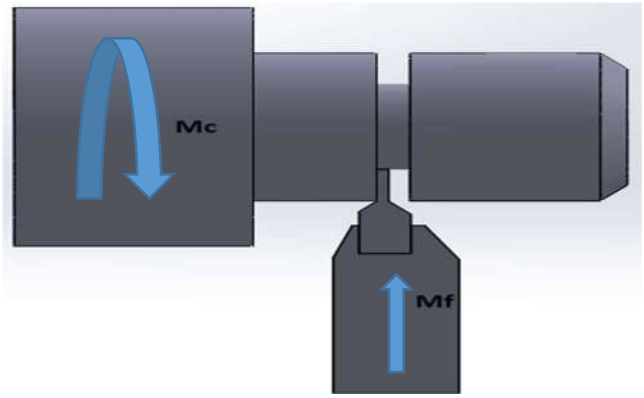


Figure 1. 10: opération de Rainurage

1.7.6. Chanfreinage :

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.

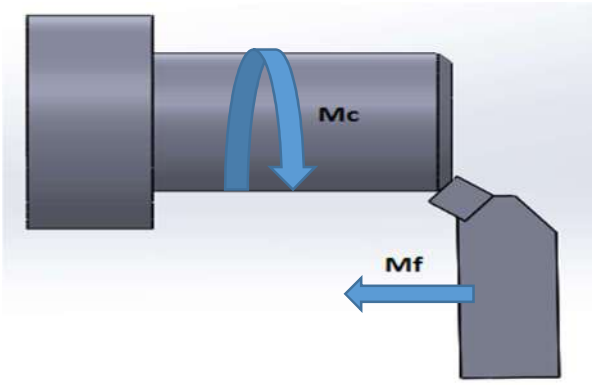


Figure 1. 11: opération de Chanfreinage

1.7.7. Tronçonnage :

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.

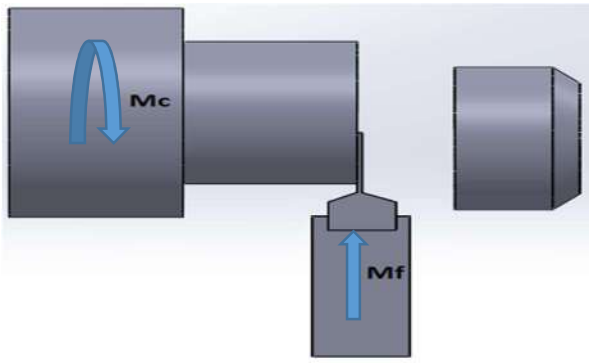


Figure 1. 12: opération de Tronçonnage

1.7.8. Filetage :

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.

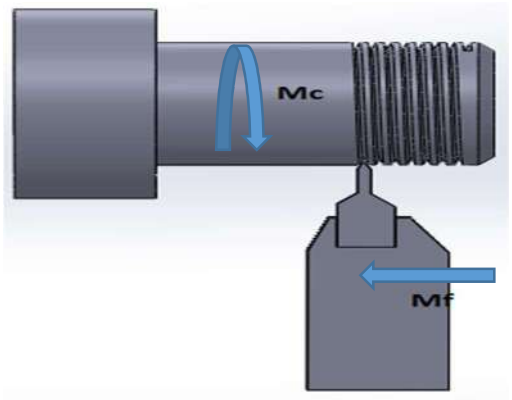


Figure 1. 13: opération de Filetage

1.8. Les outils de coupe :

La conception des outils coupants est directement liée au matériau usiné, au type et la nature de l'opération (ébauche, finition) [8]. Les outils de coupe permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables de la pièce [9].

1.8.1. Géométrie de l'outil de coupe :

1.8.1.1. Éléments de l'outil : Un outil de coupe comprend

- une partie active : partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps.
- un corps ou queue de l'outil : nécessaire à la mise en position et le maintien de l'outil sur le porte-outil.

La figure ci-dessous représente les éléments de l'outil de tournage

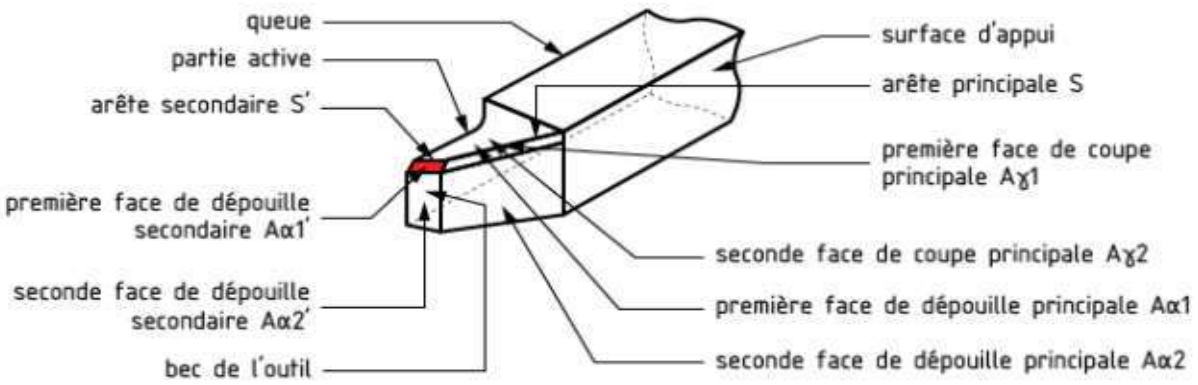


Figure 1. 14: Éléments de l'outil

1.8.1.2. Angles de l'outil :

Les angles d'arête de l'outil se définissent après avoir situé et repéré les éléments de référence suivants **[10]** :

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

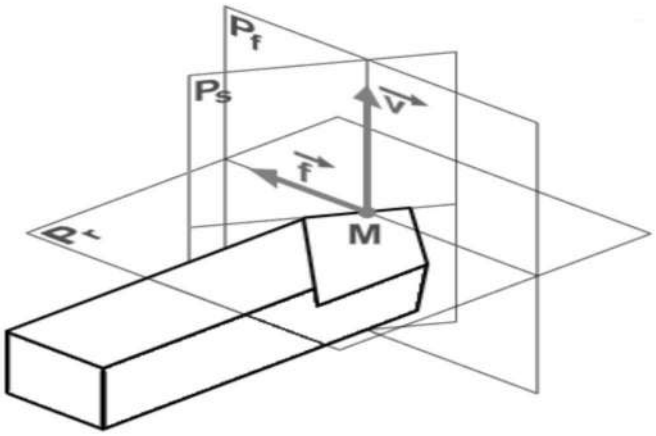


Figure 1. 15: Eléments de référence **[10]**

Après avoir étudié les éléments de référence, on peut définir les différents angles de l'outil coupant qui sont :

a. **Angle de coupe orthogonal (γ)** : il est mesuré entre le plan de référence (Pr) et la face de coupe, sa principale influence est la formation et le dégagement du copeau.
b. **Angle de taillant orthogonal (β)** : il est mesuré entre la face de coupe et la face de dépouille, sa principale influence est la résistance de la partie active de l'outil.
c. **Angle de dépouille orthogonal (α)** : il est mesuré entre le plan d'arête principale de l'outil (Ps) et la face de dépouille, sa principale influence est d'éviter le frottement de l'outil sur les surfaces usinées.
d. **Angle de direction d'arête (Kr)** : il est mesuré entre le plan d'arête principale de l'outil (Ps) et le plan de travail conventionnel (Pf) dans le plan de référence (Pr).
e. **Angle de bec (ε r) :** il est mesuré entre le plan d'arête principale de l'outil (Ps) et le plan d'arête secondaire (Ps') dans plan de référence (Pr).
f. **Angle d'inclinaison d'arête (λ) :** il est mesuré entre l'arête de coupe et le plan de référence (Pr). **[10]**

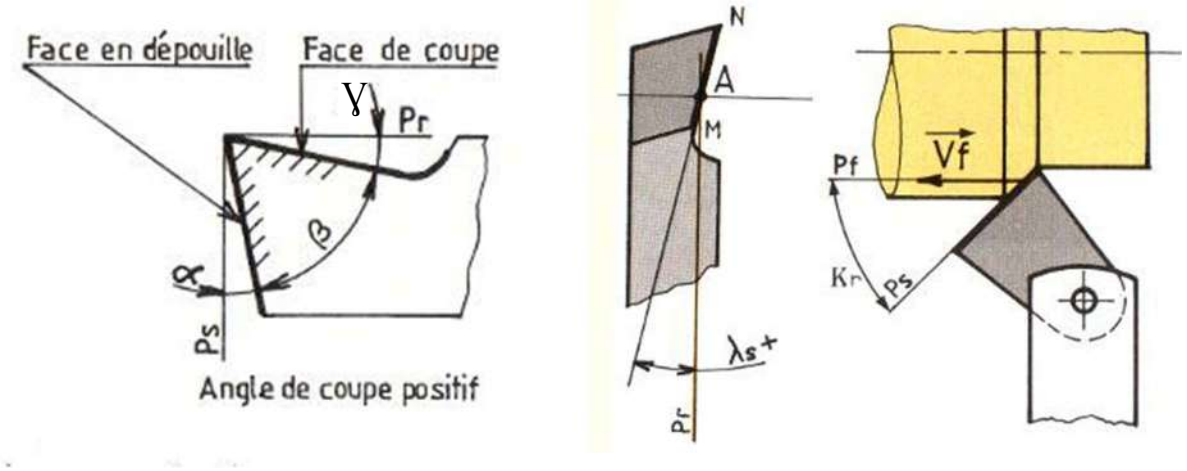


Figure 1. 16: angles d'arête [36]

1.8.2. Déférent types des outils :

Les outils de coupe en tournage classée solen la forme à trois types, ils sont :

- Les forets pour l'alésage.
- Les outils monoblocs : le corps et la parte active sont de même matériau.
- Les outils à plaquette.

Les outils de tournage actuels sont constitués dans la plupart du temps d'une porte plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe, la figure illustre les divers types d'outil porte-plaquette.

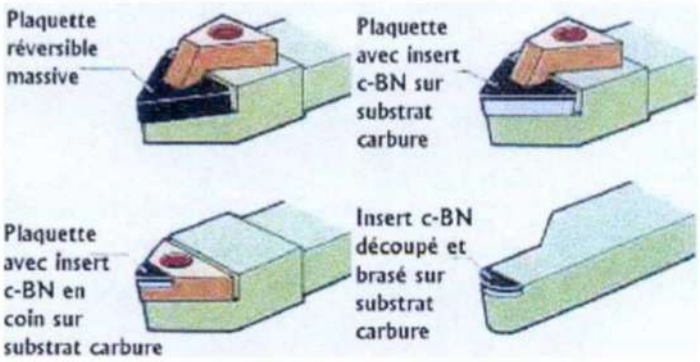


Figure 1. 17: types d'outils porte-plaquettes**. [11]**

On retrouve ainsi plusieurs types de plaquettes commercialisée, elles se distinguent en fonction du type d'usinage :

- les outils massifs plus robustes et résistants aux chocs : ils sont destinés aux opérations débauches.
- les outils revêtus de CBN sur une face sont brasés à un substrat de carbure de tungstène : ils résistent moins bien aux chocs et ils sont destinés à des opérations de semi finition ou finition.
- les outils revêtus de CBN en coin : ils ont qu'une arête de coupe et sont moins chers, Ils résistent moins à la chaleur, Dans le cas de températures de coupe très élevée, un débrasage se produit entre le CBN et le substrat.
- Les outils avec des inserts de CBN dans le coin sur toute l'épaisseur de la plaquette.

1.8.3. Matériaux de l'outil :

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à L'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro Grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie. Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont illustré en figure.

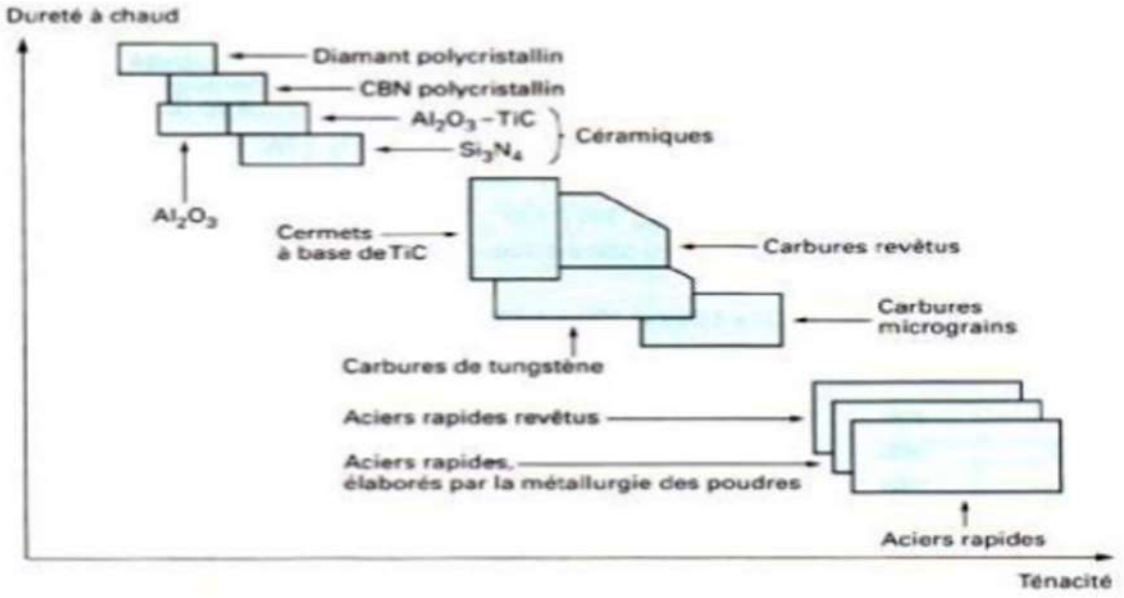


Figure 1. 18: les matériaux d'outil solen la ténacité et la dureté **[12]**

a. ARS :

Les outils ARS (acier rapides supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier faiblement allié subissant un traitement thermique, il est toujours utilisé pour certains types comme les forêts, ou les outils sont faible angle tranchant. On utilise en vitesse de coupe très basse pour éviter l'échauffement trop important élimine la trempe de l'outil, généralement ils sont des outils monobloc. Il y a plusieurs types d'outil est nommée solen le pourcentage de substance le plus grande en cas générale les compositions comme suivant : 0,7 à 1,6% de carbone ,12à 20 % tungstène ou 3,5 à 10% molybdène, vanadium cobalt est des traces pour les plus durs, dureté : 740 à 1000 Hv, Fabrication par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres.

b. Carbure :

Les outils en carbures sont les plus utilisé en cas de porte plaquette, il est existé de toutes formes pour chaque type de matériau et pour chaque type d'usinage, Les premières applications des carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaire, la partie active de ces outils étant raffûtée au fur et à mesure de son usure. Il y a deux types de carbure revêtus et non revêtus :

- Les carbures revêtus : sont recouverts d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium.
- Les carbures non revêtus : sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène, de titane …) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette.

c. Cermets :

Cermet, un terme formé de deux syllabes : cer vient de céramique et met de métal. Ce Sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de Composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel).

La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des Cermets, Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques.

Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les Cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement, Lorsque la précision de la finition l'exige.

d. Céramiques :

Les céramiques (figure 1.19) sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques. Les céramiques couramment utilisées.

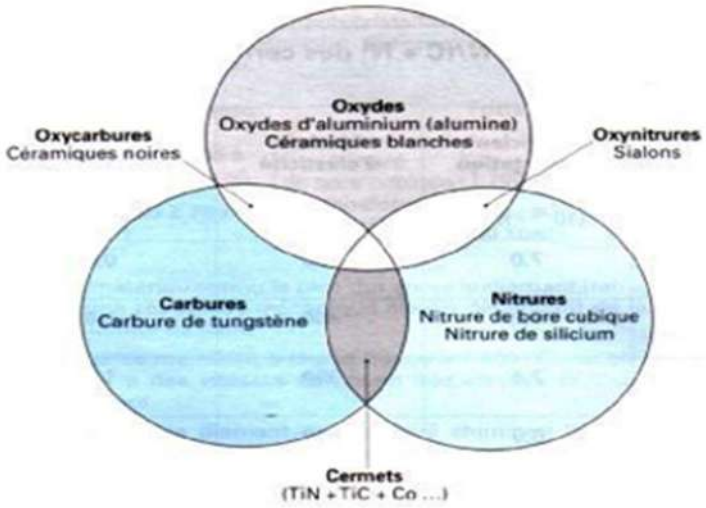


Figure 1. 19: Céramiques. [12]

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al2O3. L'apparition de ce matériau sur le marché remonte aux années 1960. Dès l'origine, il s'est révélé intéressant pour la finition des fontes, à condition de disposer de machines robustes et à grandes vitesses.

Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté Ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à HRC 60 (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation.
D'autres céramiques sont également employées.
Les céramiques noires sont des mélanges d'Al2O3 et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircone (ZrO2). Elles sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al2O3 aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe.
Le nitrure de silicium Si3N4 permet dans certains matériaux des vitesses de coupe une Fois et demie à deux fois supérieures à celles des autres céramiques, ce qui impose des Machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides …) il s'emploie à sec.
Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entrelacées) qui leurs confèrent une plus grande ténacité, permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires.
Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes. Un arrosage Continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe).

e. Nitrure de bore cubique (CBN) :

CBN est une matière très dure adaptée au tournage d'acier trompé ,de fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou cobalt .les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions coupe et de l'arête de coupe . La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure, lorsqu'elles sont utilisées correctement .les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition.

f. Diamant polycristallin (PCD) :

Le PCD est un diamant synthétique qui possède une dureté qui approche celle du diamant naturel .Ce matériau est très dispendieux et ses applications sont limitées à l'usinage des matériaux non ferreux, le PCD possède une faible dureté à chaud, limitée à 600°C.

1.8.4. Choix d'un outil de coupe à plaquette rapportée :

Les outils de tournage actuels sont constitués la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette et d'une plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe

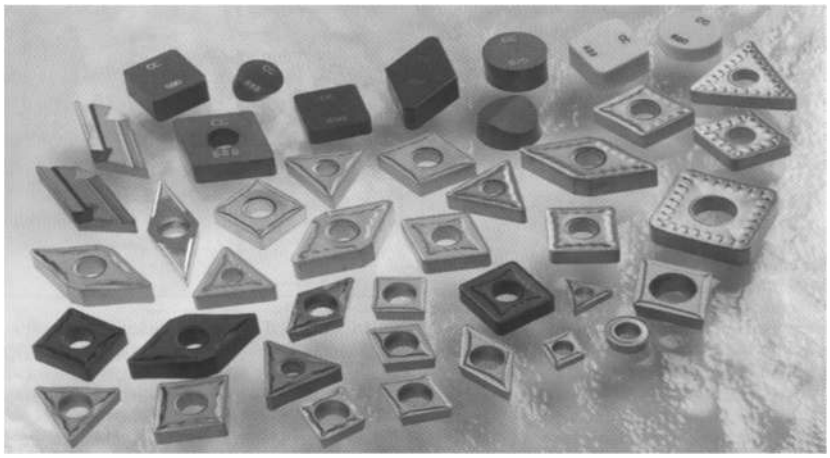


Figure 1. 20: outil de coupe à plaquette rapportée [13]

Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance.

Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- matière de la pièce, usinabilité ;
- configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage ;
- limitations : tolérances, état de surface ;
- machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques
- stabilité,

1.8.5. Processus de sélection de la plaquette :

L'approche suivante permet de choisir « pas à pas » les caractéristiques de l'outil de tournage convenant pour une application déterminée.

- système de fixation de la plaquette ;
- dimension et type de porte-plaquette ;
- forme de plaquette ;
- taille de plaquette ;
- rayon de bec ;
- type de plaquette ;
- matière de l'outil.

1.9. Paramètres de coupe :

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

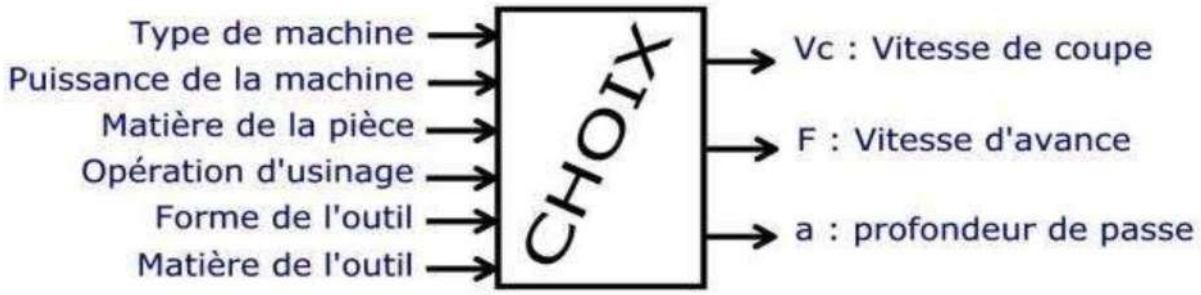


Figure 1. 21: Le choix des conditions de coupe. [13]

1.9.1. Vitesse de coupe :

Dans le cas du tournage, la vitesse de coupe constitue la grandeur cinématique de base du couple outil / pièce, elle correspond au déplacement (en mètres) effectué par un point de la pièce pendant une minute.
La formule de calcul de la vitesse de coupe est donnée par la relation suivante :

$$Vc = \frac{\pi DN}{1000} \quad (1)$$

D : diamètre de la pièce à usiner en (mm)
N : vitesse de rotation en (tr/min)
L'usineur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment :

- des matériaux de la pièce et de l'outil ;
- du diamètre de la pièce ;
- de la lubrification ;
- de la durée de vie souhaitée pour l'outil ;
- Des valeurs des autres paramètres de coupe (avance, profondeur de passe...).

1.9.2. Vitesse d'avance Vf et avance par tour f :

La vitesse d'avance Vf (mm/min), est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d'avance Vf est donnée par la formule suivante :

$$Vf\ (mm/min) = f\ (mm/tr) \times N\ (tr/min)$$

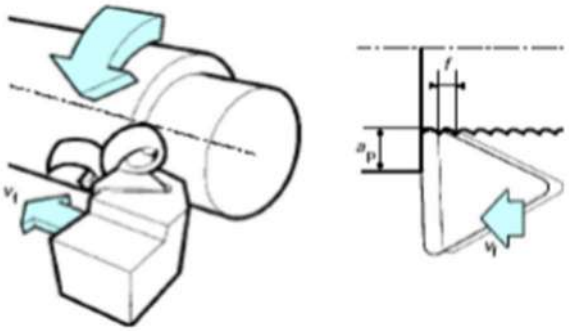


Figure 1. 22: Vitesse d'avance Vf. [13]

1.9.2.1. Les types d'avances :

On distingue trois sortes d'avance :

- **Avance longitudinal :** On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.
- **Avance transversale :** On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.
- **Avance oblique :** On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche.

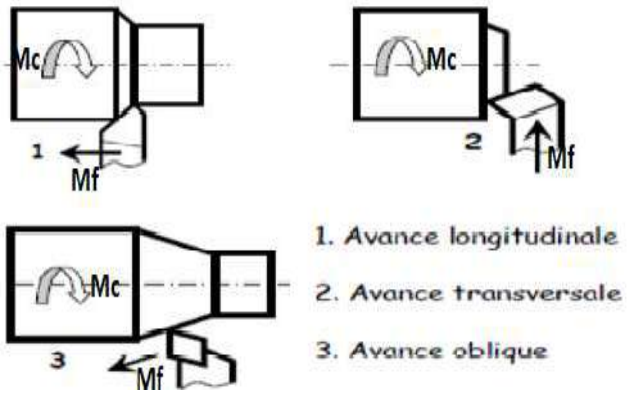


Figure 1. 23: Différente types d'avance [20]

1.9.3. Profondeur de coupe a_p :

En chariotage, la profondeur de coupe a_p (mm) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil.

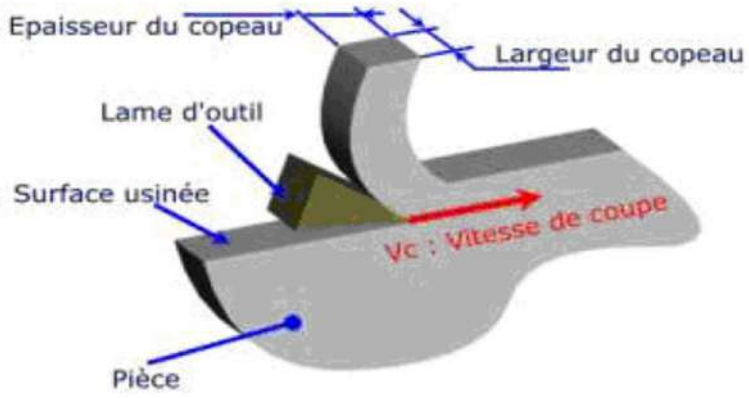


Figure 1. 24: Paramètres de coupe

1.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons rappelé les grands principes de l'usinage et particulièrement le tournage, avec ses outils et les matériaux d'outils et les paramètres de coupe

Chapitre 02

Etats des surfaces

2. Etats de surface :

2.1. Définition :

Les états de surfaces sont représentés par les irrégularités dues au procédé d'élaboration de la pièce, en général ils sont mesurés avec des appareils à palpeur à pointe en diamant nommé profilomètres, et reproduit sous forme graphique permettant de visualiser la forme des irrégularités et d'estimer leurs profondeurs et leurs espacements. Dans le bureau d'étude l'état de surface est un élément très important car il représente la cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie, et l'aspect des surfaces usinées [14]

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

Les défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques, ondulations) désignés plus communément sous le nom de rugosité.

Ces deux types de défauts peuvent être distingués de la manière suivante, en considérant le schéma, relatif à l'état de surface :

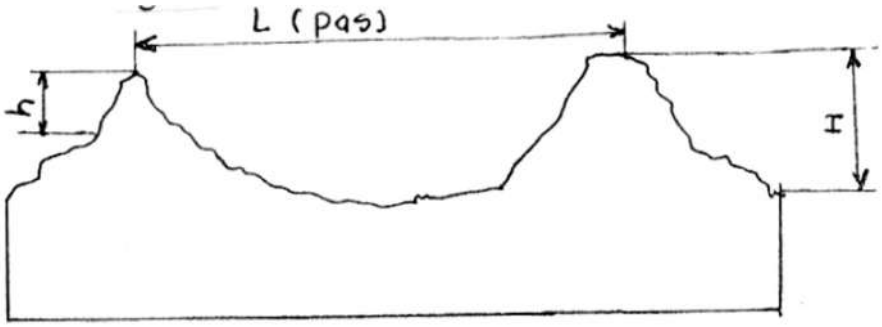


Figure 2. 1: l'état de surface

- L : Longueur.
- H : hauteur d'onde.
- h : hauteur de rugosité.
- Si L/H = 50 à 1000 on a une ondulation.
- Si L/H < 50, on a une rugosité.

Donc la rugosité ou l'état de surface est caractérisée par des défauts de surfaces de faibles amplitudes.

2.2. Rôle et fonctions de surface :

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication **[15]**

La surface fonctionnelle d'une pièce peut remplir 16 fonctions :

Surface de contact avec une autre pièce :

- frottement de glissement lubrifié (FG),
- frottement à sec (FS),
- frottement de roulement (FR),
- frottement fluide (FF),
- résistance au matage (RM),
- étanchéité dynamique avec ou sans joint ED),
- étanchéité statique avec ou sans joint (ES),
- ajustement fixe avec contrainte (AC),
- adhérence, collage (AD) ;

Surface libre, indépendante :

- générée par la coupe d'un outil (OC),
- résistance aux efforts alternés (EA),
- résistance à la corrosion (RC),
- destinée à recevoir un revêtement, peinture (RE),
- destinée à recevoir un dépôt électrolytique (DE),
- mesure (ME), aspect (AS).

2.3. La rugosité :

La confusion est souvent faite entre le degré de propreté et la rugosité d'une surface, il important de rappeler que ces deux notions sont différentes et totalement indépendantes l'une de l'autre.

- la propreté est une caractéristique chimique.
- la rugosité est une caractéristique physique

La rugosité peut être considérée comme un élément complémentaire du degré de soins (état de propreté) ou comme l'élément essentiel de contrôle, suivant la nature des traitements ou revêtements postérieurs **[16]**

2.3.1. Définition :

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière **[17]**

2.4. Différents types de surfaces [16] :

2.4.1. Surface de référence :

C'est une surface particulière qui permet de définir ou de contrôler d'autres surfaces

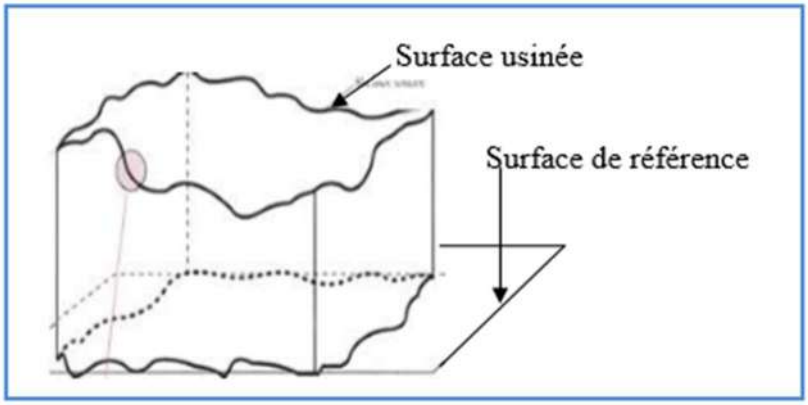


Figure 2. 2: Représentation de la surface de référence

2.4.2. Surface spécifiée :

Surface parfaite sur le dessin de définition, elle est définie géométriquement par le bureau d'études à l'aide de cotes nominales.

2.4.3. Surface associée :

C'est la surface théorique représentant au mieux la surface réellement fabriquée. Elle est de même nature que la surface nominale ou spécifiée

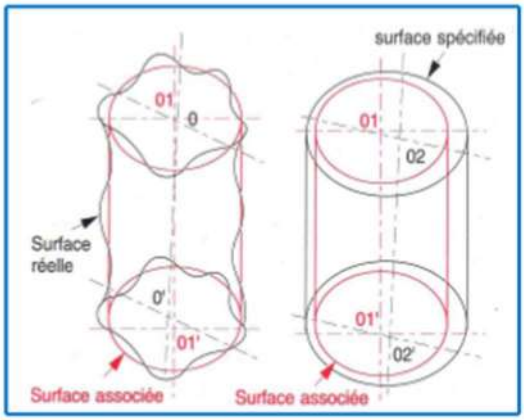


Figure 2. 3: Surface spécifiée et surface associée

2.4.4. Surface mesurée :

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée.

2.4.5. Surface réelle :

Surface obtenu au cours de la fabrication

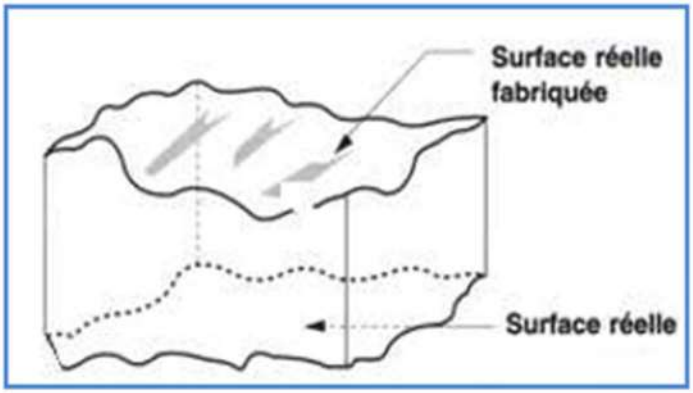


Figure 2. 4: Surface réel

2.5. Défauts de surface :

	Désignation	**Causes**
Macrographiques	défauts de forme et de position	Pendant l'usinage et après l'usinage etc.
	ondulation périodique	Fraisage : pas de l'ondulation = avance par tour de fraise : vibrations, pièce et outil, etc.
Micrographiques	strie - sillon, rugosité périodique	Stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil : lubrification, vibrations.
	arrachement, fentes, marques d'outil, piqûres, etc.	Qualité de l'affûtage de l'outil. Hétérogénéité du matériau usiné.

Tableau 2. 1: les défauts macroscopiques et microscopiques[19]

Il existe 4 ordres pour caractériser l'état de surface, (au plus l'ordre augmente au plus les Défauts étudiés sont petits) qui sont les suivants :

2.5.1. Ordre 1 :

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

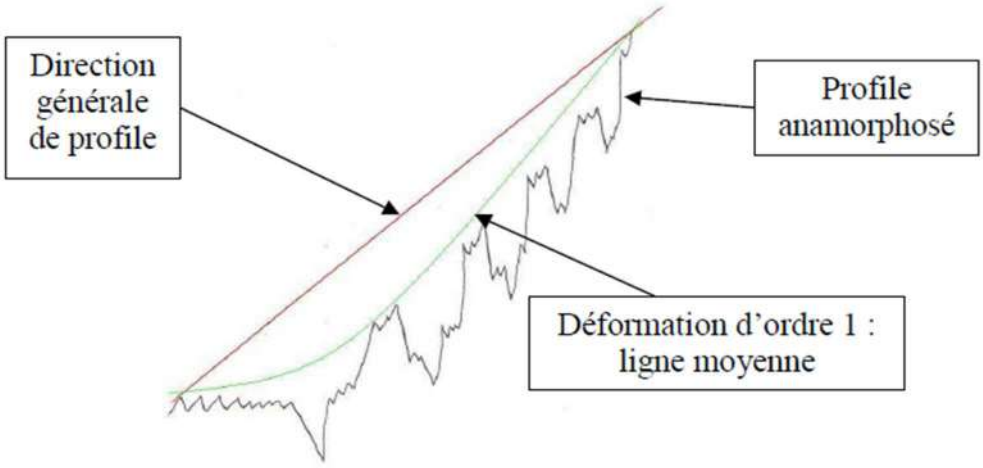


Figure 2. 5: Ordre 1 [19]

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

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

Les causes de ces défauts sont :

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

2.5.2. Ordre 2 :

Ondulations périodiques ; l'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 1.

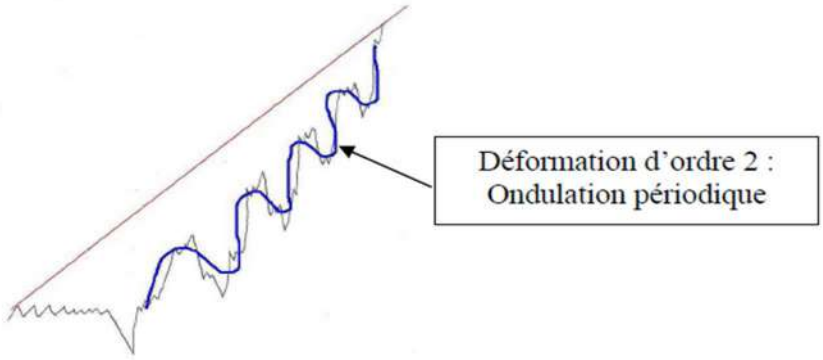


Figure 2. 6: Ordre 2 [19]

Les causes de ces défauts sont :

- Les phénomènes vibratoires bas fréquence

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

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

2.5.3. Ordre 3 :

stries ou sillons :

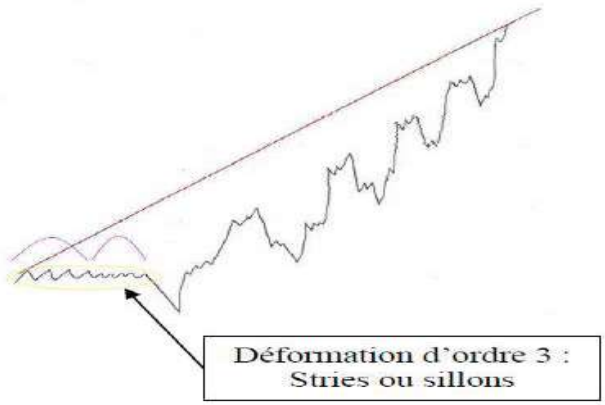


Figure 2. 7: Ordre 3 [19]

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

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

- Les problèmes de revêtement (peinture…)

Les causes de ces défauts sont :

- Les phénomènes vibratoires haute fréquence.
- Les stries ou sillons dus au passage de l'outil (r_ε)

2.5.4. Ordre 4 :

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

.

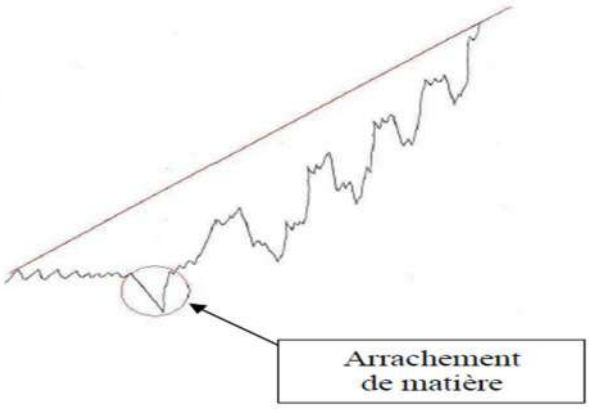


Figure 2. 8: Ordre 4 [19]

Les causes de ces défauts sont :

- Le mauvais affûtage de l'outil.
- Chocs de l'outil sur la pièce (au montage par exemple).
- Empreintes du système de serrage.

2.6. Principaux paramètres de la rugosité [53]

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité. En pratique, dans un profil et sur une longueur considérée, seuls trois d'entre eux sont retenus:

- **Ra : écart moyen arithmétique du profil de rugosité :**

Ra est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées à l'intérieur d'une longueur de base. Ra ne peut fournir que des informations très limitées et ne prend pas en compte des saillies /creux extrêmes du profil.

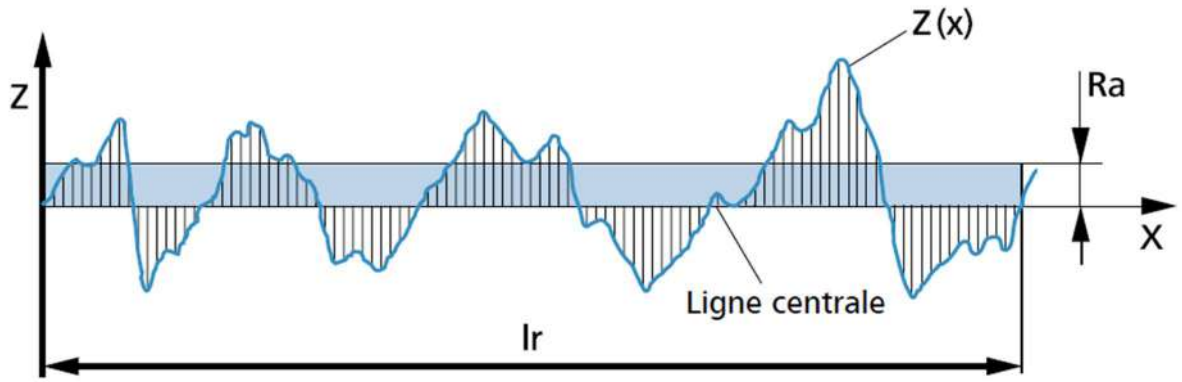


Figure 2. 9 : Écart moyen arithmétique Ra [53]

- **Rz : hauteur maximale du profil de rugosité :**

Valeur moyenne des valeurs Rz obtenues sur les cinq longueurs de base l.

- **Rt : hauteur totale du profil de rugosité :**

Ecart entre la saillie la plus élevée et le creux le plus bas du profil sur L

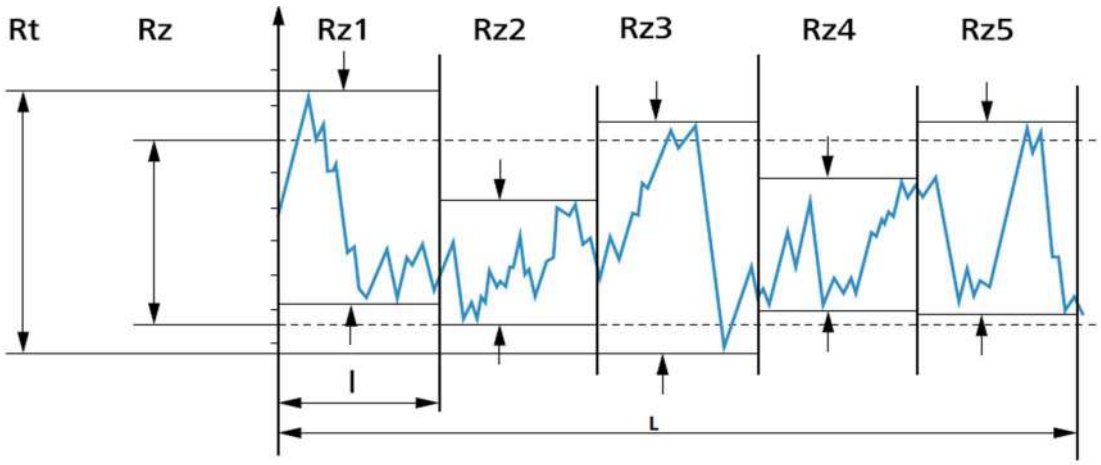


Figure 2. 10 : Ecart Rz, Rt [53]

Avec :
l : longueur de base
L : longueur d'évaluation

2.7. Mesure de la rugosité :

Il y a plusieurs méthodes pour évaluer un état de surface :

• par comparaison (échantillons Viso-tactile); Rugositest

• par mesure (appareils électroniques a capteurs ou appareils optiques) : Rugosimetre

2.7.1. La rugositèste :

a. Les Rugotests ISO type G et S :

Permettent l'évaluation du profil des surfaces en conformité avec la norme ISO 8503-2, Préparation de substrats d'acier avant l'application de peintures et de produits similaires - Caractéristiques de la rugosité de surface des substrats d'acier

- **Rugotest Type G - Grenaillage angulaire (ISO 8503) :**

Segment	1	2	3	4
Rugosité Ry (µm)	23-28	50-70	85-115	130-170

- **Rugotest Type S - Grenaillage sphérique (ISO 8503) :**

Segment	1	2	3	4
Rugosité Ry (µm)	23-28	35-45	60-80	85-115

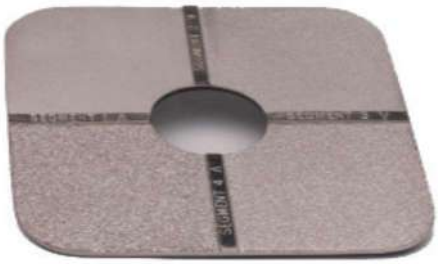


Figure 2. 11: Rugoteste type G – type S [25]

b. Le Rugotest N° 3 :

Est un comparateur de profils pour procédés de finition par grenaillage. Il a été mis au point par le Laboratoire Central de l'Armement français et le Commissariat à l'Energie Atomique Il correspond à la norme NF E05-05, désormais remplacée par la norme ISO 8503. Il est encore largement utilisé dans l'industrie. La plaquette (90 x 120 mm) est livrée dans un étui et comporte les deux séries de surfaces grenaillées, grenaillage sphérique et grenaillage angulaire.

Classe	N6	N7	N8	N9	N10	N11
Rugosité **Ra (µm)**	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5	25

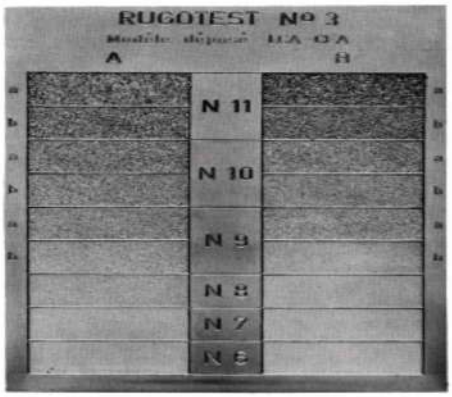


Figure 2. 12: Le Rugotest N° 3 [25]

2.7.2. Rugosimètre :

Le rugosimètre sert à déterminer rapidement la rugosité des surfaces. Le rugosimètre montre la profondeur de la rugosité moyenne Rz et la valeur de rugosité moyenne Ra en µm.

Le rugosimètre permet une détermination rapide de la surface d'un composant; d'autre part, la réalisation de la mesure de la rugosité est très simple

Le rugosimètre entre en contact avec la surface en quelques secondes et montre directement en Ra ou en Rz. Notre rugosimètre est livré dans des mallettes ayant des plaques de contrôle, des protecteurs pour les palpeurs, des accumulateurs et des chargeurs. [33]



Figure 2. 13: la Rugosimètre [33]

a. Instruments de mesure sans contact :

Les instruments de mesure sans contact réalisent la mesure à l'aide d'un faisceau de lumière et non d'un stylet. Il existe plusieurs types de rugosimètres sans contact, se différenciant par leur principe de fonctionnement (principe confocal, interférométrie par lumière blanche, etc.). De plus, d'autres instruments permettent de mesurer la rugosité, tels que les instruments à contact

transformés en instruments sans contact en remplaçant leur sonde par un capteur optique et, bien sûr, les microscopes**. [34]**



Figure 2. 14: profilomètre

2.8. Indications des exigences d'états de surface :

Les indications des exigences d'états de surface sont précisées à l'aide de symboles graphiques et d'indications textuelles. Le **tableau 2.2.** Indique la signification de chaque symbole graphique

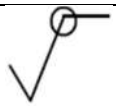
Symbole graphique	Signification
	Symbole graphique de base, tout procédé de fabrication autorisé
	Enlèvement de matière exigé sans spécification d'exigence pour l'état de surface
	Enlèvement de matière interdit
	Pour toutes les surfaces sur le contour de la pièce

Tableau 2. 2: Symboles de base.[21]

Ces symboles graphiques doivent être complétés par l'indication d'un ou plusieurs paramètres d'états de surface avec leur valeur numérique. Il est parfois nécessaire de préciser d'autres exigences, telles que le procédé de fabrication, les conditions de mesures, etc. La position des différentes exigences d'état de surface est indiquée sur la figure

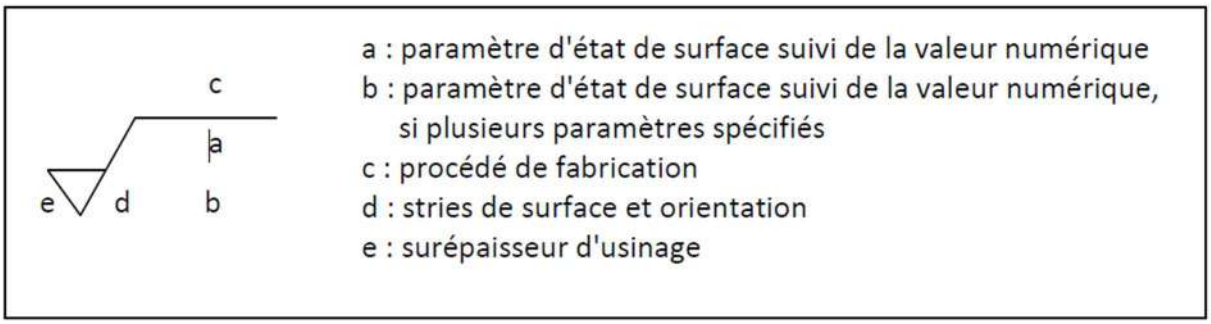


Figure 2. 15: Position de différentes exigences d'état de surface [21]

2.9. Différents types de lignes :

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

2.9.1. Longueur de base, d'évaluation :

- La longueur de base est définie par l'outil de mesure (notée l)
- La longueur d'évaluation est la longueur totale à mesurer (notée L)

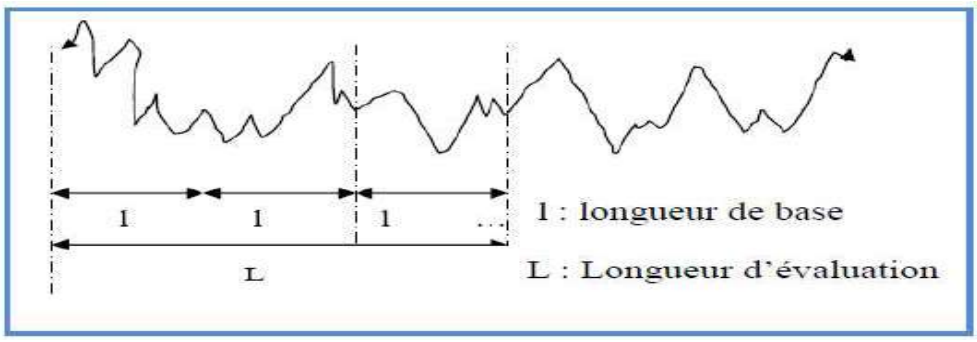


Figure 2. 16 : Longueurs d'évaluation et de base [19]

2.9.2. Lignes de référence :

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

- Les lignes moyennes : Moyennes arithmétique, Moyenne des moindres carrés
- Les lignes enveloppes : Enveloppe supérieure, Enveloppe inférieure

2.9.2.1. La ligne moyenne arithmétique :

C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle Sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (L) la somme des aires entre elle et le profil soit égale de part et d'autre :

2.9.2.2. La ligne des moindres carrés :

C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle Sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (L) la somme des carrés des écarts entre elle et le Profil soit minimal de part et d'autre

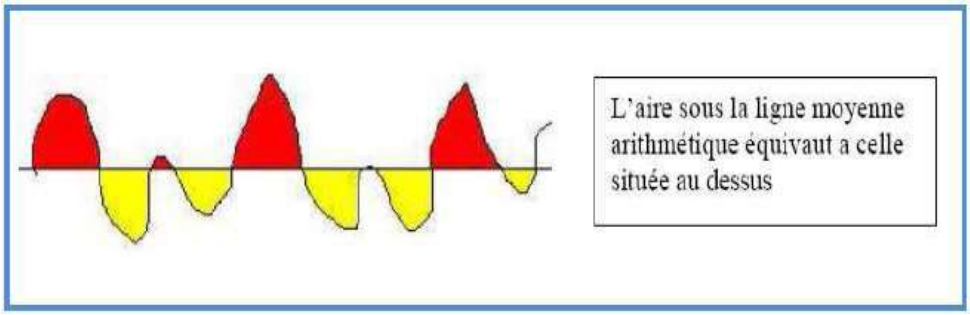


Figure 2. 17: Ligne des moindres carrés [19]

2.9.2.3. La ligne enveloppe supérieure :

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies Locales du profil.

2.9.2.4. La ligne enveloppe inférieure :

C'est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus bas des creux locaux du Profil. Le problème est que tous les points ne sont pas pris en compte (très aléatoire).

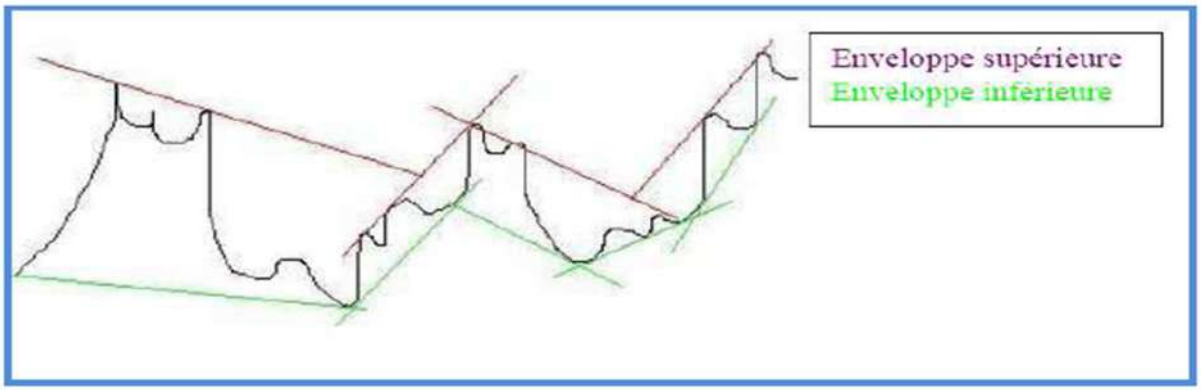


Figure 2. 18: Ligne enveloppe inférieur et supérieur [19]

Chapitre 03

Partie expérimentale

3. Partie expérimentale :

Cette étude expérimentale est conçue dans le but d'établir une loi de prédiction de la rugosité de la surface obtenue en fonction des paramètres du régime de coupe lors de l'usinage de l'acier $X_{20}Cr_{13}$

Cette série d'expérience concerne l'usinage d'un matériau en acier inoxydable ($X_{20}Cr_{13}$), par un outil en carbure métallique. Les variables considérées sont la vitesse de coupe (Vc), vitesse d'avance (Vf) et la profondeur de passe (a_p). Les paramètres de sortie sont les critères de rugosité de la surface usinée.

3.1. Matériel utilisé :

3.1.1. Machine-outil :

L'usinage est réalisé sur un tour à charioter et fileter fabriqué dans République démocratique allemande, modèle (DLZ 500)



Figure 3. 1: Tour universel (DLZ 500)

a. Caractéristique de machine-outil :

D max (mm)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	La puissance (kw)	Poids totale (tonnes)
400 – 500	**90 – 1120**	**5 – 32**	**15.5**	**3.8**

Tableau 3. 1 : Caractéristique de machine-outil

3.1.2. Outil de coupe utilisé:

Outil de coupe utilisée est en carbure métallique de désignation 302R 25x25 k20 fourni par La société TECHMO. L'outil avec une géométrie de la partie active matérialisée par les angles suivants :

L'angle de dépouille α = **6°,** L'angle de direction d'arête **kr= 45°**, L'angle de coupe γ**=4°,** Angle de taillant β **= 80°,** ayant un rayon du bec de ε_r **=0,8mm**

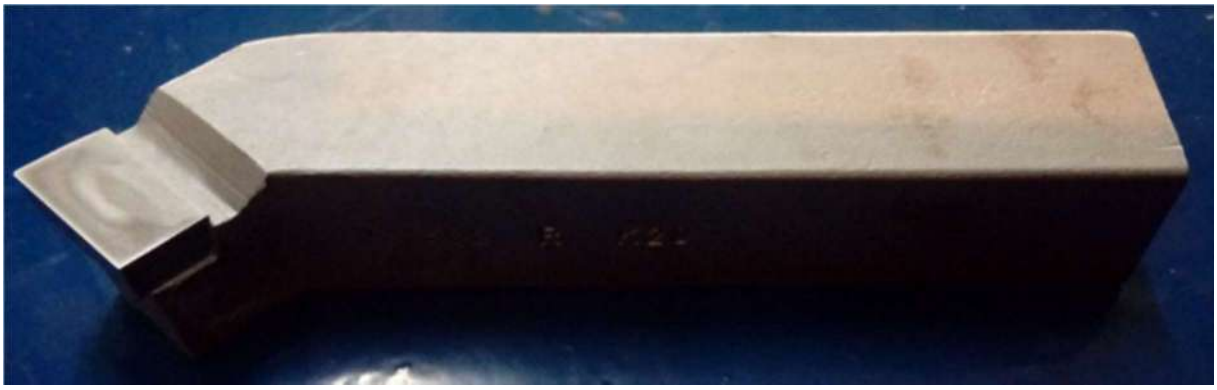


Figure 3. 2: l'outil en carbure (302 R K22)

3.2.Matériau usiné : Nous avons utilisé comme matière usinée la matière inoxydable

3.2.1. Normes européennes :

- Symbolique : X20Cr13
- Numérique : 1.4021

3.2.2. Caractéristique chimique :

- Carbone 0.20%
- Chrome.....13.00%

3.2.3. Caractéristique mécanique :

- Dureté Brinell : 180 HB
- Résistance mécanique : 1450 N/ mm^2
- Limite d'élasticité à 0,2 % : 1150 N/ mm^2
- Allongement : 13 %

La pièce utilisée est un cylindre de longueur 300 mm et de diamètre 40mm, divisée en cinq paliers. D'après la loi (4D < L < 8D) La pièce monter par montage mixte

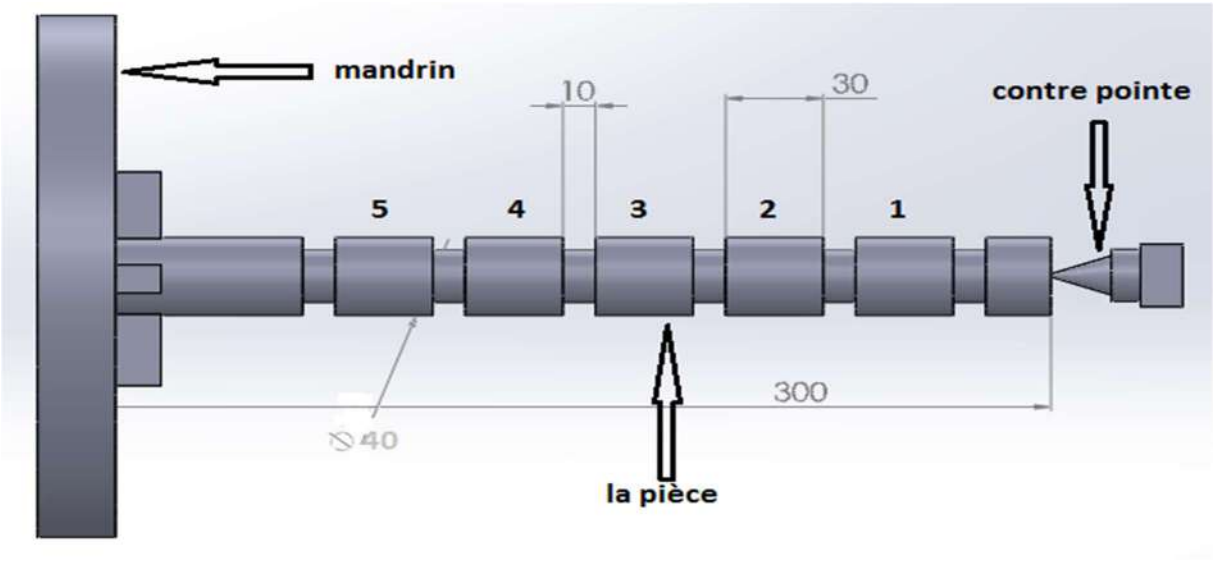


Figure 3. 3: Montage et préparation de la pièce d'essai

3.3. Mesure de rugosité :

- **Comparateurs de rugosité Viso-tactiles :**

On emploie un comparateur de profils pour comparer au moyen de la vue ou du toucher le profil d'une surface avec les diverses surfaces de référence du comparateur. Il faut employer des comparateurs différents pour les surfaces nettoyées avec de la grenaille angulaire et pour celles qui ont été nettoyées avec de la grenaille sphérique étant donné que l'aspect de la surface et la forme du profil produits par ces deux matériaux sont différents



Figure 3. 4: Comparateurs de rugosité viso-tactiles TGL 0-4763

- **Paramètre de rugosité :**

Rz=3.5 à 78 µm, Ra=0.51 à 20 µm Rt=4.2 à 80 µm

Il est fabriqué par société Erler d'allemande

3.4. Plan des essais :

Dans ces essais il est question d'étudier l'évolution de la rugosité de la surface usinée en fonction de la vitesse de coupe **(Tableau (3.2)),** de vitesse d'avance **(Tableau (3.3))** et de la profondeur de passe **(Tableau (3.4)),** suivant les plans suivants :

Essais 01 :

N° du Palier	Paramètre de coupe				Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
	Vc (m/min)	N (tr/min)	Vf (mm/min)	ap (mm)			
01	77.36	1120	18	1	1.3	6.5	7.4
02	49.04	710	18	1	2.2	9.8	11
03	24.52	355	18	1	5.4	20	22
04	12.43	180	18	1	5.4	20	22
05	6.21	90	18	1	20	78	80

Tableau 3. 2: variation de vitesse de coupe Vc (m/min)

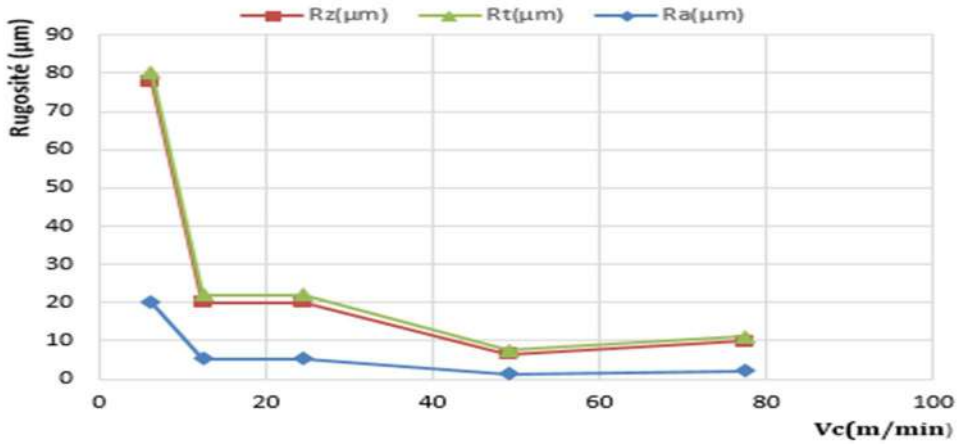


Figure 3. 5: Evolution de rugosité en fonction de vitesse de coupe (Vf=18mm/min, ap=1mm)

La vitesse de coupe possède une influence significative sur la rugosité de surface, les résultats obtenus **(Figure (3.5))** montrent, aussi, que l'état de surface du l'acier $X_{20}Cr_{13}$ s'améliore lorsque la vitesse de coupe augmente.

Essais 02 :

Numéro d'essais	Paramètre de coupe				Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
	Vc (m/min)	N (tr/min)	Vf (mm/min)	a_p (mm)			
01	77.36	1120	32	1	10	41	43
02	77.36	1120	24	1	5.4	20	22
03	77.36	1120	18	1	2.2	9.8	11
04	77.36	1120	12	1	1.3	6.5	7.4
05	77.36	1120	6	1	0.51	3.5	4.2

Tableau 3. 3: variation de vitesse d'avance Vf (mm/min)

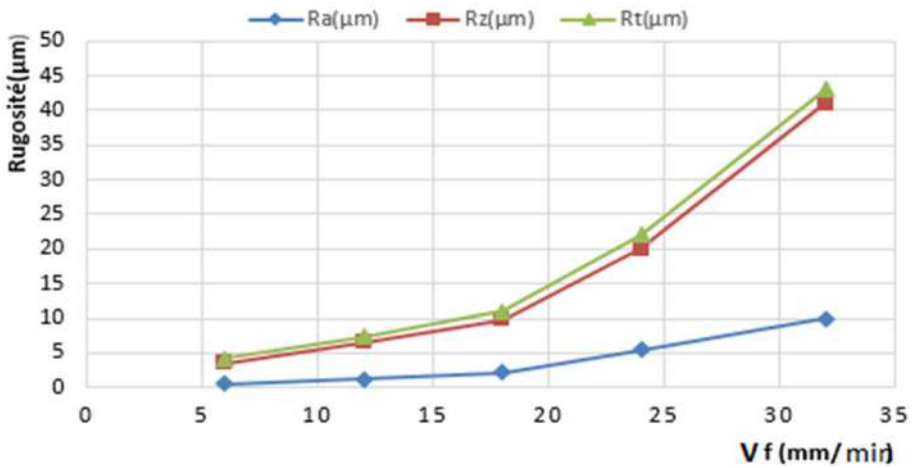


Figure 3.6: Evolution de rugosité en fonction de vitesse d'avance (a_p=1mm,Vc=77.36m/min)

La vitesse d'avance possède l'effet le plus significatif, en effet sur la courbe d'évolution de la rugosité en fonction de l'avance **(Figure (3.6))**, on constate une augmentation importante des trois critères de rugosité avec l'augmentation de vitesse d'avance dans le cas de l'acier X20Cr13.

Essais 03 :

Numéro d'essais	Paramètre de coupe				Ra (µm)	Rz (µm)	Rt (µm)
	Vc (m/min)	N (tr/min)	Vf (mm/min)	ap (mm)			
01	48.35	700	18	3	20	78	80
02	48.35	700	18	2.5	20	78	80
03	48.35	700	18	2	10	41	43
04	48.35	700	18	1.5	5.4	20	22
05	48.35	700	18	0.5	1.3	6.5	7.4

Tableau 3. 4: variation de profondeur de coupe (mm)

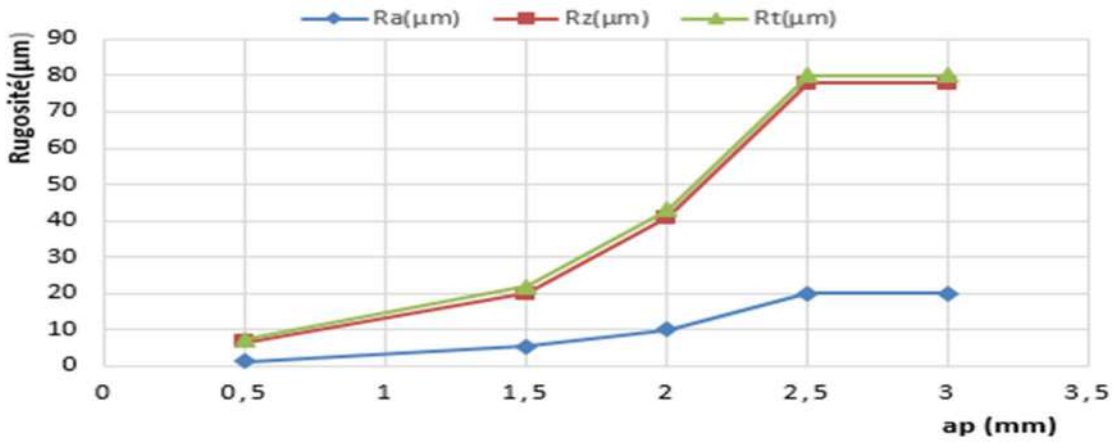


Figure 3. 7: Evolution de rugosité en fonction de profondeur (Vc=48.35,Vf=18mm/min)

Les résultats des essais **(Figure (3.7))** montrent que la profondeur de passe apporte une augmentation des critères de rugosité

3.5. Le résultat des essais :

Pour obtenir un état de surface bien déterminé et une faible rugosité, selon le résultat des essais il faut augmente la vitesse de rotation avec diminuer la profondeur de passe et la vitesse d’avance

Chapitre 04

Les efforts de coupe

4. Approches théorique des efforts de coupe :

4.1.Introduction :

Ce chapitre a pour objectif de faire un bilan des différents points de vue existant à l'heure actuelle quant à la modélisation des efforts de coupe. L'échelle d'étude envisagée, les diverses méthodes de modélisation ou encore l'identification des coefficients de lois de coupe sont les trois points présentés dans cette partie.

4.2. Les différentes échelles d'étude :

L'étude de l'usinage est souvent abordée à l'aide d'une approche multi-échelles ce qui permet de séparer les difficultés en limitant le nombre de phénomènes à prendre en compte et la taille du modèle à une échelle donnée. Trois échelles d'analyse peuvent être distinguées : microscopique, mésoscopique et macroscopique. La **(figure 4.1)** issue des travaux de M. Chérif et inspirée de ceux de A. Marty, montre la possibilité de distinguer trois points de vue d'étude des efforts. A chacun de ces points de vue sont associées différentes modélisations des efforts de coupe utilisant des théories et des procédures expérimentales particulières.

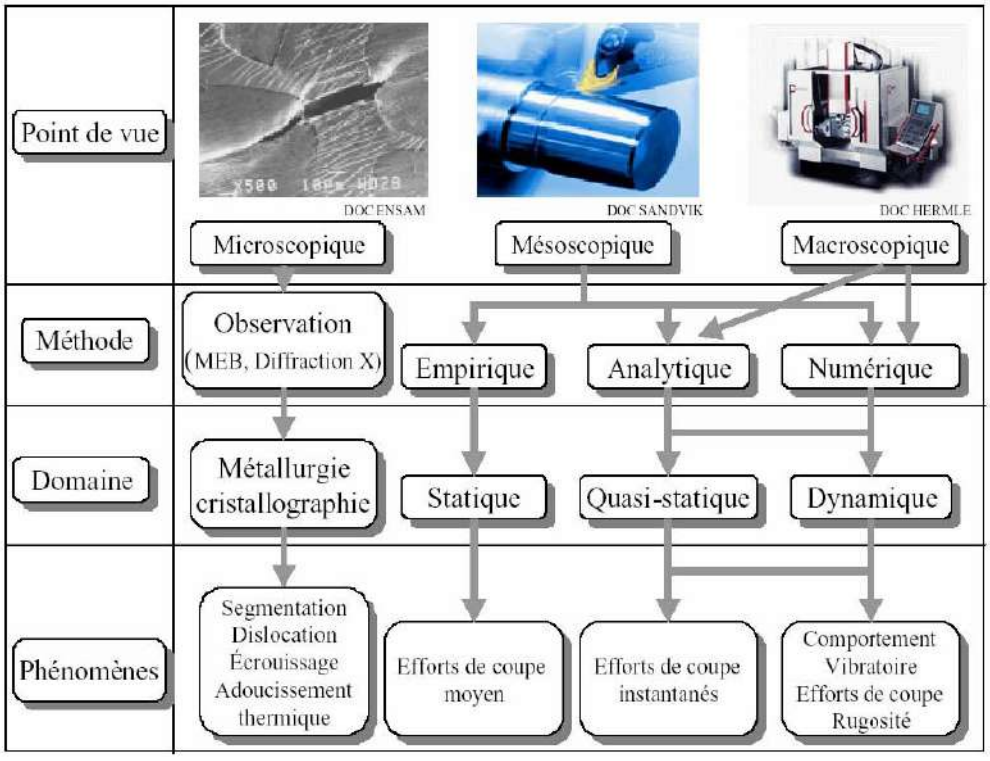


Figure 4. 1: Les différentes approches de la modélisation des efforts de coupe **[38]**

4.2.1. Approches liées à l'échelle microscopique :

L'échelle microscopique **(figure 4.2)** se situe au niveau du couple arrête d'outil et copeau, plus précisément à l'échelle des grains des matériaux. A ce niveau, l'étude de la coupe concerne les phénomènes physiques comme les mécanismes de transformations métallurgiques. La modélisation numérique de la coupe à ce niveau concerne les grandes transformations et le comportement thermomécanique des matières de la pièce et de l'outil, la formation et la fragmentation du copeau, la plasticité, au côté d'expérimentations, On s'intéresse ici essentiellement à la mesure des températures, des efforts et des accélérations, sans oublier l'identification des lois de comportement et d'endommagement de la matière.

4.2.2. Approches liées à l'échelle mésoscopique :

L'échelle mésoscopique **(figure 4.2)** est concernée par le triplet copeau-outil-pièce, ou autrement dit, la pointe de l'outil. L'étude à ce niveau permet de caractériser le domaine de fonctionnement industriel de la coupe. L'objectif est de construire un modèle paramétré prenant en compte l'interaction de l'outil avec la pièce à usiner. Ce niveau d'observation permet d'introduire les conditions d'usage de l'outil et les conditions d'usinage de la pièce pour le mode de travail considéré, afin de prédire l'état de surface usinée, la fragmentation du copeau ou la zone de contact outil-matière. On s'intéresse aussi à la mesure des températures, la mesure des efforts et des accélérations, sans oublier l'identification des lois de comportement et d'endommagement de la matière.

4.2.3. Approches liées à l'échelle macroscopique :

C'est à cette échelle que sont réalisées les simulations du comportement vibratoire résultant de l'action de l'outil coupant **(figure 4.2).**

Pour faciliter l'étude à ce niveau, cette échelle se décompose en deux sous-niveaux :

4.2.3.1. Echelle macroscopique locale :

Elle se situe au niveau du triplet pièce-outil-machine. A cette échelle d'observation, les objectifs sont l'analyse du comportement dynamique de l'ensemble au cours d'une opération d'usinage et la maitrise de la trajectoire de l'outil pour obtenir la surface usinée.

4.2.3.2. Echelle macroscopique globale :

Cette échelle se situe au niveau surveillance. Il s'agit maintenant d'adapter la commande de la machine, de surveiller son fonctionnement dans le but de prédire les pannes durant une opération d'usinage ; mais aussi dans le but de prévenir les dégradations du mode de fonctionnement entrainant une baisse de la qualité des produits.



Figure 4. 2: Différentes échelles de l'étude de la coupe, **[39].**

4.3. Principe de la coupe orthogonale en tournage :

La configuration de la coupe orthogonale en tournage nécessite que l'arête de coupe soit perpendiculaire aux vitesses de coupe Vc et d'avance de l'outil Va. Dans la pratique, deux procédés classiques permettent d'obtenir ces conditions : le tournage de tube en bout et l'usinage de palier, **(figure 4.3).** Dans ce cas, l'arête de coupe est rectiligne, perpendiculaire au mouvement d'avance de l'outil. Cette configuration de coupe n'a quasiment pas d'applications industrielles, mais elle est intéressante, par les simplifications géométriques et cinématiques qu'elle induit, pour l'étude des phénomènes apparaissant lors de la coupe tel que le broutement.

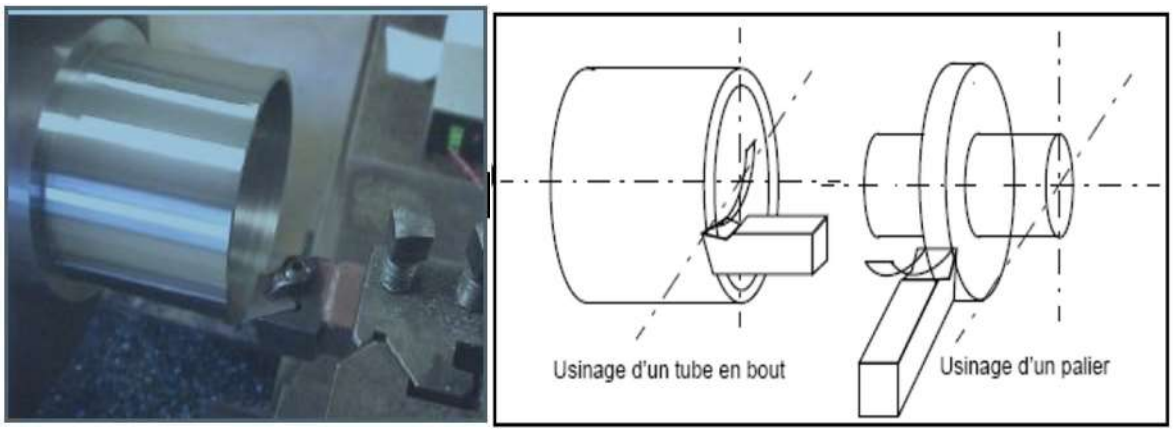


Figure 4. 3: Configurations de la coupe orthogonale, **[49].**

Les conditions de coupe se limitent à la vitesse de coupe et à l'avance par tour. L'épaisseur du copeau restant faible par rapport à sa largeur et en négligeant les effets de bord, la coupe se modélise par un problème de déformations planes (les phénomènes entrant en jeu dans des plans perpendiculaires à l'arête de coupe sont identiques). En régime stationnaire et à vitesse

de coupe constante, il est donc possible de tracer une représentation plane de la coupe **(figure4.4) [48].**

- la surface de coupe (pente d'affûtage ou surface de dégagement), c'est la surface sur laquelle s'écoule le copeau,
- la surface de dépouille, c'est la surface en regard de la surface usinée sur la pièce et elle a pour objet d'éviter le talonnage de l'outil sur la pièce,
- l'angle de coupe γ (pente d'affûtage ou angle de dégagement), c'est l'angle que fait la surface usinée avec une surface qui lui est perpendiculaire et il peut être positif ou négatif,
- L'angle de dépouille α, c'est l'angle que fait la surface de dépouille avec la vitesse de coupe,

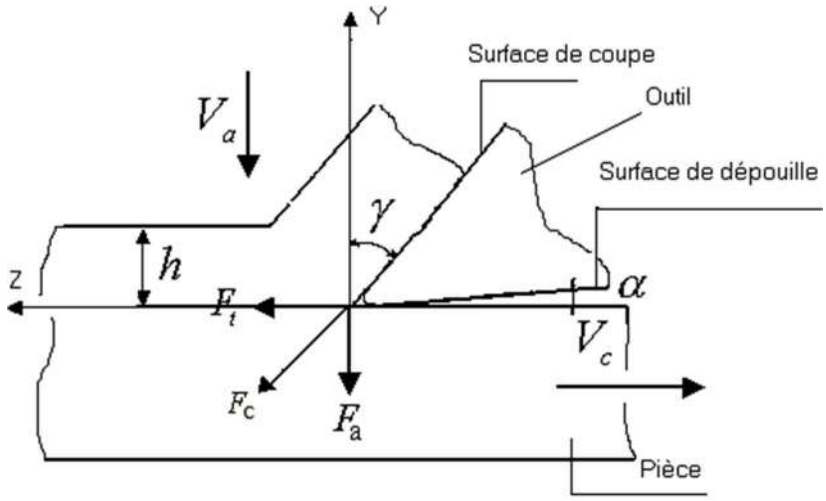


Figure 4. 4: Paramètres de la coupe orthogonale, [40].

4.4. Les différentes méthodes de modélisation des efforts :

Avant de présenter les différentes modélisations, quelques détails sur la zone de formation du copeau doivent être apportés. Au sein de la région où se forme le copeau, il existe différentes zones de sollicitations **(figure 4.5)** mises en évidence par **Bourdet [41]** lors du processus de coupe. Ces zones sont représentées dans le cas de la coupe orthogonale

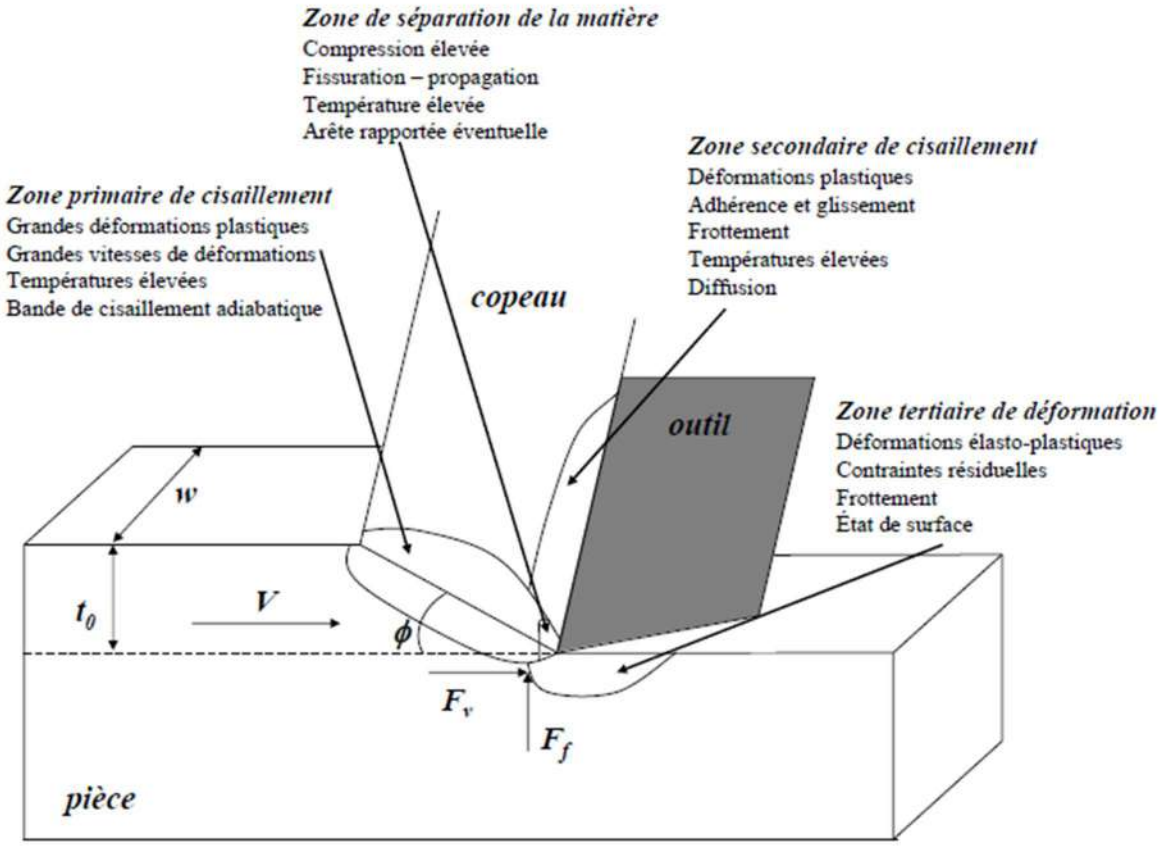


Figure 4. 5: Zones caractérisant le processus de coupe **[50].**

Les différents modèles présentés dans ce paragraphe sont basés sur cette description et s'appliquent à estimer les sollicitations mécaniques et thermiques qui règnent dans ces zones.

4.4.1. Les méthodes empiriques :

De nombreux modèles ou formules empiriques ont été proposés pour présenter les résultats expérimentaux. La plupart sont basés sur la notion de pression spécifique de coupe K_s. La composante principale de l'effort de coupe est alors exprimée en fonction de la surface de coupe :

$$F = K_s.S \qquad \text{Avec : S = b.h} \qquad \textbf{(I.1)}$$

Krönenberg, en 1927 propose une formule simple pour calculer la pression spécifique de coupe (rapport entre l'effort de coupe et la section de coupe), elle est exprimée par la relation suivante :

$$F = C_{ks}.S^{1-\frac{1}{\varepsilon_{ks}}} \qquad \textbf{(I.2)}$$

C_{ks} , ε_{ks} : Facteurs dépendant de la matière usinée et de la forme de l'outil.

Cave, en 1947 a trouvé une loi plus détaillée définissant l'effort de coupe, elle est exprimée par la relation suivante :

$$F = K.\left(1 - K^{'}.\delta\right).h^{m}.b^{n} \qquad \textbf{(I.3)}$$

avec: $K, K^{'}, m, n$: coefficients dépendant des caractéristiques du matériau usiné et des conditions de coupe.

δ : Pente d'affûtage de l'outil.

On utilise, souvent, par la suite une loi empirique de la forme :

$$F = K.h^{m}.b^{n} \qquad \textbf{(I.4)}$$

La valeur de l'exposant *m* est généralement comprise entre 0,6 et 0,9. Celle de l'exposant *n* est voisine de 1.

Cette formule ne permet pas de définir d'unité bien déterminée pour le coefficient K, on préfère la forme :

$$F = F_{o}.\left(\frac{h}{h_{o}}\right)^{m}.\left(\frac{b}{b_{o}}\right)^{n} \qquad \textbf{(I.5)}$$

Où: F_{o} est l'effort dans les conditions de références arbitraires $\left(h_{o}, b_{o}\right)$.

On peut mettre cette relation sous la forme :

$$F = ks_{o}.\left(\frac{h}{h_{o}}\right)^{m-1}.\left(\frac{b}{b_{o}}\right)^{n-1}.h.b \qquad \textbf{(I.6)}$$

où : ks_{o} : est la pression spécifique de coupe dans les conditions de référence arbitraires $\left(h_{o}, b_{o}\right)$. On a:

$$ks = ks_{o}\left(\frac{h}{h_{o}}\right)^{m-1}.\left(\frac{b}{b_{o}}\right)^{n-1} \qquad \textbf{(I.7)}$$

Où : ks est la pression spécifique de coupe.

Calcule les efforts de coupe :

La formule utilisée :

$Vf = f * N$ $f = Vf / N$

$Fc = Ks * S$ …… **(I.1)**

Avec : $S = b * h = f * a$ (mm^2)

Coefficient de pression spécifique en fonction de l'épaisseur de coupeau $Ks = 2410$ N/mm^2 **[54]**

Essais 01 :

Palier 01 :

Dans cet essai changement de la vitesse de coupe et fixé la profondeur de passe et la vitesse d'avance

Les données :

$f = 18 / 1120 = 0.016$ mm/tr $a_p = 1mm$

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

$Fc = Kc.f.a$ $Fc = 241 * 0.016 * 1$ $Fc = 38.56$ N

$Fa = 0.5. Fc$ $Fa = 0.5 * 38.56$ $Fa = 19.28$

$Ff = 0.2. Fc$ $Ff = 0.2 * 38.56$ $Ff = 7.71$

Palier 02 :

Les données :

$f = 18 / 710 = 0.025$ mm/tr $a_p = 1mm$

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

$Fc = Kc.f.a$ $Fc = 2410 * 0.025 * 1$ $Fc = 60.25$ N

$Fa = 0.5. Fc$ $Fa = 0.5 * 60.25$ $Fa = 30.12$ N

$Ff = 0.2. Fc$ $Ff = 0.2 * 60.25$ $Ff = 12.05$ N

Pallier 03 :

Les données :

$f = 18 /355 = 0.05$ mm/tr $a_p = 1mm$

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

$Fc = Kc.f.a$ $Fc = 2410 * 0.05 * 1$ $Fc = 120.5$ N

$Fa = 0.5. Fc$ $Fa = 0.5 * 120.5$ $Fa = 60.25$ N

$Ff = 0.2. Fc$ $Ff = 0.2 * 120.5$ $Ff = 24.1$ N

Palier 04 :

Les données :

$f = 18 / 180 = 0.1$ mm/tr $ap = 1mm$

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

$Fc = Kc.f.a$ $Fc = 2410 * 0.1 * 1$ $Fc = 241$ N

Fa = 0.5. Fc Fa =0.5 * 241 Fa = 120.5 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 241 Ff = 48.2 N

Palier 05 :

Les données :

f = 18 / 90 = 0.2 mm/tr ap = 1mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc = 2410 * 0.2 * 1 Fc = 482 N

Fa = 0.5. Fc Fa =0.5 * 482 Fa = 241 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 241 Ff = 96.4 N

N° du palier	Fc (N)	Fa (N)	Ff (N)	Ra (µm)
01	**38.56**	**19.28**	**7.71**	**1.3**
02	**60.25**	**30.12**	**12.05**	**2.2**
03	**120.5**	**60.25**	**24.1**	**5.4**
04	**241**	**120.5**	**48.2**	**5.4**
05	**482**	**241**	**96.4**	**20**

Tableau 4. 1 : Résultat de calcule les efforts de coupe (avec diminution de Vc)

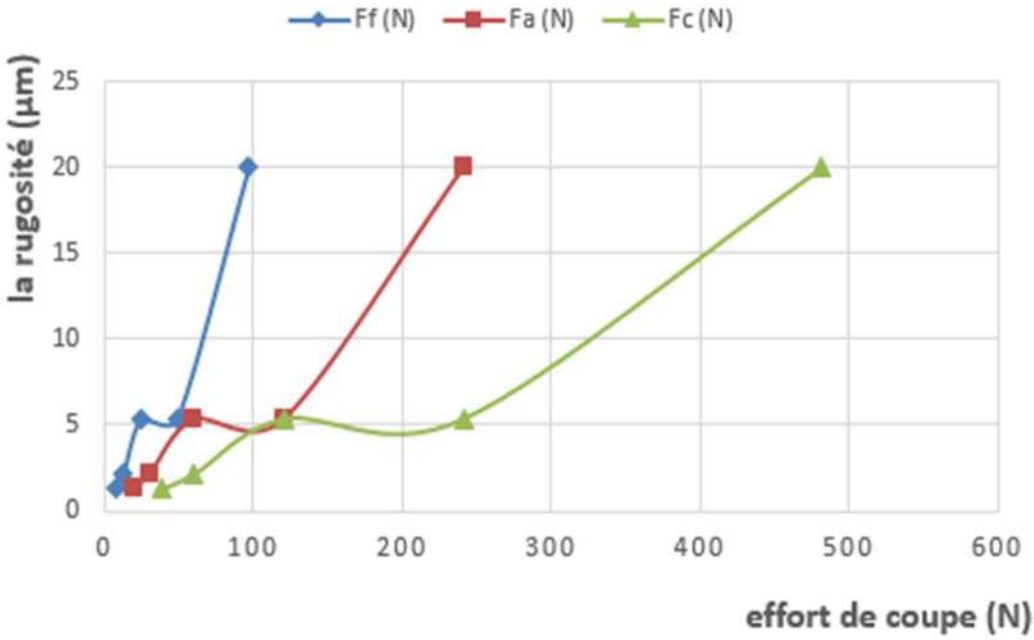


Figure 4. 6: Evolution de la rugosité en fonction des efforts de coupe (avec diminution de Vc)

Essais 02 :

Dans cet essai changement de la vitesse d'avance et fixé la vitesse de coupe et la profondeur de passe

Palier 01 :

Les données :

f = 32 / 1120 = 0.028 a_p = 1 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc =2410 * 0.028 * 1 Fc = 68.85 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 68.85 Fa = 34.42 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 68.85 Ff = 13.77 N

Palier 02 :

Les données :

f = 24 /1120 = 0.021 a_p = 1 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc = 241 * 0.021 Fc= 51.64 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 51.64 Fa = 25.82 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 51.64 Ff = 10.32 N

Palier 03 :

Les données :

f = 18 / 1120 = 0.016 mm/tr a_p = 1 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc = 2410 * 0.016 * 1 Fc= 38.56 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 38.56 Fa = 19.28 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 38.56 Ff = 7.71

Palier 04 :

Les données :

f = 12 / 1120 = 0.01 mm/tr a_p = 1mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc =2410 * 0.01 * 1 Fc= 25.82 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 25.82 Fa = 12.91 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 25.82 Ff = 5.16 N

Palier 05 :

Les données :

f = 6 / 1120 = 0.005 mm/tr a_p = 1mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc =2410 * 0.005 Fc= 12.91 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 12.91 Fa = 6.45 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 12.91 Ff = 2.58 N

N° du palier	Fc (N)	Fa (N)	Ff (N)	Ra (µm)
01	**68.85**	**34.42**	**13.77**	**10**
02	**51.64**	**25.82**	**10.32**	**5.4**
03	**38.56**	**19.28**	**7.71**	**2.2**
04	**25.82**	**12.91**	**5.16**	**1.3**
05	**12.91**	**6.45**	**2.58**	**0.51**

Tableau 4. 2 : Résultat de calcule les efforts de coupe (avec diminution de Vf)

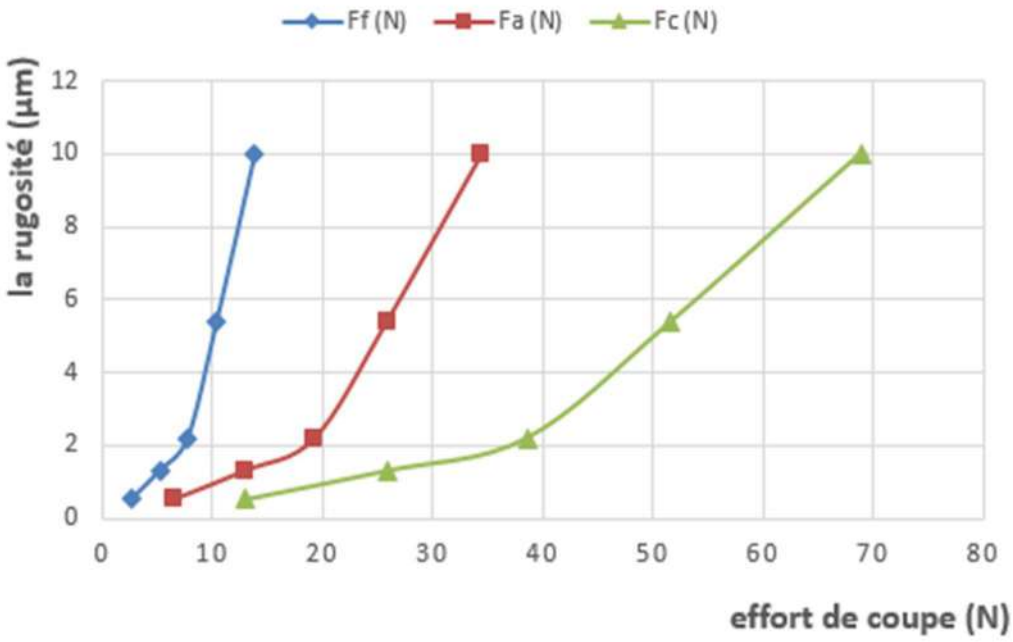


Figure 4. 7: Evolution de la rugosité en fonction des efforts de coupe (variation de Vf)

Essais 03 :

Dans cet essai changement de la profondeur de passe et fixé la vitesse de coupe et la vitesse d'avance

Palier 01 :

Les données :

f = 18 / 700 = 0.02 mm/tr a_p = 3 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc =2410 * 0.02 * 3 Fc= 144.6 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 144.6 Fa = 72.3 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 144.6 Ff = 28.92 N

Palier 02 :

Les données :

f = 0.02 mm/tr a_p = 2.5 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc = 2410 * 0.02 *2.5 Fc= 120.5 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 *120.5 Fa = 60.25 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 120.5 Ff = 24.1 N

Palier 03 :

Les données :

f = 0.02 mm/tr a_p = 2 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc = 2410 * 0.02 * 2 Fc= 96.4 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 96.4 Fa = 48.2 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 96.4 Ff = 19.28 N

Palier 04 :

Les données :

f = 0.02 mm/tr a_p = 1.5 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc = 2410 * 0.02 * 1.5 Fc= 72.3 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 72.3 Fa = 36.15 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 72.3 Ff = 14.46 N

Palier 05 :

Les données :

f = 0.02 mm/tr a_p = 0.5 mm

Calcule les efforts de coupe Fc et Fa et Ff :

Fc = Kc.f.a Fc = 2410 * 0.02 * 0.5 Fc= 24.1 N

Fa = 0.5. Fc Fa = 0.5 * 24.1 Fa = 12.05 N

Ff = 0.2. Fc Ff = 0.2 * 24.1 Ff = 4.82 N

N° du palier	Fc (N)	Fa (N)	Ff (N)	Ra (µm)
01	**144.6**	**72.3**	**28.92**	**20**
02	**120.5**	**60.25**	**24.1**	**20**
03	**96.4**	**48.2**	**19.28**	**10**
04	**72.3**	**36.15**	**14.46**	**5.4**
05	**24.1**	**12.05**	**4.72**	**1.3**

Tableau 4. 3 : résultat de calcule les efforts de coupe avec variation de a_p

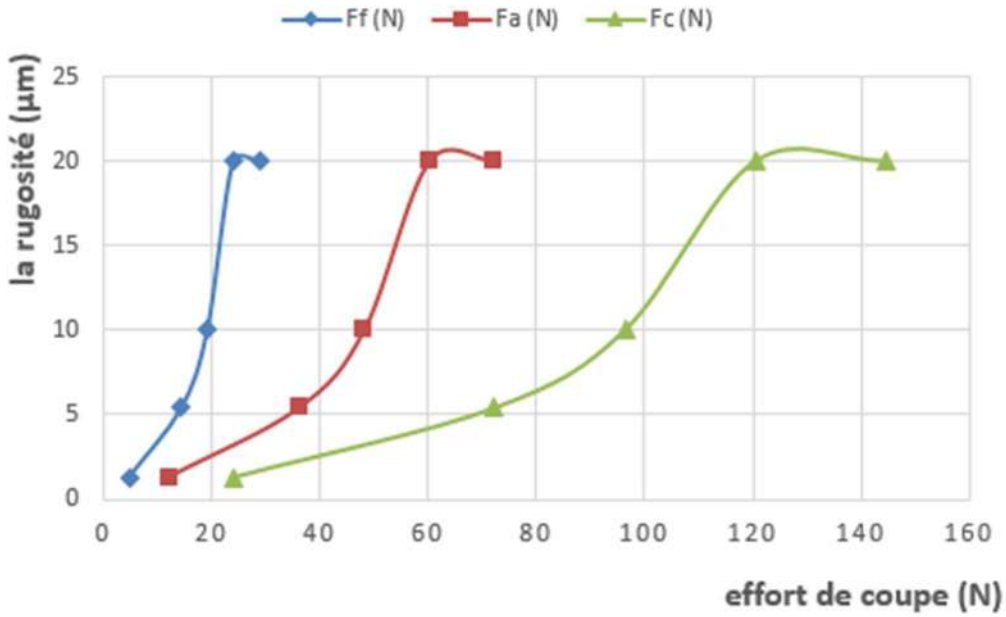


Figure 4. 8: Evolution de la rugosité en fonction des efforts de coupe (diminution de a_p)

4.4.2. Les méthodes analytiques :

Ce sont historiquement les plus anciennes, il font généralement intervenir des grandeurs telles que la contrainte de cisaillement maximale admissible par le matériau usiné τ_{max}, la

section de copeau S_{copeau}, l'angle du cône de frottement défini par la loi de Coulomb, la déformation ε et la vitesse de déformation ε' des zones de cisaillement du copeau pour la température donnée, comme indiqué par la relation **(I.8)** :

$$F = fonction\left(\tau_{max}, S_{copeau}, \varepsilon, \varepsilon', angle_{frottement}\right) \qquad \textbf{(I.8)}$$

Ces méthodes analytiques reposent toutefois sur des bases contestables et ne permettent pas d'établir les évolutions complètes des grandeurs caractéristiques de la coupe telles que les champs de contrainte, de déformation ou de température au sein de la pièce ou de l'outil. De plus, elles ne résolvent pas le problème pratique du nombre d'essais posé par les méthodes empiriques car elles supposent la connaissance préalable de coefficients qui ne peuvent eux-mêmes être obtenus que par le recours à des essais de coupe et à l'observation plus ou moins complexe des caractéristiques du copeau.

4.4.2.1. Modèle de la coupe orthogonale

Dans son modèle, Merchant **[42]** a utilisé une formulation et une approche purement énergétique. Il se place dans le cadre des déformations planes à partir des hypothèses de la coupe orthogonale. Il suppose que la formation du copeau se fait le long d'une ligne de cisaillement AA'/ inclinée par rapport à la direction de la vitesse de coupe d'un angle Φ (**figure4.8).** C'est la variation brutale de la direction du vecteur de vitesse qui est à l'origine de ce cisaillement.

$$\Phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\mu - \gamma}{2}$$

Les principales hypothèses de Merchant liées à ce modèle sont :

- La configuration d'usinage correspond à une situation de coupe orthogonale,
- l'avance *f* est grande devant la taille de la structure cristalline du matériau,
- le rayon d'arête de l'outil est nul (la pointe de l'outil est assimilée à un point),
- l'épaisseur du copeau est constante sans vibration (régime de coupe stationnaire),
- il n'y a pas de zone morte,
- le copeau se forme par glissements internes suivant des "plans de cisaillement" à volume constant,
- l'interface outil/copeau est le siège d'un frottement de type Coulomb,
- le matériau usiné a un comportement plastique parfait.

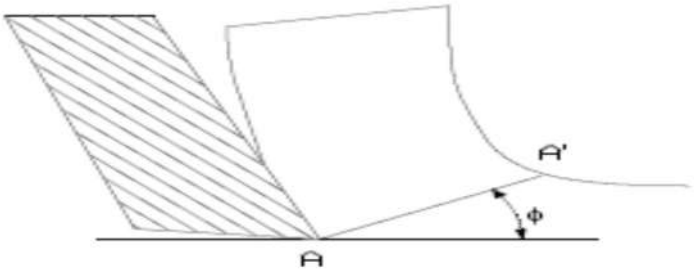


Figure 4. 9: Modèle de cisaillement dans le plan de Merchant, **[42].**

4.4.2.1.1. Modèle physique de la coupe :

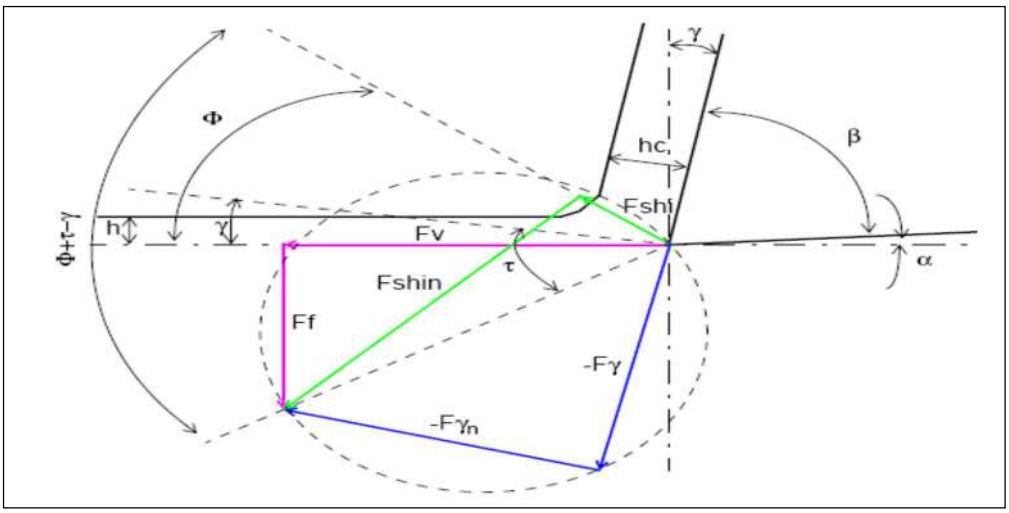


Figure 4. 10: Définition du cercle des efforts de Merchant **[41].**

a. Détermination de l'angle de cisaillement :

Le point de départ de ce calcul se base sur le fait qu'avec nos hypothèses, la déformation du copeau se fait à volume constant et dans un plan à section constante. En tenant compte de la géométrie décrite précédemment, on aboutit à la relation :

$$\tan\Phi = \frac{h}{h_c}\cdot\frac{\cos\gamma}{1-\frac{h}{h_c}\sin\gamma} \qquad \textbf{(I.9)}$$

On définit alors un rapport de compression. $Ch = \frac{h}{hc} < 1.$

D'où, $\tan\Phi = \frac{Ch\cos\gamma}{1-Ch\sin\gamma}$ **(I.10)**

b. Détermination des efforts de coupe :

Hypothèse: l'absence de zone morte et un angle de dépouille suffisant fait que la résultante des efforts ne s'applique que sur la face d'attaque de l'outil.

Données et notations:

- Contrainte de cisaillement τ ,
- Contrainte de traction-compression σ,
- Coefficient de frottement outil/copeau μ,
- Profondeur de passe a_p ,

Calcul de F_t et F_v :

La surface de la section coupée vaut : $A_o = h \cdot a_p$.

La surface de la zone de cisaillement vaut : $A_s = \dfrac{h.a_p}{\sin\Phi}$.

Par définition, on a : $\tau_{sh} = \dfrac{F_{sh}}{A_s}$ et $\sigma = \dfrac{F_{shn}}{A_s}$ ainsi que $\mu = \tan\xi$.

Où ξ est une constante qui dépend de la distribution des efforts à l'interface de contact outil/copeau. Pour le modèle de Merchant, correspondant au cas de la distribution uniforme des efforts à l'interface de contact outil/copeau la constante ξ est égale 1.

D'où $$F_t = \frac{A_0}{\sin\Phi} \cdot \tau_{sh} \cdot \frac{\cos(\xi - \gamma)}{\cos(\Phi + \xi - \gamma)}. \qquad \textbf{(I.11)}$$

Et $$F_t = \frac{A_o}{\sin\Phi} \cdot \tau_{sh} \cdot \frac{\sin(\xi - \gamma)}{\cos(\Phi + \xi - \gamma)}. \qquad \textbf{(I.12)}$$

Les limites de ce modèle ont été démontrées par **GILORMINI [43]** Sauf dans le cas où $\gamma_o = \lambda_f$**,** il n'est pas possible de prolonger le champ de contrainte aux zones rigides, ce qui donne un angle de cisaillement ϕ constant et égal à $\pi / 4$. Or d'après **DUDZINSKI [44],** cet angle n'est pas constant et est fonction de la vitesse de coupe notamment.

MOLINARI [46] à modéliser le processus de formation du copeau en coupe orthogonale, dans le cas stationnaire. En effet, La zone de cisaillement primaire est assimilée à une bande d'épaisseur uniforme et la déformation dans le copeau est supposée adiabatique et limitée à cette bande. La sollicitation dans le cisaillement secondaire est due au frottement, défini par une loi dépendante de la température**,** à l'interface outil/copeau. Cependant, l'écoulement de

la matière au voisinage de la pointe de l'outil et dans le cisaillement secondaire n'est pas considéré.

Le matériau usiné est considéré isotrope et son comportement rigide-plastique. Un modèle qui permet de déterminer la distribution de la température à l'interface outil-copeau est aussi proposé **[46].** Dans ces mêmes travaux une évolution de la répartition de pression le long de la face de coupe est donnée. Finalement, pour un matériau et un outil donnés, le modèle permet de déterminer les efforts de coupe exercés sur l'outil donnant ainsi la puissance nécessaire à la coupe, ainsi que la distribution de la température à l'interface outil-copeau.

Leur modèle de coupe orthogonale est généralisé au cas de la coupe oblique **[47].** Dans ce modèle, la direction d'écoulement du copeau est une inconnue qui est estimée à partir du matériau usiné, des conditions de coupe, de la géométrie de l'outil et du frottement à l'interface outil-copeau.

4.4.3. Les méthodes numériques et simulation :

Afin de pousser encore plus loin l'analyse des phénomènes liés à la coupe et grâce aux progrès des moyens de calculs réalisés ces dernières années, les travaux de recherche se sont progressivement orientés vers une approche numérique de la modélisation de la coupe. Ces méthodes permettent d'étudier le comportement non linéaire de la coupe pour des vitesses de déformations élevées entraînant de grandes déformations de la matière, des phénomènes de diffusion thermique ainsi qu'une analyse particulière de la mécanique du contact. Le couplage thermomécanique du frottement du copeau sur l'outil et la dissipation de la chaleur engendrée par le frottement au contact outil-pièce peut ainsi être modélisé.

Les efforts de coupe sont calculés à partir de lois de frottement et de lois de comportement mettant en œuvre les caractéristiques de la coupe telles que la déformation plastique, la vitesse de déformation, la température. Des modélisations 2D voire 3D sont désormais permises grâce à des algorithmes basés sur la méthode des éléments finis (MEF).

4.4.3.1. Mise en données de la modélisation :

Pour mettre en place une modélisation suivant la Méthode par Eléments Finis (MEF) de nombreux paramètres doivent être définis et peuvent être classés en deux parties distinctes.

4.4.3.1.1. Modélisation du réel :

Les géométries de la pièce et de l'outil sont facilement modélisables. Ces modélisations géométriques sont proches de la réalité. La pièce n'est généralement pas modélisée dans son intégralité mais seulement sur une petite partie, par nécessité de limiter le nombre d'éléments.

La géométrie de l'outil reste généralement fixe. Elle ne prend donc pas en compte l'usure de l'outil. Le choix des conditions aux limites est donc une phase cruciale de la modélisation. Les conditions cinématiques (vitesse de coupe, déplacements) ne posent pas de problème particulier. Les températures imposées au modèle de la pièce demandent une attention plus importante. Les températures imposées sont réalisées sur une surface loin de la zone de coupe, généralement la surface inférieure du modèle de la pièce. Le fait d'imposer une température constante sur la surface inférieure traduit le fait que la pièce réelle ne chauffe pas pendant l'usinage. Le frottement outil/pièce (et copeau) est généralement modélisé par une simple loi de Coulomb, La transmission de chaleur entre l'outil et la pièce (résistance de contact) et la répartition de la chaleur générée par le frottement sont aussi prises de façon arbitraire.

4.4.3.1.2. Définition des paramètres de calcul :

Pour mener à bien un calcul par la MEF, il faut choisir le type d'éléments en fonction de l'analyse à réaliser, et définir la taille de ces différents éléments. La taille des éléments doit être suffisamment petite pour rendre compte des très forts gradients mais pas trop petite pour ne pas allonger considérablement les temps de calculs. Différents paramètres doivent être choisis comme par exemple le type de contact entre l'outil et la pièce. Il faut aussi sélectionner le type de résolution (Implicite ou Explicite) et le type de modélisation (Eulérienne, Lagrangienne ou Arbitraire Lagrangienne Eulérienne -ALE-).

4.4.3.2. Types de résolution :

Il existe deux types de résolution des équations d'équilibre thermomécanique. La MEF consiste à discrétiser par éléments finis l'espace-temps. Lors de la résolution, si les positions des nœuds des éléments du maillage à l'instant $t+\Delta t$ sont exprimées en fonction de leurs positions, vitesses et accélérations précédentes $(\leq t)$, la résolution est dite Implicite. En revanche, si les positions à l'instant $t+\Delta t$ sont exprimées en fonction de leurs positions, vitesses et accélérations précédentes $(\leq t)$ et de leurs valeurs accentuelles $(t+\Delta t)$ alors la résolution est dite Explicite.

La résolution Implicite est toujours stable, mais elle n'est pas appropriée pour des phénomènes très dynamiques qui évoluent beaucoup entre t et $t+\Delta t$. Elle est généralement réservée pour des phénomènes statiques ou faiblement dynamiques. La résolution Explicite doit avoir un pas de temps très petit pour converger ($\Delta t <$ longueur du plus petit élément /célérité d'une onde dans le matériau) mais permet de rendre compte des phénomènes très dynamiques comme les chocs et la coupe.

4.4.3.3. Types de modélisation :

De nombreuses méthodes de résolution et de simulation numérique ont été développées durant ces vingt dernières années pour être appliquer à la coupe orthogonale. Le type de discrétisation utilisée (différences finies, éléments finis,...) et surtout le type de formulation

retenue (Lagrangienne, Eulérienne, Arbitraire Lagrangienne Eulérienne) permet de différencier ces méthodes, **[48].**

4.4.3.3.1. Méthode des différences finies.

La méthode des différences finies a été appliquée par **Gilormini [48]** à la coupe orthogonale pour mieux appréhender les phénomènes de coupe. Les outils numériques discrets permettent de détailler l'écoulement du copeau, les répartitions des contraintes et les températures de coupe.
Malheureusement, les coûts en temps de calculs sont prohibitifs pour mener des études paramétriques. La nécessité de connaître une géométrie initiale du copeau et de donner des conditions de contact à l'interface outil/copeau, constituent l'inconvénient majeur de cette méthode. Par ailleurs, le calcul des contraintes n'est pas toujours très réaliste puisque bien souvent, la condition de contrainte nulle aux surfaces libres n'est pas respectée.

4.4.3.3.2. Méthode des éléments finis.

Depuis une quarantaine d'année, la méthode des éléments finis est très largement utilisée, notamment dans la coupe. Dans ce domaine **Tay** et **al**. **[48]** ont beaucoup apporté à la modélisation des distributions de température dans le copeau et dans l'outil grâce aux éléments finis. Ils ont d'ailleurs proposé une méthode pour calculer la cartographie des températures dans la coupe à partir des seules données expérimentales que sont l'effort de coupe, l'angle de coupe et l'angle de cisaillement.
LIN et **al. [48]** ont utilisé les éléments finis pour proposer une modélisation thermo-élasto-plastique de la coupe orthogonale. Ils déduisent les déformations, les vitesses de déformation, les contraintes et les températures en chaque nœud des éléments. Le fait de supposer que la géométrie du copeau soit connue initialement constitue l'inconvénient majeur de ce modèle.

4.4.3.3.3. Modélisations Eulériennes :

Cette modélisation focalise l'attention sur une région fixée de l'espace au travers de laquelle s'écoule la matière. Son application à la simulation de la coupe est couplée avec une gestion des surfaces libres permettant, à partir d'une définition plus ou moins grossière de la géométrie initiale du copeau, d'obtenir l'écoulement en phase stationnaire d'un copeau continu **(Figure 4.11).**

Ce type d'approche permet d'étudier l'influence de certains paramètres du procédé sur la formation d'un copeau continu**. [48]** détaillent par exemple l'influence de la profondeur de passe, de la vitesse de coupe et du rayon d'arête de l'outil sur les champs de déformations, de contraintes et de températures obtenus. Leur modèle thermo-visco-plastique est validé à partir d'une comparaison des efforts mesurés expérimentalement et obtenus par simulation. Cette formulation est à la base des premières simulations réalisées en coupe orthogonale, mais ne permet pas de rendre compte de la formation d'un copeau discontinu.

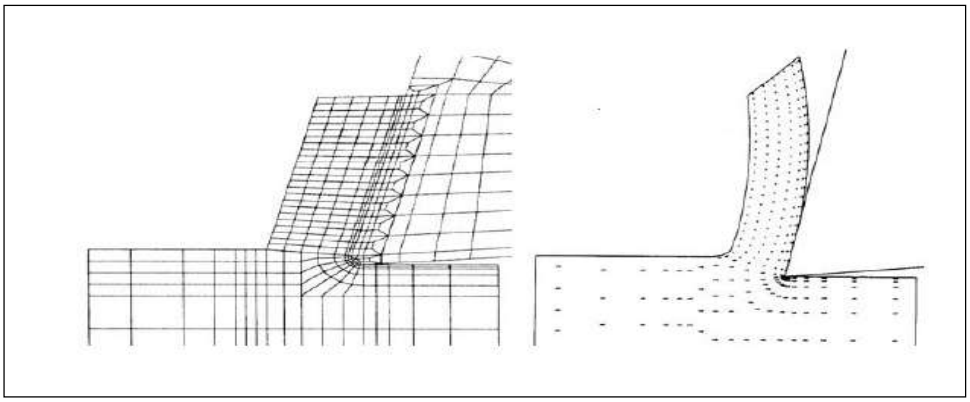
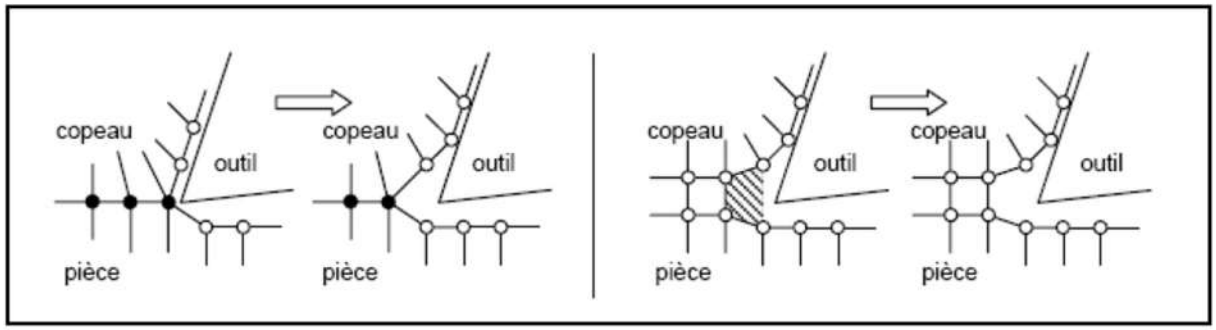


Figure 4. 11: Configurations du modèle de Kim, **[48]**

4.4.3.3.4. Modélisations Lagrangiennes :

Dans cette modélisation, chaque nœud du maillage suit le mouvement du point matériel auquel il est affecté. Le maillage se déforme, il est alors possible de simuler le procédé de coupe depuis la phase de pénétration jusqu'à obtention d'un copeau. Néanmoins, partant d'une géométrie arbitraire (pas de prédéfinition de la géométrie du copeau). Son utilisation nécessite de définir un critère de séparation afin de permettre la formation du copeau. La séparation peut être obtenue de deux façons **(figure 4.12)** : par le déboutonnage des nœuds ou par l'élimination des éléments.



Déboutonnage des nœuds ***Elimination des éléments***

Figure 4. 12: Méthodes de séparation copeau/pièce, [49].

La définition de ce critère de séparation géométrique implique deux inconvénients majeurs : le copeau obtenu ne peut être que continu et l'influence des conditions physiques ne peut pas être prise en compte. Dès lors, certains auteurs se sont intéressés à la définition de critères physiques de séparation. Ceux-ci sont empruntés à la mécanique de la rupture. La formulation Lagrangienne liant la matière au maillage et la pièce étant soumise à des sollicitations extrêmes. Les modélisations utilisant ce formalisme ont fait apparaître des problèmes de distorsion de maillage. Afin d'y remédier, certains auteurs ont fait appel à des algorithmes de maillage adaptatif, dont le principe consiste uniquement à repositionner les nœuds ou de remaillage.

4.4.3.3.5. Modélisations arbitraire Lagrangienne Eulérienne (ALE) :

Cette approche est un compromis entre les approches Eulérienne et Lagrangienne. Elle repose sur l'utilisation d'un maillage mobile partiellement indépendant des points matériels. Le maillage est globalement Lagrangien, au sens où il est nécessaire que sa frontière suive la surface du domaine occupé par la matière. Mais une liberté de choix quant au mouvement des nœuds internes est introduite. Cette dissociation entre maillage et matière permet de s'affranchir des problèmes de distorsions. Cette formulation, non associée à un critère de rupture, permet de ne simuler qu'un copeau continu dans l'hypothèse d'un processus purement plastique, **[48]**

4.5.Application de simulation :

4.5.1. Modélisations adoptées :

On a utilisé les données du modèle simple de la coupe orthogonale **[51]**

4.5.2. Description du mouvement :

Le formalisme adopté est ALE à tendance Lagrangienne. Dans cette approche, chaque nœud du maillage suit le mouvement du point matériel auquel il est affecté. Le maillage se déforme et il est alors possible de simuler le procédé de coupe depuis la phase de pénétration jusqu'à l'obtention d'un copeau.

4.5.3. Modélisation de la pièce :

Il apparaît dans la littérature une grande variété de lois de comportement élasto-plastique. Le choix repose, en général, sur la capacité à identifier expérimentalement les constantes du matériau. La loi de Johnson et Cook **[51]** a été choisie, dans cette simulation, pour représenter la contrainte d'écoulement du matériau **(équation I.13).** Ce modèle de Johnson-Cook est adapté aux problèmes de plasticité dynamique et a l'avantage d'être implémenté dans de nombreux codes de calcul par éléments finis (Abaqus).

$$\sigma = \left[A + B\left(\bar{\varepsilon}\right)^{n} \right] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_{o}} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{0}}{T_{melt} - T_{0}} \right) \right]^{m} \qquad \textbf{(I.13)}$$

Où

- σ est la contrainte équivalente de Von Mises ;
- $\left(\bar{\varepsilon}\right)^{n}$ est la déformation plastique équivalente ;
- $\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_{o}}$ est le taux de déformation plastique adimensionné avec le seuil à partir duquel la vitesse de déformation est prise en compte ;

- $\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0}$ est une température adimensionnée avec T_{melt} la température de fusion et T_0 la température ambiante.

La détermination des constantes (A, B, n, C, m) de la loi **(équation I.13**) requiert un certain nombre d'expérimentations,

La détermination des trois premiers paramètres (A, B, n) est effectuée par des essais mécaniques en quasi-statiques. Les constantes définissant la dépendance à la vitesse de déformation (C) et à la température (m) sont plus difficiles à évaluer pour les niveaux de sollicitations auxquels la pièce est soumise en usinage. Les essais aux barres de Hopkinson sont largement utilisés pour caractériser l'influence de ces paramètres. Pour la simulation réalisée, les caractéristiques du matériau de la pièce et les valeurs des constantes sont celles utilisées par **Tuğrul ÖZEL [51]** pour un acier XC 45 (AISI 1045). L'ensemble des caractéristiques est présenté dans le **tableau 4.4**.

Coefficient de dilatation thermique (µm/m°C)	11 (at 20 °C)
Densité (g/cm^3)	7,8
Coefficient de Poisson	0,3
Chaleur spécifique (J/kg/°C)	432,6
Conductivité thermique (W/m°C)	47,7
Module d'Young (GPa)	200

A (MPa)	B (MPa)	N	C	M	T_{melt} (ºC)
553,1	600,8	0,234	0,013	1,00	1650

Tableau 4. 4: Caractéristiques du matériau de la pièce XC 45 (AISI 1045) **[51].**

4.5.4. Modélisation de l'outil :

L'outil de coupe est modélisé par un corps déformable en carbure, ce choix nous permet d'évaluer les échanges thermiques entre copeau-pièce-outil, les différents paramètres sont reportés dans le **tableau 4.5**

Coefficient de dilatation thermique (µm/m°C)	4,7 (à 20 °C)
Densité (g/cm^3)	15
Coefficient de Poisson	0,2
Chaleur spécifique (J/kg/°C)	203
Conductivité thermique (W/m°C)	46
Module d'Young (GPa)	800

Tableau 4. 5: Caractéristiques matériau de l'outil Carbure **[51].**

4.5.5. Modélisation de l'interface :

Özel [52] passe en revue une grande partie des modèles de frottement utilisés en simulation d'usinage par la méthode des éléments finis. Il souligne notamment le caractère particulièrement complexe du processus, et sa sensibilité extrême aux paramètres et conditions de coupe. L'obtention de contraintes normales extrêmement importantes sur la face de coupe de l'outil est la principale cause des difficultés à obtenir des modèles réalistes à partir d'essais classiques de frottement.

Le contact entre la pièce et l'outil est modélisé par une loi de frottement de type Coulomb pour lequel les valeurs du coefficient de frottement et la contrainte de cisaillement "shear flow stress" ont été identifiées expérimentalement par **Tuğrul Özel [51], tableau 4.6.**

La gestion du contact entre l'outil et la pièce usinée est gérée par une approche maître-esclave: la surface maître étant représentée par les éléments de l'outil sur lesquels sont projetés les nœuds de la surface esclave qu'est la pièce.

k_{chip} (MPa)	202,95
Coefficient de frottement (μ_e)	0,64

Tableau 4. 6: Caractéristiques de frottement acier AISI 1045 outil carbure **[51].**

4.5.6. Paramètres de la coupe :

Vitesse de coupe V_c (m/min)	300
Profondeur de passe (mm)	0,1
Largeur du copeau, w (mm)	1
Angle de coupe, γ(degré)	-5
Angle de dépouille, α (degré)	5
Rayon du bec de l'outil, R (mm)	0,02

Tableau 4. 7: Paramètres de la coupe orthogonale**.[51]**

4.5.7. Conclusion sur le modèle :

Les conditions aux limites générales du modèle sont données sur la (**figure 4.13**), la pièce est fixée à sa base par un encastrement. Les dimensions de la pièce (longueur 3 et hauteur 1) sont choisies afin de n'avoir aucune interférence des conditions aux limites avec les résultats obtenus.

Le mouvement relatif de la pièce et de l'outil est obtenu en déplaçant ce dernier à vitesse imposée (V_c) pour une profondeur de passe de (a).

Toutes les surfaces du modèle sont adiabatiques à l'exception de la surface de contact entre la pièce usinée et l'outil pour laquelle le flux de chaleur généré par frottement est réparti pour moitié dans les deux parties en contact.

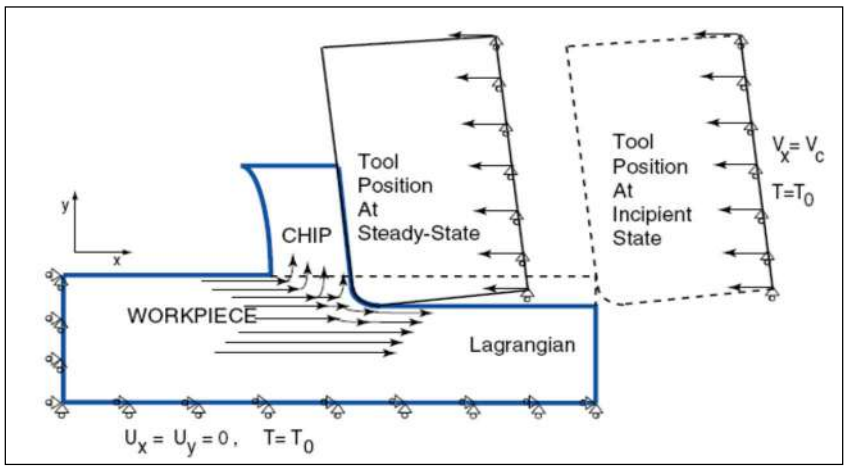


Figure 4. 13: Modèle ALE à tendance Lagrangienne. **[51].**

4.6.Présentation du logiciel ABAQUS

4.6.1. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS：

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson et Sorensen (HKS) devenue ABAQUS, Inc depuis 30 ans et le début de la théorie des éléments finis et ait été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'industrie, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en octobre 2005.

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non linéaires.

Le cœur du logiciel est donc ce qu'on pourrait appeler son moteur de calcul. A partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement) et exploiter les résultats contenus dans le fichier .obd (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe, elle doit contenir toutes les définitions géométriques, des matériaux, des chargements, les descriptions des maillages, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autre logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS/CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la simulation :
La génération du fichier de données, le lancement du calcul proprement dit, l'exploitation des résultats.

4.6.2. Base de l'interface d'ABAQUS :

4.6.2.1. Organisation de l'interface :

On retrouve dans l'interface des élément essentiels suivants : la fenêtre d'affichage graphique une première barre de menus en haut : ces menus sont relatifs au module dans lequel on se trouve une deuxième barre horizontale d'outils : y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers et les commandes réglant l'affichage es vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.) une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
Plus important : on dispose à gauche d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.
L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel ABAQUS vous parle : les messages affichés à cet endroit sont fait pour vous guider dans l'action que vous avez entreprise. Lisez-les, suivez-les attentivement, ils vous seront d'une grande aide. Enfin, une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

4.7.Présentation du logiciel ABAQUS CAE :

4.7.1. Les Modules :

ABAQUS/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation :

- **Le module PART** :

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS/CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

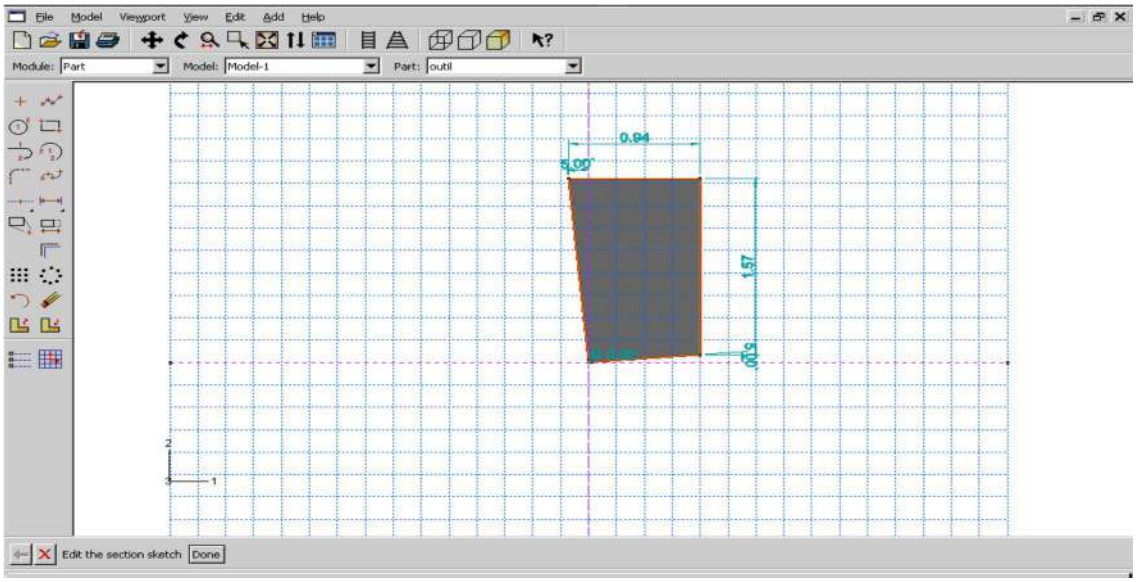


Figure 4. 14 : Le module PART

- **Le module PROPERTY** : Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propretés d'un objet géométrique ou d'une partie de cet objet

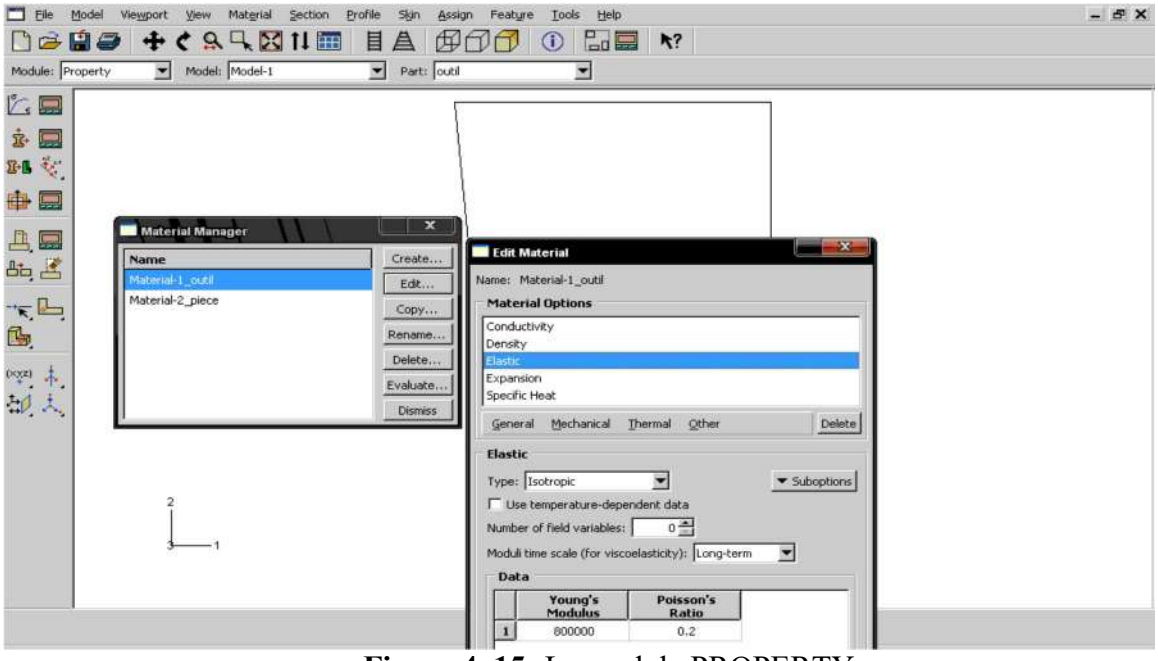


Figure 4. 15: Le module PROPERTY

- **Le module ASSEMBLY :**

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

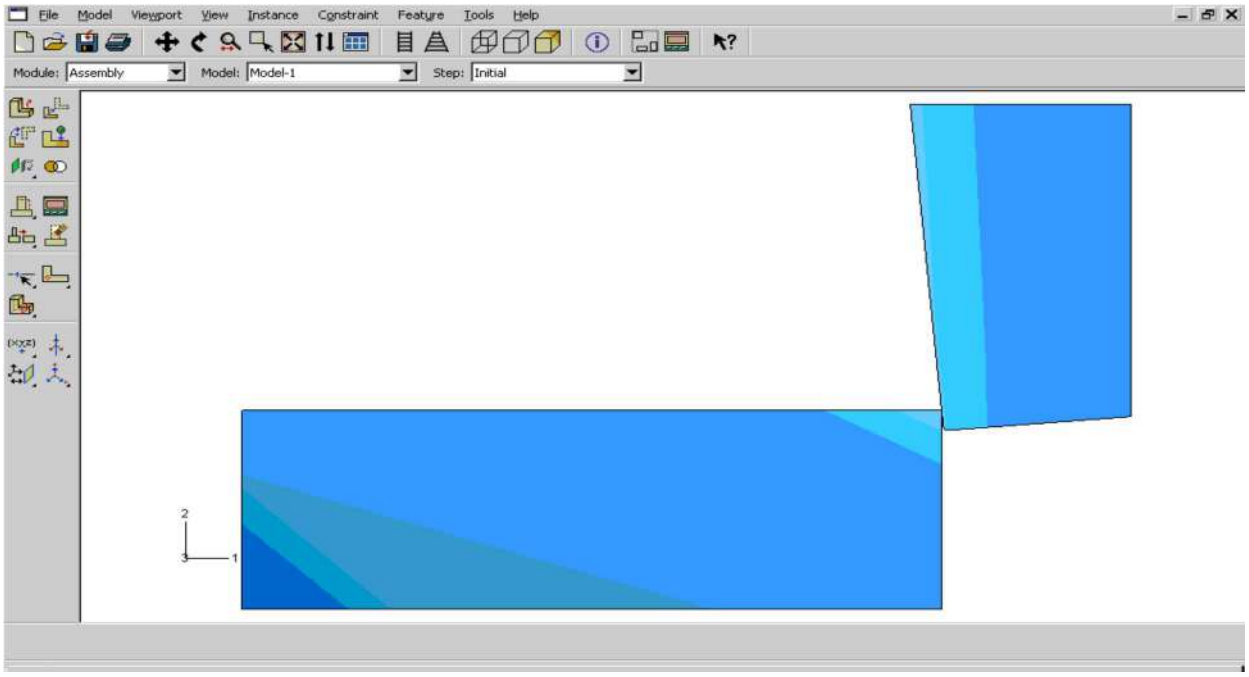


Figure 4. 16: Le module ASSEMBLY

- **Le module STEP** :

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est-à-dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

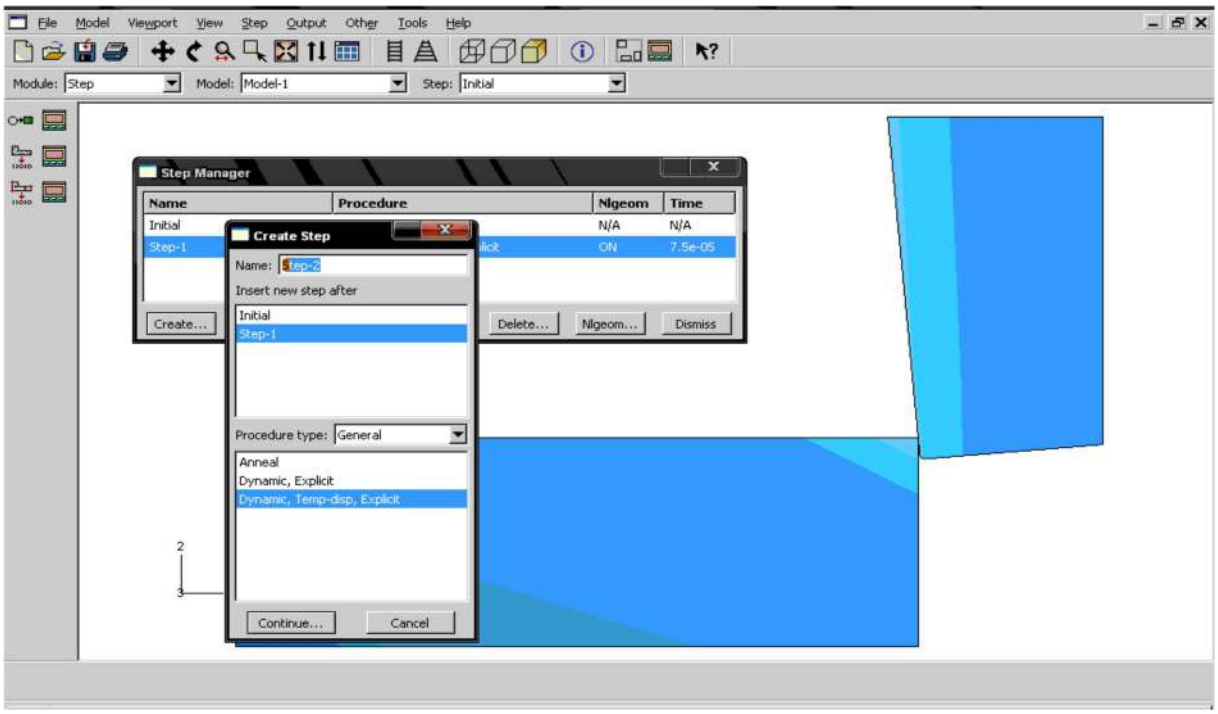


Figure 4. 17: Le module STEP

- **Le module INTERACTION** :

Grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

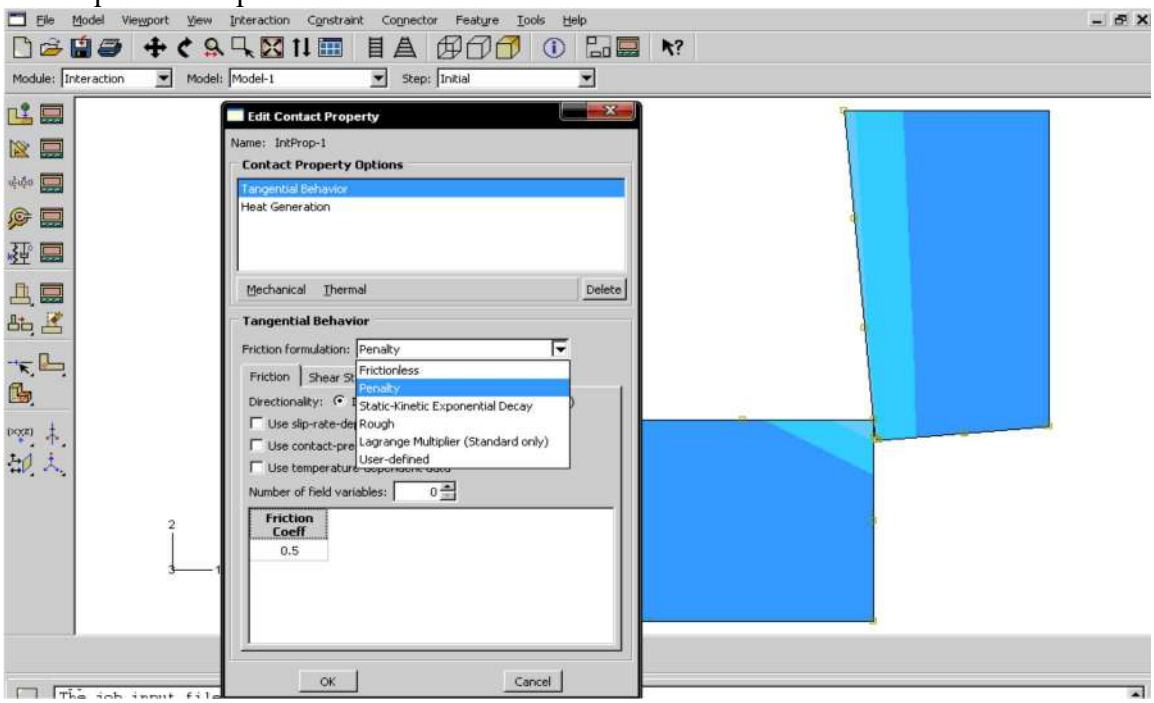


Figure 4. 18 : Le module INTERACTION

- **Le module LOAD :**

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il faut savoir qui les chargements et les conditions aux limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step1 mais inactive au step2.

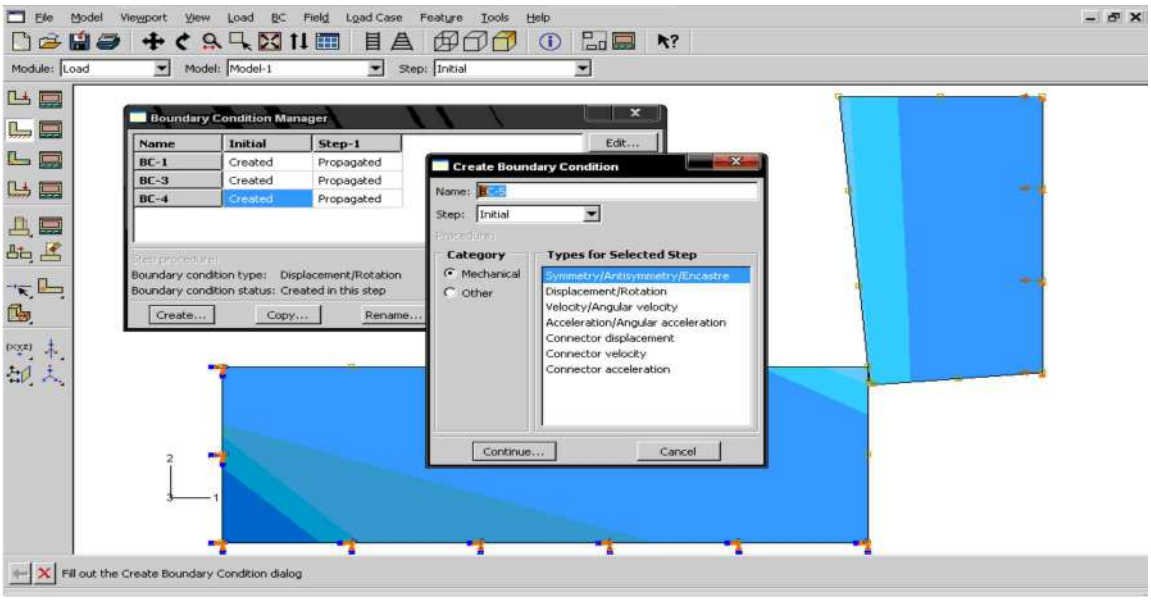


Figure 4. 19 : Le module LOAD

- **Le module MESH :**

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage.

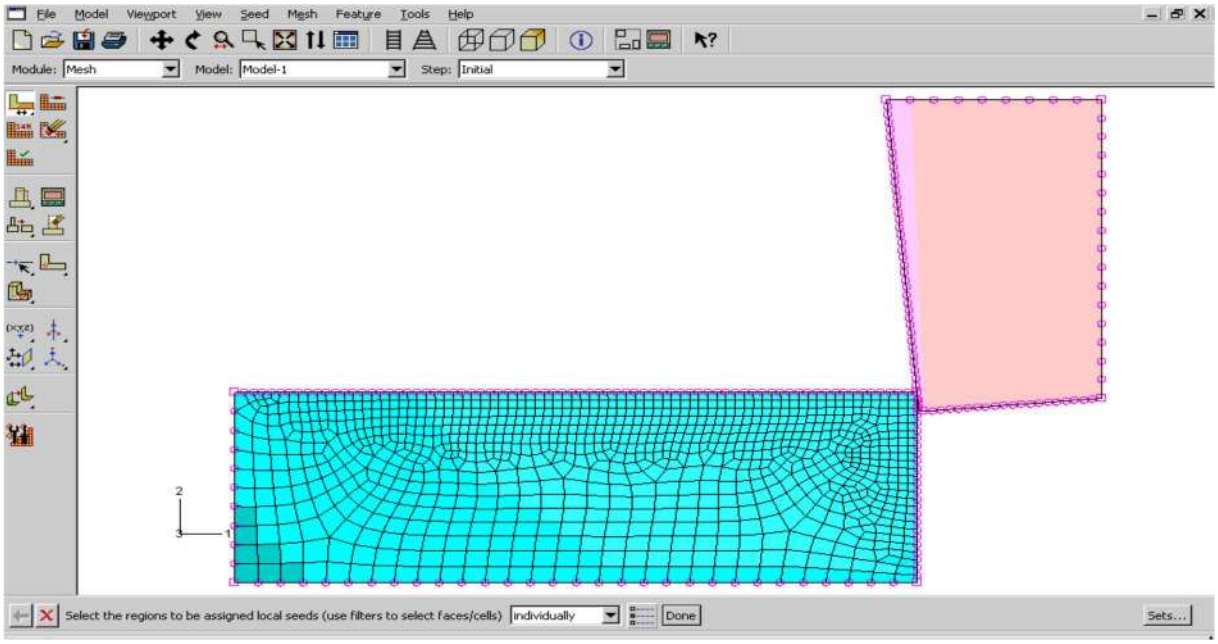


Figure 4. 20 : Le module MESH

- **Le module JOB :**

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

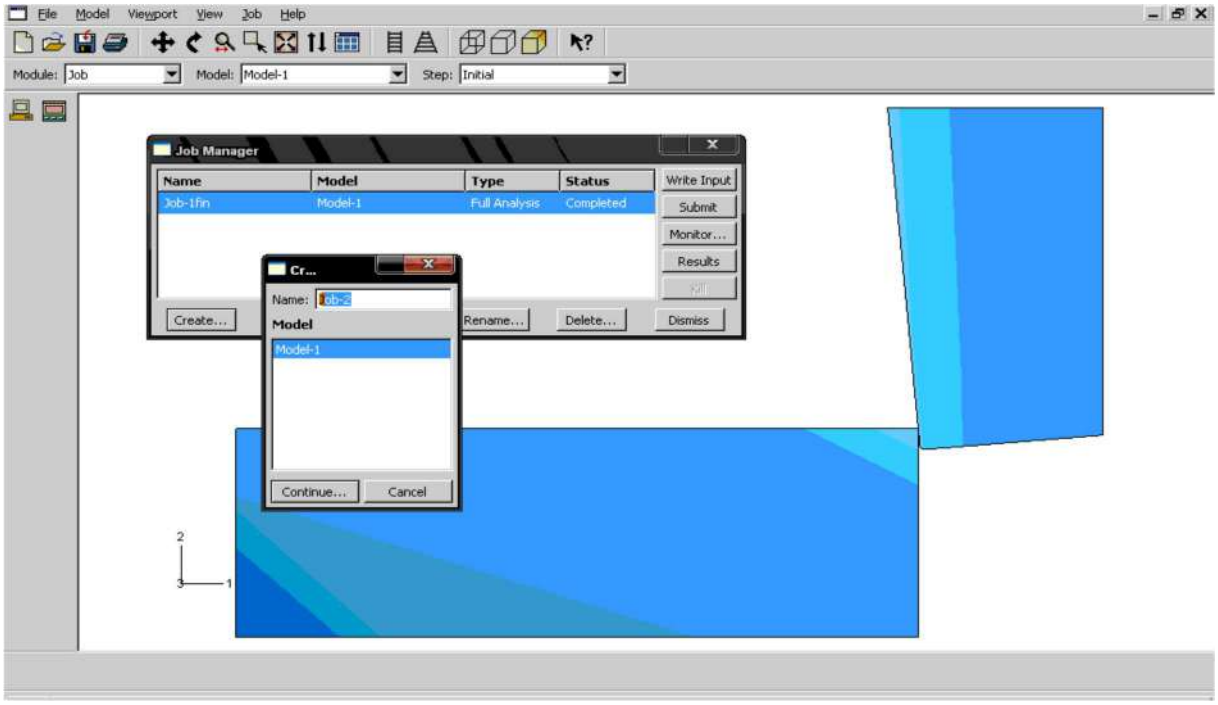


Figure 4. 21 : Le module JOB

- **Le module VISUALIZATION** :

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations….

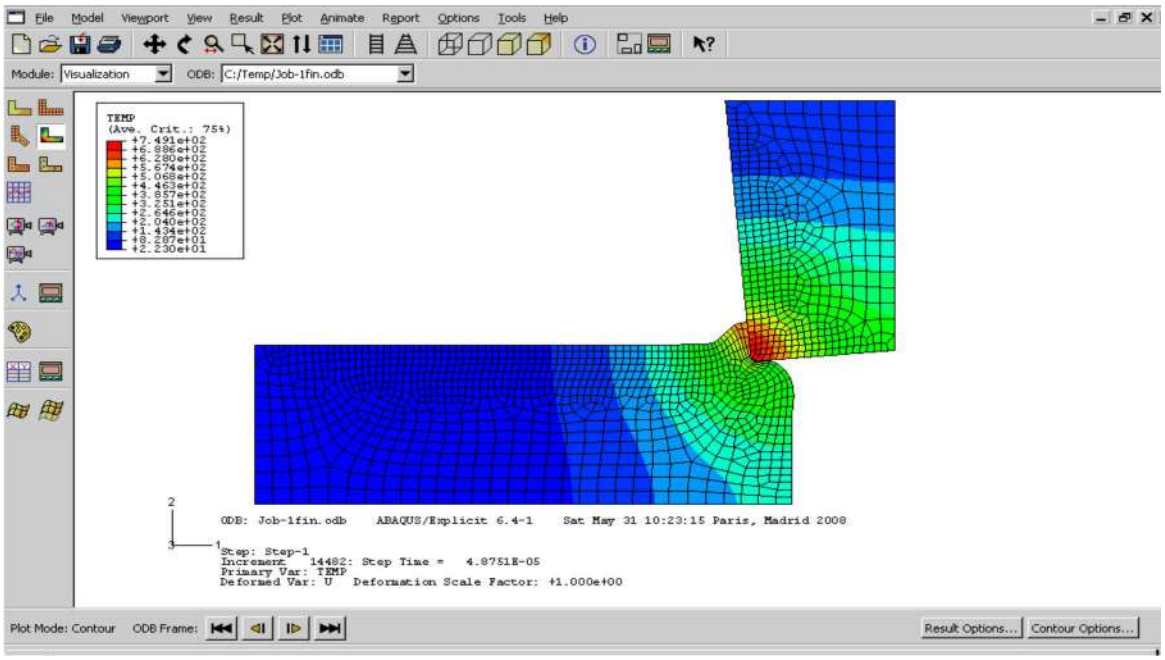


Figure 4. 22 : Le module VISUALIZATION

- **Le module SKETCH :**

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

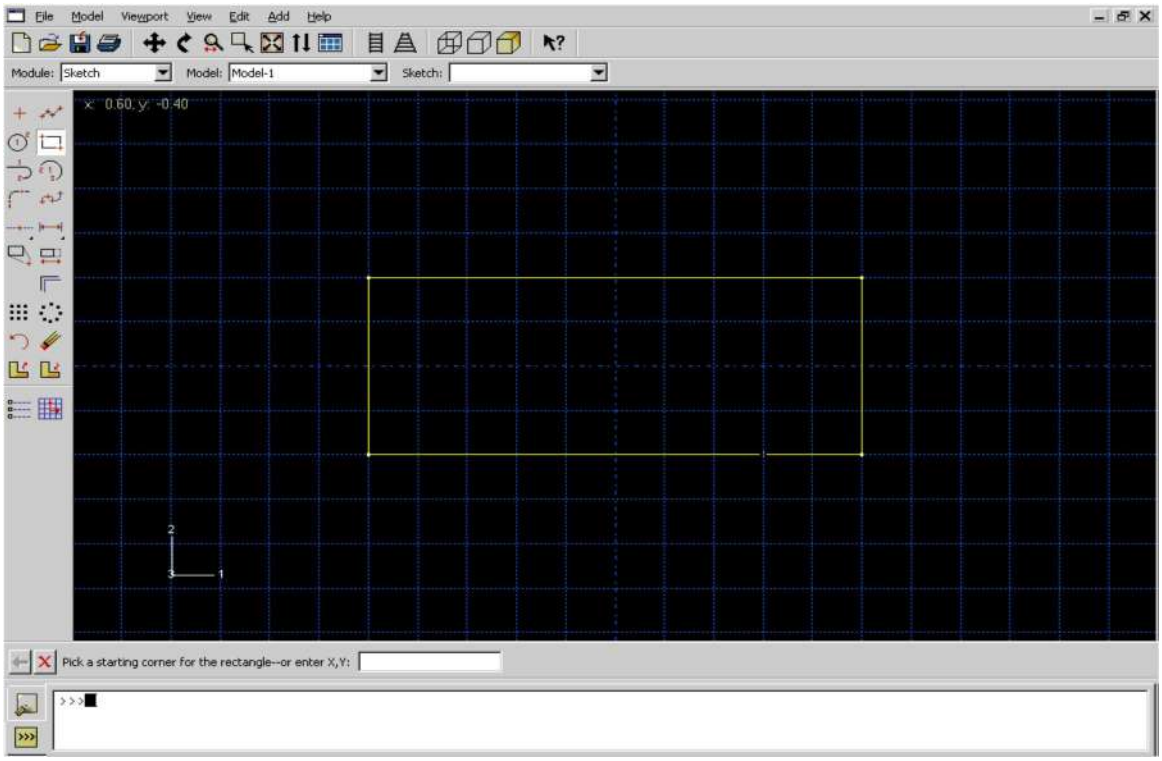
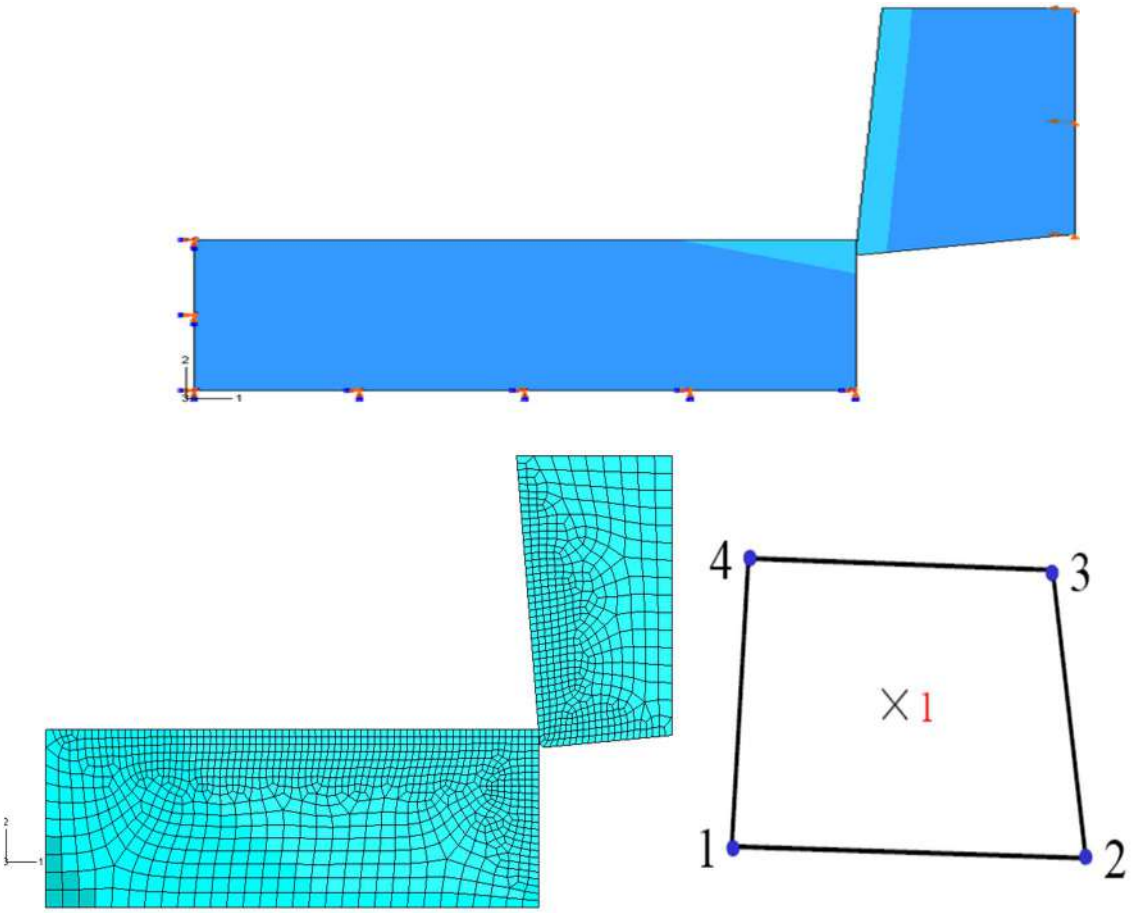


Figure 4. 23 : Le module SKETCH

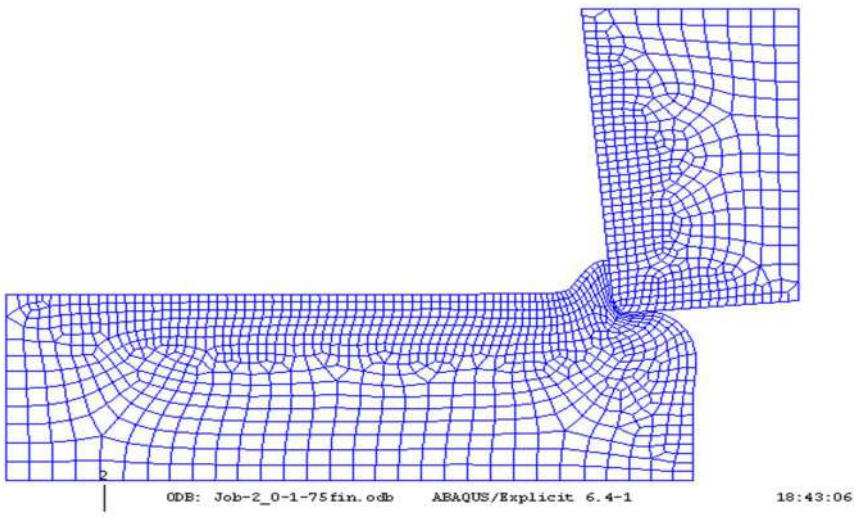
4.8. Résultats de la simulation :

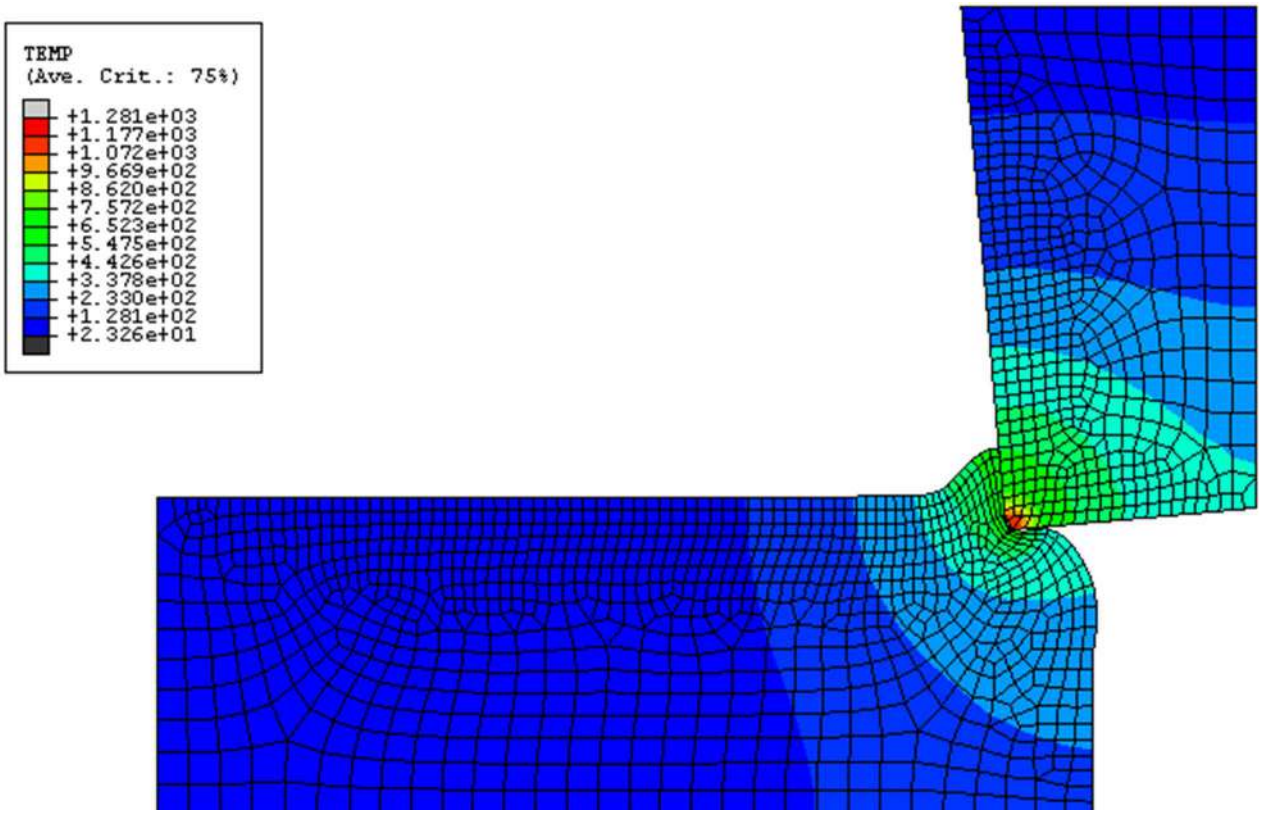
Simulation : en prenant les paramètres suivants :

R = 0.02mm, V_C = 5m/s, f = 0.1mm /tr



Type de maillage




TEMP
(Ave. Crit.: 75%)
+1.281e+03
+1.177e+03
+1.072e+03
+9.669e+02
+8.620e+02
+7.572e+02
+6.523e+02
+5.475e+02
+4.426e+02
+3.378e+02
+2.330e+02
+1.281e+02
+2.326e+01

Conclusions générales et perspectives

Une introduction détaillée nous a permis d'avoir une idée claire sur les problèmes d'usinage. Sachant que les vibrations d'usinage est un phénomène généré par l'interaction entre l'outil est la pièce, donc ce n'était pas nécessaire de s'approfondir sur la structure de la machine-outil, mais on a donné comme même des notions de base sur le tournage, les outils de coupe et enfin la rugosité. Puis on a étudié les paramètres qui influent sur l'état de surface, à savoir, les vitesses d'avance, les profondeurs de passe, et enfin les efforts de coupe.

La synthèse bibliographique présentée nous a donné un panorama général des différents modèles et théorie utilisées en ce moment. Parmi les quelques méthodes exposés on s'est amplement attardé sur la méthode expérimentale qui constitue l'axe principale de notre recherche, malgré le manque de moyens tels que les rugosimètres électroniques et les accéléromètres qui mesurent d'une manière instantanée les variations des efforts de coupes axiale et radiale.

Le stage d'une durée de un mois dans une entreprise industrielle (POVAL) nous a permis de cueillir les données qui nous en permis de tracer les graphes donnant la rugosité en fonction des paramètres de coupe cités précédemment.

L'étude expérimentale à fait l'objet de deux parties déterminantes qui sont le relevé des rugosités en fonction de la vitesse de rotation, de la profondeur de coupe et de la vitesse d'avance. Pour terminer une approche de modélisation des efforts de coupe en se basant sur le travail entamé déjà par Tuğrul ÖZEL de la coupe orthogonale. On a vérifié expérimentalement que les graphes tracés concordent largement avec les lobes de stabilité.

En dernière partie on a essayé d'approcher ce sujet par une simulation en utilisant Abaqus

Mais les résultats qu'on a pu avoir sont pour une durée d'usinage très courte de l'ordre de quelques secondes.

Apres cette étude théorique et expérimentale on pourra envisager plusieurs perspectives pour continuer ce travail :

1. Dans le cadre de cette étude, vu le manque de moyens on n'a pas eu la chance de faire l'expérience pour le cas où l'outil est flexible et la pièce rigide et inversement. car dans ce cas-là l'étude vibratoire qui influe sur la rugosité s'imposera en prenant deux degrés de libertés et peut être plus si on considère la torsion de la pièce.

2. Un autre axe envisageable c'est continuer le même sujet en considérant comme paramètres principales la variation instantanée de la section de copeau et par la suite celle des efforts de coupe et tracé graphes des efforts de coupe en fonction de la vitesse de rotation de la broche. Et valider les résultats en utilisant le matériel adéquat en l'occurrence un accéléromètre pour les efforts de coupe et un dynamomètre pour la détection des vibrations.

Enfin, on pense que ce domaine est très vaste, et les chercheurs sont très intéressés par l'amélioration de la qualité des surfaces et l'augmentation de la production, pour cela, l'usinage s'oriente de plus en plus vers l'UGV (usinage à grande vitesse).

Références bibliographique

[1] Bernard marandet, benoit verquin, jean saint-chely, anderon, marc Ryck boer. cours : usinage, principes fondamentaux d'usinage définition de l'usinage. 2008

[2] bourdet. La coupe des métaux, édition 1977.

[3] a.castella.dupont. Technologie coupe des métaux, édition des forges 1976 paris

[4] jean-pierre Cordebois et coll., « fabrication par usinage », Dunod, paris 2003

[5] Alexandre Toumine, «Cours D'Usinage », Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France.

[6] A. TOUMINE, « Usinage », INSA de LYON, Groupe conception - productique, 2007

[7] Rocdacier, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011

[8] c. marty. Industrialisation des produits mécaniques tome 3 : procédés de fabrication lavoisier 1999

[9] sandvik. Techniques modernes d'usinage. edition sandvik, 1997.

[10] admin pascal.tech-05, les outils de coupe.

[11] b. hamadi : « étude des revêtements durs et applications sur outil de coupe », thèse de magister en mécanique, université mentouri constantine, 2010. ..

[12] a. berro : « optimisation multi objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique », thèse de doctorat université toulouse, décembre 2001.moh

[13] m.rahou, f.sebaa :« automatisation des instructions d'usinage cas paramètres de coupe », 4th international conférence on computer integrated manufacturing cip'2007, université abou bekr belkaid tlemcen, 2007.moh

[14] jacques boulanger, tolérances et écarts dimensionnels, géométriques et d'états de

surface, sous la direction eric felder, bm 74 technique de l'ingénieur janvier 2000

[15] Wikipédia encyclopédie libre http:/fr. wikipédia.org/wiki/as % .état de surface catégorie usinage.2008

[16] www.technique-ingenieur.fr/..../introduction aux traitements de surface par impact. référence m1640 publié décembre 2000

[17] all cut instruments, principe de la mesure, www.mesures.com www.all cut-biz

[18] marie-line zani, mesure de la rugosité, www. mesures.com/archives/758 rugosité publié octobre 2003

[19] martin benjamin, publié sur http: //www .ifrance .com/espace-prepa/

[20] J. Vergnas, « Usinage : Technologie et Pratique », Génie Mécanique DUNOD, ISBN 2-04-011186-7, BORDAS, Paris 1982

[21]Surface texture symbols. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1996.

[22] K. Palanikumar, L. Karunamoorthy, R. Karthikeyan, Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites, *Materials* and Design 27 (2006) 862-871.

[23] J -P. Cordebois : « Fabrication par usinage », DUNOD, 2003

[24] M.A.YALLESE, L. BOULANOUAR, S. BELHADI, N. OUELAA: «influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100cr6 (60hrc) avec le CBN», laboratoire mécanique et Structure (LMS) Université de Guelma, 2Laboratoire Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle Structure (LR3MI) Université de Annaba Algérie 2007.

[25] Labomat instruments spécialités, contrôle de surface 2003

[26] BOUCHELAGHEM Abdelaziz, Diagnostic des états de surface par analyse vibratoire dans les procédés d'usinage, Annaba 2008

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

[28] MICHEAL J. GRIFFIN. Les vibrations : Les risques professionnels, Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, volume II, édition originale Anglaise établie sous la direction de Jeanne Mager Stellman.2008

[29] Capteurs et électronique associée. ESIEE-Olivier Français, 2000

[30] T.WILSON .Capteurs utilisés pour la mesure de signaux dynamiques. Acquisition et traitement de signaux dynamiques. National Instruments.2003

[31] PAUL – ERIC DUPUIS, technique de l'ingénieur, essais de vibrations, mesures et exploitation des résultats, BM 5160 (2000).

[32] Rafic Younes, Joe Chalfoun, Yasser Alayli, Peter Wagstaff article ; étude de la stabilité des vibrations de l'usinage, XIVe colloque, vibrations ; chocs et bruits, école centrale de Lyon, juin (2004).

[33] rugosimètre, PCE France /www.pce-France.fr 2010

[34] www.keyence.eu, Introduction à la « mesure de rugosité ».2011

[35] Mossaab SELAIMIA, Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80, Université 08 Mai 1945 Guelma - Algérie - Licence C.F.A.O 2008

[36] notech.franceserv.com / Notes sur les pratiques techniques.2008

[37]. S. Benlahmidi, H. Aouici, Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P, Ecole Nationale Supérieure de Technologie .2007

[38] M. Chérif, H. Thomas, B. Furet, J.Y. Hascoët, Generic Modelling of Milling Forces for CAD/CAM Applications, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44/1, pp. 29-37, 2003.

[39] S.C Assouline, « Simulation numérique de l'usinage à l'échelle Macroscopique : prise en compte d'une pièce déformable ». Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Paris, 2005.

[40] D. Batache, « Validation d'une loi de force de coupe en régime dynamique dans le cas du tournage (coupe orthogonale) », thèse de magistère, Février 2002 .Université de Batna.

[41] P. Bourdet, " La coupe des métaux." Ed., 1977.

[42] O. Pantale, « Modélisation et simulation tridimensionnelles de coupe des métaux ». Thèse de doctorat, N° d'ordre 1523. Université de Bordeaux I, Juillet 1996.

[43] **P. Gilormini**, Contribution à la modélisation de la formation du copeau en usinage des métaux. Thèse de Doctorat de Propriétés Mécanique des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 1982.

[44] D. Dudzinski et A. Molinari, A modelling of cutting for viscoplastic materials. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 39, N° 4, pp. 369-389, 1997.

[45] A. Molinari et D. Dudzinski, "Stationary shear band in high-speed machining." C.R. Acads. Sci. Paris, Vol. **315**, N° Série II, pp. 399-405, 1992.

[46] A. Moufski, A. Molinari et D. Dudzinski, «Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law." J. Mech. Phys. Solids, Vol. **46**, N° 10, pp. 2103-2138, 1998a

[47] A. Moufski, A. Molinari, D. Dudzinski et R. Rausch, " Thermoviscoplastic modelling of oblique cutting: forces and chip flow predictions." International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, pp. 1205-1232, 2000.

[48] R. Laheurte, « Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux », Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, Ecole Doctorale Des Sciences Physiques et De l'Ingénieur. 2004.

[49] M. Barge, « Etude expérimentale et numérique des mécanismes de coupe par abrasion ». Thèse de doctorat de l'école Centrale de Lyon, Juillet 2005.

[50] C. DIELEMANS et FONTAINE (optimisation des condition de coupe) , cours troisième année ENSMM , spécialité procédé de fabrication avancée ,2007

[51] Özel, T. and T. Altan, Process simulation using finite element method—prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high-speed flat end milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000. **40**(5): p. 713-738.

[52] Özel, T., The influence of friction models on finite element simulations of machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006. **46**(5): p. 518-530.
[53] Systèmes de mesure de rugosité de Jenoptik – Paramètres d'états de surface en pratique

[54] LOTHAR KUSCH, mécanique métallurgie, edition de 1979