

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE
BLIDA 1 FACULTE DE
TECHNOLOGIE DEPARTEMENT
DE MECANIQUE**

Laboratoire d'Etude et de Recherche en Technologie Industrielle

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Fabrication Mécanique et Productique

Titre :
Modélisation d'une opération de tournage
et
Tracé des lobes de stabilité

Proposé et encadré par :

Mr M.Temmar

Réalisé par :

**M.CHETTOUH
H.HADJI
B.YANINA**

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

Tout d'abord, louange à « **Allah** » le tout généreux qui nous a guidés sur le droit chemin tout au long du travail et nous a inspiré. Sans sa miséricorde, ce travail n'aurait pas abouti.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance et remerciements à notre encadrant **MR : Mustapha TEMMAR** qui a fait preuve d'une grande patience. Sa confiance, ses conseils ainsi que ses orientations nous ont permis de mener à terme ce projet .

Nos remerciements vont à l'ensemble de nos enseignants qui nous ont formés tout le long de notre cursus.

Nous remercions nos parents, nos amis et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce travail.

ملخص :

ظهور الاهتزازات أثناء تشغيل الأداة الآلية، ناشئة عن التفاعل بين نظام المعالجة المرنة وعملية المعالجة المرتبطة بتشغيل الآلة. جعل ظهور هذه الاهتزازات الحاجة إلى إجراء نمذجة لعملية الدوران وتتبع فصوص الاستقرار. يركز مشروع نهاية دراستنا على دراسة عملية التقويم لعملية التقليل على قطعة من الفولاذ الصلب و أيضا تأثير الظواهر الناتجة أثناء العملية تتكون هذه الدراسة من ثلاثة أجزاء: الأول مخصص لقص المعادن ، والثاني مخصص لعرض نتائج المحاكاة ، و الجزء الأخير مخصص للمحاكاة العددية للعملية. مفتاح : النمذجة ، عملية الدوران ، التشغيل الآلي ، المحاكاة ، الاهتزازات ، الفص.

Résumé :

L'apparition de vibrations pendant le fonctionnement de la machine-outil est générée par l'interaction entre le système usinant élastique et le processus d'usinage associé au fonctionnement de la machine.

Cette apparition rend la nécessité d'effectuer une Modélisation d'une opération de tournage et tracé des lobes de stabilité.

Notre projet de fin d'étude se focalise sur l'étude d'une opération de dressage du procédé de tournage sur une pièce d'acier dur ainsi l'influence des phénomènes induits lors de cette opération.

La présente étude constitue trois parties : la première est consacrée à la coupe de métaux, la seconde est consacrée pour la présentation des résultats des simulations et la dernière, est consacrée à la simulation numérique de l'opération.

Mots clés : Modélisation, opération de tournage, usinage, simulation ,vibration, lobe.

Abstract :

The appearance of vibrations during the operation of the machine tool is generated by the interaction between the elastic machining system and the machining process associated with the operation of the machine.

This appearance makes it necessary to perform a Modeling of a turning operation and drawing of stability lobes.

Our end-of-study project focuses on the study of an operation to adjust the turning process on a piece of hard steel as well as the influence of the phenomena induced during this operation.

The present study consists of three parts: the first is devoted to the cutting of metals, the second is devoted to the presentation of the results of the simulations and finally the last is devoted to the numerical simulation of the operation.

Keywords: Modeling, turning operation, machining, simulation, vibration, lobe.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : Généralités sur l'usinage et sur le procédé de tournage

I.1 GENERALITES	01
I.2 LES PROCEDES	01
I.3 PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX	03
I.4 OUTIL DE COUPE	06
I.5 MATERIAUX DES OUTILES DE COUPE	08
I.6 FORMATION DE CPEAU	09
I.7 LA VITESSE DE COUPE	11
I.8 LA LUBRIFOCATION	12
I.9 PROCEDE DE TOURNAGE	13
I.9.1 LE TOUR	14
I.9.2 CLASSIFICATION DES TOURS	15
I.9.3 OPERATION DE TOURNAGE	15
I.9.4 L'OUTIL	16

CHAPITRE II : Etat de l'art

II.1 INTRODCTION	18
II .2 COMPORTEMENT MECANIDUE GLOBAL DE SYSTEMEPIECE/OUTI DE COUPE/MACHINE-OUTIL (POM)	18
II .2.1 DESCRIPTION DE SYSTEME POM	19
II .2.2DYNAMIDUE DE COUPE	21
II .3 VIBRATION EN USINAGE	24
II .3.1 TYPES DE VIBRATION	25
II .4 SOURCES DE VIBRATIONS DU SYSTEME POM	21
II .5 MODELISATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU SYSTEME POM	26
II .5.1 LA MODELISATION ANALYTIQUE	27
II .5.2 MODELES DYNAMIQUES	31

CHAPITRE III : Application des lobes de stabilité

III .1 INTRODUCTION	39
III .2.1 HISTORIQUE	40

III .2.2 MODELE UTILISE	41
III .3 MISE EN EQUATION	43
III .4 FONCTION DE TRNASFERT	44
III .5 ETUDE DE LA STABILITE DE SYSTEME	45
III .6 METHODOLOGIE DE CINSTRUCTION ET ALGORITHME DU TRACE DES LOBES STABILITE	48
III.7 DONNEES DE SIMULATION	50

Chapitre IV : Etat de surface et rugosité

IV .1 INTRODUCTION	52
IV .2 DEFINITION	52
IV .3 LA RUGOSITE	55
IV .4 DESCRIPATION ET MOSZLISATION	56
IV.5 CHOIX FES AVANES DE COUPE	62
IV .6 PRESENTATION DES SIMULATIONS	63
IV .6.1 SIMULATION SANS VIBRATION	63
IV .6.2 SIMULATION AVEC VIBRATION	65
IV .7 ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA RUGOSITE THEORIQUE FONCTION DE L'AVANCE ET DU RAYON DU BEC	68

CONCLUSION GENERALE

Liste des figures

CHAPITRE I : Généralités sur l'usinage et sur le procédé de tournage

<u>Figure I.1</u> : Les différents procédés	02
<u>Figure I.2</u> : La coupe des métaux	03
<u>Figure I.3</u> : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage	04
<u>Figure I.4</u> : Mouvements de l'outil et de la pièce en fraisage	04
<u>Figure I.5</u> : Critères permettant de définir les paramètres de coupe	05
<u>Figure I.6</u> : Les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil	06
<u>Figure I.7</u> : Eléments de l'outil	07
<u>Figure I.8</u> : Angles du taillant (outil en main)	07
<u>Figure I.9</u> : Angles du taillant (outil en travail)	08
<u>Figure I.10</u> : Copeau continu	10
<u>Figure I.11</u> : Copeau cisailé	10
<u>Figure I.12</u> : Copeau discontinu	10
<u>Figure I.13</u> : Procédure de tournage	13
<u>Figure I.14</u> : Constitution d'un tour parallèle	14
<u>Figure I.15</u> : Opérations de base en tournage	15
<u>Figure I.16</u> : Outils de coupe du procédé de tournage	17

CHAPITRE II : Etat de l'art

<u>Figure II.1</u> : Eléments indépendants de l'opération d'usinage	19
<u>Figure II.2</u> : Procédé de tournage	22
<u>Figure II.3</u> : Système dynamique des machines-outils ²³	
<u>Figure II.4</u> : Interaction système élastique/processus de coupe :apparition des vibrations forcées	24
<u>Figure II.5</u> : Digramme d'ISHIKAWA des causes principales des vibrations en usinage	24
<u>Figure II.6</u> : Comportement dynamique du système POM	26
<u>Figure II.7</u> : Chronogramme sur la modélisation de la coupe	27
<u>Figure II.8</u> : Efforts de coupe selon Albrecht	29
<u>Figure II.9</u> : Modélisation de la coupe	30
<u>Figure II.10</u> : Modèle schématique de Keeg de l'orientation des efforts de coupe	32
<u>Figure II.11</u> : Modèle de Boothroyd et Sarnicola	33
<u>Figure II.12</u> : Modèle bidimensionnel de Wu et Liu du processus dynamique de coupe	34
<u>Figure II.13</u> : Variation de l'angle de cisaillement	35
<u>Figure II.14</u> : Modèle dynamique de coupe orthogonale	36
<u>Figure II.15</u> : Système dynamique de coupe bidimensionn	37
<u>Figure II.16</u> : Coupe tridimensionnelle	38

CHAPITRE III : Application des lobes de stabilité

<u>Figure III.1</u> : Possibilité de vibration dans un tour	39
<u>Figure III.2</u> : Opération de dressage (tournage)	41
<u>Figure III.3</u> : Schématisation du procédé de tournage	41
<u>Figure III.4</u> : Schématisation du déphasage en tournage	42
<u>Figure III.5</u> : Diagramme en boucle fermée	44
<u>Figure III.6</u> : Tracé de la fonction de transfert	45
<u>Figure III.7</u> : Organigramme utilisé	49
<u>Figure III.8</u> : Tracé des lobes de stabilité	50
<u>Figure III.9</u> : Pièce mal usinée	51

Chapitre IV : Etat de surface et rugosité

<u>Figure IV.1</u> : Représentation des irrégularités sur un profil d'état de surface	54
<u>Figure IV.2</u> : La rugosité	55
<u>Figure IV.3</u> : Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface	56
<u>Figure IV.4</u> : Description de l'usinage de la surface.	57
<u>Figure IV.5</u> : Organigramme pour la génération du fichier des points X_i, Y_i, Z_i	58
<u>Figure IV.6</u> : Rugosimètre de type MITUTOYO modèle SURFTEST 211	59
<u>Figure IV.7</u> : Rugosité arithmétique N°01 (sans vibration)	60
<u>Figure IV.8</u> : Rugosité arithmétique N°02 (sans vibration)	60
<u>Figure IV.9</u> : Rugosité arithmétique N°03 (sans vibration)	60

<u>Figure IV.10</u> : Rugosité arithmétique N°01 (avec vibration)	61
<u>Figure IV.11</u> : Rugosité arithmétique N°02 (avec vibration)	61
<u>Figure IV.12</u> : Rugosité arithmétique N°03 (avec vibration)	62
<u>Figure IV.13</u> : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.4$ mm/tr, $re = 0.8$ mm	64
<u>Figure IV.14</u> : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.45$ mm/tr, $re = 0.8$ mm	64
<u>Figure IV.15</u> : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.5$ mm/tr, $re = 0.8$ mm	65
<u>Figure IV.16</u> : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.1$ mm/tr, $re = 0.8$ mm	66
<u>Figure IV.17</u> : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.15$ mm/tr, $re = 0.8$ mm	66
<u>Figure IV.18</u> : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.2$ mm/tr, $re = 0.8$ mm	67
<u>Figure IV.19</u> : Différence entre une pièce usinée sans vibration (a) et avec vibration (b)	67
<u>Figure IV.20</u> : Représentation du profil de la pièce et de la rugosité théorique	68
<u>Figure IV.21</u> : Évolution de la rugosité théorique R_t en fonction du rayon de bec	69

Liste des tableau

<u>Tableau IV.1:</u> Ordres de grandeur des irrégularités géométriques et leurs origines possibles	53
<u>Tableau IV.2 :</u> Classement « pratique » des différents écarts géométriques	54
<u>Tableau IV.3 :</u> Critères de la rugosité	61
<u>Tableau IV.4 :</u> Critères de la rugosité	62
<u>Tableau IV.5 :</u> Simulations à effectuer (sans vibration)	63
<u>Tableau IV.6 :</u> Simulations à effectuer (avec vibration)	65
<u>Tableau IV.7 :</u> Valeurs de la rugosité théorique R_t obtenues par calcul	69

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Les pièces mécaniques (appareils, machines,...) sont obtenues par plusieurs procédés : moulage, assemblage, formage (laminage, forgeage, estampage, ...) ou usinage (coupe des métaux). L'usinage par enlèvement de matière permet d'élaborer des pièces mécaniques finies. L'outil de coupe enlève de la surépaisseur pour générer une nouvelle surface. Cette coupe est influencée principalement par les propriétés du matériau de la pièce à usiner, la géométrie de l'outil de coupe, les conditions de coupe, les conditions de lubrification et les paramètres dynamiques (raideur, amortissement) du système usinant. L'apparition de vibrations pendant le fonctionnement de la machine-outil ne peut être évitée. Généralement, ces vibrations représentent des déplacements périodiques du système élastique autour de sa position d'équilibre. Ces vibrations sont générées par l'interaction entre le système usinant élastique et le processus d'usinage associé au fonctionnement de la machine.

Pour bien comprendre ce phénomène, nous nous sommes intéressés à étudier une opération de dressage du procédé de tournage sur une pièce d'acier dur et l'étude de l'influence des phénomènes induits lors de cette opération. Les résultats obtenus vont nous permettre d'établir des corrélations fortes entre les vibrations auto-entretenues et les paramètres de coupe conditionnés par deux paramètres : la géométrie de l'outil de coupe (rayon du bec) et l'avance de l'outil de coupe. Aussi, et grâce à ces paramètres de coupe, il est possible d'étudier l'évolution du système vibrant outil-pièce.

Notre travail, Modélisation d'une opération de tournage et tracé des lobes de stabilité, va nous permettre de prendre un exemple d'une des opérations de tournage à savoir le dressage et d'étudier le phénomène de vibrations par la suite.

Notre travail se divise en quatre chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les notions nécessaires sur l'usinage en général et sur le procédé de tournage en particulier.

Le chapitre II sera consacré à la coupe des métaux, les différents mouvements en particulier ainsi que les paramètres de coupe.

Le chapitre III présentera les résultats des simulations relatives au modèle des lobes de stabilité. Les programmes seront réalisés et simulés à l'aide du logiciel Matlab. Ce démonstrateur permet de valider le modèle et les algorithmes que nous avons employés.

Le chapitre IV sera consacré à l'étude de l'état de surface et de la rugosité. Ayant pris connaissance au travers des chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de tournage, nous nous intéresserons à la simulation numérique de l'opération de dressage et l'interprétation et la discussion des résultats. La simulation numérique de notre exemple est difficile en raison de la présence de vibrations, de modifications thermiques (négligeables) ou encore de la présence de frottements.

La dernière partie, à savoir la conclusion générale, présentera les résultats obtenus tout au long de notre travail.

CHAPITE I

**Généralités sur l'usinage et
sur le procédé de tournage**

CHAPITRE I : Généralités sur l'usinage et sur le procédé de tournage**I.1/ GENERALITES :**

Le domaine des procédés d'usinage est extrêmement vaste. Il est généralement caractérisé par l'action d'un outil sur un matériau pour obtenir une nouvelle forme.

Traditionnellement, les procédés d'usinage mécanique sont divisés entre les opérations dites traditionnelles et les opérations dites non traditionnelles en distinguant les techniques d'usinage classique des autres. Mais il semble pertinent de classer schématiquement les procédés d'usinage selon les phénomènes physiques mis en jeu.

Ces derniers peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Les procédés physico-chimiques,
- Les procédés mécaniques.

I.2/ LES PROCEDES :

La figure I.1 suivante représente les différents procédés utilisés pour transformer un matériau qui soit à l'état liquide, solide ou pulvérulent (poudre).

Ce matériau peut être usiné soit par un usinage par enlèvement de matière ou par un usinage sans enlèvement de matière.

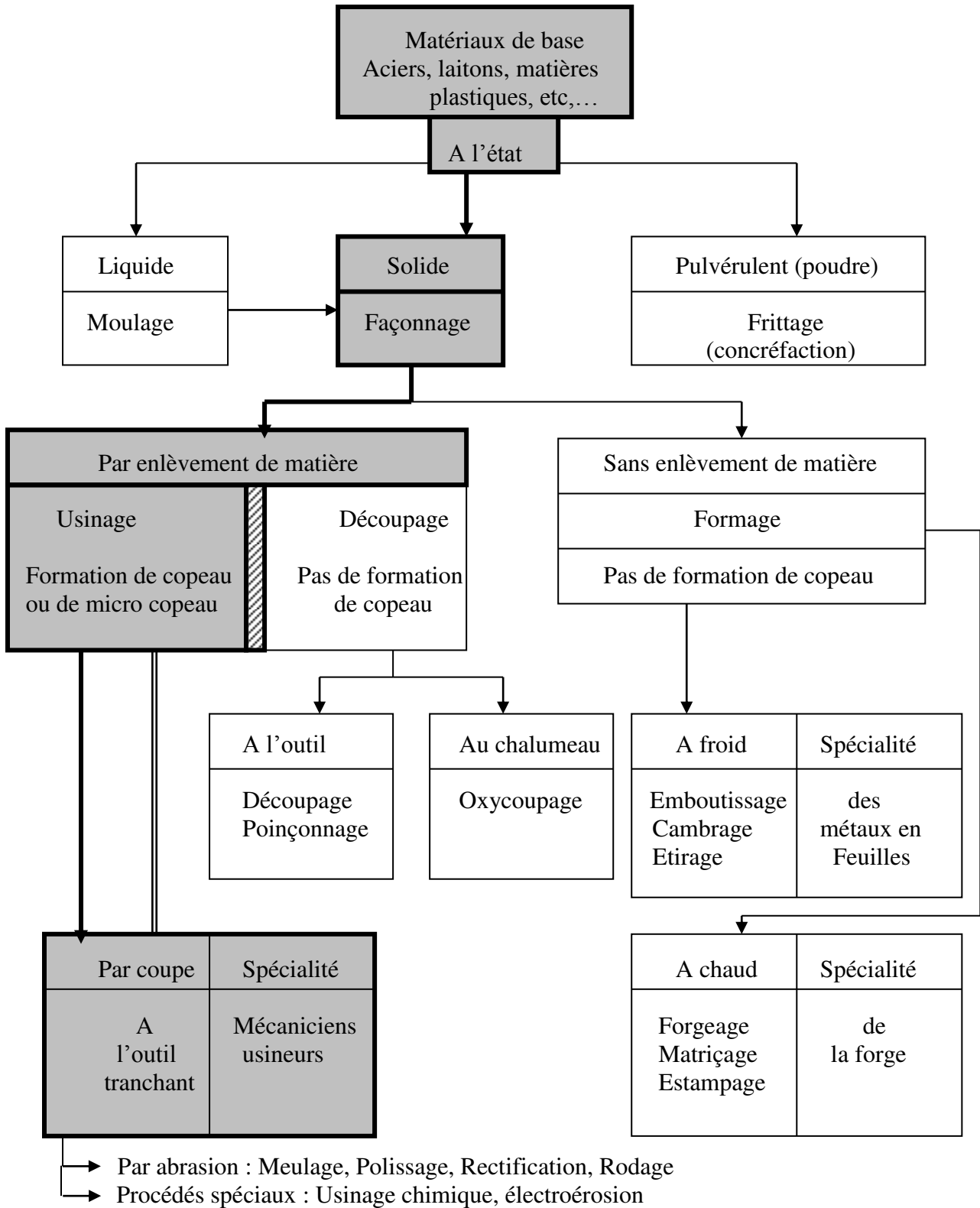


Figure I.1 : Les différents procédés

I.3/ PRINCIPE DE LA COUPE DES METAUX :

La coupe des métaux (ou usinage) consiste à enlever une couche de métal pour obtenir une pièce finie conforme au dessin de définition. [1]. [2]

Cette coupe est effectuée sur des machines à l'aide d'outils tranchants de dimensions et de formes diverses.

Lors de l'usinage, on trouve :

- Une lame d'outil qui pénètre dans la matière et enlève un copeau,
- L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner, où les mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine outil.

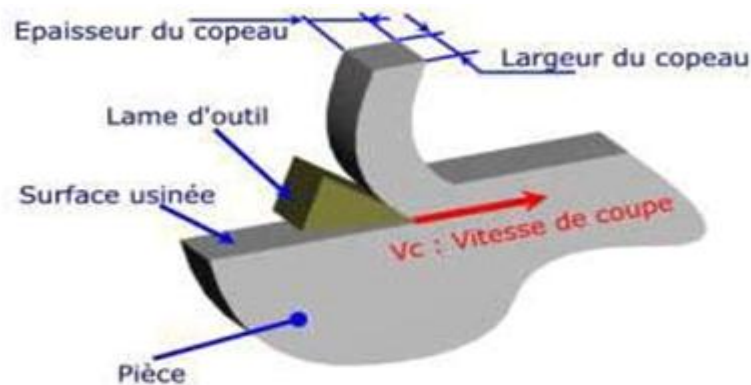


Figure I.2 : La coupe des métaux

La conjugaison de 3 mouvements soit à l'outil où soit à la pièce permet la coupe. Ces 3 mouvements sont : Le mouvement de coupe, le mouvement d'avance et le mouvement de profondeur.

- **Mouvement de coupe (M_c) :**

Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il est le mouvement principal à l'élaboration du copeau pendant la course de la machine Il est caractérisé par la vitesse de coupe v_c qui est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce.

Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation n et du diamètre D de l'élément en rotation.

Pour le tournage, il faut prendre le diamètre du cercle qui se trouve sur le point de l'arête de coupe le plus éloigné de l'axe de rotation.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} = \text{m/min} \quad (\text{I.1})$$

• **Mouvement d'avance (Ma) :**

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance est caractérisé par la vitesse d'avance v_f qui est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en mm/min soit en mm/tour.

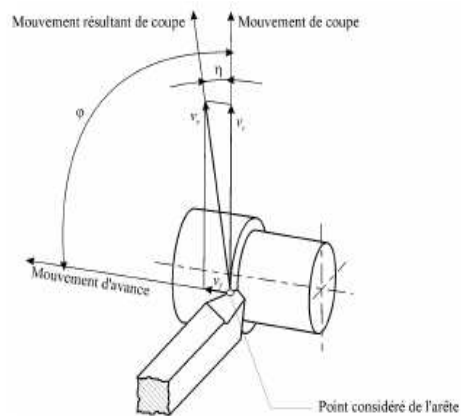


Figure I.3 : Mouvements de l'outil et de la pièce en tournage

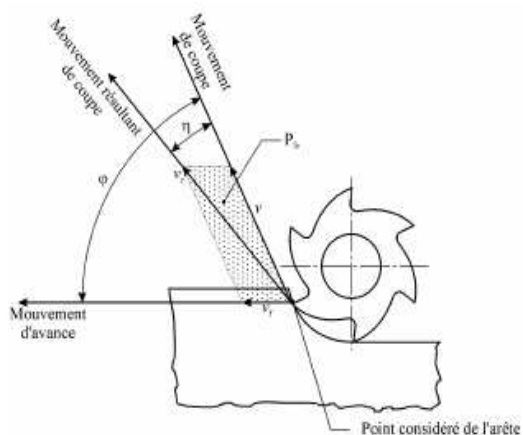


Figure I.4 : Mouvements de l'outil et de la pièce en fraiseuse

- **Mouvement de profondeur (M_p) :**

Les paramètres d'usinage sont des grandeurs qui caractérisent les mouvements de l'outil et de la pièce à usiner ainsi que les valeurs de la surépaisseur d'usinage et de la section de coupe. Le mouvement de profondeur est un mouvement perpendiculaire aux mouvements de coupe et d'avance. Il détermine la pénétration de l'outil dans la pièce (l'épaisseur du copeau à enlever).

Pour enlever de la matière en cours d'usinage, deux mouvements sont nécessaires : mouvement de coupe et mouvement d'avance. D'une manière générale, ces mouvements de coupe peuvent être donnés soit par la pièce soit par l'outil.

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil,...), on doit régler les paramètres de coupe ; ou, il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de coupe, comme le montre la figure suivante :

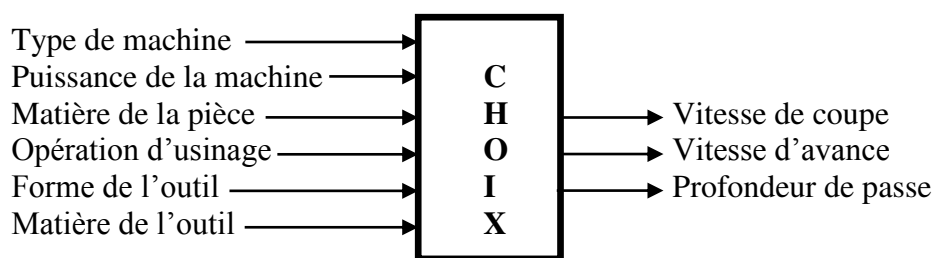


Figure I.5 : Critères permettant de définir les paramètres de coupe

La figure I.6 suivante illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes. La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée surface coupée.

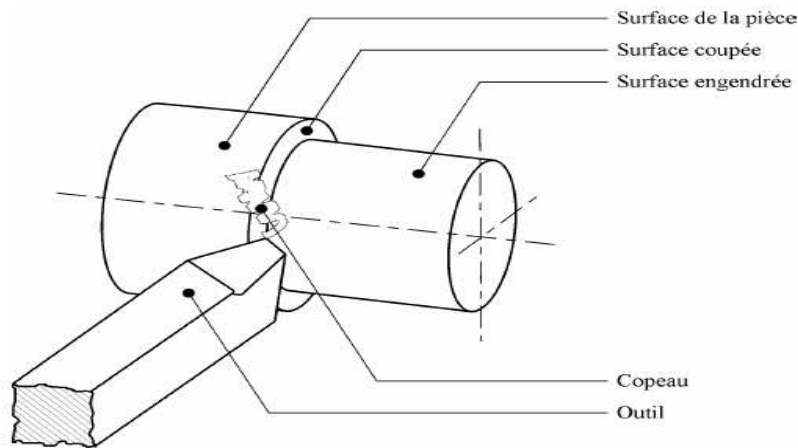


Figure I.6 : Les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil

I.4/ OUTIL DE COUPE :

Les outils permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables sur la pièce. On peut définir les éléments de coupe et les Faces et Arêtes de l'outil. [3]

- **Éléments de l'outil :**

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons sur un outil de coupe en tournage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil. Dans cette partie, on ne donne que les définitions nécessaires à la compréhension de phénomènes de coupe expliqués plus loin. Les définitions complètes se trouvent dans la norme ISO3002/1982.

- **Faces et arêtes de l'outil :**

Un outil de coupe consiste en un corps et une queue. Un corps est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps. D'autre part, la queue de l'outil est la partie par laquelle celui-ci est maintenu.

La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille) est appelée partie active. On y distingue différentes faces et arêtes qui sont illustrées sur la figure I.7 suivante (les arêtes, la force de coupe et la face de dépouille).

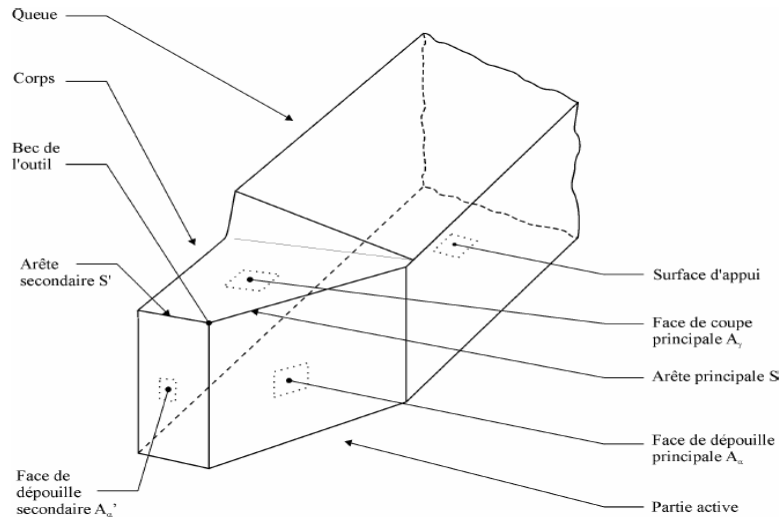


Figure I.7 : Eléments de l'outil

La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces : la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée. On appelle une arête un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Dans un outil de tournage simple, on peut distinguer une arête principale, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille principale, et une arête secondaire, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil. Il peut être droit, arrondi ou représenter l'intersection vive des deux arêtes.

- **Angles de l'outil :**

Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe il est nécessaire de définir les angles ayant la plus grande influence sur lesdits phénomènes.

La figure I.8 suivante illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ .

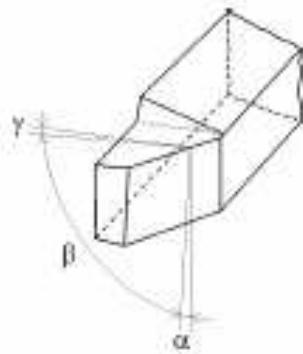


Figure I.8 : Angles du taillant (outil en main)

La figure I.9 suivante illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail : outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

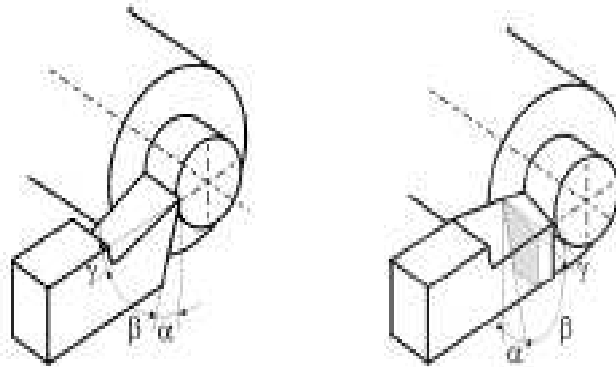


Figure I.9 : Angles du taillant (outil en travail)

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (\text{I.2})$$

Dans le cas où la somme de α et de β est supérieure à 90° , on parle de coupe négative (γ négatif).

I.5/ MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE :

Pour résister aux sollicitations sévères que le tranchant de l'outil subit dans la coupe, la partie active de celui-ci doit être constituée d'un matériau présentant des qualités particulières :

- Une dureté élevée pour pouvoir pénétrer dans le métal usiné,
- Une résistance mécanique élevée (particulièrement à la compression) pour résister aux efforts de coupe,
- Une résistance aux chocs pour éviter l'écaillage de l'arête de coupe (croûte de la matière usinée que se dépose sur le bec de l'outil, en formant une deuxième arête tranchante), elle détériore l'état de surface et crée un échauffement plus accentué de la partie active,
- Une résistance au frottement suffisamment élevée pour limiter les efforts d'usure sur les faces de coupe et de dépouille,
- Une conservation de la dureté à des températures élevées (500 à 4400°C),

- Un bon fini de la face d'attaque et de dépouille pour respecter l'état de surface demandé (un bon pierrage après chaque affûtage est souhaitable).

Un bon outil doit permettre un maximum de rendement pour un minimum d'usure.

Toutes ces caractéristiques nous amènent à employer les matériaux suivants, classés par ordre de dureté croissante:

- **Les aciers au carbone trempés ou aciers fondus** : Ils contiennent entre 0.8 à 1.2% de carbone. Leur dureté à froid atteint 65 HRC (essai Rockwell ou cône de diamant d'angle 120° C),
- **Les aciers au carbone alliés (aciers rapides)** : Ils sont des aciers avec des pourcentages importants d'éléments d'alliages, tel que le Tungstène (W) ou molybdène (D), Le Chrome (C), Le vanadium (V), le cobalt (K),...
- **Les aciers au tungstène (W) trempés (aciers rapides supérieurs),**
- **Les alliages durs ou alliages coulés** : Ils sont obtenus par fusion de métaux purs avec du carbone (C) au four électrique. Leur composition est la suivante :

Carbone (C) : 2.5 à 4%.

Cobalt (Co) : 40 à 50 %, Tungstène (W) : 25 à 80 %, Chrome (Cr) : 25 à 82 %, Fer (Fe) : environ 4%, Manganèse (Mn) : un peu. Ils conservent leur dureté à une température assez élevée (700 ° C),

- **Les carbures métalliques frittés** : Ces matériaux, dits « carbures », connaissent un développement de plus en plus grand, dus à leurs performances de coupe. Leur très grande variété de leurs caractéristiques et leurs conditions d'élaboration par la technique du frittage font de ces matériaux une utilisation très fréquente dans le domaine de la coupe,
- **Les céramiques,**
- **Les corps super abrasifs,**
- **Les diamants.**

I.6/ FORMATION DU COPEAU :

La coupe (formation du copeau) est un processus physique complexe qui s'accompagne de déformations plastiques et élastiques ; elle donne lieu à un frottement important (outil-pièce), au dégagement de chaleur, à la formation d'une arête rapportée (copeau adhérent sur le bec de l'outil), à l'enroulement et au retrait du copeau, au durcissement de la pièce (surface usinée écrouie) et à l'usure de l'outil (détérioration de la partie active de l'outil).

La formation du copeau joue un rôle important sur la rugosité de la surface usinée. Elle est un phénomène de déformation élastique et plastique (compression) de la couche cisailée.

La déformation plastique consiste dans le glissement de certaines couches par rapport à d'autres suivant des plans de glissement qui se confondent en général avec la direction des contraintes de cisaillement maximales. Les glissements des couches du métal provoquent la modification de la forme des grains, de leurs dimensions et positions relatives. Elle s'accompagne d'un échauffement important et d'une modification des propriétés du métal. Cette modification rend le métal plus dur.

Les formes du copeau varient suivant les conditions d'usinage. L'usinage des métaux plastiques (aciers) donne lieu à trois types de copeaux : continu, cisailé et discontinu. On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes,...).

Le copeau continu : Il apparaît lorsque l'acier est usiné à une grande vitesse. Il s'écoule alors en forme d'une bande longue.

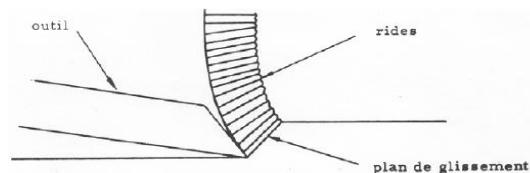


Figure I.10 : Copeau continu

- **Le copeau cisailé** : Il s'obtient lorsque l'usinage de l'acier se fait à vitesse moyenne. La face du copeau en regard de l'outil est lisse, alors que sa face opposée porte des entailles qui définissent la direction bien marquée des éléments isolés fortement liés les uns aux autres.

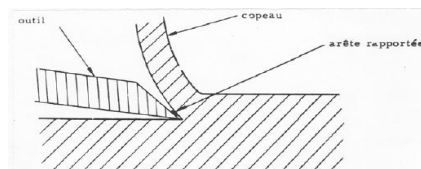


Figure I.11 : Copeau cisailé

- **Le copeau discontinu** : Il s'obtient lors de l'usinage des métaux durs et peu ductiles, à faible vitesse de coupe. Il est composé d'éléments séparés, déformés plastiquement, peu liés ou pas liés du tout entre eux.

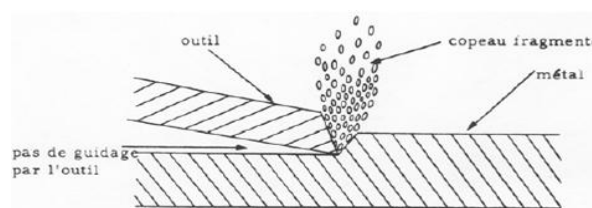


Figure I.12 : Copeau discontinu

I.7/ LA VITESSE DE COUPE :

La vitesse de coupe supposée en un point A de l'arête de l'outil est la vitesse relative de l'outil par rapport à la pièce. Elle se mesure en mètres par minutes (m/min). [4]

Taylor a été le premier à effectuer une étude expérimentale relative à la détermination des vitesses de coupe types, en fonction des différents facteurs, pour des dimensions de copeaux données et une durée de l'outil bien déterminée.

Herbert a repris les travaux de **Taylor** et, pour l'expérimentation, il a imaginé une machine spéciale. Le commandant **Denis**, en opérant sur la machine d'**Herbert**, a étudié systématiquement le problème et c'est lui qui en a poussé le plus loin l'étude.

Ses travaux sont à la base de la détermination pratique des vitesses de coupe.

La vitesse de coupe est un facteur important de la production. Plus la vitesse de coupe est grande, plus le temps d'usinage est petit. Toutes les conditions de travail restent les mêmes, la quantité de chaleur résultant du travail de coupe pendant un temps déterminé augmente avec la vitesse de coupe. Comme cette chaleur doit être évacuée en partie par le métal qui constitue l'outil, la température de la partie active de l'outil augmente, sa dureté diminue, son usure se produit plus rapidement : l'outil est rapidement hors d'usinage.

Il existe une vitesse-limite qui correspond à l'usure immédiate de l'outil et, pour un travail déterminé, une vitesse économique qui correspond au meilleur prix de l'usinage, compte tenu du coût de l'affûtage de l'outil.

De nombreux travaux ont été faits pour rechercher quelles sont les vitesses de coupe les plus avantageuses à utiliser. Aucune conclusion définitive n'a pu être établie ; le choix de la vitesse de coupe dépend, en effet, d'un très grand nombre de facteurs et les essais à effectuer sont toujours très longs, puisque ce sont des essais fondés sur l'usure de l'outil.

La vitesse augmente si :

- la section du copeau est faible,
- l'épaisseur du copeau est faible (petit avance, angle de direction peu important),
- l'outil est correctement refroidi (lubrification abondante).

Les facteurs qui ont une influence sur le choix de la vitesse de coupe dépendent de l'outil, de la matière usinée, des conditions de coupe :

- **Facteurs qui dépendent de l'outil :**
 - ✓ Nature et traitement thermique du métal constituant l'outil,
 - ✓ Forme de la partie active et dimensions : profil, angles de coupe,
 - ✓ Fini de la face de coupe.

- **Facteurs qui dépendent du métal à usiner :**
 - ✓ Nature métallurgique : composition, état laminé, étiré ou coulé,
 - ✓ Dureté et résistance à la traction,
 - ✓ Caractère d'usinabilité et d'abrasion.

- **Facteurs qui dépendent des conditions de coupe :**
 - ✓ Avance par tour ou par coup selon le type d'usinage,
 - ✓ Profondeur de passe,
 - ✓ Lubrification,
 - ✓ Genre d'usinage : discontinu ou continu.

I.8/ LA LUBRIFICATION :

La formation du copeau s'accompagne d'un important dégagement de chaleur dû au frottement du copeau glissant sur la face de coupe et au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil.

L'échauffement de la partie active est fonction de la vitesse de coupe. Lors de l'usinage, cette partie active de l'outil doit être réduite pour ne pas entraîner sa perte de dureté.

Aussi, les conséquences de l'augmentation de la température sur la pièce provoquent une dilatation de la pièce et des contraintes résiduelles en surface. En effet, dans la zone de formation du copeau, la température tend à augmenter la plasticité du métal et par conséquent, elle permet une diminution notable des efforts de coupe.

Pour éviter tous les phénomènes de chaleur, il est recommandé d'utiliser lors de l'usinage des lubrifiants ou des agents de refroidissement.

Ils agissent :

- En diminuant le coefficient de frottement copeau-outil et outil-pièce, c'est l'effet lubrifiant,
- En refroidissant l'outil et la pièce pour évacuer la chaleur produite, c'est l'effet réfrigérant.

En pratique, le débit doit être abondant et fonction de la puissance absorbée. La pression doit être suffisante pour évacuer les débris métalliques et pénétrer entre la face de coupe et le copeau. C'est essentiellement la partie active de l'outil qui doit être refroidie.

Un fluide de coupe convenablement choisi a une influence sur :

- L'usure de l'outil (réduction),
- Le choix de la vitesse de coupe,
- La rugosité de la surface usinée.

Parmi les produits lubrifiants, on peut citer :

- Les huiles minérales, elles sont issues de la distillation du pétrole,
- Les huiles solubles, ce sont des mélanges d'huiles minérales, d'émulgateurs et d'inhibiteurs de corrosion ajoutés à de l'eau,
- Les fluides synthétiques pour travaux spéciaux.

I.9/ PROCEDE DE TOURNAGE :

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

L'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce. La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes).

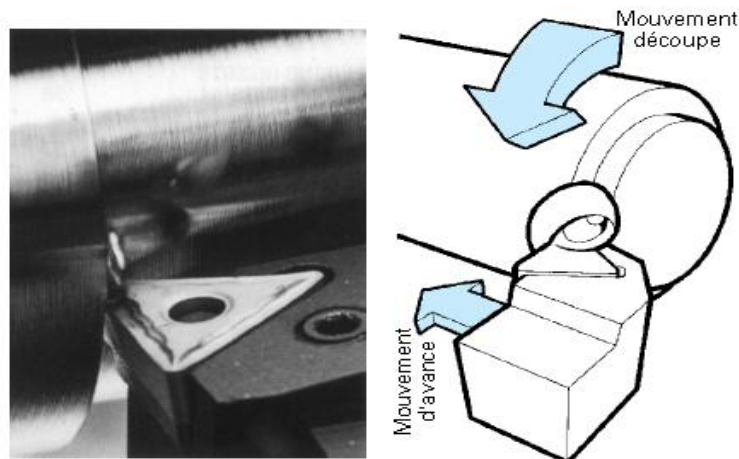


Figure I.13 : Procédure de tournage

I.9.1/ LE TOUR

Le type de machine utilisé en tournage est le tour.

On peut classer les tours en deux catégories :

- **Les tours parallèles** qui sont réservés aux travaux unitaires et en petite série,
- **Les tours spéciaux automatiques et semi-automatiques** qui sont destinés au travail en série.

On distingue deux classes : tours monobroches et tours multibroches (le nombre de broches porte-pièces est : 4, 6 ou 8 broches). Chaque broche comporte généralement deux chariots porte-outils radiaux et un porte-outil axial. Les outils travaillent simultanément.

On trouve : tour semi-automatique à décolleter, tour revolver, tour à copier, tour à commande numérique,...

La figure I.14 représente un tour parallèle :

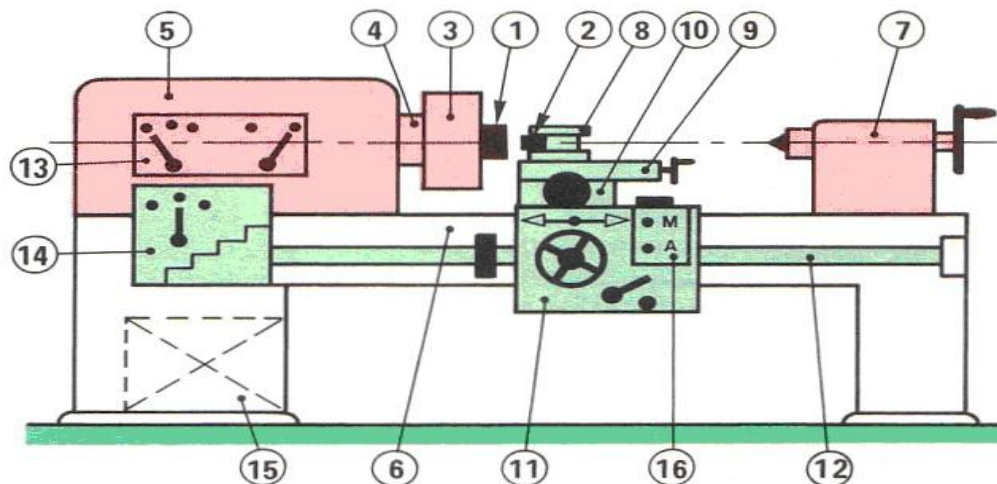


Figure I.14 : Constitution d'un tour parallèle

Avec :

(1) Pièce	(9) Chariot supérieur
(2) Outil	(10) Chariot transversal
(3) Mandrin	(11) Traînard
(4) Broche	(12) Barre de chariotage
(5) Poupée fixe	(13) Boite des vitesses
(6) Banc	(14) Boite des avances
(7) Poupée mobile	(15) Moteur
(8) Tourelle porte-outils	(16) Contacteur

I.9.2/ CLASSIFICATION DES TOURS :

Les tours les plus courants utilisés sont:

- Les tours parallèles à charioter et à fileter,
- Les tours à copier,
- Les tours semi-automatiques,
- Les tours automatiques,
- Les tours automatiques multibroches,
- Les tours à commande numérique.

I.9.3/ OPERATIONS DE TOURNAGE:

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, quatre opérations de base :

1. tournage longitudinal, ou chariotage,
2. dressage,
3. tournage de cônes,
4. contournage.

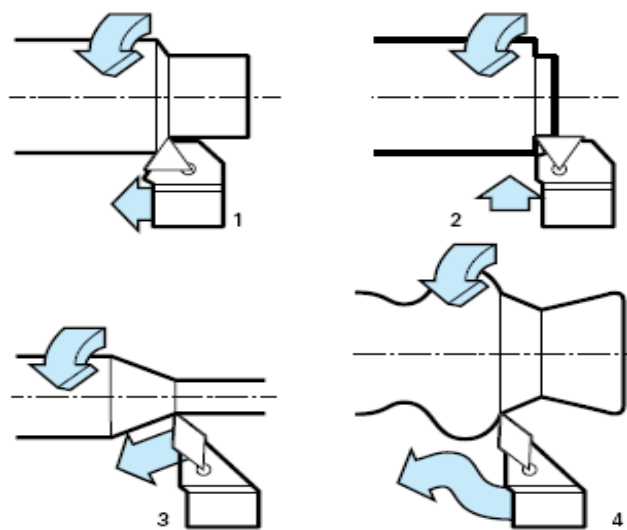


Figure I.15 : Opérations de base en tournage

1. En chariotage, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce.

2. En dressage, le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.

3. En combinant les deux types de déplacements précédents (avance de l'outil en translation rectiligne oblique/axe), on génère des cônes de révolution.

4. Enfin, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil de contourage), on peut obtenir une forme de révolution quelconque. Ces différentes opérations correspondent à un usinage dit « de génération » ou « d'enveloppe » : la forme obtenue, à l'échelle macro géométrique, ne doit rien à la forme de l'outil qui l'a générée.

En d'autres termes, la forme obtenue dépend uniquement de la trajectoire de l'outil, à la rugosité près.

À l'opposé, les gorges, filetages, etc., sont obtenus par reproduction dans la pièce du profil de l'outil et sont qualifiés d'usinage « de forme ».

I.9.4/ L'OUTIL :

L'outil est l'intermédiaire entre la machine et la pièce à usiner. La partie active d'un outil est foncée dans la pièce et se déplace mécaniquement par rapport à celle-ci de façon à éliminer la surépaisseur sous forme de copeau.

Les angles caractéristiques de l'outil sont : angle de dépouille, angle de taillant, angle de coupe, angle d'inclinaison de l'arête, angle de direction de l'arête, angle de direction complémentaire et l'angle de pointe.

La forme du bec influence l'état de surface.

Les principales formes sont :

- L'intersection vive,
- Le rayon,
- Le plat.

Le choix du rayon de bec est fonction de l'opération à effectuer : ébauche ou finition.

En tournage, les différents outils sont représentés dans la figure I.16 suivante :

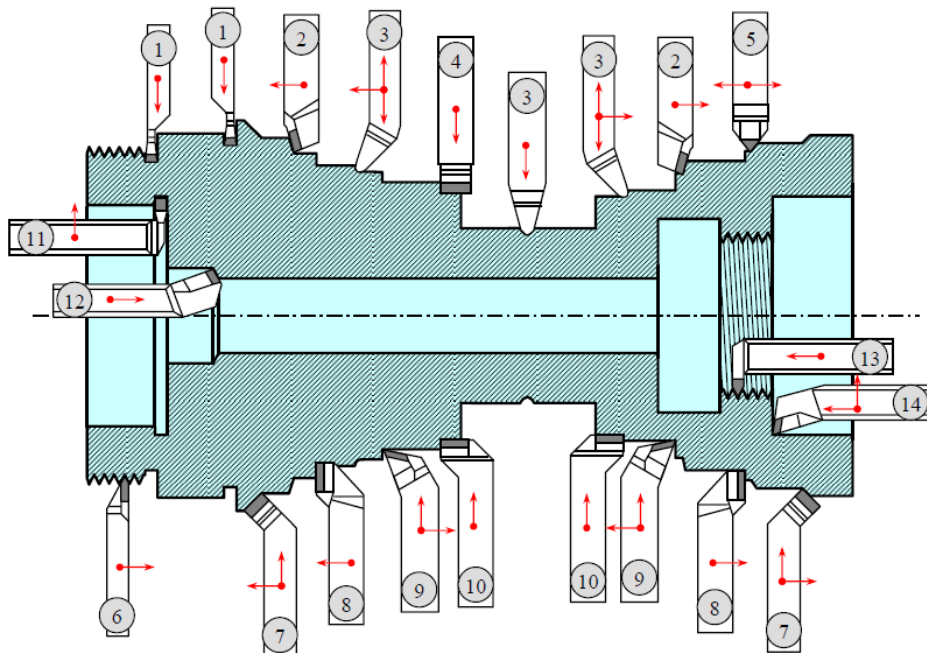


Figure I.16 : Outils de coupe du procédé de tournage

Avec :

Désignation	Désignation
(1) Outil à saigner	(8) Outil couteau
(2) Outil à charioter droit	(9) Outil à dresser les angles
(3) Outil à retoucher	(10) Outil à dresser les faces
(4) Outil pelle	(11) Outil à chambrer
(5) Outil à retoucher	(12) Outil à aléser
(6) Outil à fileter	(13) Outil à tarauder
(7) Outil coudé à charioter	(14) Outil à aléser

CHAPITRE II

Etat de l'art

CHAPITRE II : Etat de l'art**II.1/ INTRODUCTION :**

La simulation du comportement dynamique d'un système usinant conduit à la résolution d'un problème de dynamique non-linéaire où la modélisation de l'interaction outil/pièce joue un rôle central.

Ce système usinant est représenté par : Pièce/Outil de coupe/ Machine-outil (POM).

Cette interaction, prescrite via la donnée d'une trajectoire théorique outil de coupe/pièce fixant le mouvement relatif des référentiels R_{Outil} par rapport au référentiel $R_{\text{Pièce}}$, a pour particularité d'évoluer au cours du temps suite à une modification régulière de la surface usinée correspondant à une partie de la frontière du domaine de la pièce.

La flexibilité de la pièce complique très nettement l'évaluation de l'interaction outil de coupe/ pièce ainsi que le suivi de la frontière du domaine qu'elle occupe, à cause de ses vibrations qui ne peuvent pas être négligées.

L'effet retard qui provient de l'histoire de l'enlèvement de matière peut de plus conduire à l'auto-excitation du système et être responsable du phénomène de broutement. Ce phénomène de broutement, est fréquemment observé lors de l'usinage de pièces flexibles (carter, voiles minces). [5].

**II.2/ COMPORTEMENT MECANIQUE GLOBAL DU SYSTEME
PIECE/OUTIL DE COUPE/MACHINE-OUTIL (POM) :**

La machine-outil est un ensemble complexe mettant en œuvre un ou plusieurs procédés, des éléments de structure fixes (bâtis, glissières) ou mobiles (broches et arbres tournants dans des paliers) ainsi qu'une partie commande.

La machine-outil est un système qui doit être étudiée du fait que tous les éléments, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent. Elle à un comportement dynamique dont on ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments.

II.2.1/ DESCRIPTION DU SYSTEME POM :

La plupart des ouvrages traitant de la machine-outil se répartissent généralement en deux types. Certains auteurs abordent de façon encyclopédique et/ou descriptive. [6].[7].[8].[9]. D'autres auteurs décrivent distinctement les organes de chaque machine dont le calcul n'est abordé que de façon assez générale. Le reste aborde le système POM au travers d'applications expérimentales particulières. [10].

Malgré leurs diversités apparentes, les machines-outils ont pratiquement les mêmes structures et sont composées des mêmes éléments de base. La constitution générale d'une machine-outil permet de distinguer deux parties :

- une partie indépendante de l'opération d'usinage,
- une partie dépendante de l'opération d'usinage.

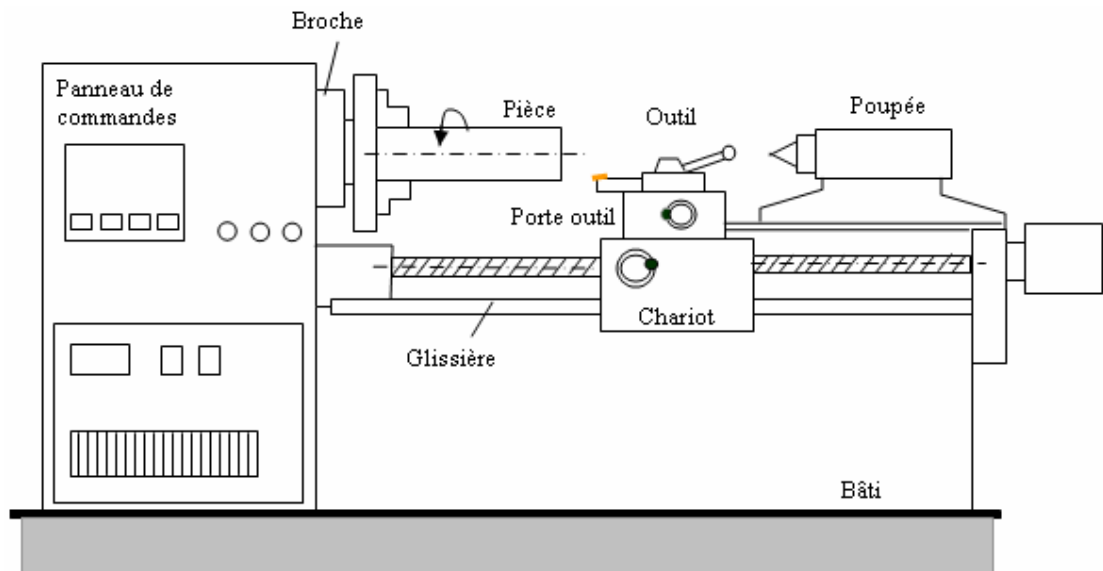


Figure II.1 : Eléments indépendants de l'opération d'usinage

Les éléments identifiés comme étant indépendants de l'opération d'usinage sont :

- Bâti,
- Ensemble chariot-glissière,
- Broche,
- Commande d'avance,
- Commande de puissance
- Directeur de commande

Avec :

- **Bâti** : Le rôle du bâti est multiple. D'une part, il sert d'intermédiaire entre le sol et les éléments actifs de la machine. D'autre part, il réalise la liaison entre la pièce à usiner et les outils de coupe.

- **Chariot-glissière** : La glissière confère au chariot un seul degré de liberté correspondant à une translation. Il est communément convenu que la liaison idéale chariot-glissière doit être sans jeu et ne faire intervenir qu'un frottement de type hydrodynamique. Dans la réalité, il convient de noter la présence de jeux et de frottements de types plus complexes.

- **Broche** : La broche est un corps tournant qui possède un seul degré de liberté par rapport à la structure de la machine. La machine comporte les paliers qui retirent à la broche cinq degrés de liberté. Ces paliers ont une grande importance pour la qualité de la machine. Ils doivent être rigides et ne doivent présenter que de très faibles jeux, afin d'éviter des mouvements relatifs non souhaités entre la broche et le bâti donc entre la broche et la pièce. Assez souvent la broche est cependant l'élément le plus souple de la machine.

- **Commande d'avance** : Elle comporte en général un moteur et une transmission mécanique de mouvement entre un élément de structure (fixe ou mobile) et le chariot. C'est donc la commande d'avance qui retire au chariot son sixième degré de liberté.

- **Commande de puissance** : La commande de puissance de la machine pose des problèmes qui ont pour origine la liaison entre le moteur et la broche. Essentiellement deux techniques sont utilisées. La courroie qui paraît être arrivée au bout de son potentiel tant en vitesse qu'en puissance transmise et la transmission directe qui présente des problèmes sérieux dus à l'encombrement qu'elle impose à la broche ou à l'ensemble moteur-broche quand ils sont montés en ligne.

- **Directeur de commande** : Le directeur de commande a le rôle d'animation de l'ensemble de la machine. En particulier, c'est lui qui assure le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce selon la trajectoire prévue. Il est responsable du maintien des conditions de coupe à leurs valeurs programmées.

Les éléments identifiés comme étant dépendants de l'opération d'usinage sont :

- la pièce,
- l'outil de coupe,
- le porte - outil,
- le porte - pièce.

- **Pièce** : La pièce est considérée comme une partie intégrante du système d'usinage. Il ne sert à rien d'avoir une machine de très grande rigidité et très haute qualité si la pièce à usiner se déforme sous l'effet des efforts de coupe ou de bridage. Les pièces peuvent être réparties en trois catégories :

- ✓ Pièces massives,
- ✓ Pièces flexibles,
- ✓ Autres.

- **Outil de coupe** : L'outil de coupe peut être unique ou multiple. Il constitue une partie essentielle dans l'étude du comportement statique et dynamique d'une machine-outil. C'est par l'étude du phénomène d'interaction de l'outil avec la pièce que nous obtenons les forces de coupe engendrées durant l'usinage. Les outils peuvent se répartir en trois catégories :

- ✓ Indéformables,
- ✓ Souples,
- ✓ Intermédiaires.

- **Porte-outil** : Le porte-outil assure la liaison entre l'outil et la machine. La notion de l'interface (cône, denture, liaison prismatique, etc.) confère au porte-outil des caractéristiques particulières de raideur et d'amortissement qui sont très dépendantes de la qualité, de la géométrie et de l'état d'usure de l'interface

- **Porte-pièce** : Le porte-pièce assure le maintien en position de la pièce par rapport à l'élément auquel il est rattaché (broche ou chariot). Les actions qu'il exerce sur la pièce contribuent à la fois à la déformer, à la renforcer et à augmenter la rigidité. Sur le plan dynamique, la prise en compte globale de l'ensemble (pièce, porte-pièce) est nécessaire sauf dans le cas de pièces particulièrement déformables ne pouvant pas être soutenues. [11].

II.2.2/ DYNAMIQUE DE COUPE :

La mise en forme par enlèvement de matière est l'un des procédés d'élaboration de pièces mécaniques.

Le processus de coupe représente un ensemble de phénomènes physico-chimiques et particulièrement dynamiques, déterminés par des déformations élastiques, plastiques et elastovisco-plastiques, des phénomènes thermiques et de frottement,...

Il existe différents types de configurations de coupe :

- Orthogonale,
- Oblique,
- Tridimensionnelle.

Pour le cas du procédé de tournage, la pièce est animée d'un mouvement de rotation ou l'outil se déplace en translation afin de générer les surfaces désirées.

La figure II.2 illustre ce procédé.

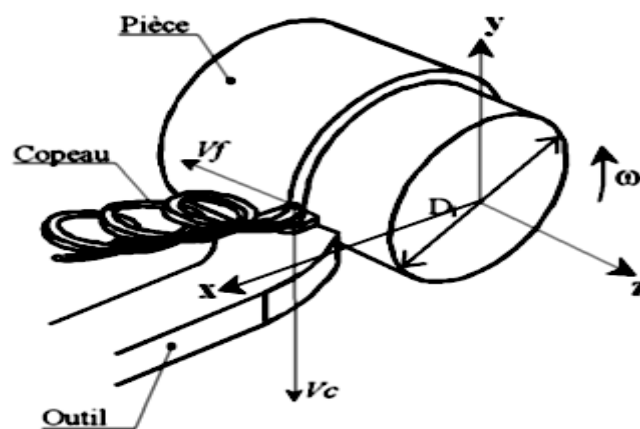


Figure II.2 : Procédé de tournage

Les vibrations des machines-outils sont générées par l'interaction entre le système usinant élastique et le processus d'usinage associé au fonctionnement de la machine. Le système élastique comprend le dispositif de fixation, la pièce et l'outil de coupe.

L'interaction entre les systèmes élastiques et les processus d'usinage constitue le système dynamique du système usinant.

Les actions du processus d'usinage sur le système élastique sont, généralement, des forces ou des moments, mais elles peuvent aussi être de nature thermique. Ces actions engendrent également des déplacements relatifs des éléments constitutifs du système élastique qui se produisent, par exemple, entre l'outil de coupe et la pièce, entre le chariot et les guidages,... Ces déplacements représentent la réaction du système élastique à l'action du processus d'usinage. Ils conduisent à la variation des paramètres de travail et induisent la variation des forces, des moments, de la quantité de chaleur dégagée,....

La figure II.3 illustre le système dynamique des machines-outils.

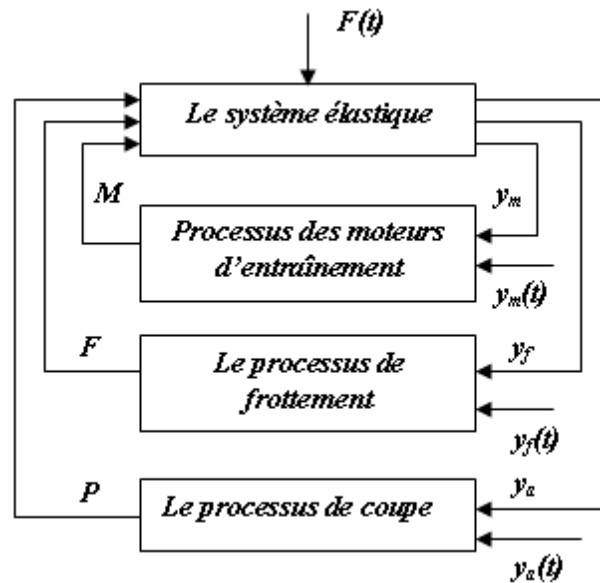


Figure II.3 : Système dynamique des machines-outils

La schématisation de l'interdépendance entre le système élastique et le processus d'usinage conduit à un système fermé, qui contient les éléments du système dynamique.

Ce système dynamique des machines-outils est représenté dans la figure II.3. Les actions des processus de travail sur le système élastique sont notées par P , F et M , qui représentent, respectivement, les actions du processus de coupe, du frottement, et du moteur d'entraînement. Leurs réactions sont respectivement y_a , y_f , y_m .

L'apparition de vibrations pendant le fonctionnement de la machine-outil ne peut être évitée. Généralement, ces vibrations représentent des déplacements périodiques du système élastique autour de sa position d'équilibre. La valeur des déplacements dépend autant des caractéristiques des éléments du système dynamique que de l'intensité de l'interaction de ces éléments.

Le processus de coupe peut générer deux types de vibrations :

- Vibrations forcées,
- Vibrations auto-entretenues.

La figure II.4 illustre ce phénomène.

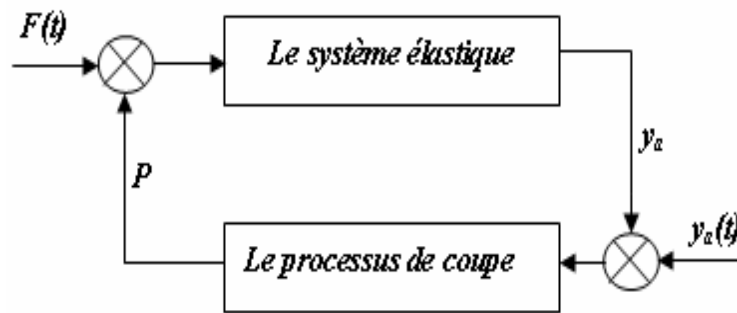


Figure II.4 : Interaction système élastique/processus de coupe :
apparition des vibrations forcées

II.3/ VIBRATION EN USINAGE :

Les vibrations du système pièce-outil-machine dégradant la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Ces dernières diminuent la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil. Il en existe deux types, les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau). [12].

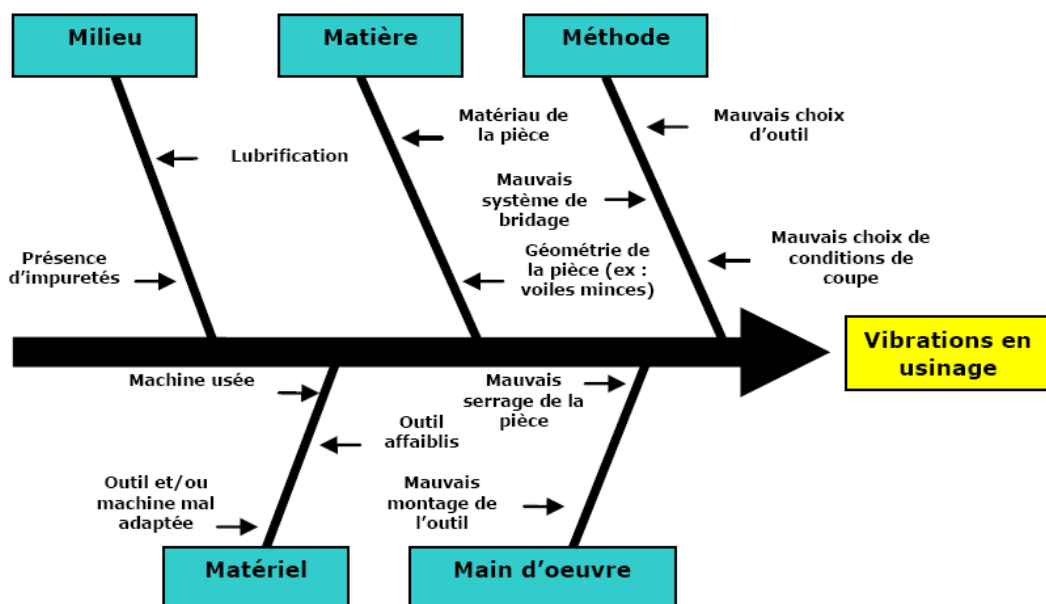


Figure II.5 : Digramme d'ISHIKAWA des causes principales des vibrations en usinage [13]

II.3.1/ TYPES DE VIBRATION :

• **Vibration forcées :** Les vibrations forcées sont dues à l'application d'une force oscillatoire ayant une fréquence différente de celles des modes propres des différentes parties vibrantes constituant le système d'usinage. Ainsi, si la fréquence propre du système est nettement différente de la fréquence excitatrice, l'amortissement de la machine outil, souvent inférieur à 0.2, ne pourrait pas contribuer à la stabilité du procédé d'usinage. L'amplitude des vibrations est inversement proportionnelle à la rigidité de la machine outil. Evidemment, cette amplitude diminue quand la différence entre la fréquence propre et la fréquence de la force oscillatoire augmente. Dans une opération de perçage par exemple, cela suggère que, la fréquence propre fondamentale de la machine outil soit assez élevée afin de supprimer la partie basse des fréquences propres des parties vibrantes qui dominant. [14].

• **Les vibrations générées par auto-excitation :** Le deuxième problème, perturbant les procédés d'usinage, est l'apparition de vibrations ou des excitations proches de la fréquence du système vibrant (machine-outil-pièce). [15] [16]. Ces vibrations, appelées "Self-excited vibrations", créent un état dynamique de coupe instable. Dans cet état, une force alternée entretenant le mouvement est créée. Celle-ci est en même temps contrôlée par le mouvement qu'elle entretienne. Donc, quand l'action du mouvement cesse d'agir, la force alternée disparaît, [17]. Aussi, dans le cas des vibrations générées par auto-excitation, l'amplitude des vibrations est inversement proportionnelle au produit de la rigidité de coupe et de l'amortissement de la machine outil.

II.4/ SOURCES DE VIBRATIONS DU SYSTEME POM :

Les causes des excitations du système POM peuvent être directement liées à l'usinage ou provenir d'autres sources.

Ces dernières sont principalement les défauts d'équilibrage, les défauts des chaînes cinématiques et les oscillations provenant des asservissements de pilotage.

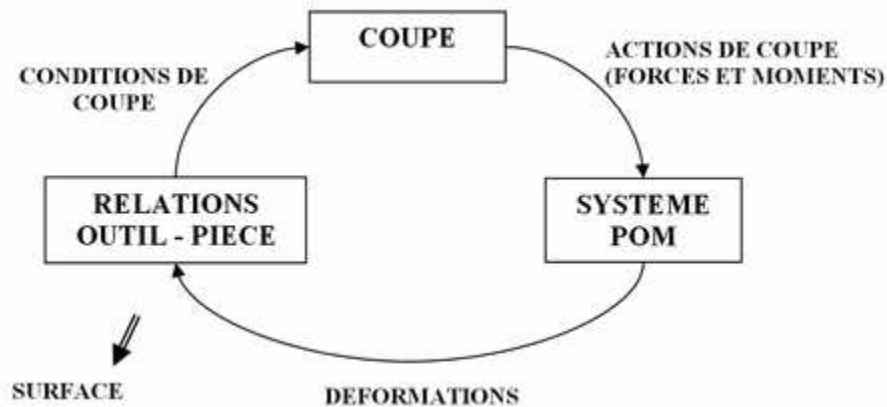


Figure II.6 : Comportement dynamique du système POM.

II.5/ MODELISATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU SYSTEME POM :

Il est généralement admis que le comportement dynamique du système POM peut être décrit par l'équation :

$$[M].(\ddot{q}) + [C].(\dot{q}) + [K].(q) = (F(t)) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

(q) le vecteur des degrés de liberté du système POM caractérisé par les matrices de masse [M], d'amortissement [C] et de rigidité [K]. Le deuxième membre dépend directement du modèle de la loi de coupe retenue. [18].

A priori, tous les termes de l'équation varient au cours du temps. Cependant, sous certaines conditions, lorsque nous isolons le système mécanique qui est constitué de l'ensemble POM pour modéliser le comportement dynamique du dispositif d'usinage, nous considérons les matrices de masse, d'amortissement et de raideur comme constantes. Ceci simplifie le calcul du premier membre des équations (II.1). Le caractère non linéaire du système différentiel est dû essentiellement à la nature complexe des efforts de coupe, qui implique la relation suivante : [19]

$$\left(\overline{F(t)} \right) = \left(F(q(t), q(t-T), \dots, \dot{q}(t), \dot{q}(t-T), \dots) \right). \quad (\text{II.2})$$

II.5.1/ LA MODELISATION ANALYTIQUE :

Afin de modéliser les procédés de coupe industriels tels que le tournage, le fraisage ou le perçage, il est nécessaire de comprendre les phénomènes existants dans des opérations de coupe simples telles que la coupe orthogonale ou oblique avec une arête droite. Toutes les recherches ont été appliquées à étudier l'usinage et développer des modèles analytiques.

Parmi les auteurs intéressés, Lee et Schaffer utilisent la méthode des lignes de glissement pour décrire l'écoulement du copeau à travers la bande de cisaillement, puis le long de la face de coupe. Ces auteurs suppriment, ainsi l'hypothèse d'un outil supposé parfait, et intègrent le rayon d'arête. Néanmoins, la méthode des lignes de glissement impose que le matériau usiné soit parfaitement plastique. [20].

D'autres modèles ont été développés comme ceux de Molinari et de Dudzinski. Ils ont modélisé le processus de formation du copeau continu en coupe orthogonale en régime stationnaire. [21].[22]. Ce modèle focalise l'étude sur l'écoulement dans la zone de cisaillement primaire supposée être une bande avec une épaisseur constante et uniforme. Il prédit une diminution de la largeur de contact outil-copeau et de l'effort de coupe avec une élévation de la vitesse de coupe. Ce modèle a été généralisé au cas de la coupe oblique (la direction d'écoulement du copeau déterminée pour un couple outil-matière donnée) en utilisant une loi dépendante de la température pour définir le frottement généré par le contact outil de coupe et copeau.

La figure II.7 illustre un chronogramme sur la modélisation de la coupe

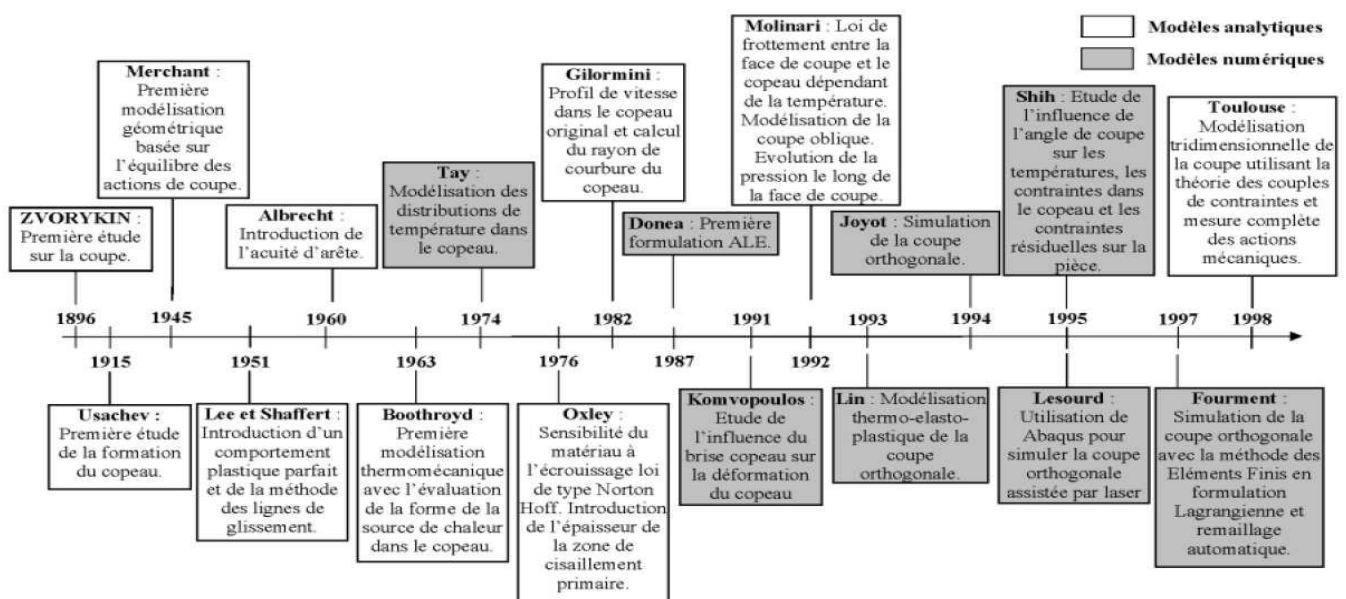


Figure II.7 : Chronogramme sur la modélisation de la coupe [23]

• **Modèle de Merchant :** Ce n'est qu'à partir des années 40 qu'un premier modèle analytique de la coupe à vu le jour grâce à Merchant. Cette première approche a permis de modéliser la formation d'un copeau continu et de prévoir les efforts de coupe lors de l'enlèvement de matière, en coupe orthogonale et ce en utilisant un outil de coupe avec une pointe aigu. Dans son modèle, cet auteur ne prend en compte qu'un cisaillement dans la zone primaire. De plus, il suppose que le matériau a un comportement parfaitement plastique. Il utilise en particulier la théorie de la plasticité en déformation plane. [24].[25].

Le principe de cette approche analytique est d'exprimer les différentes composantes des efforts de coupe en fonction de l'angle de frottement outil/copeau (λ), l'angle de coupe γ et l'angle de cisaillement ϕ (représentant l'inclinaison du plan de cisaillement par rapport à la surface de la pièce). En minimisant la puissance de coupe, l'angle de cisaillement est exprimé par l'équation suivante considérée comme étant la solution du problème.

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\lambda - \gamma}{2} \quad (\text{II.3})$$

Le frottement outil de coupe - copeau est supposé de type Coulomb et l'expression du coefficient de frottement (μ) est donnée par l'équation suivante :

$$\mu = \tan(\lambda) = \frac{F}{N} = \frac{F_n + F_t \cdot \tan(\gamma)}{F_t - F_n \cdot \tan(\gamma)} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

F = Effort normal projeté à la face de coupe,

F_n = Effort normal (dans le repère de mesure),

F_t = Effort tangentiel (dans le repère de mesure),

N = Projection de l'effort de coupe perpendiculairement à la face de coupe

• **Modèle D'Albrecht :** Dans son approche, Albrecht s'est inspiré du modèle de Merchant, sans pour autant prendre en compte un outil de coupe parfaitement aigu. Il considère un outil avec un rayon de courbure au niveau du raccordement entre sa face de dépouille et sa face de coupe comme le montre la figure II.8. Ce rayon pourrait provenir soit de la géométrie, soit de l'usure de l'outil. Dans ce dernier cas, Il distingue alors deux zones différentes suivant le contact outil/matériau. Une zone (AB) à laquelle il associe une résultante des efforts, \vec{Q} située au milieu de l'arc (AB), et une deuxième zone (BC) composée de deux portions (BE) et (EC) avec

une résultante des efforts \vec{P} , située, elle aussi, au milieu de l'arc (BC), en supposant que la répartition des efforts le long de cet arc est uniforme. Chacune de ces zones a son propre coefficient de frottement, les différences étant accentuées s'il y a un copeau adhérent au cours de la coupe.[26]

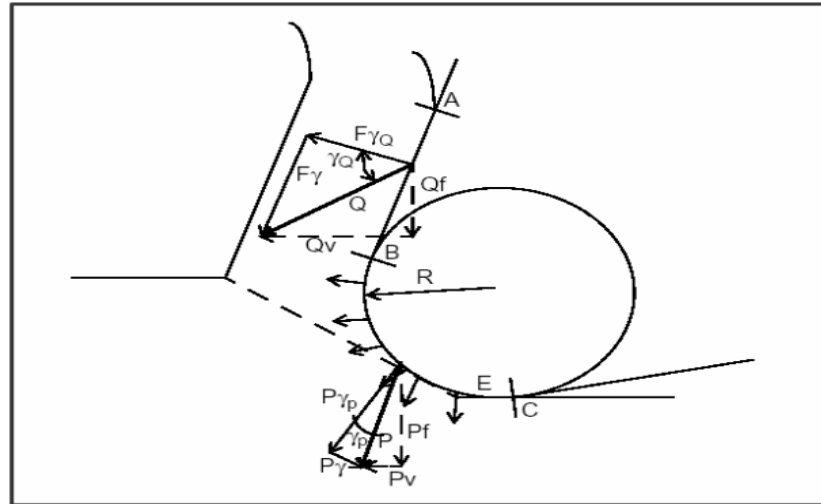


Figure II.8 : Efforts de coupe selon Albrecht.

• **Modèle de Boothroyd :** Durant les années 50, Lee et Schaffer basent leur modélisation sur la théorie des lignes de glissements tout en gardant un comportement du matériau parfaitement plastique. Quelques années plus tard, Boothroyd a mis en place le premier modèle thermomécanique permettant d'évaluer la forme de la source de chaleur dans le copeau et ce dans le cas de la coupe orthogonale. Dans son modèle, il considère que toute la puissance mécanique nécessaire au cisaillement est transformée en puissance calorifique et est dissipée par la coupe. Ainsi, il met en évidence la présence de deux sources planes de chaleur uniformes, une au niveau de la zone de cisaillement primaire et la deuxième au niveau de la zone de cisaillement secondaire. [27]. [28].

• **Modèle d'Oxley :** Oxley a été l'un des premiers à avoir pris en compte le comportement thermomécanique du matériau usiné. Il a construit un modèle de coupe assez élaboré permettant de déterminer la géométrie du copeau.

Dans son modèle, Oxley a introduit le comportement réel du matériau. À partir des observations expérimentales, il a pu montrer que les propriétés d'écrouissage du matériau affectent la distribution de la pression hydrostatique dans la zone de formation du copeau. [29].[30]

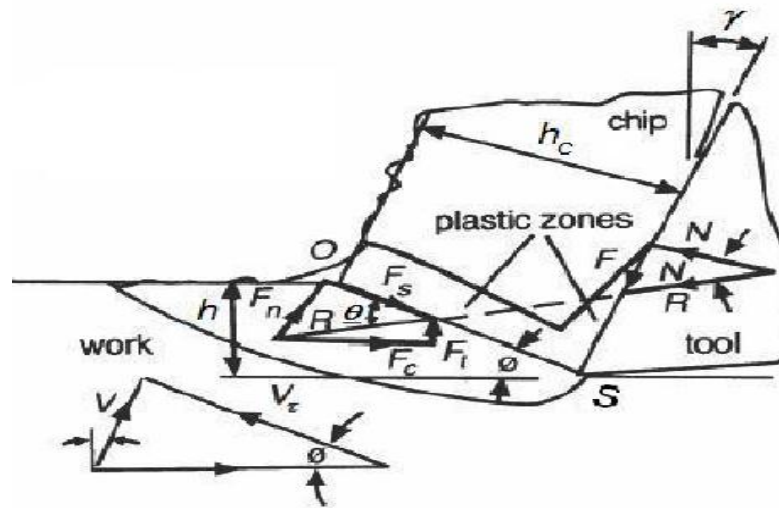


Figure II.9 : Modélisation de la coupe

L'outil possède une arête vive et la résultante des efforts est déterminée par l'équation suivante :

$$R = \frac{F_s}{\cos \theta} = \frac{\bar{\tau} b h}{\sin \phi \cos \theta} \quad (\text{II.5})$$

Où τ est la contrainte d'écoulement en cisaillement dans la bande de cisaillement.

θ = Angle entre la force résultante R et l'effort de cisaillement F_s . Cet angle est calculé de manière à respecter l'équilibre des contraintes le long de la bande de cisaillement pour un angle de cisaillement $0 < \phi < \pi/4$ tel que :

$$\tan \theta = 1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \phi \right) - C_n \quad (\text{II.6})$$

Avec :

n = Indice d'écrouissage,

C = Constante empirique,

Les efforts (normal et coplanaire) à la bande de cisaillement sont alors liés par la relation suivante :

$$F_n = F_s \left(1 + \frac{\pi}{2} - 2\phi - C_n \right) \quad (\text{II.7})$$

L'effort de cisaillement est :

$$F_s = \frac{\bar{\tau} b h}{\sin \phi} \quad (\text{II.8})$$

Le paramètre clef des modèles analytiques est l'angle de cisaillement primaire ϕ . Sa prédiction n'est pas aisée.

Cet angle est calculé analytiquement :

$$\tan \phi = \frac{h \cos \varphi_n}{h_c - h \sin \varphi_n} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

h et h_c = Epaisseurs du copeau avant et après déformation,

φ_n = Angle de coupe.

Le modèle de Zvorykin (1893) est une des plus anciennes formulations de l'angle de cisaillement. Basée sur l'énergie minimale, sa formulation lie l'angle ϕ aux angles de coupe φ_n et de frottement β .

$$\phi = \frac{\pi}{4} + (\varphi_n - \beta) \quad (\text{II.10})$$

II.5.2/ MODELES DYNAMIQUES :

Afin de mieux connaître et de maîtriser les phénomènes d'instabilité dans la coupe, les études développent des modèles dynamiques pour prévoir les conditions nécessaires à l'élaboration d'une coupe stable.

• **Modèle de Keeg :** Kegg a prit comme hypothèse que la composante de force dépendant de l'épaisseur de coupe et celle dépendant du taux de pénétration de l'outil dans la pièce ne sont pas dirigées dans la même direction. La Figure II.10 montre l'orientation η_1 de la force primaire de coupe F_1 qui dépend de l'épaisseur de coupe et l'orientation η_2 de la force secondaire de coupe F_2 qui dépend du taux de pénétration de l'outil. [31].

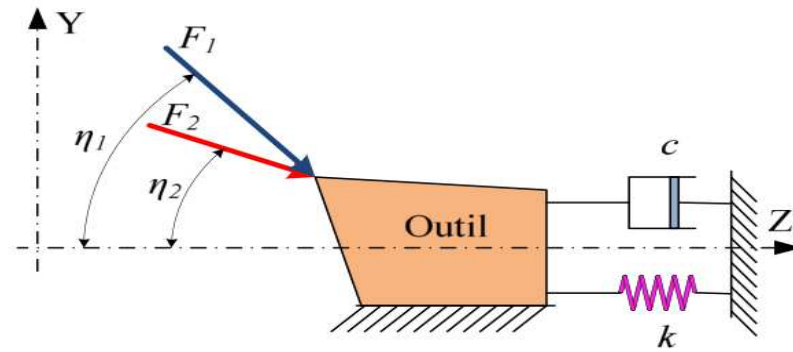


Figure II.10 : Modèle schématique de Keeg de l'orientation des efforts de coupe

Pour un système à un seul degré de liberté, les composantes de ces forces dans la direction Z peuvent être écrites sous la forme :

$$m \ddot{z} + c \dot{z} + kz = k \cdot b \cdot h \cdot \cos \eta_1 - \frac{C_d \cdot b}{V_c} \dot{z} \cdot \cos \eta_2 \quad (\text{II.11})$$

Avec :

C_d = Facteur d'amortissement associé à la pénétration de l'outil dans la pièce (N/m),

V_c = Vitesse de coupe (m/sec).

Keeg a défini deux largeurs de coupe, « b_{cr} », la largeur critique de coupe pour définir la stabilité de coupe et « b_m » et la largeur de coupe minimale à laquelle le broutement peut apparaître.

Pour un système à un seul degré de liberté, la vitesse de coupe V_c , pour la largeur de coupe critique associée au broutement a été définie de la façon suivante :

$$V_c = \frac{n}{n-1} \left(\frac{2\pi C_d f \cos \eta_2}{k \cos \eta_1} \right) \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$n = \frac{b_{cr}}{b_m}$$

f = Fréquence de vibration du système. La relation ci-dessus permet le calcul de V_c une fois que la valeur de C_d est connue.

• **Modèle de Boothroyd et Sarnicola :** Ce modèle précise que pendant l'usinage en présence du broutement, la vibration parallèlement à la direction de coupe, influence le processus d'usinage, mais ne provoque pas de variation de l'épaisseur de coupe. En revanche, la vibration

normale à la surface usinée influence la variation de l'épaisseur de coupe et engendre un défaut de surface. [32].

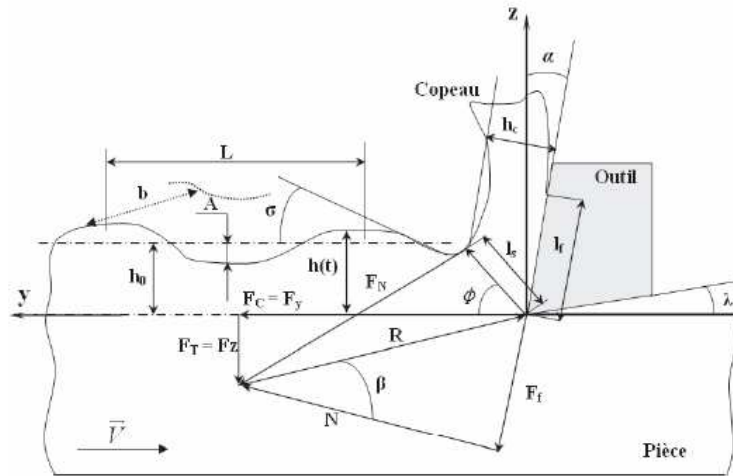


Figure II.11 : Modèle de Boothroyd et Sarnicola

Pour une ondulation de la surface usinée, Boothroyd et Sarnicola expriment l'épaisseur instantanée de coupe par la relation :

$$h = h_0 + A \sin(2\pi \cdot y/L) \quad (II.13)$$

Les composantes instantanées F_C et F_T de l'effort de coupe sont exprimées les équations suivantes II.14 et II.15 par :

$$F_C = S_s \cdot b \cdot \left[\frac{\sin(\phi) \cos(\phi - \alpha) - \left(\frac{S_s}{S_f \cdot K} \right) \cos(\alpha)}{\left(\frac{S_s}{S_f \cdot K} \right) \sin(\phi) \cos(\phi - \alpha)} \right] \cdot \left(h_0 + A \sin\left(\frac{2\pi \cdot y}{L} \right) \right),$$

$$F_T = S_s \cdot b \cdot \left[\frac{\cos(\phi) \sin(\phi - \alpha) - \left(\frac{S_s}{S_f \cdot K} \right) \sin(\alpha)}{\left(\frac{S_s}{S_f \cdot K} \right) \sin(\phi) \cos(\phi - \alpha)} \right] \cdot \left(h_0 + A \sin\left(\frac{2\pi \cdot y}{L} \right) \right).$$

L'angle de cisaillement est exprimé en fonction de la pente de la surface par :

$$\phi = \phi_0 + C\sigma \quad (\text{II.16})$$

• **Modèle de Wu et Liu :** Ces auteurs ont développé un modèle bidimensionnel comme le montre la figure II.12.

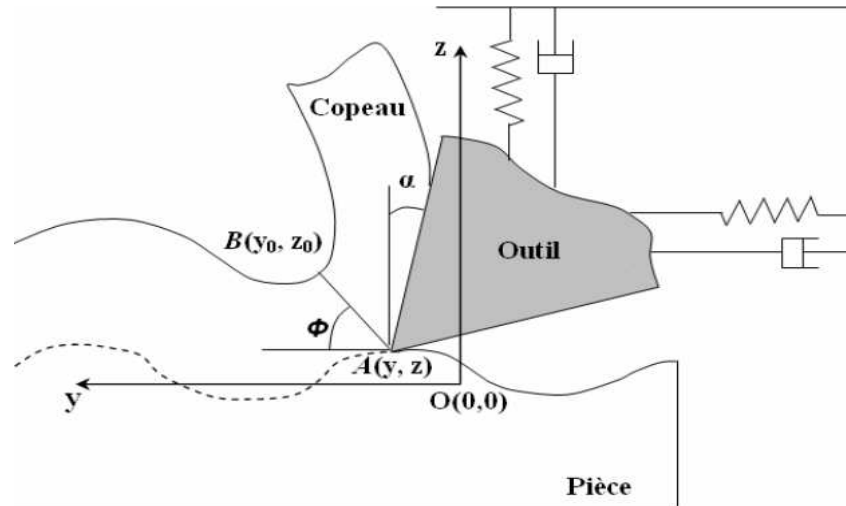


Figure II.12 : Modèle bidimensionnel de Wu et Liu du processus dynamique de coupe

Ils proposent un modèle original, prenant en compte la variation du coefficient de frottement moyen μ à l'interface outil-copeau sous la forme :

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-qV_c} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

μ_0 = Frottement extrapolé à vitesse nulle.

Le coefficient q constant dépend du couple outil-matière, V_c est la vitesse relative du copeau par rapport à l'outil. Donc, V_c varie lors des mouvements vibratoires de l'outil et lors des oscillations de la bande de cisaillement.

Wu et Liu donnent une expression approchée sous la forme :

$$V_c \cos \alpha = \left(V + \frac{\dot{y} - \dot{y}_0}{2} \right) \tan(\phi) - \left(\frac{\dot{z} - \dot{z}_0}{2} \right) \quad (\text{II.18})$$

• **Modèle de Lin et Weng** : Lin et Weng proposent pour le système d'usinage un modèle masse-ressort-amortisseur à deux degrés de liberté. Dans la configuration utilisée, la raideur du système d'usinage dans la direction de la vitesse de coupe est plus importante que perpendiculairement à la surface usinée. Les efforts de frottement et de cisaillement ont tendance à amortir les vibrations du système d'usinage dans la direction de la vitesse de coupe. [33].

La variation de l'angle de cisailement est engendrée par les vibrations de l'outil par rapport à la pièce selon deux configurations représentées dans la figure II.13.

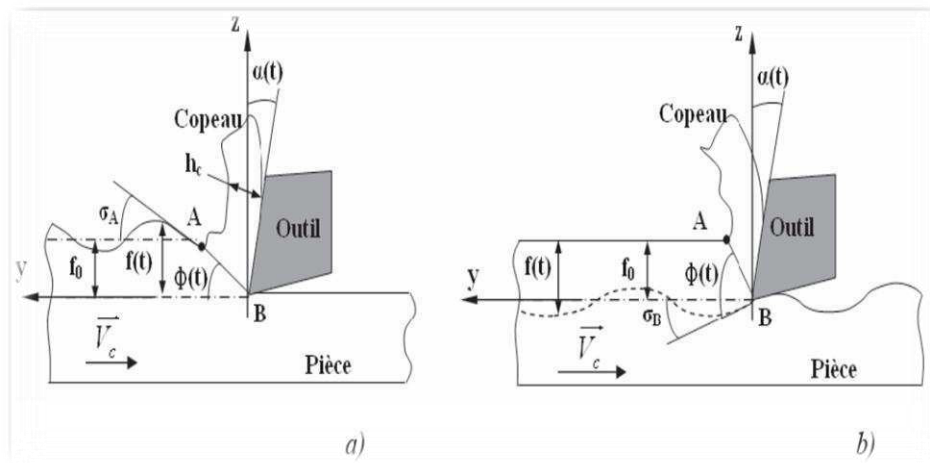


Figure II.13 : Variation de l'angle de cisailement

a) Effets des ondulations de la surface usinée, b) Effets des vibrations de l'outil de coupe/pièce.

Le modèle analytique de la coupe dynamique proposé est développé pour une formation continue de copeau dans le cas de la coupe orthogonale en tenant compte des variations de l'angle de cisaillement en fonction des inclinaisons de la surface usinée et de la surface générée.

• **Modèle de Tarng, Young et Lee** : Ces auteurs proposent une modélisation dynamique basée sur l'interaction dynamique entre la formation de copeau et le comportement structural de la machine, en intégrant le principe des ondulations de la surface usinée à la passe précédente. [34].

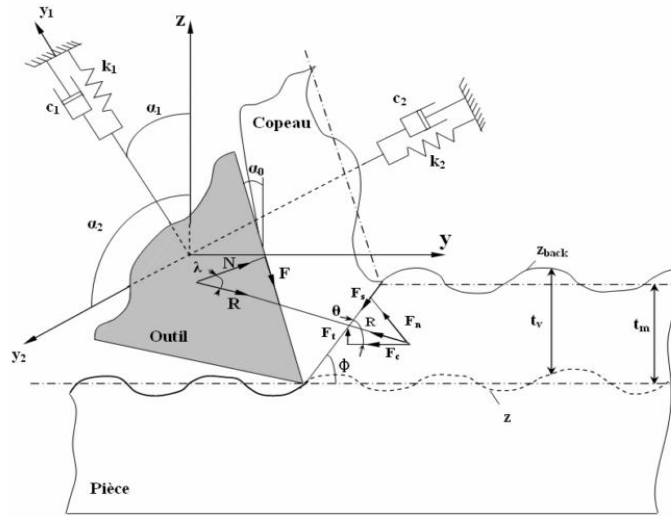


Figure II.14 : Modèle dynamique de coupe orthogonale.

Les équations du mouvement sont :

$$m_1 \ddot{y}_1 + c_1 \dot{y}_1 + k_1 y_1 = F_1 = F_c \sin(\alpha_1) + F_t \cos(\alpha_1) \quad (\text{II.19})$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_2 \dot{y}_2 + k_2 y_2 = F_2 = F_c \sin(\alpha_2) + F_t \cos(\alpha_2) \quad (\text{II.20})$$

Sont représentés sur les directions y_1, y_2 les masses équivalentes m_1 et m_2 , les coefficients d'amortissement c_1 et c_2 et les raideurs k_1, k_2 .

L'épaisseur de copeau (t_1) est exprimée en fonction de l'épaisseur nominale (t_m) et de l'épaisseur variable (t_v).

$$t_1 = t_m + t_v = t_m + (y_{back} - y) \quad (\text{II.21})$$

y_{back} représente l'ondulation de la surface générée à la passe précédente et y l'ondulation de la surface réalisée lors de la passe en cours :

Avec :

$$y = x_1 \cos(\alpha_1) + x_2 \cos(\alpha_2) \quad (\text{II.22})$$

Les auteurs expriment ensuite selon les axes y_1, y_2 les forces de coupe F_1 et F_2 :

$$F_1 = F_y \sin(\alpha_1) + F_z \cos(\alpha_1) \quad (\text{II.23})$$

$$F_2 = F_y \sin(\alpha_2) + F_z \cos(\alpha_2) \quad (\text{II.24})$$

• **Modèle de Segreti** : Il modélise les vibrations de l'outil en interaction avec le processus de formation du copeau, en ce plaçant dans le cas où la pièce ne vibre pas. L'auteur s'intéresse aux oscillations de l'outil suivant les deux directions Oy et Oz, la direction de coupe et la direction d'avance. [35].

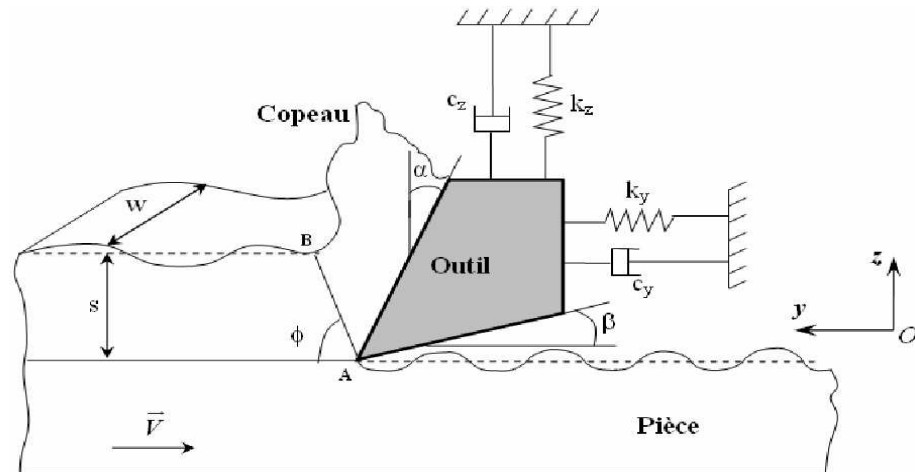


Figure II.15 : Système dynamique de coupe bidimensionnel

Le mouvement de l'outil est exprimé par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{aligned}
 m_y \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y &= F_y + f_y \\
 m_z \ddot{z} + c_z \dot{z} + k_z z &= F_z + f_z
 \end{aligned}
 \tag{II.25}$$

Avec :

m_y, c_y, k_y, m_z, c_z et k_z = Paramètres dynamiques du système outil/porte-outils.

F_y et F_z sont respectivement l'effort de coupe et d'effort d'avance exercés sur l'outil, et, f_y et f_z sont les composantes selon Oy et selon Oz de la force de talonnement.

Le système bidimensionnel est ensuite résolu comme un système à un seul degré de liberté, dans la direction d'avance, en faisant les hypothèses suivantes : l'épaisseur du copeau est considérée égale à l'avance (s), l'outil est parfaitement tranchant sans prendre en compte le rayon d'arête, qui en réalité existe.

• **Modélisation tridimensionnelle :** Dès les premières tentatives de recherche pour proposer des modélisations des procédés de mise en forme par enlèvement de matière, une schématisation telle que la coupe orthogonale a été adoptée de façon à simplifier les modèles analytiques.

Dans la réalité, le cas le plus général de la mise en forme par enlèvement de matière est la coupe tridimensionnelle. [36].

L'outil est en contact avec la matière suivant trois plans distincts. Un premier plan est défini par la face de coupe, tandis que les deux suivants sont définis par les faces de dépouille principale et secondaire. Nous ne pouvons plus nous placer dans le cas des déformations planes à moins de considérer l'avance comme quantité négligeable par rapport à la profondeur de passe et de négliger le phénomène de dilatation suivant la direction de la profondeur de passe.

En revanche, les déformations du copeau et de la pièce impliquent que des actions soient aussi transmises à l'outil depuis les faces de dépouille et non plus seulement à partir de la face de coupe. Le cas général de l'usinage impose aussi la présence de rayons de bec, d'acuité ou d'arête.

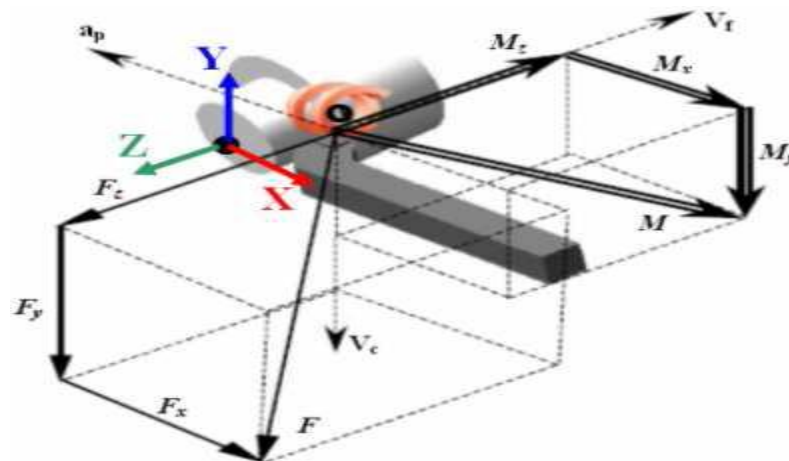


Figure II.16 : Coupe tridimensionnelle

La modélisation tridimensionnelle dynamique de la coupe a commencé par le traitement de la coupe oblique avec une seule arête coupante. Les problèmes de calcul proviennent du fait que les données du problème (géométrie de l'outil, paramètres d'usinage) ne suffisent pas pour prédire la géométrie de la déformation, en particulier la direction que suit le copeau.

CHAPITRE III

Application des lobes de stabilité

CHAPITRE III : Application des lobes de stabilité

III.1/ INTRODUCTION :

Lors de l'usinage, le rôle de la stabilité d'une machine-outil est important du fait que la possibilité d'accomplir l'enlèvement de matière dépend des domaines favorables :

- des conditions opératoires : vitesses de rotation de la pièce et de déplacement de l'outil, profondeur de passe,
- de puissance,
- de précision,
- d'état de surface pour la pièce usinée.

Aussi, et lors de l'usinage, les vibrations du système pièce-outil de coupe influent sur l'état de la surface de la pièce à usiner. Ainsi, une vibration importante a un effet négatif sur la productivité et sur la rentabilité :

- Baisse de la durée de vie de l'outil,
- Usure prématurée de certains éléments de la broche comme les roulements et paliers,
- Etc,...



Figure III.1 : Possibilité de vibration dans un tour

La théorie des lobes de stabilité permet en usinage de déterminer une profondeur pour une vitesse de rotation désignée. Le but est d'éviter l'instabilité. Celle-ci apparaît après quelques opérations d'usinage.

L'utilisation de cette théorie est très adaptée lors du procédé de tournage du fait que les efforts de coupe sont constants en fonction du temps.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations relatives à notre modèle des lobes de stabilité. Tous les programmes ont été réalisés et simulés avec le logiciel Matlab. Ce démonstrateur permet de valider le modèle et les algorithmes que nous avons employés.

Nous avons, pour chaque paramètre (masse, raideur, amortissement, conditions de coupe) fait varier leurs niveaux dans une plage de valeurs prédéfinies en vue de connaître l'évolution de la stabilité en tournage.

La forme des résultats sont présentés sous forme de graphiques (figure III.8) liant les vitesses de rotation de la pièce (tr/min) et la profondeur de passe (mm).

III.2.1/ HISTORIQUE :

Les premières recherches sur les causes des vibrations régénératives en usinage datent de 1946 par Arnold. Par la suite Tobias en 1958 et en 1965, Tlustý et Polatek en 1963 ont considéré les vibrations dues à l'interaction dynamique entre l'outil et la pièce usinée et l'influence de la passe précédente. Cette notion de régénération a été utilisée pour schématiser le processus à l'aide de la théorie analytique des boucles fermées. Ainsi Merrit, en 1965 a proposé un critère de stabilité graphique. Il apparaît alors la notion de lobes de stabilité. Il permet de visualiser de manière graphique les zones où l'usinage est stable en fonction des paramètres utilisés : [37]. [38]. [39]. [40]. [41].

- profondeur de passe,
- vitesse de rotation,
- Etc....

Dans un premier temps, les études menées sur le sujet concernaient la coupe ininterrompue. Le système outil broche et pièce est modélisé par un système masse ressort. Le principe de cette modélisation analytique sera expliqué sur le modèle du tournage.

III.2.2/ MODELE UTILISE :

Prenons l'exemple suivant : Opération de dressage du procédé de tournage.



Figure III.2 : Opération de dressage (tournage)

Prenons un exemple où l'outil est considéré rigide et la pièce flexible. La pièce est modélisée comme un système dynamique linéaire à un degré de liberté dans la direction de l'avance comme le montre la figure III.3 ci-dessous :

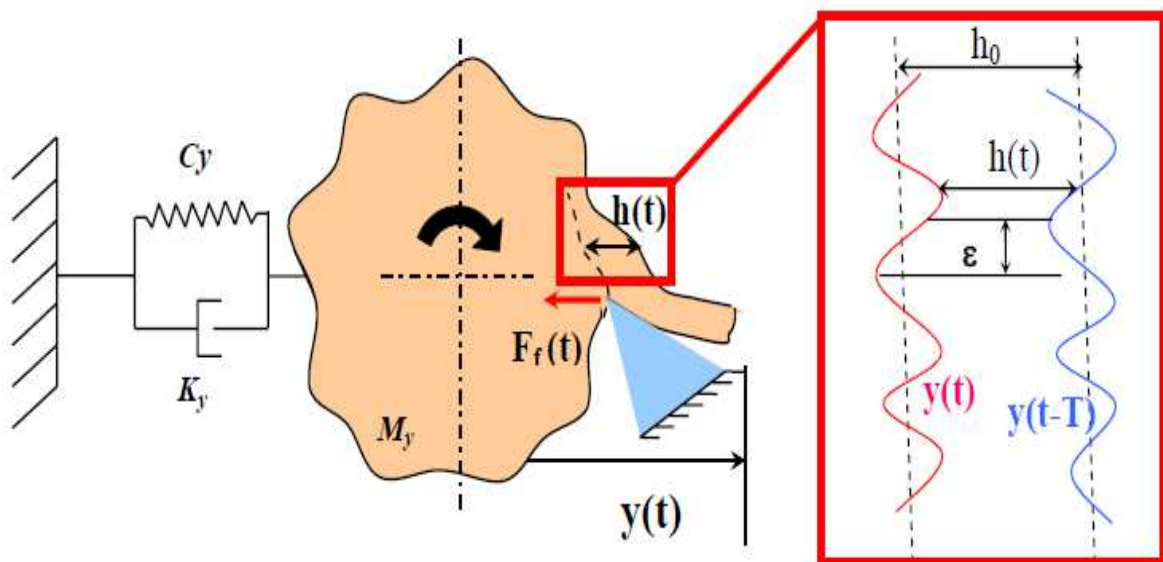


Figure III.3 : Schématisation du procédé de tournage

Avec :

$F_f(t)$: effort d'avance

h_0 : épaisseur du copeau non déformé

$h(t)$: épaisseur de copeau instantanée

$y(t)$: vibration relative outil/pièce

ε : décalage de phase des vibration d'un tour à l'autre, $0 < \varepsilon < 2\pi$

n : nombre d'ondulations entière entre chaque tour

N : vitesse de rotation de la pièce

Sur cette figure, $F_f(t)$ présente l'effort d'avance de l'outil dans la matière. Dans le cas d'un système à une dimension, seul l'effort colinéaire au degré de liberté est considéré, car c'est lui qui génère l'énergie reçue par le système et donc provoque les vibrations auto entretenues. Cet effort dépend de l'épaisseur de copeau réelle $h(t)$ à l'instant t comme illustre la figure III.4, qui est elle-même fonction de l'épaisseur de copeau non déformé h_0 , de la vibration relative entre l'outil et la pièce à l'instant t $y(t)$ et de cette vibration au tour précédent $y(t-T)$.

Les vibrations auto entretenues apparaissent dès que l'épaisseur de copeau instantanée $h(t)$ varie au court du temps. Ce phénomène se produit lorsqu'il y a un déphasage ε entre deux tours consécutifs de l'outil.

La figure III.4 représente les différents cas de figures que l'on peut rencontrer.

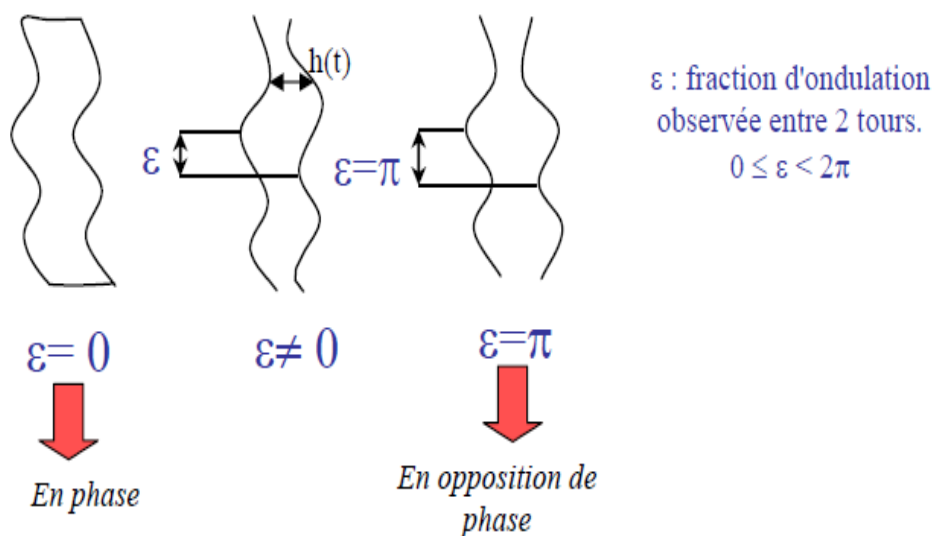


Figure III.4: Schématisation du déphasage en tournage

III.3/ MISE EN EQUATION :

Le but de cette partie est de déterminer les zones stables et instables en fonction des paramètres de coupe utilisés. Comme il a été cité auparavant, le système est modélisé par un système masse/ressort.

Ces caractéristiques sont m , c , k . ces paramètres représentent respectivement la masse, l'amortissement, et la raideur.

L'équation de la dynamique régissant ce système est :

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_f(t) \quad (\text{III.1})$$

Tel que : $F_f(t) = K_f b h(t)$

Avec :

$F_f(t)$: Effort d'avance,

b : Largeur de copeau,

$F_f(t)$: Effort de coupe linéaire,

$h(t)$: Epaisseur instantanée du copeau,

D'après la figure III.2,

$$h(t) = h_0 + [y(t - T) - y(t)] \quad (\text{III.2})$$

Donc :

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = K_f b (h_0 + [y(t - T) - y(t)]) \quad (\text{III.3})$$

III.4/ FONCTION DE TRANSFERT :

Appliquant le domaine de Laplace :

$$ms^2y(s) + csy(s) + ky(s) = k_f b [h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s)]y(s)[ms^2 + cs + k] = F_f(s) \quad (III.4)$$

Cette équation peut se traduire par le diagramme en boucle fermée. Celui-ci est représenté dans la figure III.5 suivante :

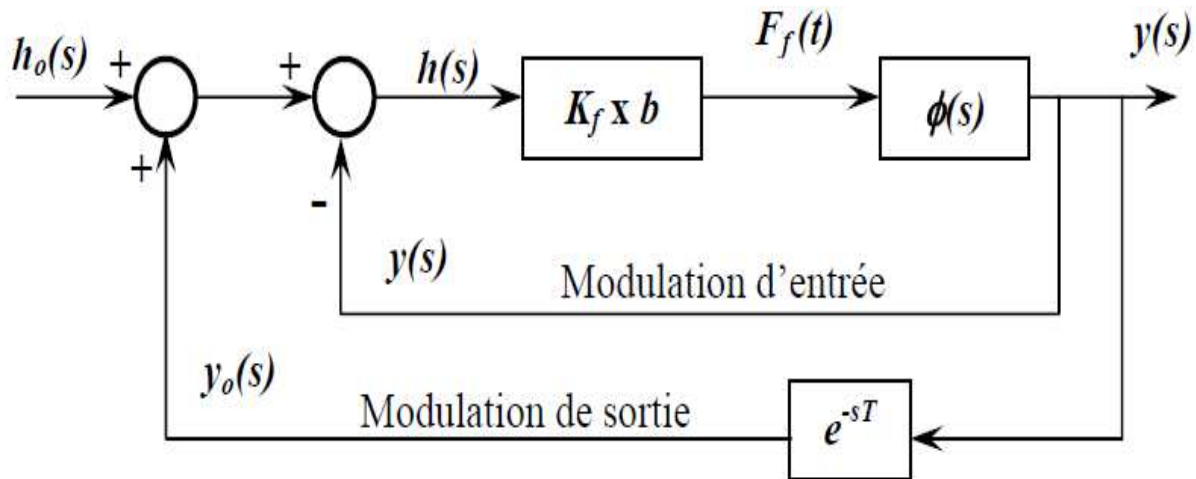


Figure III.5 : Diagramme en boucle fermée

Tel que :

$$F_f(s) = K_f b h(s) \quad (III.5)$$

$$\frac{y(s)}{F_f(s)} = \frac{1}{[ms^2 + cs + k]} = \phi(s)$$

$$\Leftrightarrow y(s) = F_f(s) \cdot \phi(s)$$

Les données du système à un degré de liberté (1ddl) sont :

- Pulsation propre du système $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$
- Le coefficient d'amortissement $\xi = \frac{c}{2\sqrt{k.m}}$

$$\phi(s) = \frac{1}{[ms^2 + cs + k]} = \frac{1/m}{s^2 + \frac{c}{m}s + \frac{k}{m}}$$

On multiplie par $\frac{k}{k}$;

La fonction de transfert du système à 1 degré de liberté $\emptyset(s)$ est donc :

$$\emptyset(s) = \frac{\omega_n^2}{k[s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2]} \tag{III.6}$$

La figure III.6 représente le tracé de la fonction de transfert.

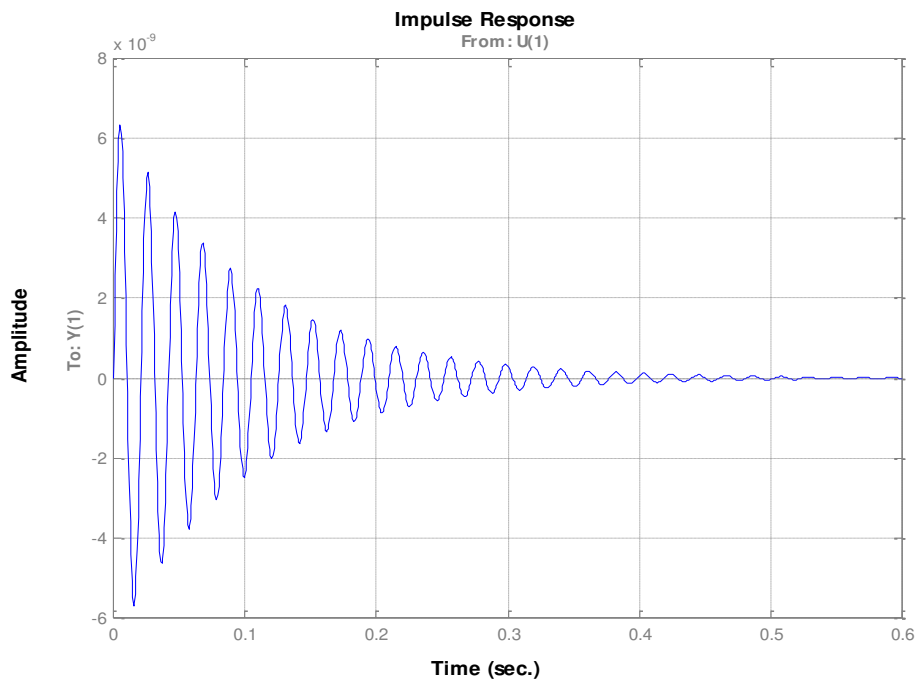


Figure III.6 : Tracé de la fonction de transfert

III.5/ ETUDE DE LA STABILITE DE SYSTEME

La recherche de la stabilité du système s’effectue par l’étude du rapport entre l’épaisseur du copeau non déformée h_0 et l’épaisseur moyenne du copeau $h(s)$:

La détermination de $\frac{h(s)}{h_0}$:

$$h(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s) \tag{III.7}$$

Avec :

$$y(s) = F_f(s) \cdot \emptyset(s)$$

$$\text{Et } F_f(s) = K_f b h(s)$$

Donc :

$$h(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1).K_f b h(s) \phi(s)$$

$$\Leftrightarrow h_0 = h(s) - (e^{-sT} - 1).K_f b h(s) \phi(s)$$

$$\Leftrightarrow h_0 = h(s). [1 + (1 - e^{-sT}).K_f b \phi(s)]$$

$$\Leftrightarrow \frac{h(s)}{h_0} = \frac{1}{[1 + (1 - e^{-sT}).K_f b \phi(s)]}$$

Considérons $s = \sigma + j\omega_c$, une racine de l'équation caractéristique associée à l'équation ci-dessus.

Si σ est positif la transformée inverse de Laplace de la racine comporte un terme en $e^{+\sigma T}$. L'amplitude des vibrations tend vers l'infini, le système sera donc instable.

Au contraire, si σ est négatif, la racine avec le terme $e^{-|\sigma|T}$ converge, le système est considéré comme stable.

Pour obtenir la frontière de la stabilité, il faut donc se placer à $\sigma = 0$.

La résolution de l'équation caractéristique en ce point permet d'obtenir b_{lim} la largeur de coupe limite.

$$1 + (1 - e^{-j\omega_c T})K_f b_{lim} \phi(s) = 0 \tag{III.8}$$

Soit $\phi(j\omega_c) = G + jH$, en développant l'équation eq.II-8, l'équation devient :

$$(1 + k_f b_{lim} [G(1 - \cos \omega_c T) - H \sin \omega_c T]) + j(k_f b_{lim} [G \sin \omega_c T - H(1 - \cos \omega_c T)]) = 0$$

Pour satisfaire cette relation, il faut que la partie réelle et la partie imaginaire soient nulles.

Annulation de la partie imaginaire :

$$(K_f b_{lim} [G \sin \omega_c T - H(1 - \cos \omega_c)]) = 0 \quad (III.9)$$

Cette équation permet d'obtenir le déphasage de la fonction de transfert liée à la structure du fait que :

$$\tan \Psi = \frac{H(\omega_c)}{G(\omega_c)}$$

$$\text{Or } \frac{H(\omega_c)}{G(\omega_c)} = \frac{\sin \omega_c T}{\cos \omega_c - 1},$$

Après transformation, $\tan \Psi$ s'écrit:

$$\tan \Psi = \tan \left(\frac{\omega_c T}{2} - \frac{3\pi}{2} \right) \text{ soit } \omega_c T = 3\pi + 2\Psi + 2k\pi$$

Le but est de relier la fréquence de vibration régénérative ou "chatter" aux paramètres de coupe notamment la vitesse de rotation et la profondeur de passe afin de tracer les lobes de stabilité.

L'équation III.9 et $T = \frac{60}{N}$ permet d'obtenir la relation concernant la vitesse de rotation :

$$N(\omega_c) = \frac{60 \omega_c}{2 k\pi + 2\Psi(\omega_c) + 3\pi} \quad (III.10)$$

Pour trouver la relation faisant intervenir la profondeur de passe limite, il faut résoudre la deuxième partie de l'équation III-10 : annuler la partie réelle.

Annulation de la partie réelle :

$$1 + K_f b_{lim} [G(1 - \cos \omega_c T) - H \sin \omega_c T] = 0 \quad (III.11)$$

Les équations III-10 et III-13 permettent de déduire :

$$b_{i,lim} = \frac{-1}{2 k_f G(\omega_c)}$$

b_{lim} correspond à une valeur physique positive.

Cette égalité n'est valable que pour des valeurs de $G(\omega_c)$ négatives.

$$G\omega_c = \frac{-1}{4k\omega_c(1+\omega_c T)} \quad (\text{III.12})$$

III.6/ Méthodologie de construction et Algorithme du tracé des lobes de stabilité :

Les expressions de la vitesse de rotation et de la profondeur de passe limite en fonction de la fréquence de "chatter" permettent de tracer les lobes de stabilité.

Ce graphique permet de délimiter les zones stables et instables de la coupe en fonction de la vitesse de rotation et de la profondeur de passe. Il permet par conséquent d'optimiser les conditions de coupe pour un système outil/pièce donné.

En effet, le changement d'un des paramètres dynamiques de l'équation III.1, nécessite de rééditer tout le calcul précédemment expliqué.

Pour tracer ces lobes de stabilité, l'algorithme est le suivant

1. Calcul de $b_{i,\text{lim}}=a_{p,\text{lim}}$ correspondant à ω_{ci} à l'aide de l'équation III.14,
2. Calcul du déphasage Ψ pour une fréquence ω_{ci} à l'aide de l'équation III.11,
3. Calcul des différentes vitesses de rotation N_{ik} en faisant varier $k = \{1,2,3, \dots, n\}$,
4. Réitération de l'opération avec une autre fréquence ω_{ci} .

(k représente le nombre d'ondulations complètes pendant un tour)

L'organigramme est le suivant :

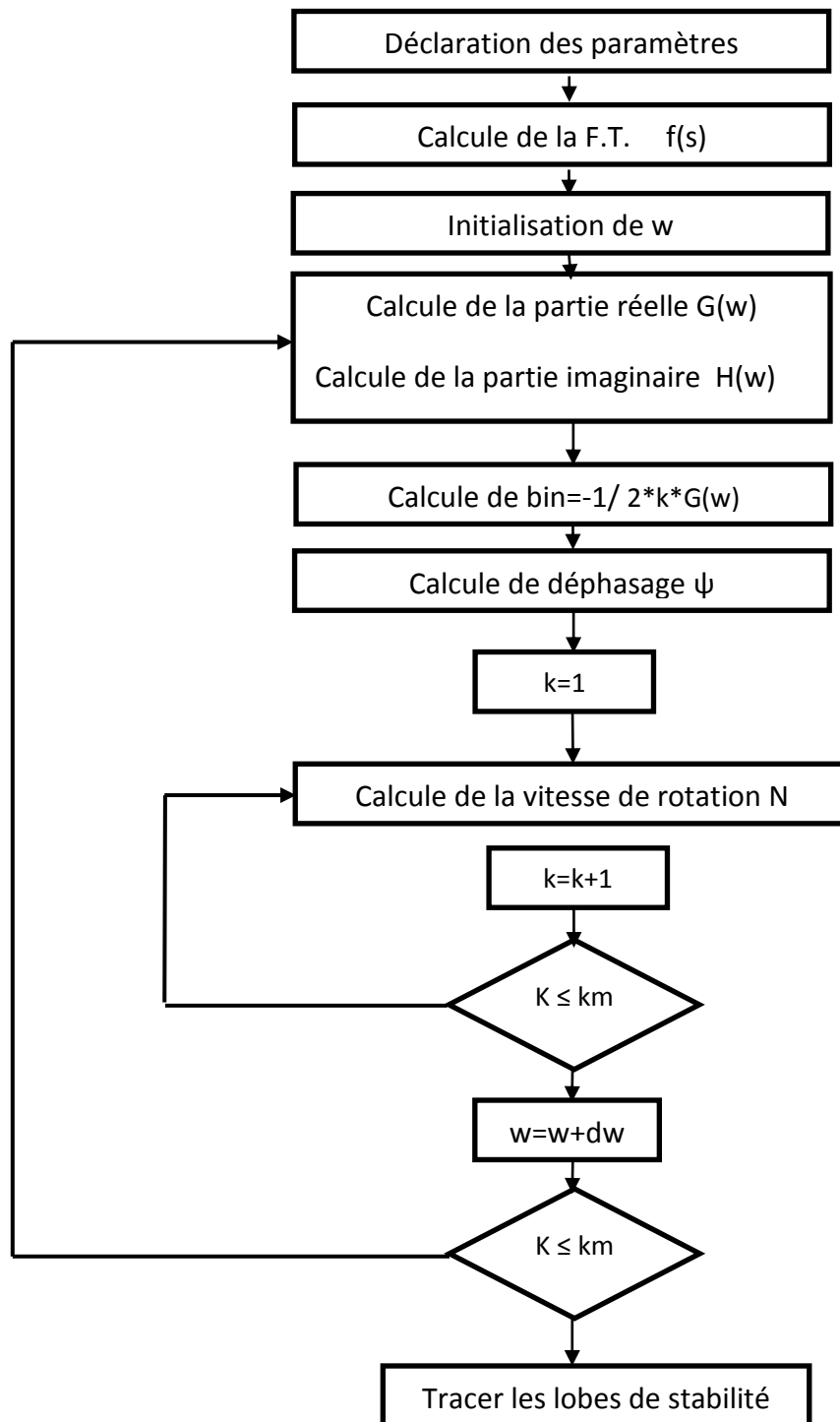


Figure III.7 : Organigramme utilisé

III.7/ Données de simulation

Les données de simulation :

- Masse $m = 2,2kg$
- Raideur dynamique $k = 2.6. 10^7 N/m$
- Coefficient d'amortissement dynamique $c = 1.2. 10^3 N.s/m$
- Taux d'amortissement $\xi = 0.05$
- Constante $K_f = 45. 10^9 MPa$

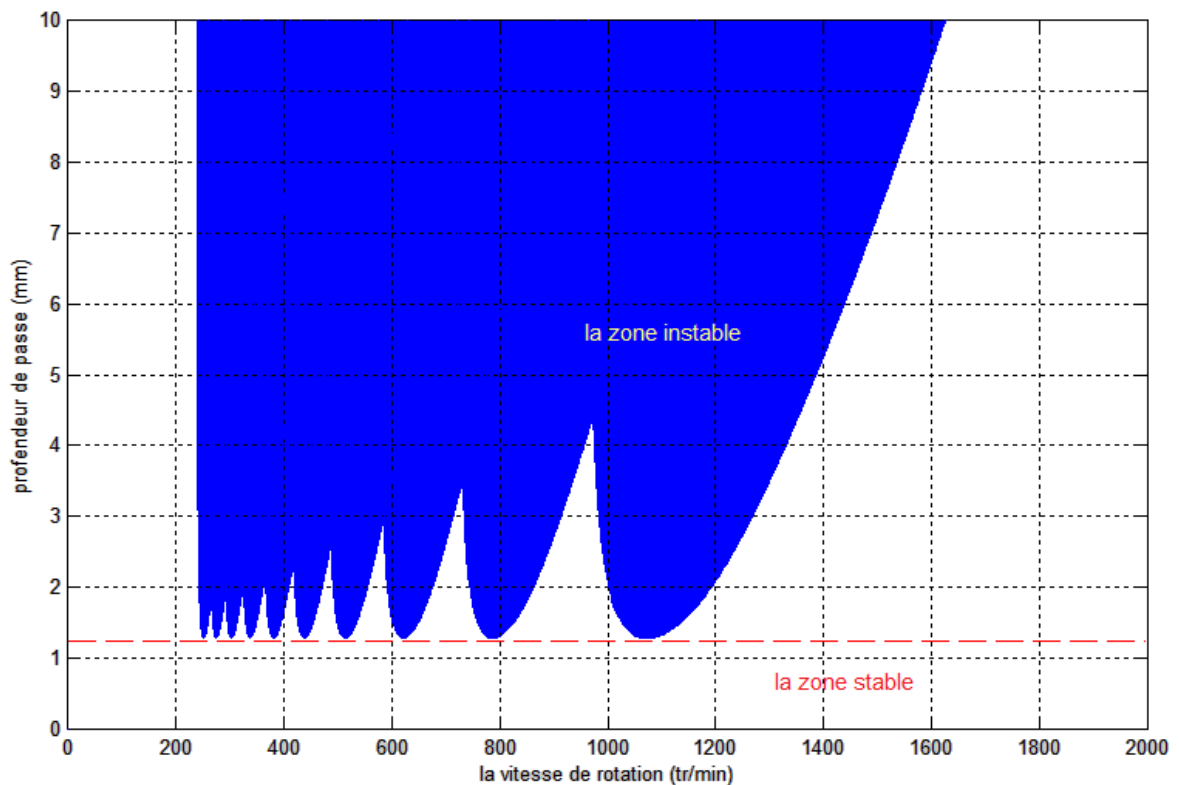


Figure III.8 : Tracé des lobes de stabilité

On constate de la figure III.7 que pour des vitesses inférieures à 250 tr/mn, on peut augmenter la profondeur de passe tout en restant toujours dans le domaine stable.

En atteignant une vitesse supérieure à 250 tr/min, notre système devient instable c'est à dire que les vibrations commencent à devenir importante. Aussi, l'apparition de ces vibrations (forcées) a pour conséquence une faible productivité et un mauvais état de surface de la pièce usinée.

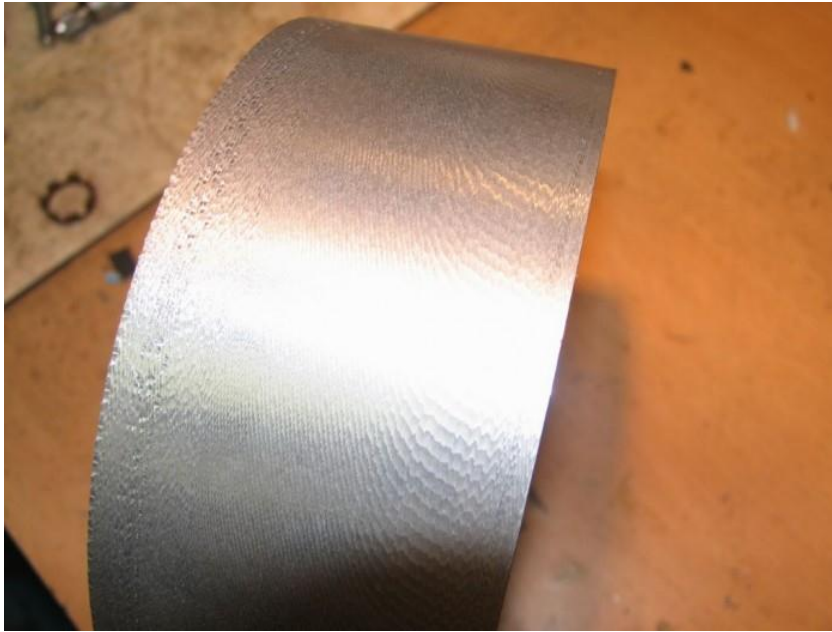


Figure III.9 : Pièce mal usinée

A travers ce chapitre, il nous a été permis de développer un modèle d'un procédé d'usinage pour déterminer les lobes de stabilité. On peut citer qu'ils existent plusieurs moyens d'étudier le système des vibrations. Aussi, il est à noter qu'ils diffèrent en fonction de l'opération d'usinage effectuée : ébauche ou finition.

La mise en équation du problème de la dynamique de la coupe peut conduire à plusieurs modèles. Le modèle analytique, qui a l'avantage d'être rapide en temps de calcul, peut être inefficace lorsque l'usinage devient complexe (exemple de la finition). En effet, lors des opérations de cet usinage, il se crée des discontinuités dans la coupe qui ne sont pas encore pris en compte.

Notre démarche et notre méthode permettent de tracer les lobes de stabilité permettant de repérer des zones de coupe stable en fonction de la profondeur de passe et de la vitesse de rotation.

CHAPITRE IV

Etat de surface et rugosité

Chapitre IV : Etat de surface et rugosité

IV.1/ INTRODUCTION :

Ce chapitre sera consacré à l'étude de l'état de surface et de la rugosité. Ayant pris connaissance au travers des chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de tournage, nous nous intéresserons à la simulation numérique de l'opération de dressage et l'interprétation et la discussion des résultats. La simulation numérique de notre exemple est difficile en raison de la présence de vibrations, de modifications thermiques (négligeables) ou encore de la présence de frottements.

L'usinage des pièces s'est déroulé au niveau de l'atelier d'usinage de notre département. La partie expérimentale concernant l'état de surface et la rugosité s'est déroulée au niveau de l'atelier d'usinage du Département de Mécanique de l'université Amar Telidji de Laghouat.

IV.2/ DEFINITION :

On appelle, état de surface, les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Elles sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profil mètres, qui relèvent le profil de la surface.

Un profil de surface est la courbe résultant de l'intersection de la surface réelle et d'un plan spécifié P. [42]. Ce profil est représenté dans la figure IV.1.

Ce plan est perpendiculaire à la surface de l'échantillon et orienté généralement perpendiculairement au sens des stries d'usinage. [43]. Un profil de surface, outre la forme nominale de la pièce, est composé de différents écarts géométriques, auxquels correspondent différents profils Celles-ci sont représentées dans la Tableau IV.1. [44].

Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques			
Ordre	Écarts géométriques	Croquis	Origines possibles
1	Défauts de planéité ; de rectitude ; de circularité ; de cylindricité, etc.	<p>PROFIL GEOMETRIQUE THEORIQUE</p> <p>ECART DE FORME</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut de bridage. • Flexion des éléments de la machine • Qualité du guidage des éléments coulissants. • Usure des organes. • Déformation de la pièce: <ul style="list-style-type: none"> - Pendant l'usinage, indépendamment du procédé. - Après l'usinage, dépendant du matériau (libérations des contraintes internes)
2	Ondulation : Irrégularités géométriques telle que la distance entre deux sommets d'irrégularités soit comprise entre 500 µm et 2 500 µm(1).	<p>0,5 < pas ≤ 2,5 mm</p> <p>ECART DE FORME</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrations basses fréquences: <ul style="list-style-type: none"> - de la pièce. - de l'outil. - des deux, dues aux flexions, au mauvais guidage et équilibrage des éléments de la machine, et également à l'insuffisance de l'installation de l'isolation passive et active.
3	Rugosité : Irrégularités géométriques telle que la distance entre deux pics de ces irrégularités soit compris entre 0 et 500 µm (1).	<p>0 < Pas ≤ 0,5 mm</p> <p>Ligne enveloppe supérieure</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Vibrations hautes fréquences (causes analogues à celles énumérées ci-dessus). • Installation de lubrification : <ul style="list-style-type: none"> - Lubrifiant : nature, qualité lubrifiante, action de refroidissement, stabilité dans le temps. - Mode d'arrosage. - Filtre : efficacité du système (entre autres fréquences de nettoyage). <ul style="list-style-type: none"> • Procédés par enlèvement de copeaux : STRIES, SILLONS dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil ; à l'avance par tour de la pièce ou de la meule, etc. • Qualité de la géométrie de l'outil. • Hétérogénéité, plasticité du matériau.
4	Arrachement : Marque d'outil, fente, piquûre,... (irrégularités aperiodiques)		
Profil Total		<p>Direction générale du profil</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ensemble des écarts de profil dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données

(1) Limites données pour l'automobile.

Tableau IV.1: Ordres de grandeur des irrégularités géométriques et leurs origines possibles

Comme le montre la figure IV.1, la représentation graphique de l'état de surface est toujours anamorphosée.

L'amplification verticale est généralement beaucoup plus importante que l'amplification horizontale.

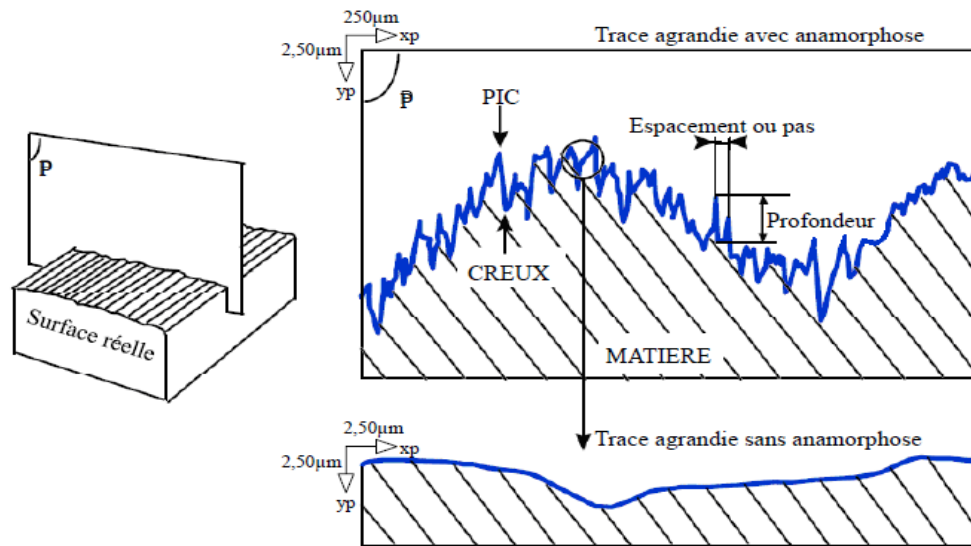


Figure IV.1 : Représentation des irrégularités sur un profil d'état de surface

La frontière entre la rugosité et l'ondulation est arbitraire, en pratique, le classement s'effectue à partir de la distance entre les pics.

Le tableau IV.2 représente le classement pratique des différents écarts géométriques.

Écart géométrique	Distance entre les pics (en μm)
Écart de forme (ordre 1)	Entre 2 500 à 8 000 et longueur de l'élément
Ondulation (ordre 2)	Entre 250 à 800 et 2 500 à 8 000
Rugosité (ordre 3 et 4)	Entre 2 et 250 à 800

Tableau IV.2 : Classement « pratique » des différents écarts géométriques [45]

Selon le classement des défauts de surface, les surfaces usinées ne sont jamais parfaites. Elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils de coupe, à la matière usinée, etc.

Sur la surface d'une pièce obtenue par usinage, on distingue quatre principaux types de défauts, d'ordre macro où microgéométrique :

1. Ecart de forme et de position,
2. Ondulations (défauts périodiques),
3. Signature du procédé d'élaboration : stries, sillons (défaut périodique ou pseudopériodique),
4. Défauts accidentels ; arrachements, piqûres,
5. Etc,....

Les autres défauts sont :

1. Structure cristalline,
2. Réseau cristallin.

IV.3/ LA RUGOSITE :

La rugosité comprend les irrégularités le plus souvent sensibles à l'angle comme par exemple, les traces d'outil d'une pièce usinée ou le « grain » d'une surface sablée ou revêtue.

Concernant les pièces mécaniques, elles sont généralement des irrégularités de pas inférieur à 500 μm , avec un ratio largeur/profondeur dans la plage 100/1 à 5/1.

La rugosité influe sur l'aptitude au frottement (particulièrement pendant la période de rodage), l'usure, l'adhésivité des revêtements, la résistance à la flexion et aux efforts alternés, à la corrosion, etc.

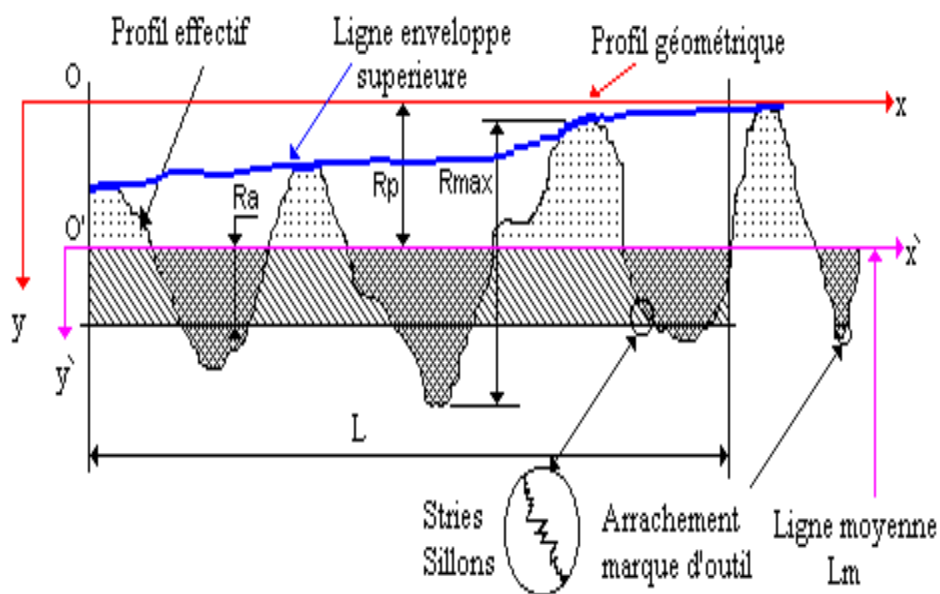


Figure IV.2 : La rugosité

Lors de l'usinage, les facteurs influant sur la rugosité sont l'avance de l'outil, son affûtage, les ondulations de sa face de coupe, le brise-copeaux, le rayon de pointe, la qualité et le filtrage du lubrifiant, le démontage de la meule en rectification, les vibrations de haute fréquence, etc.

Les Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface sont représentés dans la figure IV.3 suivante :

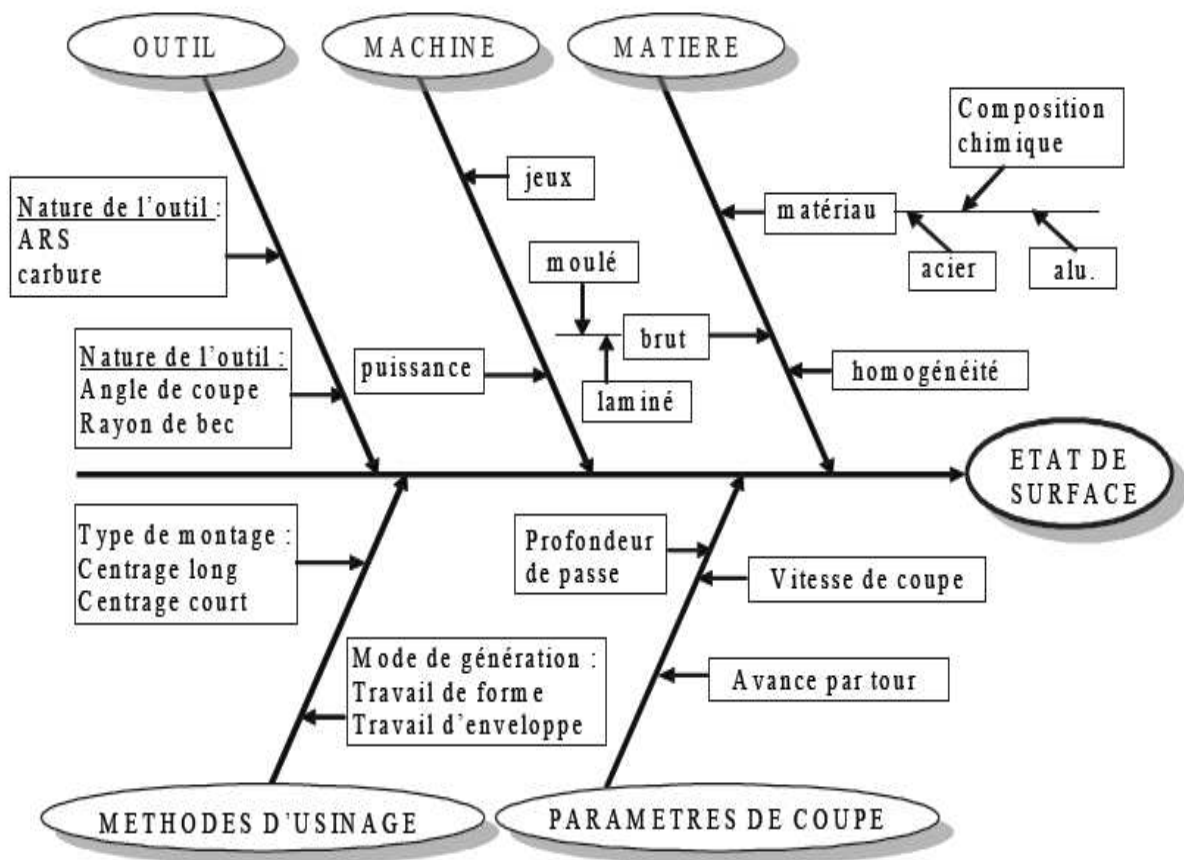


Figure IV.3 : Facteurs intervenant sur l'obtention de l'état de surface

IV.4/ DESCRIPTION ET MODELISATION :

Dans le cas d'une opération de dressage d'une surface sur un tour parallèle (figure III-2), le point générateur de l'outil décrit lors du déplacement une spirale dont le centre est sur l'axe de rotation de la broche.

Cette forme de spirale est due au mouvement rectiligne continu de l'outil de coupe d'une part, et la rotation de la pièce d'autre part.

La forme de la surface usinée dépend des caractéristiques géométriques de l'arrête tranchante de l'outil et de l'avance

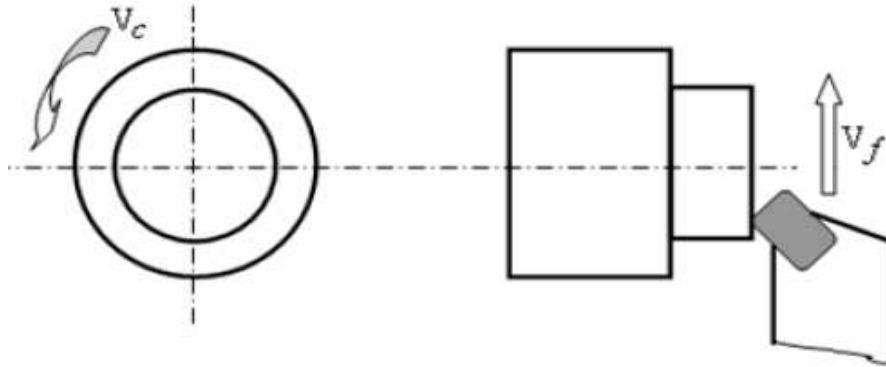


Figure IV.4 : Description de l'usinage de la surface.

Dans des conditions idéales, le profil de la rugosité est formé par la répétition du profil du point générateur de l'outil à des intervalles égale à l'avance par tour de la pièce.

Pendant l'opération de dressage, le point générateur de l'outil décrit une spirale dont le centre se trouve sur le centre de la pièce. Simultanément, l'outil se déplace relativement à la pièce avec un mouvement harmonique simple dû aux vibrations relatives existantes entre l'outil et la pièce.

Il est possible de reproduire la topographie de la surface par la somme des 2 équations suivantes :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - (f/2)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \left(\frac{(\mu + 2 \cdot P \cdot \pi) \cdot f}{2 \cdot \pi} + f/2 \right) \right)^2} \quad (\text{IV.1})$$

Et

$$Z_c(j) = Z_m \left(\frac{j \Delta \theta}{\omega} \right) + A \sin \left(\frac{2 \pi f z j \Delta \theta}{\omega} - \varphi \right) \text{ pour } j=0,1,2,\dots,N_t \quad (\text{IV.2})$$

On obtient :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - (f/2)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \left(\frac{(\mu + 2 \cdot P \cdot \pi) \cdot f}{2 \cdot \pi} + f/2 \right) \right)^2} + A_0 \sin \left(\frac{2 \pi f z j \Delta \theta}{\omega} - \varphi \right) \quad (\text{IV.3})$$

A_0 : l'amplitude des vibrations relatives entre l'outil et la pièce usinée,

f : la fréquence des vibrations,

φ : Déphasage,

$\Delta \theta$: Section radiale de la spirale,

μ : Angle varie avec un pas de $\Delta \theta$.

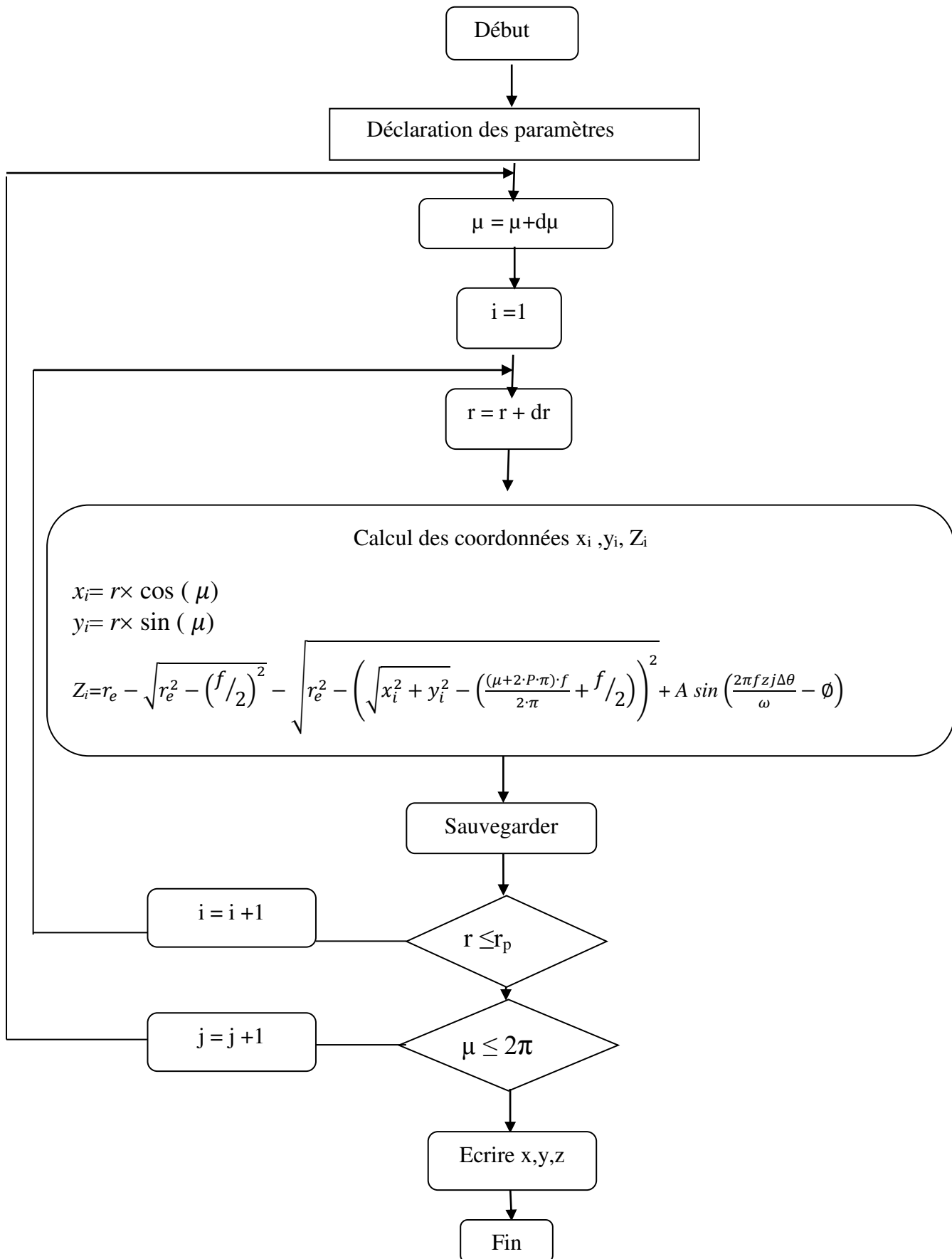


Figure IV.5 : Organigramme pour la génération du fichier des points X_i , Y_i , Z_i

Dans notre simulation, on s'intéresse à la rugosité théorique (défaut de troisième ordre), qui est influencée principalement par deux paramètres essentiels :

- La géométrie de l'outil de coupe,
- L'avance de l'outil.

La partie expérimentale s'est déroulée au niveau de l'atelier d'usinage du Département de Mécanique de l'université Amar Telidji de Laghouat.

Nous avons utilisé un rugosimètre de type MITUTOYO modèle SURFTEST 211, équipé d'un convertisseur électronique, d'un capteur à bras et d'une imprimante de profil de rugosité. Il est illustré dans la figure IV.6.

Ce dernier est constitué d'un palpeur en diamant qui se déplace linéairement sur la surface mesurée afin d'obtenir les caractéristiques géométriques, physiques et statiques (R_a , R_q , R_p , R_t) des surfaces usinées.



Figure IV.6 : Rugosimètre de type MITUTOYO modèle SURFTEST 211

L'application est représentée pour chaque cas (sans et avec vibration) ci-dessous :

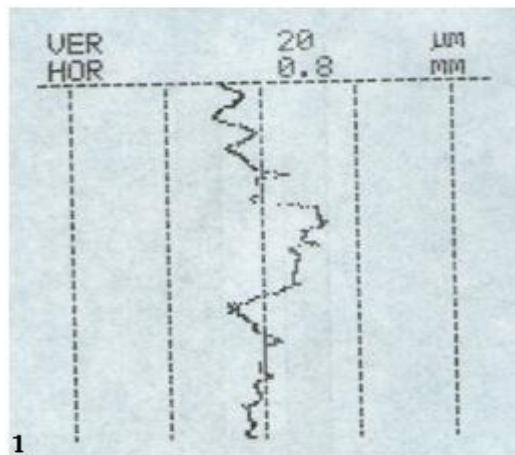


Figure IV.7 : Rugosité arithmétique N°01 (sans vibration)

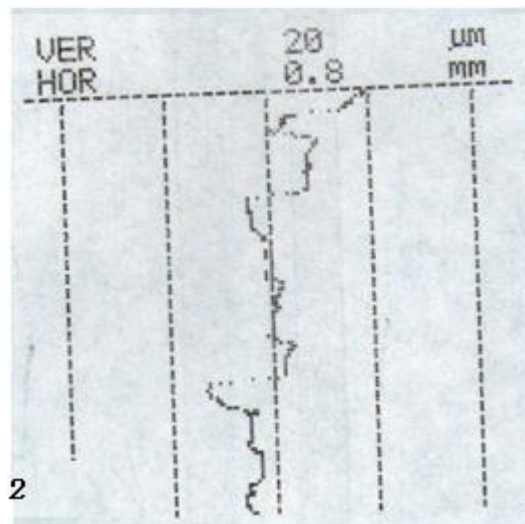


Figure IV.8 : Rugosité arithmétique N°02 (sans vibration)

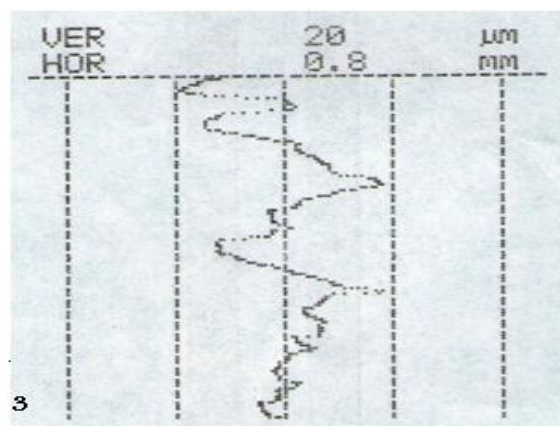
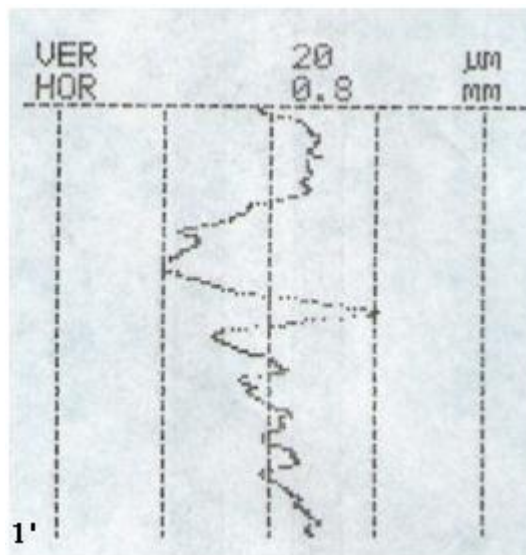
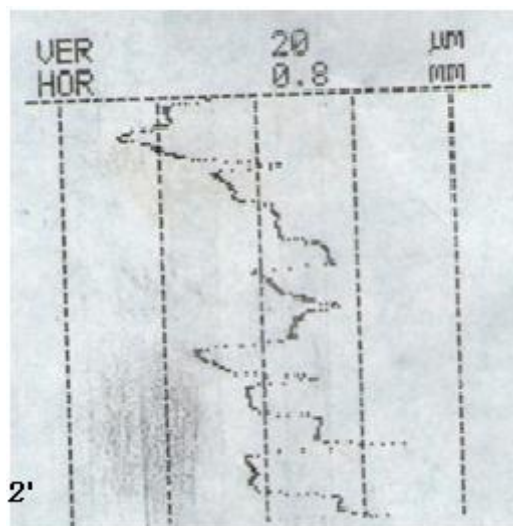


Figure IV.9 : Rugosité arithmétique N°03 (sans vibration)

Sans vibration :

Pièce N°	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse d'avance (tr/min)	Rayons de bec r_e (mm)	Critères de la rugosité (μm)			
				Ra	Rq	Rp	Rt
1	250	0.40	0.80	4,51	5,6	13,4	23,6
2	290	0.45	0.80	4,89	6,45	20,3	34
3	340	0.50	0.80	6,48	8,33	20,5	39,8

Tableau IV.3 : Critères de la rugosité**Figure IV.10 :** Rugosité arithmétique N°01 (avec vibration)**Figure IV.11 :** Rugosité arithmétique N°02 (avec vibration)

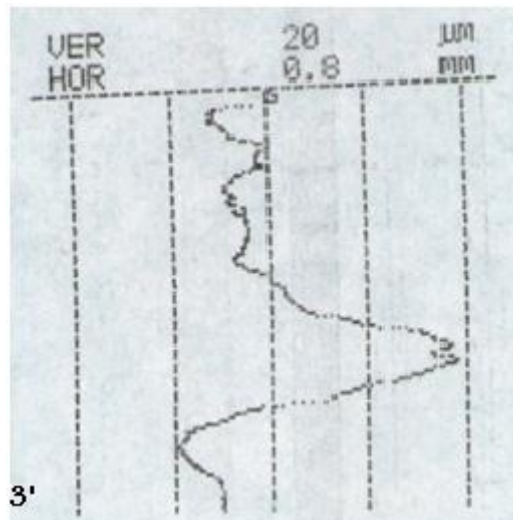


Figure IV.12 : Rugosité arithmétique N°03 (avec vibration)

Avec vibration :

Pièce N°	Vitesse de coupe (m/min)	Vitesse d'avance (tr/min)	Rayons de bec r_e (mm)	Critères de la rugosité(μm)			
				Ra	Rq	Rp	Rt
1	350	0.10	0.80	6,98	8,68	20,7	41,1
2	390	0.15	0.80	9.26	11,43	28,4	56,9
3	395	0.20	0.80	11,62	15,13	38,4	58,5

Tableau IV.4 : Critères de la rugosité

Les résultats obtenus sont déterminés à partir de la figure IV.7 à IV.12.

L'interprétation est faite à partir de l'équation IV.5 :

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (\text{IV.5})$$

Le graphe représente la rugosité arithmétique en fonction de la trajectoire du palper.

IV.5/ CHOIX DES AVANCES DE COUPE :

Comme il a été signalé auparavant, le facteur le plus important influant sur la rugosité théorique (défaut de troisième ordre) est l'avance.

Pour notre étude, nous avons choisi les valeurs suivantes :

- Sans vibration
 - 1- $f = 0.4$ mm/ tr,
 - 2- $f = 0.45$ mm/ tr,
 - 3- $f = 0.5$ mm/ tr.

- Avec vibration
 1. $f = 0.1$ mm/ tr,
 2. $f = 0.15$ mm/ tr,
 3. $f = 0.2$ mm/ tr.

Le choix de ces avances a été établi pour permettre une représentation fidèle du modèle mis au point.

Choix de l'outil :

Étant donné que le modèle développé dans le chapitre III est fonction entre autre du rayon de bec de l'outil qui influe directement sur la rugosité théorique, nous avons opté pour la valeur suivante qui permet de mieux apprécier la trace de l'empreinte de l'outil (spirale) :

- 1- $r_e = 0.8$ mm,

IV.6/ PRÉSENTATION DES SIMULATIONS :

IV.6.1/ SIMULATION SANS VIBRATION :

Le tableau suivant illustre les différentes simulations à réaliser sans prendre en compte les vibrations :

Simulation	Rayons de bec r_e (mm)	Avances f (mm/tr)
1	0.8	0.4
2	0.8	0.45
3	0.8	0.5

Tableau IV.5 : Simulations à effectuer (sans vibration)

Pour le rayon du bec 0.8, on fait varier 3 fois l'avance. Ainsi, et pour chacun de ces cas, on représente les simulations suivantes :

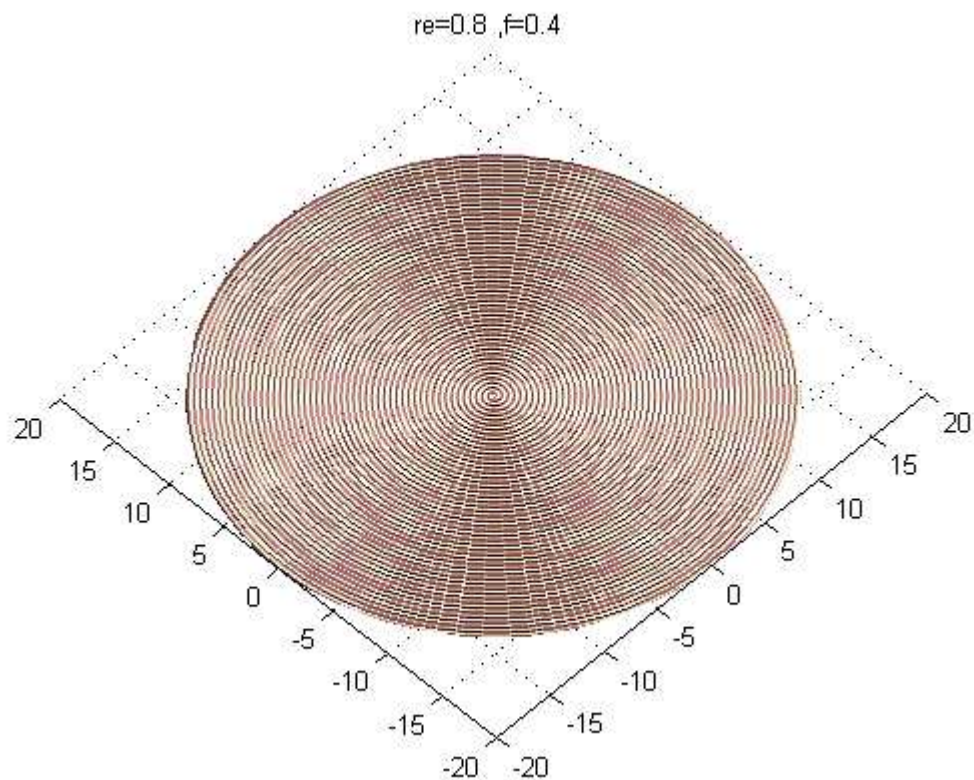


Figure IV.13 : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.4$ mm/tr, $re = 0.8$ mm

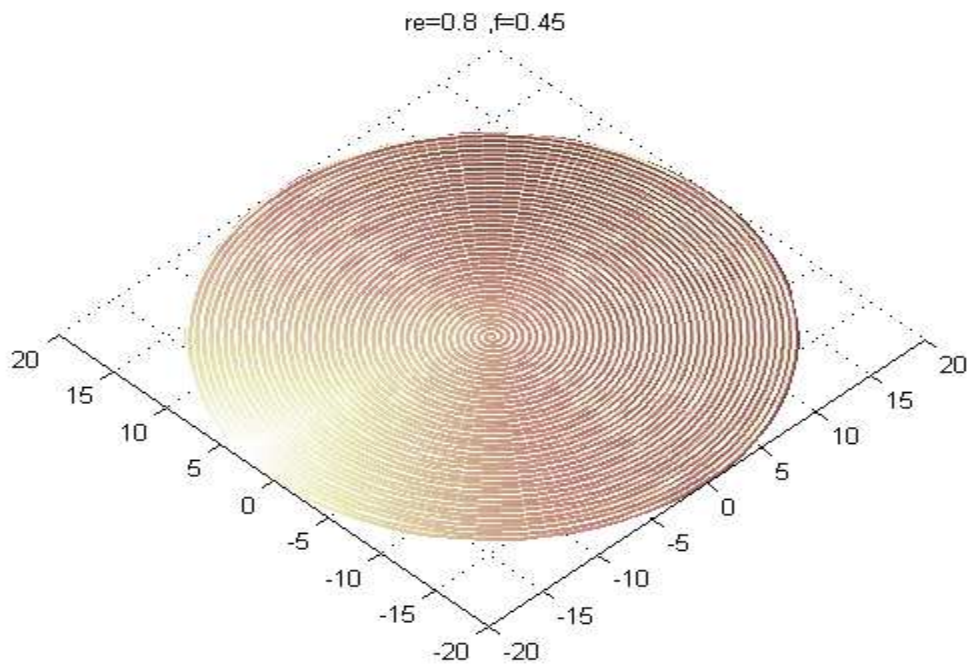


Figure IV.14 : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.45$ mm/tr, $re = 0.8$ mm

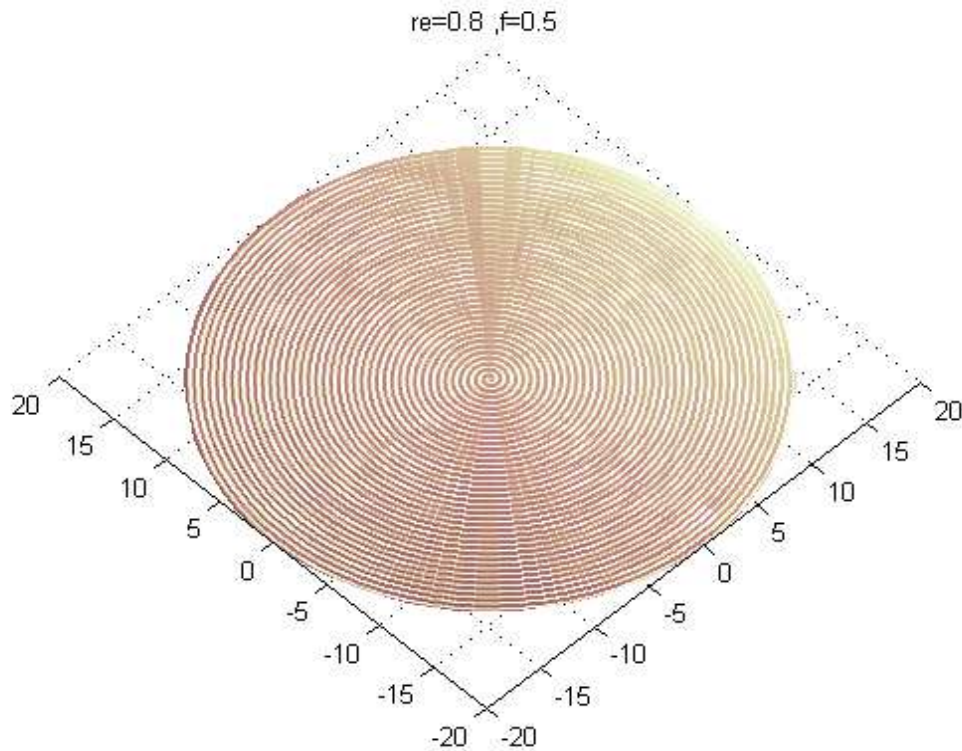


Figure IV.15 : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.5$ mm/tr, $re = 0.8$ mm

Discussion des résultats :

Ces figures représentent le déplacement de l'outil de coupe lors de l'opération de dressage.

On remarque que les figures ne se ressemblent pas à cause de changement de l'avance de l'outil.

On remarque que lorsque l'avance augmente, l'état de surface de la pièce usinée est représentée par une spirale décrite par le rayon du bec de l'outil coupant.

IV.6.2/ SIMULATIONS AVEC VIBRATION :

Simulation	Rayons de bec re (mm)	Avances f (mm/tr)
1	0.8	0.1
2	0.8	0.15
3	0.8	0.2

Tableau IV.6 : Simulations à effectuer (avec vibration)

De la même manière, et pour le même rayon du bec 0.8, on fait varier 3 fois l'avance.

Pour ces cas là, la vibration est prise en compte (non négligée).

Ainsi, et pour chacun de ces cas, on représente les simulations suivantes :

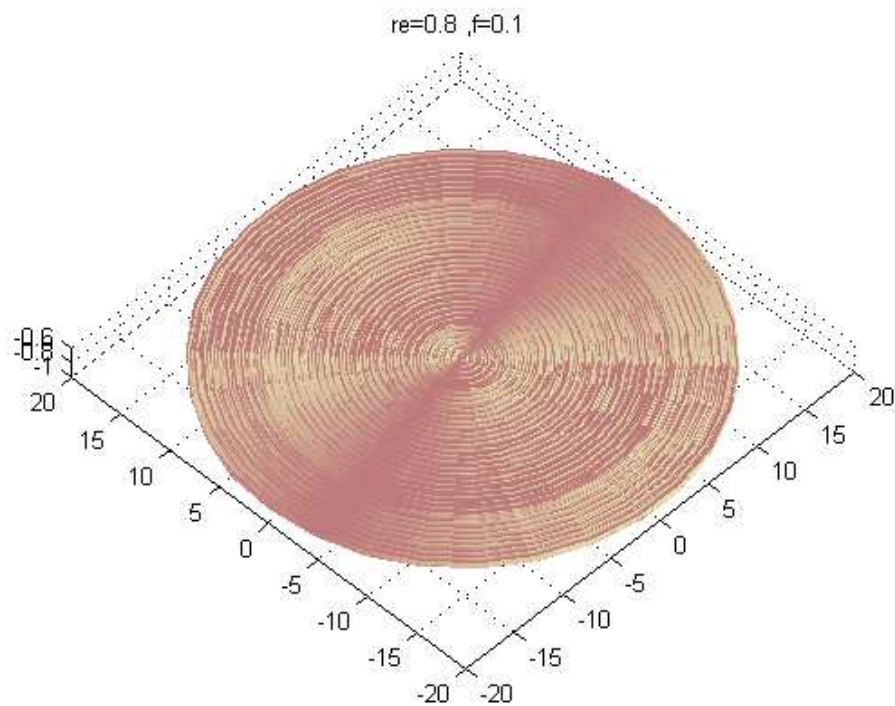


Figure IV.16 : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.1$ mm/tr, $re = 0.8$ mm

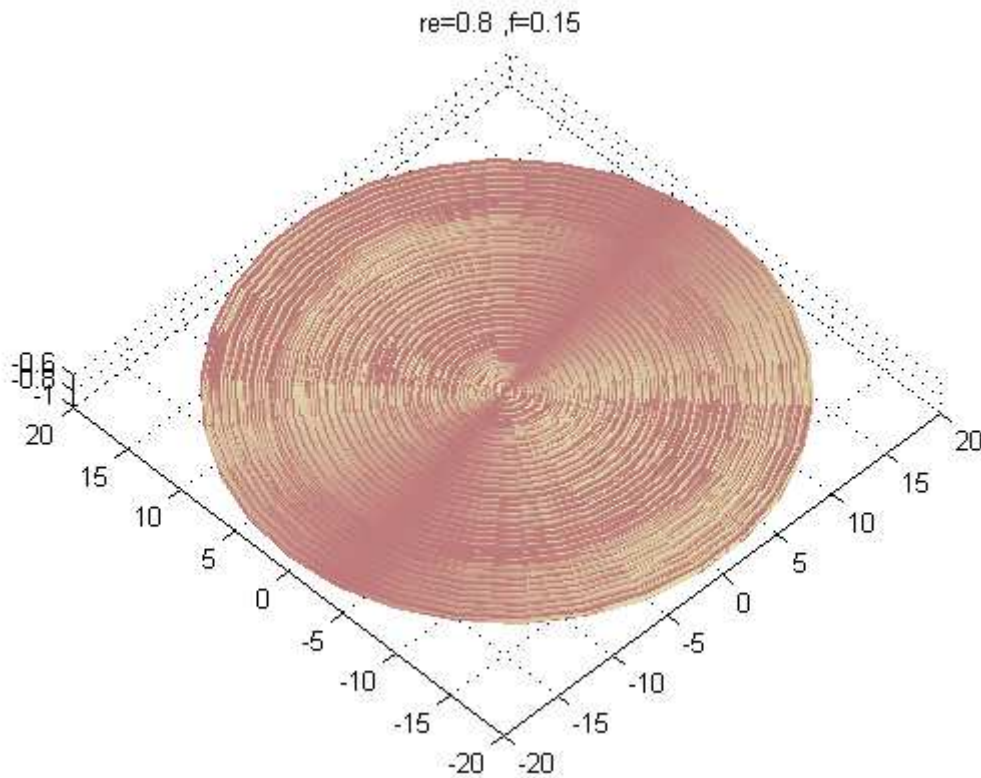


Figure IV.17 : Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.15$ mm/tr, $re = 0.8$ mm

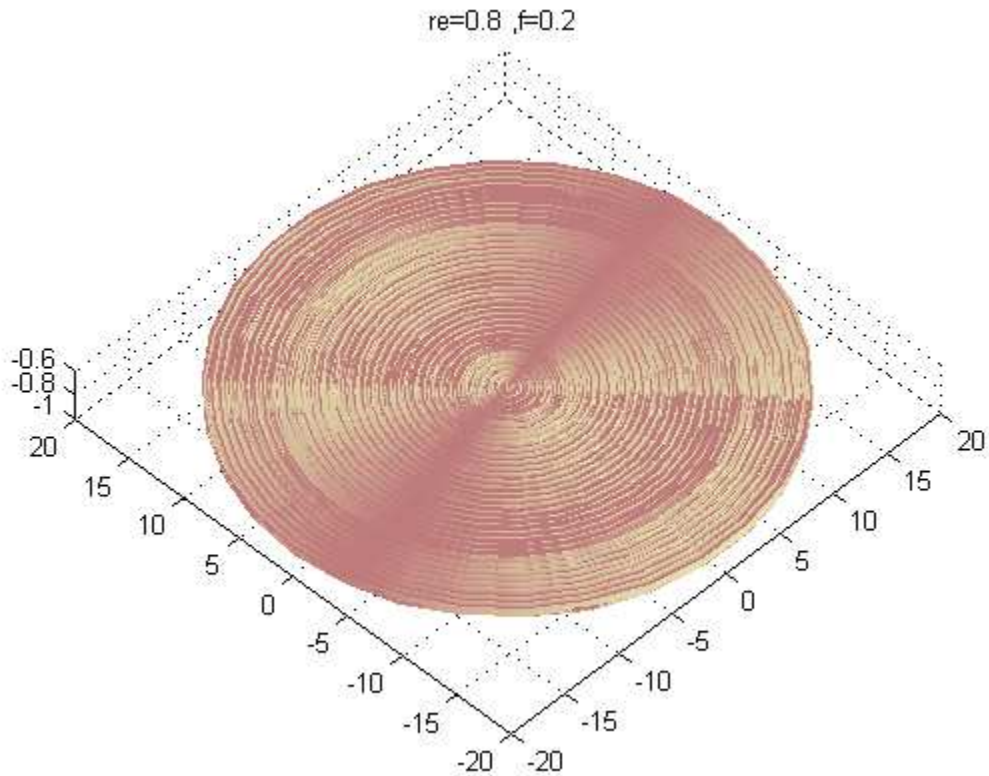


Figure IV.18: Image virtuelle de la surface usinée ; $f = 0.2$ mm/tr, $r_e = 0.8$ mm

De la même manière, ces figures représentent le déplacement de l'outil de coupe lors de l'opération de dressage. Pour ce cas-là, la vibration est prise en compte.

La figure suivante IV.12 montre bien la différence entre une pièce usinée sans vibration et avec vibration :

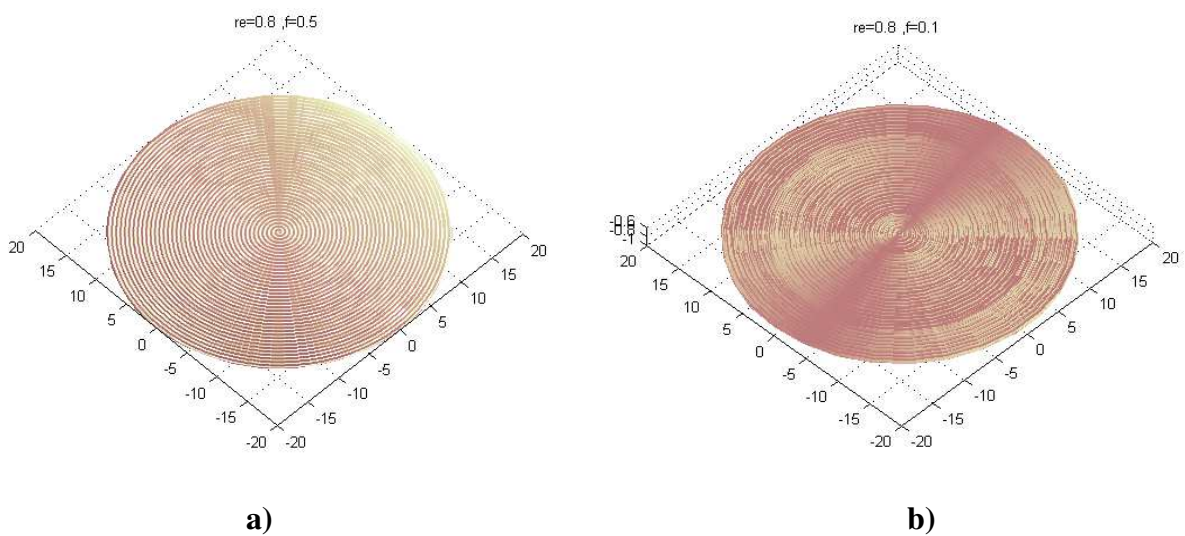


Figure IV.19: Différence entre une pièce usinée sans vibration (a) et avec vibration (b):

IV.7/ ETUDE DE L'ÉVOLUTION DE LA RUGOSITÉ THÉORIQUE EN FONCTION DE L'AVANCE ET DU RAYON DU BEC :

En supposant que le profil de la pièce est la reproduction fidèle d'une partie du profil de l'outil à l'échelle micro-géométrique, la profondeur totale de rugosité est :

$$R_t [\mu m] = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} \cdot 1000 \quad (\text{IV.4})$$

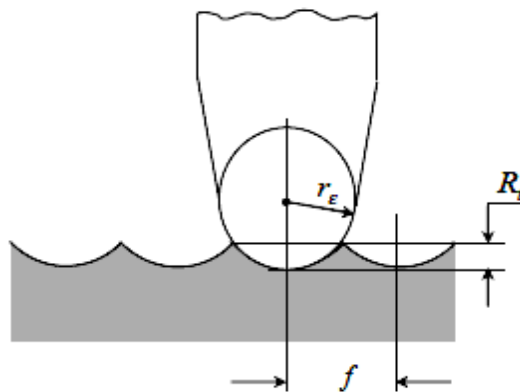


Figure IV.20: Représentation du profil de la pièce et de la rugosité théorique

Cependant, des défauts d'enlèvement de matière (défauts du 4ème ordre) viennent se superposer à cette allure théorique. Aussi, d'autres facteurs entrent en compte, comme la vitesse de coupe ou la forme de l'arête de coupe.

Étant donné que notre travail consiste à étudier la rugosité d'une manière théorique, nous allons comparer cette dernière avec celle qui va être déterminée par la méthode de simulation.

Les valeurs de la rugosité théorique R_t sont obtenues selon les formules mentionnées auparavant.

Le même principe est pris en considération à savoir quatre différentes valeurs du rayon du bec de l'outil coupant et 13 différentes valeurs de l'avance.

Le tableau suivant représente ces paramètres :

f Avance de l'outil (mm/tr)	Rayon du bec $re = 0.4\text{mm}$	Rayon du bec $re = 0.8\text{mm}$	Rayon du bec $re = 1.2$	Rayon du bec $re = 1.6$
	Valeurs de la rugosité théorique $R_t(\mu\text{m})$			
0.1	3.125	1.562	1.041	0.781
0.15	7.031	3.515	2.343	1.757
0.2	12.5	6.250	4.166	3.125
0.25	19.531	9.765	6.510	4.882
0.3	28.125	14.062	9.375	7.031
0.35	38.281	19.140	12.760	9.570
0.4	50	25	16.666	12.500
0.45	63.281	31.640	21.093	15.820
0.5	78.125	39.062	26.041	19.531
0.55	94.531	47.265	31.510	23.632
0.6	112.5	56.250	37.500	28.125
0.65	132.031	66.015	44.010	33.007
0.7	153.125	76.562	51.041	38.281

Tableau IV.7 : Valeurs de la rugosité théorique R_t obtenues par calcul

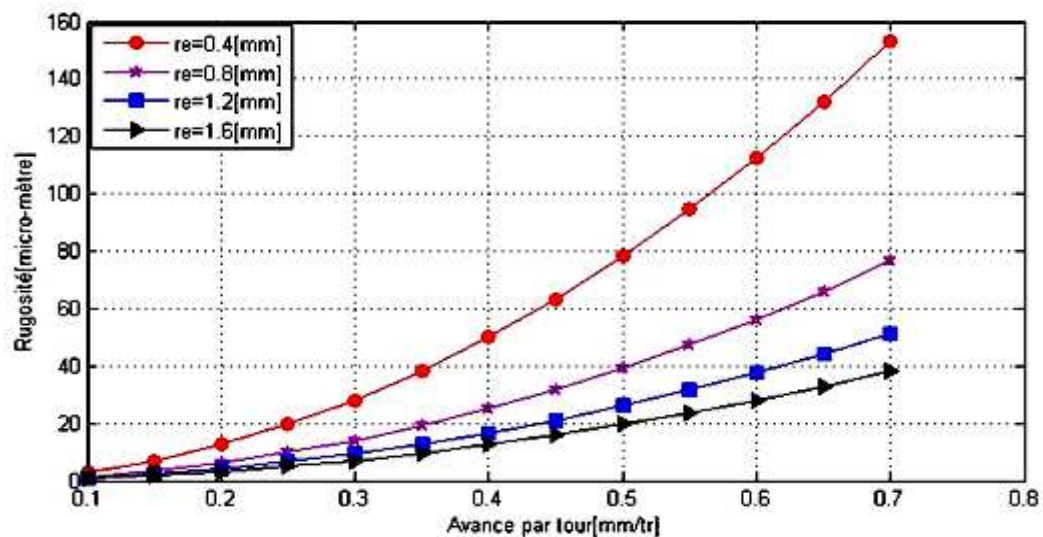


Figure IV.21 : Évolution de la rugosité théorique R_t en fonction du rayon de bec

L'évolution de la rugosité théorique, illustrée dans la figure IV.21, montre que les pics sont atteints lors de la valeur de l'avance maximale.

CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à modéliser une opération de tournage et à tracer les lobes de stabilité.

La première partie de notre recherche bibliographique a montré qu'il est nécessaire de connaître l'évolution du procédé d'usinage ainsi que toutes les étapes importantes lors du processus de fabrication. Le procédé de tournage a été étudié du fait que notre travail s'est concentré sur une opération de ce procédé.

La deuxième partie de notre recherche bibliographique a montré l'importance de la coupe des métaux qui parfois est difficilement réalisable car d'une part, elle est sujette aux conditions de coupe et d'autre part, les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface. Cependant, l'utilisation adéquate des paramètres de coupe peut améliorer cet état de surface.

Dans notre travail, nous avons présenté les résultats des simulations relatives à notre modèle des lobes de stabilité. Tous les programmes ont été réalisés et simulés avec le logiciel Matlab. Nous avons, pour chaque paramètre (masse, raideur, amortissement, conditions de coupe) fait varier leurs niveaux dans une plage de valeurs prédéfinies en vue de connaître l'évolution de la stabilité en tournage. Les résultats ont montré que lors de l'application de certaines vitesses, on peut augmenter la profondeur de passe tout en restant toujours dans le domaine stable. Au-delà de ces vitesses, notre système devient instable c'est à dire que les vibrations commencent à devenir importante. Le tracé des lobes de stabilité permet de repérer des zones de coupe stable en fonction de la profondeur de passe et de la vitesse de rotation.

De la dernière partie de notre travail, l'application d'un mauvais choix d'un paramètre de coupe conduit à l'obtention d'un mauvais état de surface. La simulation nous a permis de

déterminer la rugosité qui est conditionné par deux paramètres : la géométrie de l'outil de coupe (rayon du bec) et l'avance de l'outil de coupe.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] **Temmar.M**, Cours de fabrication mécanique, Département de mécanique, Faculté de Technologie, Université Saad Dahlab de Blida, 2006
- [2] **Bourdet.P**, La coupe des métaux, Polycopié, Ecole Normale Supérieure de Cachan, version V5, octobre 2004
- [3] **Depeyre.P**, Fabrication mécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion, 2004-2005
- [4] **Bensaada.S**, coupe des métaux, Département de Génie Mécanique, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Université El-Hadj Lakhdar de Batna
- [5] **Merritt.H.E**, Theory of self-excited machine tool chatter, ASME J.Eng.Ind, Vol 87/4, pp 447-454, 1965
- [6] **Ispas.C, Gheorghiu.H, Parausanu.I, Anghel.V**, Vibrations des systèmes Technologiques. Edition Agir, Série : Ingénierie Mécanique , Bucarest, 1999
- [7] **Amsted.B.H, Begeman.M.L**, Manufacturing Process, John Wiley and Sons, New York, 8eme edition, 1987
- [8] **Town. H. C**, The design and construction of machine tools, Iliffe Books, London, 1971
- [9] **Ryder.G.H, Bennet.M. D**, Mechanics of machines, Macmillan, London, 1975
- [10] **Ispas.C, Predincea.N., Zapciu.M., Mohora.C, Boboc.D**, Machines outils- Essais et Reception (titre original : Masini Unelte- Incercare si RecepÑie), Editura Tehnica, Bucarest, 1998
- [11] **Bisu.C.F**, Etude des vibrations auto-entretenues en coupe tridimensionnelle : nouvelle modélisation appliquée au tournage. Thèse de Doctorat, Université politehnica Bucarest, Juin 2007
- [12] **Rafic.Y**. Etude de la stabilité des vibrations de l'usinage XIV^{ème} colloque vibration-chocs et bruit, Ecole centrale de Lyon, 16, 17, et 18 juin 2004

- [13] **Serra.S**, Analyse vibratoire d'une opération de tournage Ecole Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie E.A.2640, 3 Rue de la chocolaterie, 41000 BLOIS, 29 août au 2 septembre 2011
- [14] **Lee, D. G.**, 1988, "Manufacturing and Testing of Chatter Free Boring Bars", Annals of the CIRP, Vol. 37/1/1988, pp. 365-368, Vol. 37/1/1988
- [15] **Fabris, N. S. and D'Souza, A. F**, Experimental and Analytical Investigation of Self-Excited Chatter Vibrations in Metal Cutting", Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME, Series B, Vol. 96, N° 2, pp. 670-675, 1978
- [16] **Lee, D. G.**, 1988, "Manufacturing and Testing of Chatter Free Boring Bars", Annals of the CIRP, Vol. 37/1/1988, pp. 365-368, Vol. 37/1/1988
- [17] **Rivin, E. I. and Kang, H. L**, Improving Dynamic Performance of Cantilever Boring Bars, Annals of the CIRP, Vol. 38/1/1989, pp. 377-380, 1989
- [18] **Benmohammed**, Identification des lois d'effort de coupe de tournage en régime dynamique. Thèse de Doctorat de Mécanique, L'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - France, N° d'ordre : 199
- [19] **Dekelbab**, Modélisation et simulation du comportement dynamique de l'ensemble pièce outil machine en usinage à l'outil coupant, Thèse de Doctorat, ENSAM-Paris - France, N° d'ordre : 199
- [20] **S.Xavier**, Thèse de doctorat; Modélisation analytique de l'usinage à grande vitesse et étude de l'usure en cratère – application au tournage, université Paul Verlaine, Metz (France) , 2008
- [21] **A. Molinari, D. Dudzinski**, Stationary shear band in high speed machining, Journal of Mechanics of Solid, pp. 399-405, 1992
- [22] **D. Dudzinski, A. Molinari**, A modelling of cutting for viscoplastic materials, International Journal of Mechanics Science. Vol. 39, pp. 369-389, 1997
- [23] **R. Laheurte**, Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux, Thèse de Mécanique. Université de bordeaux, N° d'ordre : 2935, 2004
- [24] **M.E. Merchant**, Mechanics of the metal cutting process I. Orthogonal cutting and a type 2 chip, Journal of applied physics, Vol. 16, N° 5, pp. 267-275, 1945
- (25) **M.E. Merchant**, Mechanics of the metal cutting process II, Plasticity conditions in orthogonal cutting, Journal of applied physics, Vol. 16, N° 6, pp. 318-324, 1945
- [26] **Malek HABAK**, thèse Doctorat mécanique : Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6 l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006

- [27] **E. H. Lee, B. W. Schaffer**, The theory of plasticity applied to a problem of machining, Journal of applied mechanics, pp. 405-413, December 1951
- [28] **R.Laheurte**, Application de la théorie du second gradient a la coupe des matériaux, Thèse de Doctorat de Mécanique, Université de Bordeaux 1 - France, N° d'ordre : 2935, 2004
- [29] **W.F.Hastings, PMathew, and P.L.B.Oxley**, A machining theory for predicting chip geometry, cutting forces etc. from work material properties and cutting conditions, Proceedings of the Royal Society of London, 311 : 569-587, 1980
- [30] **Oxley, P.L.B.** Mechanics of metal cutting, ASME, p' 50-60' 1963', 1963, P.L.B, Mechanics of Machining, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1989
- [31] **R. L. Kegg**, Chatter behavior at low cutting speeds. CIRP Annals 17, pp. 97–106. 1969
- [32] **BOOTHROYD G. SARNICOLA J. F**, Machine tool chatter, Effect of surface slope on shear angle during wave generating and regenerative chatter, North American Metal Working Research Conference, Madison (USA), pp. 618-631, 1974
- [33] **Lin.J.S**, A nonlinear dynamic model of cutting. Int. J. of Mach. Tools and Manuf, Vol. 30, N° 1, p 53-64, 1990
- [34] **Tarng.Y.S, Young.H.T, Lee.BY**, An analytical model of chatter vibration in metal cutting, Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 34, N° 2, pp. 183-197, 1994
- [35] **Segreti**, Vibrations en coupe orthogonale. Modélisation, Etude stabilité et validation expérimentale, in Science de l'ingénieur, Université de Metz, Metz, Page, 173, 2002
- [36] **Toulouse.D**, Contribution à la modélisation et à la métrologie de la coupe dans le cas d'un usinage tridimensionnel, Thèse de Doctorat de Mécanique, Université Bordeaux 1 - France, N° d'ordre : 1925, 1998
- [37] **Arnold.R.N**, The mechanism of tool vibration in the cutting of steel, proceedings of Institution of Mechanical Engineers, pp. 154, 1946
- [38] **Tobias.S.A**, Machine tool vibration, Blackie, 1958
- [39] **Tobias.S.A**, Machine tool vibration, Blackie, 1965
- [40] **Tlusty.J, Polacek.M**, The stability of the machine tools against self excited vibrations in machining, ASME, 1963
- [41] **H. E. Merritt**, Theory of self-excited machine tool chatter, contribution to machine tool chatter, Journal of Engineering for Industry, November 1965
- [42] **Raphet.B**, Etats de surface caractérisation, Technique de l'Ingénieur-sciences et Technique, Vol.R1230, p22, 2005
- [43] **Arnaud.C**, Thèse de doctorat, Contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système « pièce – outil – machine » sur la qualité de surface obtenue en tournage

de super finition, Institut National Polytechnique de Lorraine, 29 septembre 2008

[44] **CNOMO**, Guide de capitalisation pour la caractérisation et la mesure des états de surface en complément a la normalisation, ISO 2000, ge 40-084n, p. 27

[45] **Bourdet.S**, la coupe des métaux, photocopiés, école normale supérieure de Cachan, version V5, octobre 2004