

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة 1  
UNIVERSITÉ SAAD DAHLAB DE BLIDA 1



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE

Mémoire de Master  
Conception mécanique

Thème

# Simulation numérique de la coupe des pièces mécaniques et impact des paramètres de coupe sur la qualité de surface en tournage

Présentés par :

- BOUKHLIFA ALIDr M.TEMMAR
- HAFSI WALID Melle N. MELZI

Proposé et dirigé par :

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2016-1017

## ***Dédicace***

## **Remerciement**

*Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces pour accomplir ce travail.*

*Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes ayant contribuées, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*Nous souhaitons tout d'abord remercier Monsieur Temmar Mustapha et Mademoiselle Melzi Nesrine, pour les conseils prodigués à notre égard et pour toutes les informations qui nous ont permis de réaliser ce modeste travail.*

*Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Enfin nous tenons à remercier l'ensemble du corps enseignant de la Filière de Formation en Génie Mécanique, sans oublier bien sûr tous nos proches notamment nos parents pour leurs encouragements et leurs soutiens.*

## ***TABLE DE MATIERE***

Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des symboles.....	
<b>Introduction générale.....</b>	

---

### **Chapitre I Généralité sur le Tournage**

I.1 Histoire.....	1
I.2 Définition.....	2
I.2.1 Tournage .....	2
I.2.2 Principe de tournage.....	2
I.2.3 Principe de fonctionnement.....	3
I.2.4 Les tours.....	4
I.2.5 Classification des machines de tour.....	4
I.2.5.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter.....	5
I.2.5.2 Les tours à copier.....	5
I.2.5.3 Les tours semi-automatiques.....	5
I.2.5.4 Les tours automatiques.....	5
I.2.5.5 Les tours automatiques multibroches.....	5
I.2.5.6 Les tours à commande numérique.....	6
I.2.6 Différentes opérations de tournage.....	6

I.2.6.1 Chariotage.....	6
I.2.6.2 Alésage.....	6
I.2.6.3 Dressage.....	7
I.2.6.4 Perçage.....	7
I.2.6.5 Rainurage.....	7
I.2.6.6 Chanfreinage.....	8
I.2.6.7 Tronçonnage.....	8
I.2.6.8 Filetage.....	8
I.3 Géométrie de coupe.....	9
I.4 Condition de coupe.....	9
I.4.1 La vitesse de coupe.....	9
I.4.2 L'avance .....	10
I.4.3 La profondeur de passe .....	10
I.5 Outil de tour.....	10

## **Chapitre II**

### **Vibration en usinage**

II.1 La maîtrise des vibrations d'usinage.....	13
II.2 La modélisation et la connaissance du phénomène.....	13
II.2.1 Différents types de vibrations.....	13
II.2.1.1 Les vibrations libres .....	13

II.2.2.2 Les vibrations forcées .....	14
II.2.2.3 Les vibrations auto-entretenues.....	14
II.2.2 État de surface : généralités.....	14
II.3 Système pièce/outil de coupe/machine-outil(POM) .....	18
II.3.1 Description de système pièce/outil de coupe/machine-outil(POM)...	18
II.3.2 Eléments indépendants de l'opération d'usinage.....	19
II.3.3 Eléments dépendants de l'opération d'usinage.....	20
II.3.4 Source de vibration du système POM.....	21
II.3.5 Modélisation du comportement dynamique du système POM.....	22

## Chapitre III

### Modèle de Wu et Liu

III.1 Introduction .....	23
III.2 Élaboration du modèle .....	23
III.3 Modélisation de l'usinage de la surface.....	23
III.4 Calcul de l'altitude $Z_i$ de point $M_i$ dans le cas ou $f < f_{max}$ .....	25
III.4.1 Calcul de la coordonne $x'_i$ et de la distance $X$ .....	26
III.4.2 Calcul de l'altitude $Z_i$ (sans vibration) .....	27
III.5 Modèle analytique .....	29
III.6 Modélisation du système usinant en tournage.....	29
III.6.1 Machine-outil .....	30
III.7 Calcul et application numérique.....	32

## Chapitre IV

### Simulation numérique et Discussion des résultats

IV.1 Introduction.....	39
IV.2 Choix des avances de coupe.....	40
IV.3 Choix de l'outil.....	40
IV.4 Présentation des simulations.....	40
IV.4.1 Simulation sans vibration.....	40
IV.4.1.1 Etat de surface des pièces usinées (sans vibration).....	41
IV.4.1.2 Discussion des résultats.....	45
IV.4.2 Simulation avec vibration .....	45
IV.4.2.1 Etat de surface des pièces usinées (avec vibration).....	46
IV.4.2.2 Discussion des résultats.....	50
IV.5 Comparaison .....	50
IV.6 Conclusion.....	51

---

**Conclusion générale** .....

Bibliographie.....

Annexe I .....

## Liste des figures

**Figure I.1 :** Principe de tournage

**Figure I.2 :** Tour conventionnel

**Figure I.3 :** Composantes de tour

**Figure I.4 :** Chariotage

**Figure I.5 :** Alésage

**Figure I.6 :** Dressage

**Figure I.7 :** Perçage

**Figure I.8 :** Rainurage

**Figure I.9 :** Chanfrenage

**Figure I.10 :** Tronçonnage

**Figure I.11 :** Filetage

**Figure I.12 :** Le choix des conditions de coupe

**Figure I.13 :**  $a_p$  et  $f$  en tournage. [17]

**Figure I.14 :** Outil de tour (coupe positive) [6]

**Figure I.15 :** Coupe négative [6]

**Figure II.1:** Trois familles de vibrations présentes en usinage : les vibrations libres, les vibrations forcées et les vibrations auto-entretenues

**Figure II.2 :** Représentation des irrégularités sur un profil d'état de surface

**Figure II.3:** Machine-outil

**Figure II.4:** Comportement dynamique du système POM.

**Figure III.1 :** Modélisation de l'usinage de la surface. 1 ère approximation

**Figure III.2:** Modélisation de l'équation III.1

**Figure III.3 :** Modélisation de la surface usinée ; 2ème approximation.

**Figure III.4 :** Modélisation si  $f > f_{\max} = 2 re \sin(kr)$ .

**Figure III.5 :** Calcul de l'attitude  $Z_i$  d'un point  $M_i$ .

**Figure III.6 :** Représentation de  $x'_i$  et de la distance  $x$

**Figure III.7:** Représentation de l'altitude  $Z_i$

**Figure III.8 :** Outil de l'opération de tournage

**Figure III.9 :** L'acier Z200C12 avant l'usinage (brute)

**Figure III.10:** Tour utilisé

**Figure III.11:** Modèle de coupe dynamique 3D. [23]

**Figure III.12 :** Organigramme pour la génération du fichier des points  $X_i, Y_i, Z_i$

**Figure IV.1 :** Diagramme schématique de la simulation.

**Figure IV.2:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr

**Figure IV.3:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr

**Figure IV.4:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.4$  mm/tr

**Figure IV.5:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.4$  mm/tr

**Figure IV.6:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.8$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr

**Figure IV.7:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.8$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr

**Figure IV.8:**Image réelle de la surface usinée ;  $re= 0.8 \text{ mm}, f= 0.4 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.9 :**Image virtuelle de la surface usinée ;  $re= 0.8 \text{ mm}, f= 0.4 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.10 :**Image réelle de la surface usinée ;  $re= 0.4 \text{ mm}, f= 0.2 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.11 :**Image virtuelle de la surface usinée ;  $re= 0.4 \text{ mm}, f= 0.2 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.12 :**Image réelle de la surface usinée ;  $re= 0.4 \text{ mm}, f= 0.4 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.13 :**Image virtuelle de la surface usinée ;  $re= 0.4 \text{ mm}, f= 0.4 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.14 :**Image réelle de la surface usinée ;  $re= 0.8 \text{ mm}, f= 0.2 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.15 :**Image virtuelle de la surface usinée ;  $re= 0.8 \text{ mm}, f= 0.2 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.16 :**Image réelle de la surface usinée ;  $re= 0.8 \text{ mm}, f= 0.4 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.17 :**Image virtuelle de la surface usinée ;  $re= 0.8 \text{ mm}, f= 0.4 \text{ mm/tr}$

**Figure IV.18:**Différence des allures des états de surface

### **Liste destableaux**

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

**Tableau II. 2 :** Classement « pratique » des différents écarts

**Tableau III.1:** Amplitudes

**Tableau IV.1:**Les simulations à effectuer (sans vibration)

**Tableau IV.2 :** Les simulations à effectuer (avec vibration)

## Liste des symboles

$M_c$  : mouvement de coupe

$M_f$  : mouvement d'avance

$V_c$  : vitesse de coupe

$V_r$  : vitesse de rotation

$f$  : l'avance

$a$  : profondeur de passe

$N$  : vitesse de rotation

$R_p$  : rayon de la pièce usinée

$r_e$  : bec de l'outil

$r_e$  : rayon de bec

$P$  : plan spécifié

$P_f$  : plan de travail

$P_r$  : plan de référence

$P_n$  : plan normal

$P_s$  : plan de l'arête de l'outil

$P_p$  : plan vers l'arrière

$k_r$  : l'angle de direction d'arête

$\epsilon_r$  : L'angle de pointe

$k'_r$  : l'angle de direction d'arête secondaire

$\gamma_n$  : angle de coupe normal

$\gamma_s$  : angle d'inclinaison d'arête

$W$  : profil d'ondulation

$R$  : profil de rugosité

$q$  : vecteur des degrés de liberté du système POM

$Z_i$  : l'altitude

$M_i$  : point dans les coordonnées  $X_i$  et  $Y_i$

$X_i$  : coordonnée dans le plan de mesure

$Y_i$  : coordonnée dans le plan de mesure

$x'_i$  : représente la coordonnée de point  $M_i$

$V$  : volume de la pièce

$\rho$  : masse volumique de la pièce

$I$  : moment d'inertie

$E$  : module de Young

$[M]$  : matrice de masse

$[C]$  : matrice d'amortissement

$[K]$  : matrice de rigidité

$m$  : la masse de la pièce

$K$  : la rigidité

$C$  : Coefficient d'amortissement visqueux

$\xi$  : Facteur d'amortissement visqueux

$\omega_0$  : Pulsation propre

$\omega_n$  : vitesse angulaire avec vibration

$\varphi$  : Déphasage

$A$  : amplitude de vibration

$T_0$  : la période

$f_0$  : fréquence propre

$F_c$  : Effort de coupe

$K_c$  : force de coupe par unité de surface

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

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

## **Introduction Générale**

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 inoxydable et l'étude de l'influence des phénomènes induits sur les états de surfaces.

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 l'état de l'art sur le comportement mécanique global du système POM (Pièce-Outil de coupe-Machine-outil) : Dynamique de coupe, vibration et modélisation du comportement dynamique de ce système.

Dans le chapitre III, nous nous intéresserons à appliquer un modèle de modélisation.

. En utilisant le modèle Cheung et Lee, nous allons simuler grâce au logiciel Matlab notre opération de dressage et étudier les états de surfaces des différents essais.

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.

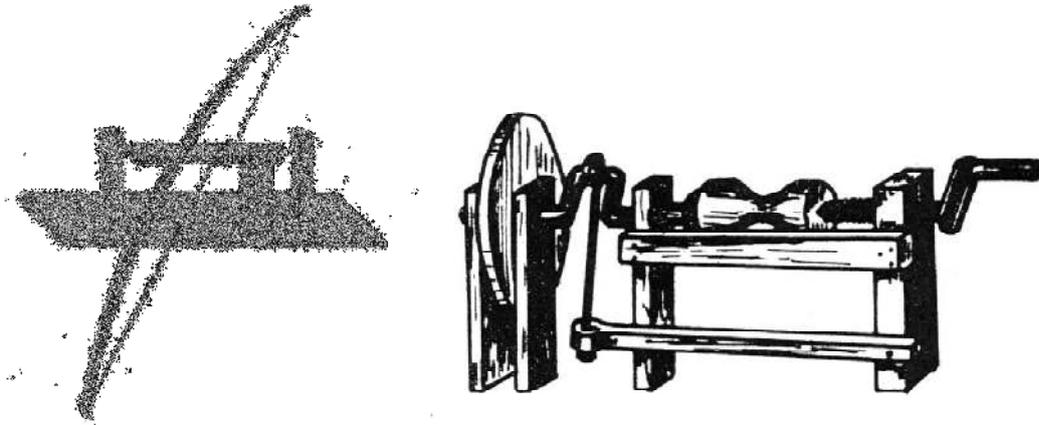
Le chapitre IV sera consacré à l'étude de l'état de surface et de la rugosité. Ayant pris connaissance au travers des chapitres précédents des différents phénomènes liés au procédé de tournage, nous nous intéresserons à la simulation numérique de l'opération de dressage et l'interprétation et la discussion 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.

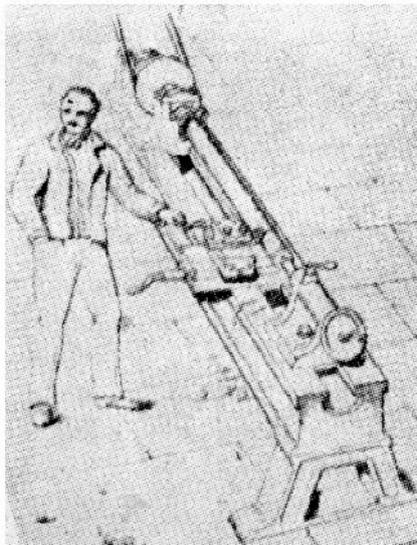
**CHAPITRE I**  
**GENERALITE SUR LE TOURNAGE**

## I.1 Histoire :

Le tour est un instrument de travail connu déjà dans l'antiquité. Très longtemps, il a été utilisé surtout pour exécuter des travaux à caractère artistique. On tournait le bois, l'os, l'ivoire et des métaux tendres, tels que l'or et l'étain. Les figures ci-dessous donnent une idée du tour antique qui était construit presque entièrement en bois.



En 1794, apparaît le tour parallèle avec le chariot porte-outil à déplacement longitudinal.



L'évolution, lente jusque là, va s'accélérer, surtout avec l'invention du moteur électrique.

Au cours du 19ème siècle, les tours prennent progressivement l'aspect d'ensembles métalliques.

Et aujourd'hui, grâce aux nombreux perfectionnements, ce sont des machines parfaitement au point : précises, rapides et puissantes.

Le tour est à l'origine de toutes les machines-outils et il a contribué largement au progrès industriel du siècle dernier. On ne peut concevoir un atelier mécanique sans le tour. C'est la première machine-outil qu'il est indispensable d'acquérir.

## **I.2 Définition :**

### **I.2.1 Tournage :**

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

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

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). [1]

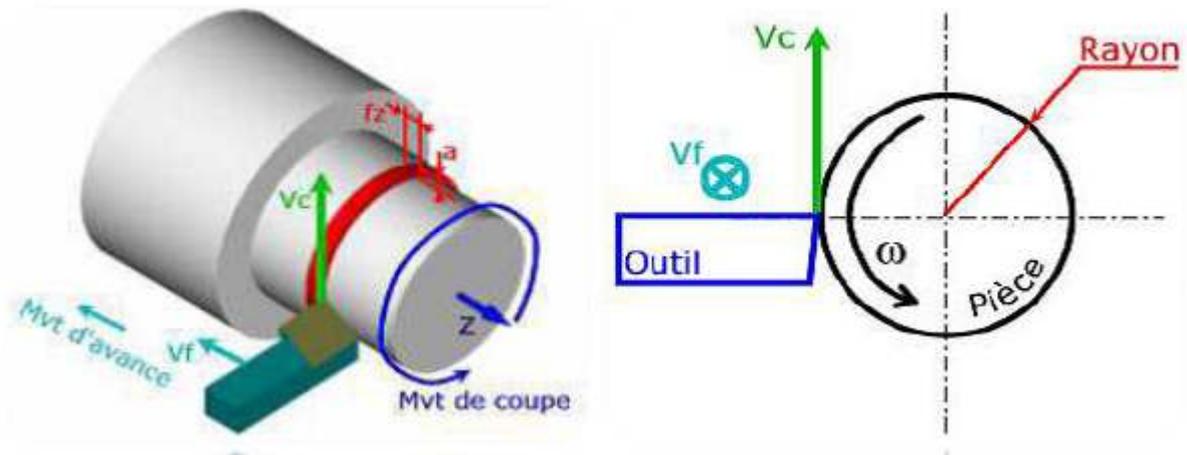
### **I.2.2 Principe de tournage :**

La pièce est animée d'un mouvement circulaire uniforme c'est le mouvement de coupe  $M_c$ .

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

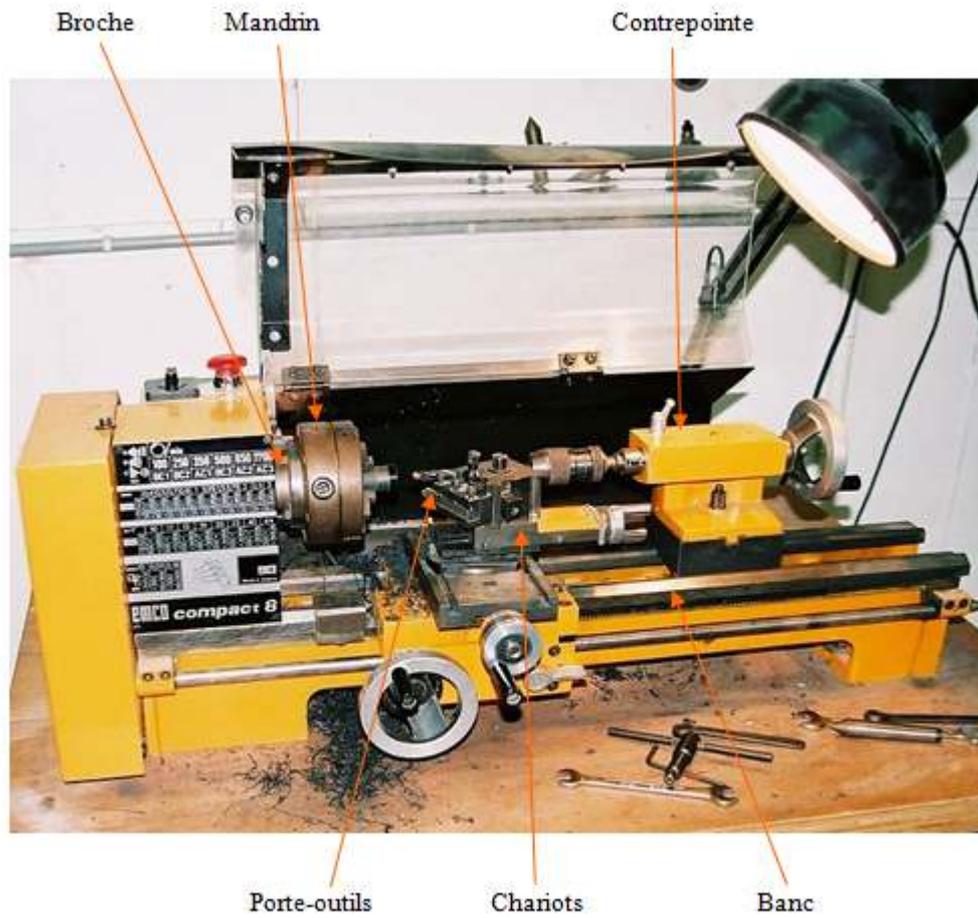
Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil (mouvement radial) il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution tels que cylindre, cône, sphère, etc.

Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [2].



**Figure I.1** : principe de tournage

**I.2.3 Principe de fonctionnement :**



**Figure I.2** : Tour conventionnel

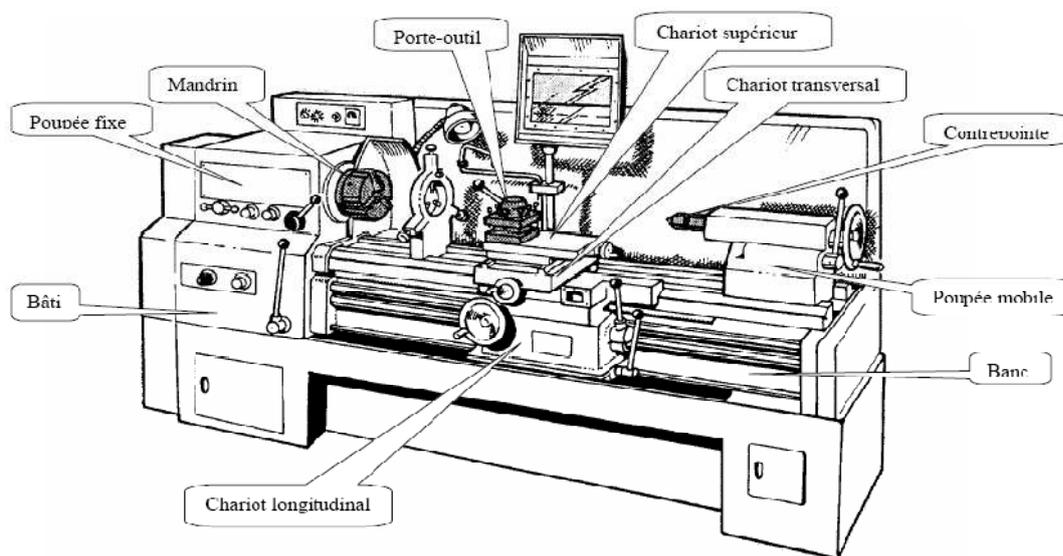
La pièce à usiner est placée dans le mandrin et serrée par l'intermédiaire des mors. Un moteur permet la mise en rotation du mandrin fixé sur la broche. L'outil coupant, est positionné dans un porte-outil et serré à l'aide de vis. Le porte-outil est mis en place sur une tourelle porte-outil. Le chariot transversal et le longitudinal assurent ainsi les mouvements de l'outil par des moteurs d'avance.

La contrepointe permet de réaliser des opérations de pointage, centrage, perçage et alésage en bout de pièce.

### **I.2.4 Les tours :**

Les tours (Figure. I.3) permettent de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage) : cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle.

Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche. [3]



**Figure I.3 :** Composantes de tour.

### **I.2.5 Classification des machines de tour :**

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

### **I.2.5.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter :**

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe. [4]

### **I.2.5.2 Les tours à copier :**

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque. [4]

### **I.2.5.3 Les tours semi-automatiques :**

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées. Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises. La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série. [4]

### **I.2.5.4 Les tours automatiques :**

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries. [4]

### **I.2.5.5 Les tours automatiques multibroches :**

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise

la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espace entre les broches. [4]

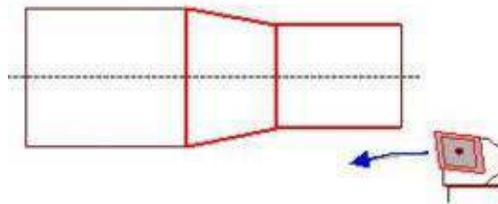
### **I.2.5.6 Les tours à commande numérique :**

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives. [4]

### **I.2.6 Différentes opérations de tournage :**

#### **I.2.6.1 Chariotage :**

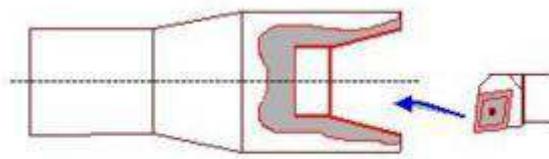
Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.



**Figure I.4 :**Chariotage [4]

#### **I.2.6.2 Alésage :**

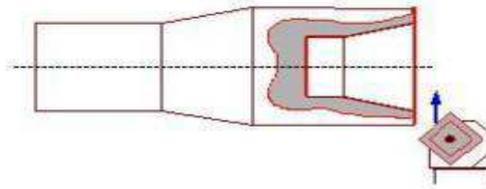
Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.



**Figure I.5 :**Alésage [4]

### **I.2.6.3 Dressage :**

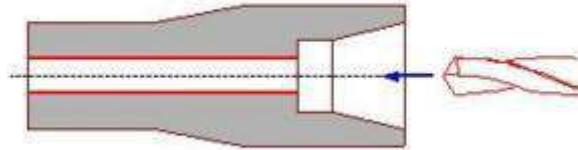
Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure.



**FigureI.6 :**Dressage[4]

### **I.2.6.4 Perçage :**

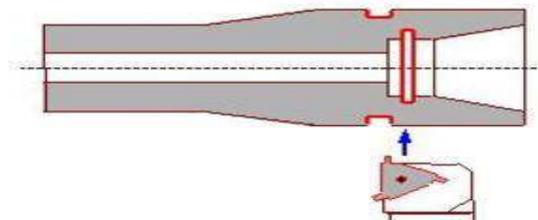
Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'une forêt.



**FigureI.7 :**Perçage[4]

### **I.2.6.5 Rainurage :**

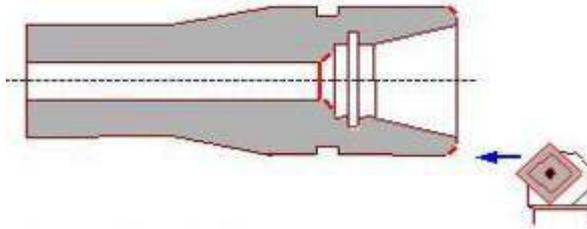
Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple.



**FigureI.8 :**Rainurage[4]

### **I.2.6.6 Chanfreinage :**

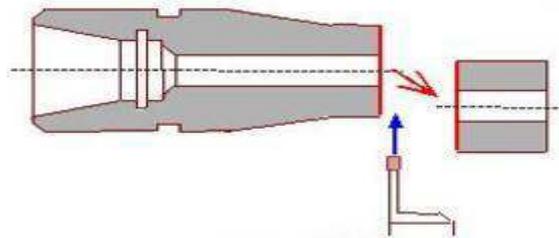
Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.



**FigureI.9 :**Chanfreinage[4]

### **I.2.6.7 Tronçonnage :**

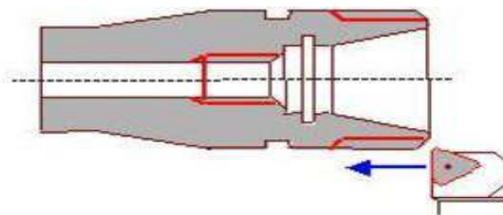
Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.



**FigureI.10 :**Tronçonnage[4]

### **I.2.6.8 Filetage :**

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur



**FigureI.11 :**Filetage[4]

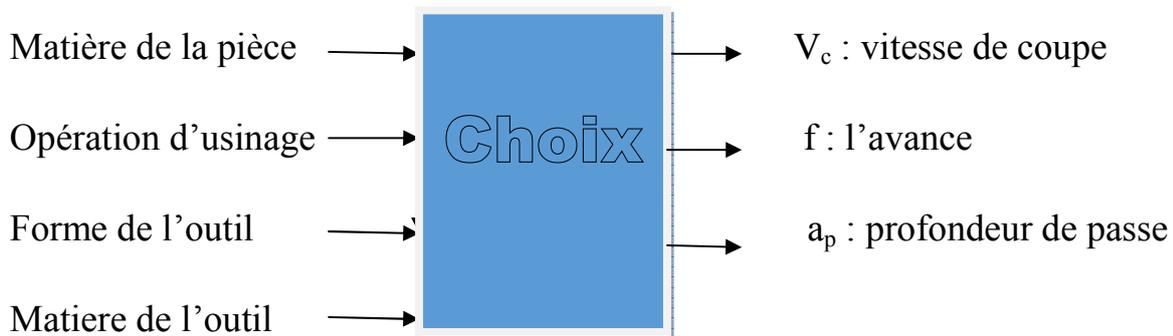
### **I.3 Géométrie de coupe :**

La géométrie des outils de coupe est très complexe. Dans ce chapitre, nous décrivons les caractéristiques géométriques les plus importantes et leurs influences sur la coupe, notamment sur les efforts développés par l'outil. [5]

### **I.4 Conditions de coupe :**

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...) Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- La puissance de la machine - La matière de l'outil (ARS, carbure...)
- La matière usinée (acier, aluminium...)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfacage...)
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement)



**Figure I.12** :Le choix des conditions de coupe

#### **I.4.1 La vitesse de coupe :**

La vitesse de coupe (figure I.1) notée V<sub>c</sub> est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle détermine la vitesse de rotation de la pièce. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière.

La vitesse de rotation de la pièce est définie par :

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

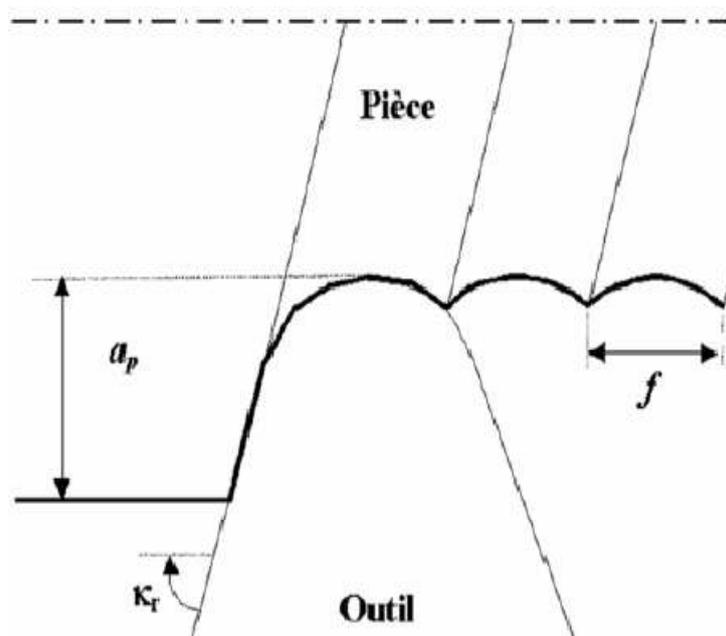
où D est le diamètre final de la pièce (figure I.1).

#### **I.4.2 L'avance :**

L'avance notée  $f$  (figure I.13), correspond à la différence de déplacement de l'outil entre deux itérations ou deux révolutions (une révolution de la pièce dans le cas du tournage et de l'outil dans le cas du fraisage).[16]

#### **I.4.3 La profondeur de passe :**

La profondeur de passe, notée  $a_p$  (figure I.13), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, et par exemple à la différence entre le rayon avant et après l'usinage, dans le cas du tournage.[16]



**Figure I.13:**  $a_p$  et  $f$  en tournage.[16]

#### **I.5 Outil de tour :**

Pour les opérations comme le tournage ou le fraisage, les outils sont plus complexes car l'arête de coupe n'est plus rectiligne. Prenons le cas d'un outil de tour classique. L'arête est constituée de deux parties rectilignes, l'arête principale et l'arête secondaire, reliées par une partie arrondie qu'on appelle le bec de l'outil et dont le rayon est noté  $r_e$  (figure I.14). Les angles d'outil sont définis dans plusieurs plans :

Le plan de travail  $P_f$  qui contient les directions de coupe et d'avance

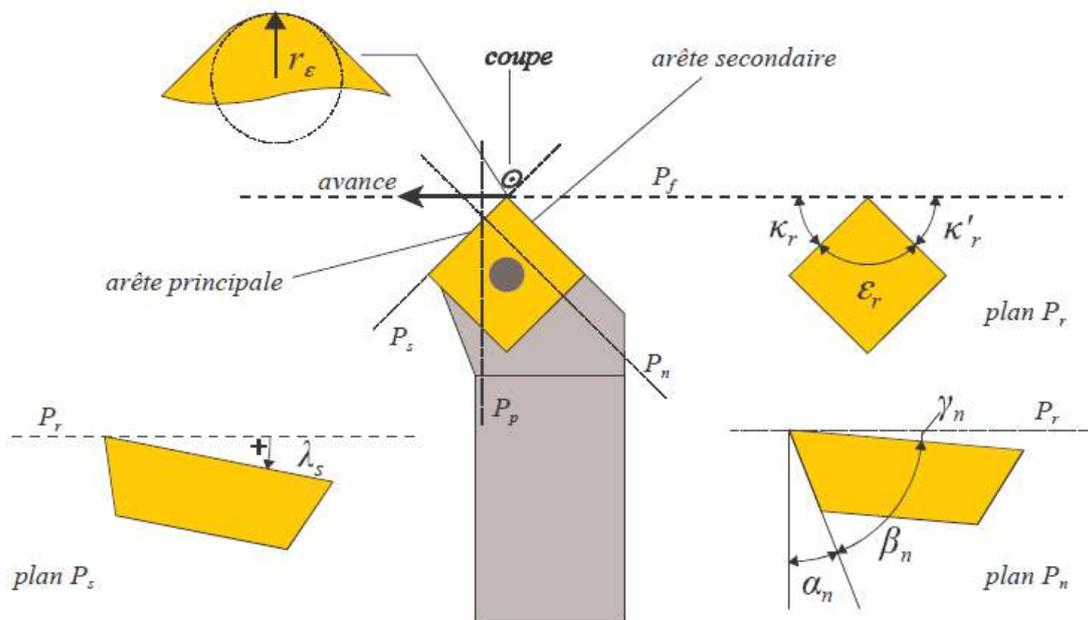
Le plan de référence  $P_r$ , perpendiculaire à la direction de coupe

Le plan normal  $P_n$  perpendiculaire à l'arête de coupe principale

Le plan de l'arête de l'outil  $P_s$  qui contient l'arête et est perpendiculaire à  $P_r$

Le plan vers l'arrière  $P_p$ , perpendiculaire à  $P_r$  et à  $P_f$ .

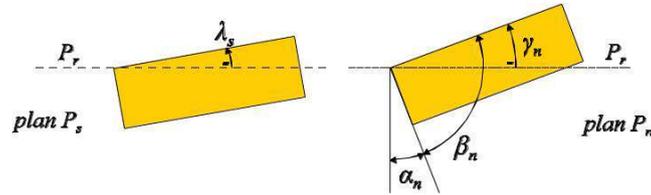
Dans le plan  $P_r$  sont définis l'angle de direction d'arête  $\kappa_r$ . L'angle de pointe  $\epsilon_r$  et l'angle de direction d'arête secondaire  $\kappa'_r$ . L'angle  $\kappa_r$  est très important car il règle la section du copeau et la répartition des forces de coupe dans le plan  $P_r$ . Plus  $\kappa_r$  est grand, plus la force d'avance augmente et plus la force passive diminue. L'angle  $\kappa_r$  est généralement compris entre  $45^\circ$  et  $95^\circ$  selon le type d'opération de tournage. Il contrôle également la progressivité de l'attaque de la pièce. Plus il est proche de  $90^\circ$  et plus la rentrée de l'outil dans la matière se produit brutalement, ce qui diminue la durée de vie des plaquettes. [5]



**Figure I.14** :outil de tour (coupe positive) [5]

Pour des opérations de finition, on utilise des plaquettes à coupe positive comme celle illustrée à la (figure I.14), c'est-à-dire une plaquette avec un angle de coupe normal  $\gamma_n$  et un angle d'inclinaison d'arête  $\gamma_s$  positifs ou nuls. Pour des opérations d'ébauche avec des matériaux difficiles à usiner (fontes, alliages à haute résistance, usinage avec chocs), on utilise

plutôt une plaquette à géométrie négative, ce qui signifie que ces deux angles sont négatifs (figure I.15). On remarque la différence de forme de la plaquette à coupe négative qui est plus massive. Avec une coupe positive, on obtient généralement un meilleur état de surface, ce qu'on recherche en finition.



**Figure I.15** : coupe négative [5]

**CHAPITRE II**  
**VIBRATION EN USINAGE**

## II.1 La maîtrise des vibrations d'usinage :

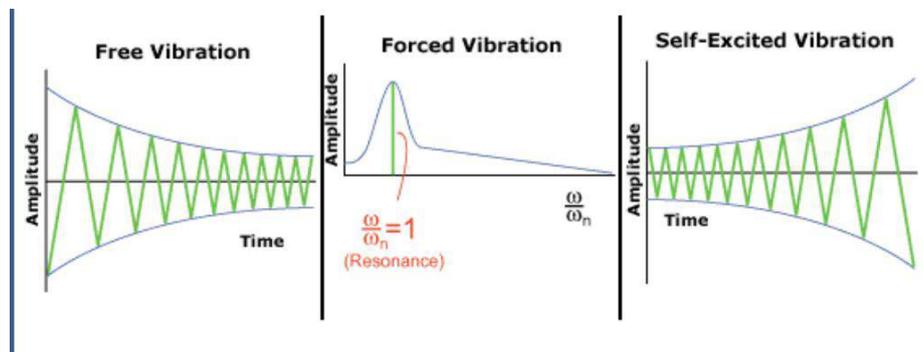
De nombreuses opérations existent en usinage par outil coupant : fraisage tournage perçage... Elles sont toutes soumises au problème des vibrations d'usinage, initiées par la coupe elle-même. Ceci fait de l'étude des vibrations d'usinage une thématique consistante. Une quantité considérable de travaux a été publiée, comprenant pour la plupart un aspect modélisation, des essais de validation et parfois la simulation d'états de surface. Plutôt que de dresser un état de l'art purement chronologique. [6]

## II.2 La modélisation et la connaissance du phénomène :

### II.2.1 Différents types de vibrations :

Les problèmes de vibrations en usinage, sont apparus dès le début du XX<sup>e</sup> siècle. Frederick W. Taylor en 1907 évoquait le broutement en usinage comme l'un des problèmes les plus délicats à traiter.

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle, il a été constaté que trois types de vibrations sont présents dans le cas d'une opération d'usinage, les vibrations libres, les vibrations forcées, et les vibrations auto-entretenues. Ces trois familles sont détaillées dans cette partie et sont représentées sur la Figure II.1.[7]



**Figure II.1:** Trois familles de vibrations présentes en usinage : les vibrations libres, les vibrations forcées et les vibrations auto-entretenues

#### II.2.1.1 Les vibrations libres :

Elles correspondent à la réponse vibratoire naturelle de tout système mécanique à une brève excitation, un impact. Dans le cas de l'usinage, que ce soit en fraisage ou en tournage, elles sont généralement utilisées pour la caractérisation du système. [7]

### **II.2.2.1 Les vibrations forcées :**

Les vibrations forcées sont la réponse vibratoire d'un système mécanique à une excitation périodique. Pour ce qui est de l'usinage, c'est par exemple la réponse du système lors d'une opération ou la coupe est interrompue. [8] [9]

### **II.2.2.3 Les vibrations auto-entretenues :**

Les vibrations auto-entretenues ont pour source le passage d'un régime de coupe stabilisé à un régime de coupe instable. C'est-à-dire quand le système usinant se met à vibrer à une fréquence différente de la fréquence de passage de dent, le régime dynamique de la coupe est différent du régime dynamique de l'outil. Elles sont la cause du phénomène appelé broutement (ou "chatter" en anglais), ce phénomène est très préjudiciable car il entraîne généralement :

- Un très mauvais état de surface de la pièce finie.
- Une baisse de la durée de vie de l'outil en accélérant l'usure ou dans des cas extrêmes en entraînant la casse de l'outil.
- Un bruit très désagréable lors de l'usinage. Même si ce point n'a pas de conséquence sur la qualité de la pièce finie, il est à prendre en compte par rapport à l'environnement de travail des opérateurs.
- Une usure prématurée de la broche de la machine. [7]

### **II.2.2 État de surface : généralités :**

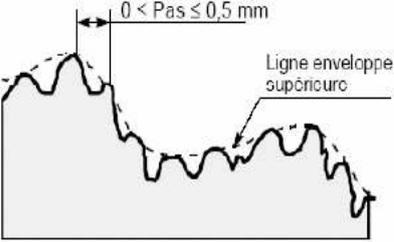
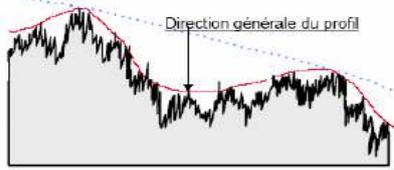
On appelle « état de surface » les irrégularités des surfaces dues au procédé d'élaboration de la pièce (usinage, moulage, etc.). Ils sont, le plus souvent, mesurés avec des appareils à palpeur à pointe de diamant, appelés profilomètres, qui relèvent le profil de la surface.

Un profil de surface est la courbe résultant de l'intersection de la surface réelle et d'un plan spécifié  $P$ . Ce plan est perpendiculaire à la surface de l'échantillon et orienté généralement perpendiculairement au sens des stries d'usinage. Un profil de surface, outre la forme nominale de la pièce, est composé de différents écarts géométriques, auxquels correspondent différents profils (Tableau1) : • Profil  $P$ , profil primaire ou total (ordre 1 + 2 + 3 + 4), sur

lequel sont définis les paramètres de structure, désignés par un symbole précédé de la lettre *P*, par exemple *Pt*, *Pa*, etc. ;

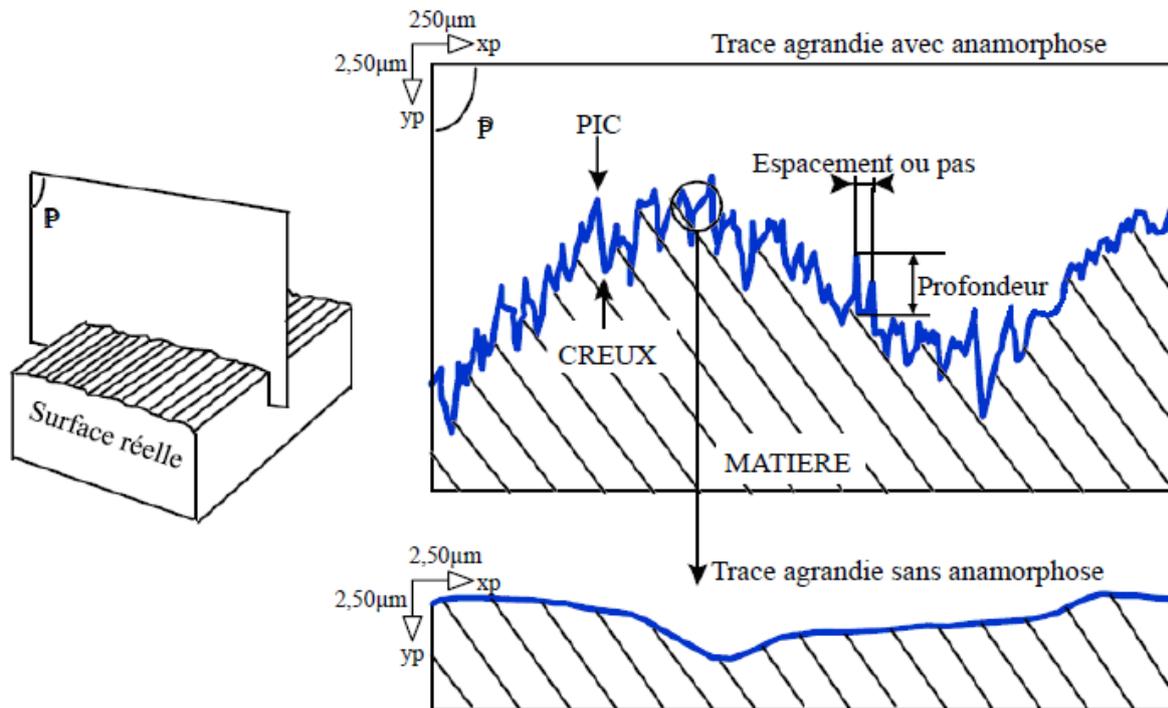
- Profil *W*, profil d'ondulation (ordre 2), sur lequel sont définis les paramètres d'ondulation, désignés par un symbole précédé de la lettre *W*, par exemple *Wt*, *Wa*, etc...
- Profil *R*, profil de rugosité (ordre 3 + 4), sur lequel sont définis les paramètres de rugosité, désignés par un symbole précédé de la lettre *R*, par exemple *Rt*, *Ra*, etc...

Différents ordres de grandeur des irrégularités géométriques			
Ordre	Écarts géométriques	Croquis	Origines possibles
1	<p><b>Écarts géométriques</b></p> <p>Défauts de planéité de rectitude ; de circularité ; de cylindricité, etc...</p>	<p>PROFIL GEOMETRIQUE THEORIQUE</p> <p>ECART DE FORME</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Défaut de bridage.</li> <li>• Flexion des éléments de machine</li> <li>• Qualité du guidage des éléments coulissants.</li> <li>• Usure des organes.</li> <li>• Déformation de la pièce: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pendant l'usinage,</li> </ul> </li> </ul> <p>Indépendamment du procédé.</p> <p>- Après l'usinage, dépendant du matériau (libérations des contraintes internes)</p>
2	<p><b>Ondulation :</b></p> <p>Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux sommets d'irrégularités soit compris entre 500 μm et 2500 μm(1).</p>	<p>0,5 &lt; pas ≤ 2,5 mm</p> <p>ECART DE FORME</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibrations basses fréquences: <ul style="list-style-type: none"> <li>– de la pièce.</li> <li>– de l'outil.</li> <li>– des deux,</li> </ul> </li> </ul> <p>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.</p>

3	<p><b>Rugosité :</b></p> <p>Irrégularités géométriques, telle que la distance entre deux pics de ces irrégularités soit compris entre 0 et 500 <math>\mu\text{m}</math>(1).</p>	 <p>0 &lt; Pas <math>\leq</math> 0,5 mm</p> <p>Ligne enveloppe supérieure</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibrations hautes fréquences (causes analogues à celles énumérées ci-dessus).</li> <li>• Installation de lubrification : <ul style="list-style-type: none"> <li>– Lubrifiant : nature, qualité</li> <li>lubrifiante, action de refroidissement, stabilité dans le temps.</li> <li>– Mode d'arrosage.</li> <li>– Filtre : efficacité du système (entre autres fréquences de nettoyage)</li> </ul> </li> <li>• Procédés par enlèvement de copeaux :</li> </ul> <p>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.</p>
4	<p><b>Arrachement :</b></p> <p>Marque d'outil, fente, piquûre, (irrégularités apériodiques)</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité de la géométrie de l'outil.</li> <li>• Hétérogénéité, plasticité du matériau.</li> </ul>
<b>Profil Total</b>		 <p>Direction générale du profil</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensemble des écarts de profil dont l'analyse permet de déterminer leur influence spécifique sur une ou plusieurs fonctions données</li> </ul>
(1) Limites données pour l'automobile.			

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

La représentation graphique de l'état de surface est toujours anamorphosée (Figure II.2). L'amplification verticale est généralement beaucoup plus importante que l'amplification horizontale. Cette anamorphose a comme effet de compresser le profil réel et d'en donner une image très différente de la réalité.



**Figure II.2 :** Représentation des irrégularités sur un profil d'état de surface [10]

La frontière entre la rugosité et l'ondulation est arbitraire, aucune définition absolue n'existe. En pratique, le classement s'effectue à partir de la distance entre les pics (Tableau 2).

<i>Écart géométrique</i>	<i>Distance entre les pics (en µm)</i>
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 2 :** Classement « pratique » des différents écarts géométriques [11]

Dans le cas du tournage, le filtre de séparation entre l'ondulation et la rugosité est choisi en fonction de l'avance par tour  $f$ .

La séparation des écarts géométriques est nécessaire pour quantifier chaque écart, indépendamment des autres. Il existe deux méthodes normalisées de séparation des écarts géométriques [11]

- Méthode de la ligne moyenne: elle consiste à opérer un filtrage du profil primaire avec un filtre passe bande. La différenciation d'un écart par rapport à l'autre s'effectue en considérant les distances entre deux sommets (longueur d'onde). La limite entre deux écarts géométriques s'exprime donc comme une longueur (longueur d'onde de coupure). Le filtre génère une ligne moyenne d'où le nom de méthode de la ligne moyenne ;

- Méthode des motifs: elle consiste à décomposer le profil primaire en motifs en appliquant un algorithme de type «reconnaissance de forme».

Ces deux méthodes de séparation des écarts géométriques permettent la détermination de paramètres classés en trois familles, en fonction de leur mode de calcul :

- Les paramètres définis par rapport aux motifs;
- Les paramètres définis par rapport à la ligne moyenne;
- Les paramètres pour les surfaces ayant des propriétés fonctionnelles différentes suivant les niveaux, qui sont classés en deux catégories: ceux définis par rapport à la courbe de taux de longueur portante et ceux définis par rapport à la probabilité de matière.

### **II.3 Système pièce/outil de coupe/machine-outil (POM) :**

Lors de l'usinage, la machine-outil est nécessaire. Celle-ci est un ensemble complexe mettant en œuvre :

- Un ou plusieurs procédés,
- Des éléments de sa partie fixe comme le bâti et la glissière,
- Des éléments de sa partie mobile comme la broche et les arbres tournants dans les paliers.

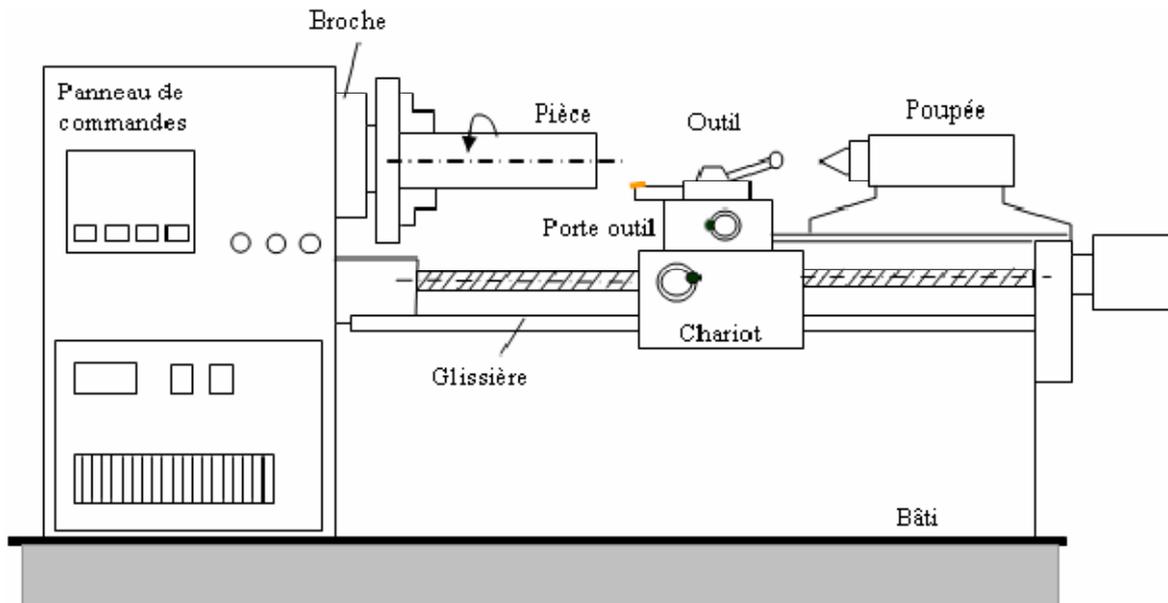
La machine-outil, étant un véritable système, doit être étudié comme tel et à un comportement dynamique dont ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments.

Tous les éléments constituant cette machine-outil, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent

#### **II.3.1 Description de système pièce/outil de coupe/machine-outil (POM) :**

Plusieurs auteurs se sont intéressés sur la description de ce système pièce/outil de coupe/machine-outil (POM) et plusieurs recherches ont été faites. L'ensemble s'est accordé à ce que la machine-outil possède :

- Une partie indépendante de l'opération d'usinage
- Une partie dépendante de l'opération d'usinage.



**Figure II.3:** Machine-outils.

### **II.3.2 Éléments indépendants de l'opération d'usinage :**

On peut citer les éléments suivants :

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

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

**Ensemble chariot-glissière :** Il 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 fait intervenir qu'un frottement de type hydrodynamique. [16]

**Broche :** C'est 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. [16]

**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 :** Elle 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. [16]

**Directeur de commande :** Il a pour 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 aussi du maintien des conditions de coupe à leurs valeurs programmées. [16]

### **II.3.3 Eléments dépendants de l'opération d'usinage :**

On peut citer les éléments suivants :

- Pièce,
- Outil de coupe,
- Porte-outils de coupe,
- Porte-pièces.

**Pièce :** Elle est considérée comme une partie intégrante du système d'usinage car en effet, il ne sert à rien d'avoir une machine de très grande rigidité et de très haute qualité si la pièce à usiner se déforme sous l'effet des efforts de coupe ou de bridage.

Les pièces peuvent être considérées en 3 catégories :

- Pièces massives,
- Pièces flexibles,

- Autres.

**Outil de coupe :** Il peut être unique ou multiple. Il constitue une partie essentielle dans l'étude du comportement statique et dynamique d'une machine-outils. 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 de coupe sont repartis en trois catégories :

- Indéformables (fraises à surfacer),
- Souples (barres d'alésage longues, fraises deux tailles longues, fraises de finition, etc.)
- Intermédiaires.

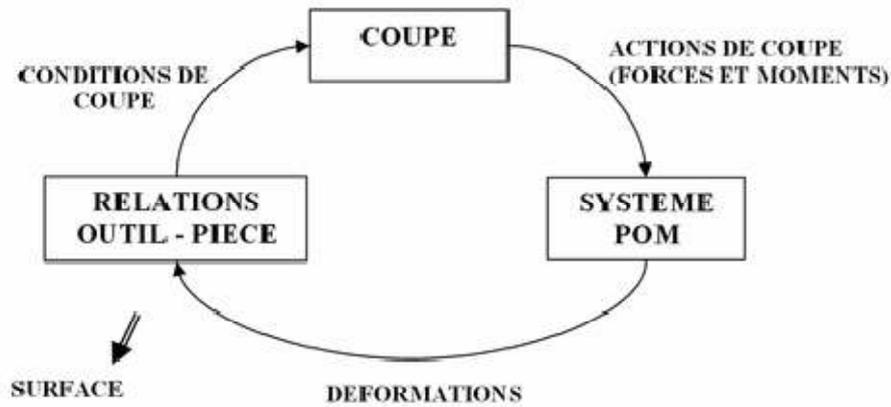
**Porte-outil de coupe :** Il assure la liaison entre l'outil de coupe et la machine-outil. La notion de l'interface confère au porte-outil des caractéristiques particulières de raideur et d'amortissement qui sont très dépendantes de la qualité et de l'état d'usure de l'interface. [12]  
[13]

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

### **II.3.4 Source de vibration du système 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. [14][15]



**Figure II.4:** Comportement dynamique du système POM. [16]

### **II.3.5 Modélisation du comportement dynamique du système POM :**

D'après [15] il est généralement admis que le comportement dynamique du système POM peut être décrit par l'équation :

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

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.

**Chapitre III**  
**Modèle de Wu et Liu**

### **III.1 Introduction :**

Le processus d'usinage a un caractère subjectif du fait qu'il très délicat en pratique d'évaluer l'ensemble des conséquences des choix technologiques lors des différentes opérations d'usinage des différents procédés d'usinage : Tournage, fraisage, rabotage, perçage, ...

Aussi, le processus d'usinage a un caractère relatif du fait qu'il faut prendre plusieurs paramètres en considération comme la qualité de la pièce à usiner, la qualité de l'outil,...

Pour obtenir les meilleures conditions d'usinage, il faut prendre en considération 3 paramètres importants :

- La machine-outil,
- L'outil de coupe,
- La pièce.

Dans ce chapitre, on présente le développement d'un modèle mathématique qui permet de donner l'image virtuelle de la surface d'une pièce obtenue par usinage (tournage/dressage). Et comme nous nous intéressons à la rugosité théorique qui est affectée principalement par l'avance et le rayon de bec de l'outil, le modèle sera établi en tenant compte de ces deux paramètres. . 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.

### **III.2 Élaboration du modèle :**

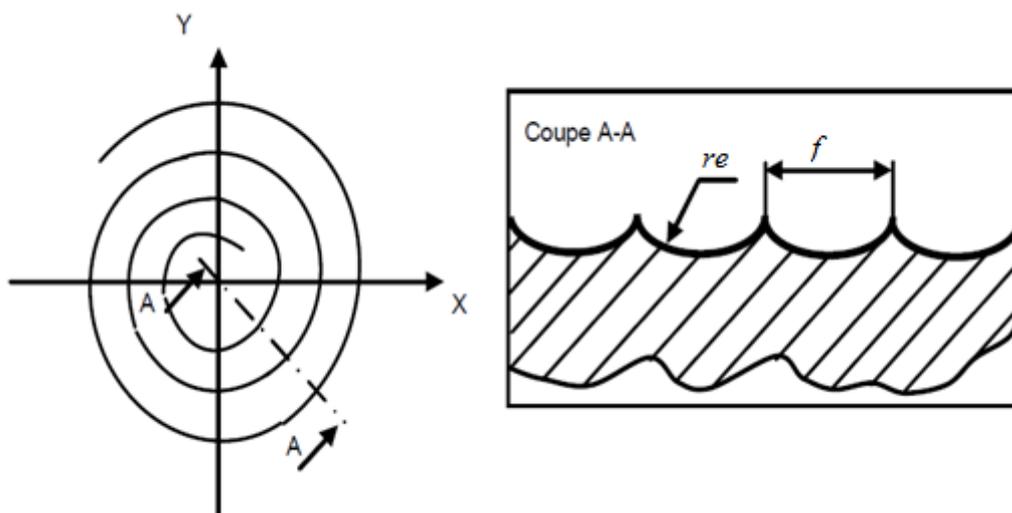
Le modèle mathématique proposé va reproduire l'image virtuelle d'une surface dressée. Lors d'une opération de dressage, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est

une translation rectiligne perpendiculaire à l'axe de rotation, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère une surface orthogonale à l'axe. [17]

### **III.3 Modélisation de l'usinage de la surface :**

La forme de la surface usinée dépend des caractéristiques géométriques de l'arrête tranchante de l'outil et de l'avance. Dans ce cas, on cherche à connaître l'altitude  $Z_i$  d'un point  $M_i$  dont les coordonnées sont  $X_i$  et  $Y_i$  dans le plan de mesure, défini comme le plan tangent extérieur dans un repère  $R (o,x,y,z)$ .

Étant donné que le point générateur de l'outil décrit une spirale dont l'origine se trouve sur le périmètre de la pièce et le centre sur l'axe de la broche. La distance entre les crêtes correspond à l'avance par tour de l'outil ( $f$ ). Les sillons sont générés par le bec d'outil. Dans le cas d'une arrête tranchante arrondie, ces sillons sont des portions de cercles de rayon  $r_e$  en première approximation (figure III.1).



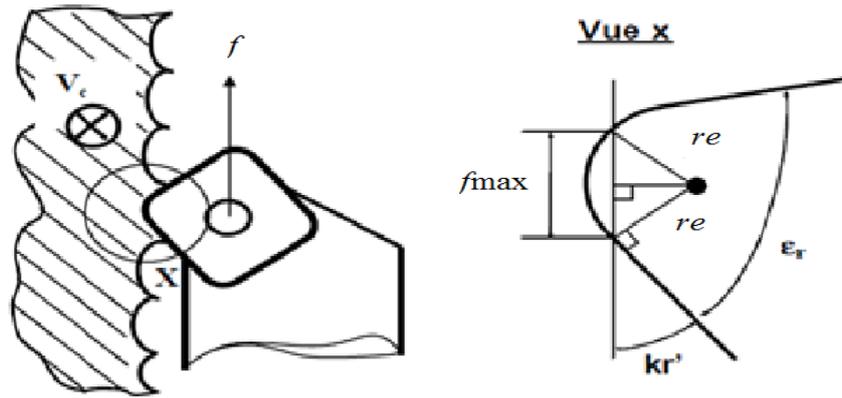
**Figure III.1 :** Modélisation de l'usinage de la surface. 1 ère approximation

#### **Condition d'application :**

Dans le cas où les sillons générés par le bec de l'outil sont des portions de cercles, il faut que l'avance de l'outil soit trop importante (figure III.2). Cela se traduit géométriquement par :

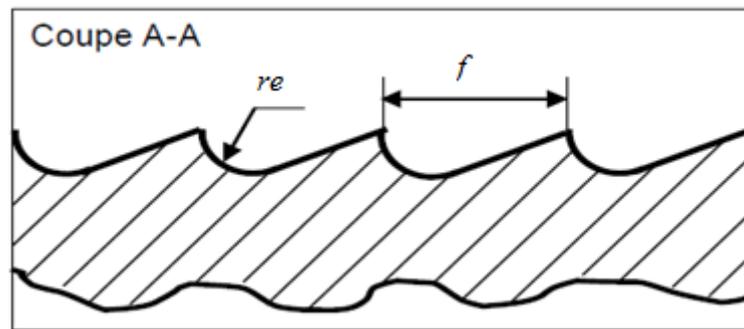
$$f < f_{\max} = 2 r_e \sin(kr')$$

III.1



**Figure III.2:** Modélisation de l'équation III.1

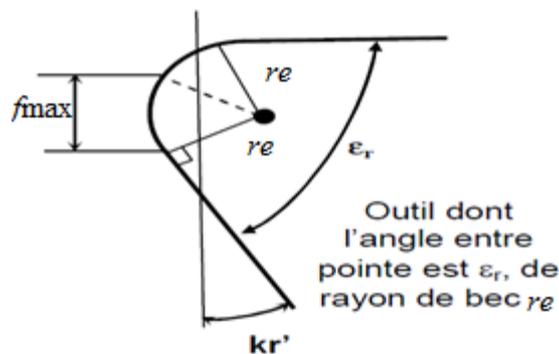
Dans le cas contraire où la forme de l'arrête tranchante de l'outil est une combinaison d'une portion de cercle complétée par une ou deux portions linéaires en fonction de la géométrie de l'outil, le sillon sera une combinaison des deux formes précédentes (figure III.3).



**Figure III.3 :** Modélisation de la surface usinée ; 2ème approximation.

**Condition d'application :**

Cette situation impose une avance:  $f > f_{max} = 2 r_e \sin(kr')$ , ce qui correspond au cas d'étude où la forme du sillon obtenue est à la fois une portion de cercle et une droite (figure III.4).



**Figure III.4 :** Modélisation si  $f > f_{max} = 2 \text{ resin} (kr)$

Dans notre étude, nous limiterons notre travail au premier cas, c'est-à-dire, lorsque les sillons générés par le bec de l'outil sont des portions de cercles de rayon  $re$ .

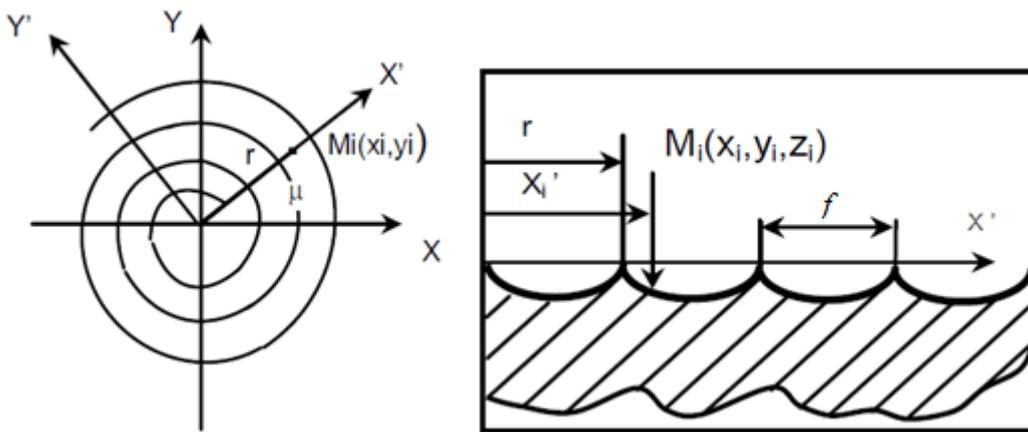
**III.4 Calcul de l'altitude  $Z_i$  de point  $M_i$  dans le cas ou  $f < f_{max}$  :**

L'altitude  $Z_i$  de point  $M_i$  dépende directement des paramètres géométriques de l'outil tel que le rayon de bec  $r$  mais aussi des paramètres cinématiques de la coupe tels que l'avance  $f$ .

Elle s'exprime aussi en fonction du nombre des spires effectués par l'outil :

$$N = R_p / f \quad \text{III.2}$$

Où  $R_p$  est le rayon de la pièce usinée.



**Figure III.5 :** Calcul de l'altitude  $Z_i$  d'un point  $M_i$ .

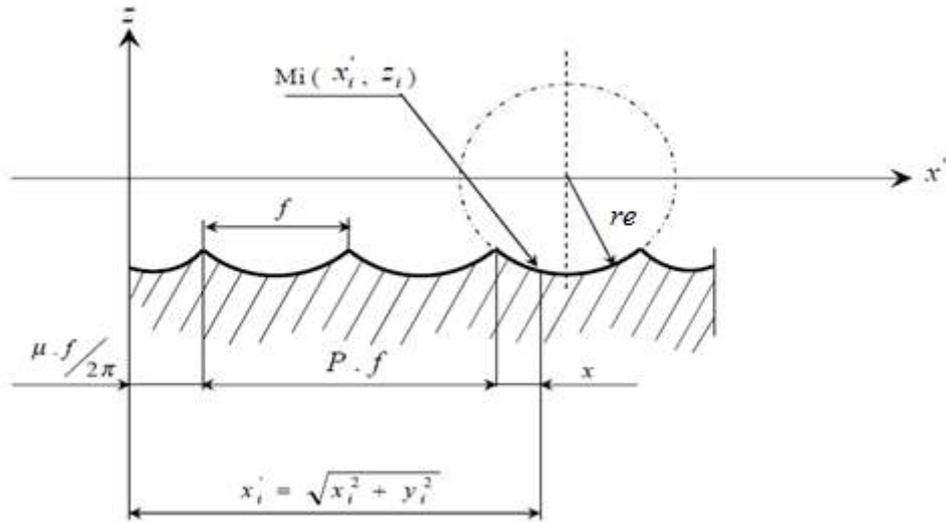
La mise en équation de la spirale en coordonnées polaires dans le cas ou  $(f < f_{max})$  (figure III.5) nous donne :

$$r = \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} \quad \text{III.3}$$

**III.4.1 Calcul de la coordonnée  $x'_i$  et de la distance  $X$  :**

$x'_i$ , représente la coordonnée de point  $M_i$  suivant l'axe des  $X$  dans un repère  $O(x', y', z)$ .

Elle représente aussi la distance de point  $M_i$  du centre de la spirale (figure III.6).



**Figure III.6 :** Représentation de  $x'_i$  et de la distance  $x$

Dans le repère  $O(x', y', z)$ , la distance  $x'_i$  de point  $M_i$  à partir du centre de la spirale peut s'exprimer par :

$$x'_i = \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} + P \cdot f + x \text{ III.4}$$

D'où

$$x = x'_i - \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} - P \cdot f \text{ III.5}$$

Et on sait que la distance  $x'_i$ , dans le repère  $O(x, y, z)$  est donnée par :

$$x'_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \text{ III.6}$$

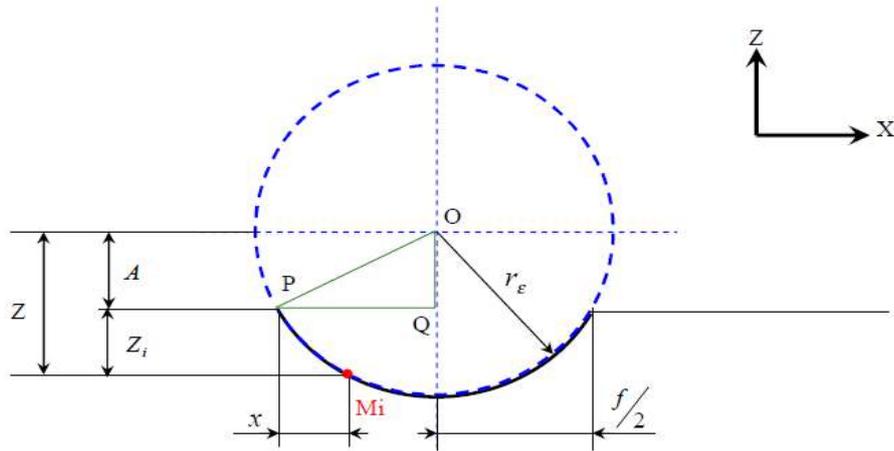
Le changement de  $x'_i$  par son expression dans (équation III.6) nous donne :

$$x = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} - P \cdot f \text{ III.7}$$

Le paramètre  $P$  représente la partie entière du nombre des spires, et il est exprimé par :

$$P = \text{partie entière} \left( \frac{x'_i}{f} - \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \right)$$

### **III.4.2 Calcul de l'altitude $Z_i$ (sans vibration) :**



**Figure III.7:** Représentation de l'altitude  $Z_i$

A partir de la représentation graphique de l'altitude  $Z_i$  (figure III.7) on peut écrire :

$$Z_i = A - Z \quad \text{III.8}$$

La distance  $A$  peut être calculé à partir de triangle vert OPQ (figure III-7) de la manière suivante:

$$r_e^2 = A^2 + (f/2)^2 \quad \text{III.9}$$

D'où

$$A = \sqrt{r_e^2 - (f/2)^2} \quad \text{III.10}$$

Pour calculer la distance  $Z$  on applique l'équation de cercle au point  $M_i$  qui va nous permet d'écrire :

$$Z^2 + (x - f/2)^2 = r_e^2 \quad \text{III.11}$$

D'où

$$Z = \sqrt{r_e^2 - (x - f/2)^2} \quad \text{III.12}$$

La substitution de l'équation III.8 dans l'équation III.12 nous donne :

$$Z = \sqrt{r_e^2 - \left( \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \frac{\mu f}{2\pi} - P \cdot f - f/2 \right)^2} \quad \text{III.13}$$

La substitution de l'équation III.12 et de l'équation III.13 dans l'équation III.8 nous permet d'écrire :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - \left(x - f/2\right)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} - P \cdot f - f/2\right)^2} \quad \text{III.14}$$

Après des simplifications, l'altitude  $Z_i$  de chaque point  $M_i$  s'exprime sous la forme :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - \left(f/2\right)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left(\sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \left(\frac{(\mu + 2 \cdot P \cdot \pi) \cdot f}{2 \cdot \pi} + f/2\right)\right)^2} \quad \text{III.15}$$

Avec :  $\mu = \text{Arctan}\left(\frac{y_i}{x_i}\right)$  elle varie de  $0 \div 360^\circ$ .

$$P = \text{partie entière}\left(\frac{x_i'}{f} - \frac{\mu}{2 \cdot \pi}\right)$$

$r_e$ : Représente le rayon du bec de l'outil.

$f$ : L'avance de l'outil.

L'équation III.15 donne les valeurs des altitudes des spires qui sont formées par la pointe de l'outil de coupe lors de l'usinage en négligeant l'effet de vibration.

Dans notre travail nous avons essayé de présenter l'état de surface en déterminant l'altitude  $Z_i$  des spires en tenant compte des vibrations induit lors de l'usinage.

Pour cela, il est nécessaire de développer un modèle de coupe dynamique pour avoir le résultat souhaité.

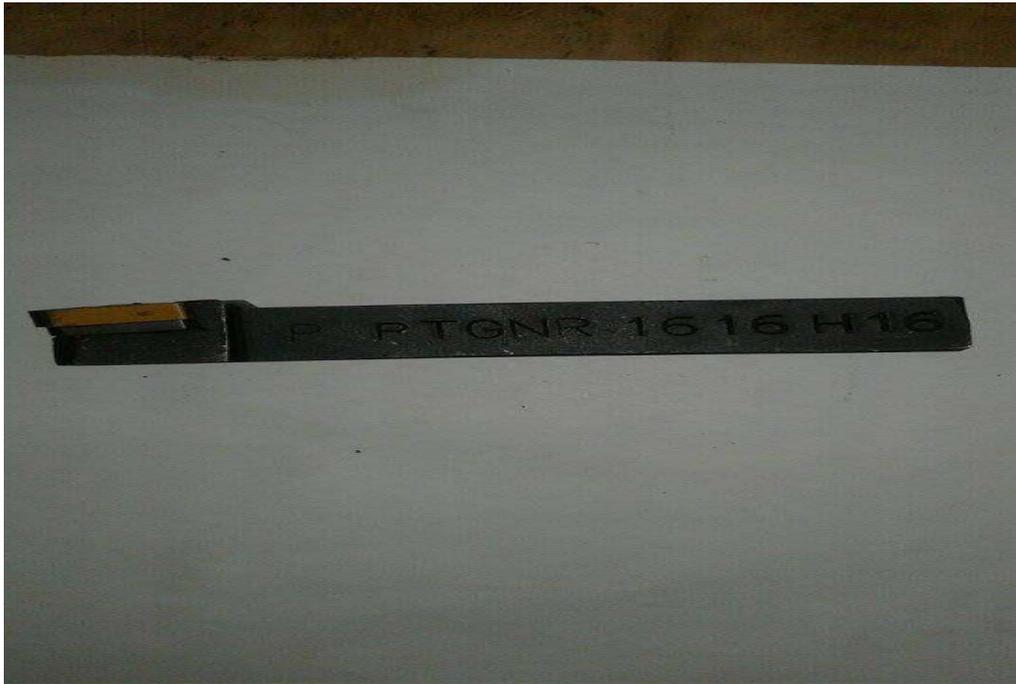
### **III.5 Modèles analytique** : [18]. [19]. [20]. [21]

Il existe plusieurs types de modèles. Les plus utilisés sont ceux de Wu et Liu, Segretiet de Laheurte. Ils sont représentés dans l'annexe I.

### **III.6 Modélisation du système usinant entournage** :

Le système usinant en tournage est conçu de :

- Un outil de type PTG NR 1616H16 en carbures non revêtues sans brise copeau.



**Figure III.8** :outil de l'opération de tournage

- La pièce est de l'acier inoxydable (Z200C12) de dimensions 30mmx100mm, avec une grande résistance à l'usure (teneur élevée en carbures de chrome) et une remarquable capacité de coupe.



**Figure III.9** :l'acier Z200C12 avant l'usinage (brute)

### **III.6.1 Machine-outil :**

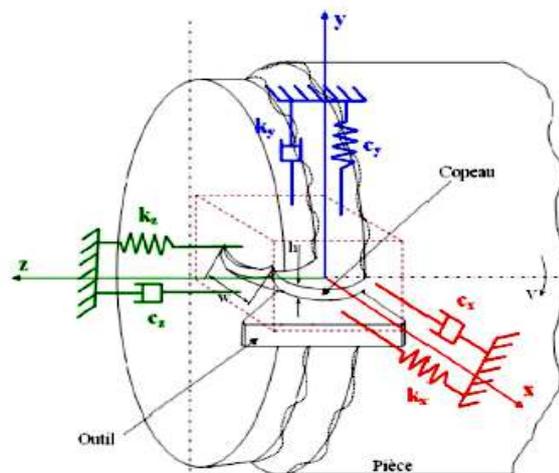
Les essais de coupe ont été réalisés sur un tour parallèle de marque Heckert, de type DZFG 200 et d'une puissance absorbée de 5.5 KW.



**Figure III.10:** Tour utilisé

Les conditions d'usinage sont :

- La vitesse de coupe ( $V_c$ ),
- L'avance ( $f$ ),
- La profondeur de passe ( $a$ ),
- La géométrie de l'outil.



**Figure III.12 :** Modèle de coupe dynamique 3D. [22]

Le modèle si dessus est un modèle de coupe dynamique tridimensionnel représente la modélisation des vibrations provoquées par l'interaction de l'outil de coupe et la pièce à usiner dans les trois directions (x, y, z) qui constituent un système à 3 degrés de libertés. [23]

Le système dynamique est modélisé par un système d'équations différentielles, où les oscillations instantanées sont données suivant chaque direction par:

$$\begin{cases} m_x \cdot \ddot{x} + c_x \cdot \dot{x} + k_x \cdot x = F_x(t) \\ m_y \cdot \ddot{y} + c_y \cdot \dot{y} + k_y \cdot y = F_y(t) \\ m_z \cdot \ddot{z} + c_z \cdot \dot{z} + k_z \cdot z = F_z(t) \end{cases} \quad \text{III.16}$$

Le système tridimensionnel peut se résoudre comme un système à un seul degré de liberté, dans la direction d'avance suivant l'axe des (x) exprimé par l'équation suivante :

$$m_x \cdot \ddot{x} + c_x \cdot \dot{x} + k_x \cdot x = F_x(t) \quad \text{III.17}$$

L'équation III.17 est une équation de second ordre avec second membre où  $m_x$ (kg) représente la masse équivalente suivant la direction,  $c_x$  (Ns/m) le coefficient d'amortissement et  $k_x$ (N/m) la raideur équivalente dans la direction (x). La composante de la force dynamique  $F_x$ :

$$F_x(t) = F_c \cos \omega t \quad \text{III.18}$$

$$m_x \cdot \ddot{x} + c_x \cdot \dot{x} + k_x \cdot x = F_c \cdot \cos \omega(t) \quad \text{III.19}$$

$$\ddot{x} + 2 \cdot \xi \cdot \dot{x} + \omega_0^2 \cdot x = \frac{F_c}{m_x} \cdot \cos(\omega t) \quad \text{III.20}$$

### III.7 Calcul et application numérique:

#### a) Calcul de la masse

V: volume de la pièce [m<sup>3</sup>]

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad \text{III.21}$$

$$V = \pi (15 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 100 \cdot 10^{-3}$$

$$V = 7.068 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

On prend  $\rho = 7750 \text{ kg/m}^3$  la masse volumique de la pièce

m: la masse de la pièce [kg]

$$m = \rho \cdot V \quad \text{III.22}$$

$$m = 7750 \cdot 7.068 \cdot 10^{-5}$$

$$m = 0.5477 \text{ kg}$$

Le moment d'inertie dans le cas d'un cylindre plein est:

$$I = \frac{\pi D^2}{64} \quad \text{III.23}$$

$$I = \frac{\pi (30 \cdot 10^{-3})^2}{64}$$

$$I = 4.41 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

**Convertir le module de Young en N/m<sup>2</sup>**

E: module de Yong [N/m<sup>2</sup>]

$$E = 2106 \text{ GPa} = 210 \cdot 10^9 \text{ Pa} = 210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

**b) Calcul de la rigidité :**

K: la rigidité [N/m]

$$k = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} \quad \text{III.24}$$

$$k = \frac{3 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 4.41 \cdot 10^{-5}}{(100 \cdot 10^{-3})^3}$$

$$k = 2.77 \cdot 10^{10} \text{ N/m}$$

**c) Calcul de la pulsation propre :**

$\omega_0$  : Pulsation propre [rad/s]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{III.25}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2.77 \cdot 10^{10}}{0.5477}}$$

$$\omega_0 = 2.25 \cdot 10^5 \text{ rad/s}$$

**d) Calcul de coefficient d'amortissement :**

$\xi$  : Facteur d'amortissement visqueux

$$\xi = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{m \cdot k}} \text{III.26}$$

C : Coefficient d'amortissement visqueux [Ns/m]

$$c = \xi \cdot 2 \cdot \sqrt{m \cdot k} \text{III.27}$$

Le taux d'amortissement en usinage est  $\xi \leq 0.05$

On prend  $\xi \approx 0.05$

$$C = 0.05 \cdot 2 \cdot \sqrt{2.77 \cdot 10^{10} \cdot 0.5477}$$

$$C = 1.23 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}$$

On prend :

$\omega_1 = 14.66 \text{ rad/s}$  (vitesse angulaire avec vibration)

$\omega_2 = 37.17 \text{ rad/s}$  (vitesse angulaire sans vibration)

**e) Calcul de déphasage :**

$\varphi$  : Déphasage [rad]

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot \xi \cdot \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \text{III.28}$$

**Avec vibration**

$$\varphi_1 = \text{Arctg} \frac{2 \cdot 2.25 \cdot 10^5 \cdot 0.05 \cdot 14.66}{(2.25 \cdot 10^5)^2 - 14.66^2}$$

$$\varphi_1 = 3.722 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

**Sans vibration**

$$\varphi_2 = \text{Arctg} \frac{2 \cdot 2.25 \cdot 10^5 \cdot 0.05 \cdot 37.17}{(2.25 \cdot 10^5)^2 - 37.17^2}$$

$$\varphi_2 = 9.465 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

**f) Calcul de la période :**

$T_0$  : la période [s]

$$T_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0} \text{ III.28}$$

$$T_0 = \frac{2 \cdot \pi}{2.25 \cdot 10^5}$$

$$T_0 = 2.79 \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

**g) Calcul de la fréquence :**

$f_0$  : fréquence propre [Hz]

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \text{ III.29}$$

$$f_0 = \frac{1}{2.79 \cdot 10^{-5}}$$

$$f_0 = 35809.862 \text{ Hz}$$

**h) Calcul de l'effort de coupe :**

$F_c$  : Effort de coupe [N]

$$F_c = K_c \cdot S$$

III.30

$K_c$  : force de coupe par unité de surface [ $N/mm^2$ ] (valeur indicative à partir de Sandvik).

$$K_{c1} = 3400 \text{ N/mm}^2$$

$$K_{c2} = 2450 \text{ N/mm}^2$$

$S = a \cdot f$  (profondeur de passe [mm] \* l'avance de coupe [mm]) III.31

$$S_1 = 1 \cdot 0.2$$

$$S_1 = 0.2 \text{ mm}^2$$

et

$$S_2 = 1.04$$

$$S_1 = 0.4 \text{ mm}^2$$

Donc :

$$F_{c1} = 3400 \cdot 0.2$$

$$F_{c1} = 680 \text{ N}$$

et

$$F_{c2} = 2450 \cdot 0.4$$

$$F_{c2} = 980 \text{ N}$$

**i) Calcul de l'amplitude des vibrations :**

A : amplitude de vibration [mm]

$$A = \frac{\frac{F_c}{m_x}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2 \cdot \omega_0 \cdot \xi \cdot \omega)^2}} \quad \text{III.32}$$

$$A_1 = \frac{\frac{680}{0.5477}}{\sqrt{((2.25 \cdot 10^5)^2 - 14.66^2)^2 + (2 \cdot 0.05 \cdot 2.25 \cdot 10^3 \cdot 14.66)^2}}$$

$$A_2 = \frac{\frac{980}{0.5477}}{\sqrt{((2.25 \cdot 10^5)^2 - 37.17^2)^2 + (2 \cdot 0.05 \cdot 2.25 \cdot 10^3 \cdot 37.17)^2}}$$

$$A_1 = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ mm}$$

$$A_2 = 3.53 \cdot 10^{-8} \text{ mm}$$

	Avance (mm/tr)	Profondeur (mm)	F <sub>c</sub> [N]	Amplitude (mm)
1	0.2	1	680	2.45·10 <sup>-8</sup>
2	0.4	1	980	3.53·10 <sup>-8</sup>

**Tableau III.1** : Amplitudes

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 (III.15 et III.26), on obtient :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - (f/2)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left( \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \left( \frac{(\mu + 2 \cdot P \cdot \pi) \cdot f}{2 \cdot \pi} + f/2 \right) \right)^2} + A_\theta \sin \left( \frac{2\pi f z_i \Delta\theta}{\omega} - \phi \right) \text{ III.33}$$

$A_\theta$ : l'amplitude des vibrations relatives entre l'outil et la pièce usinée,

$f_z$ : la fréquence des vibrations,

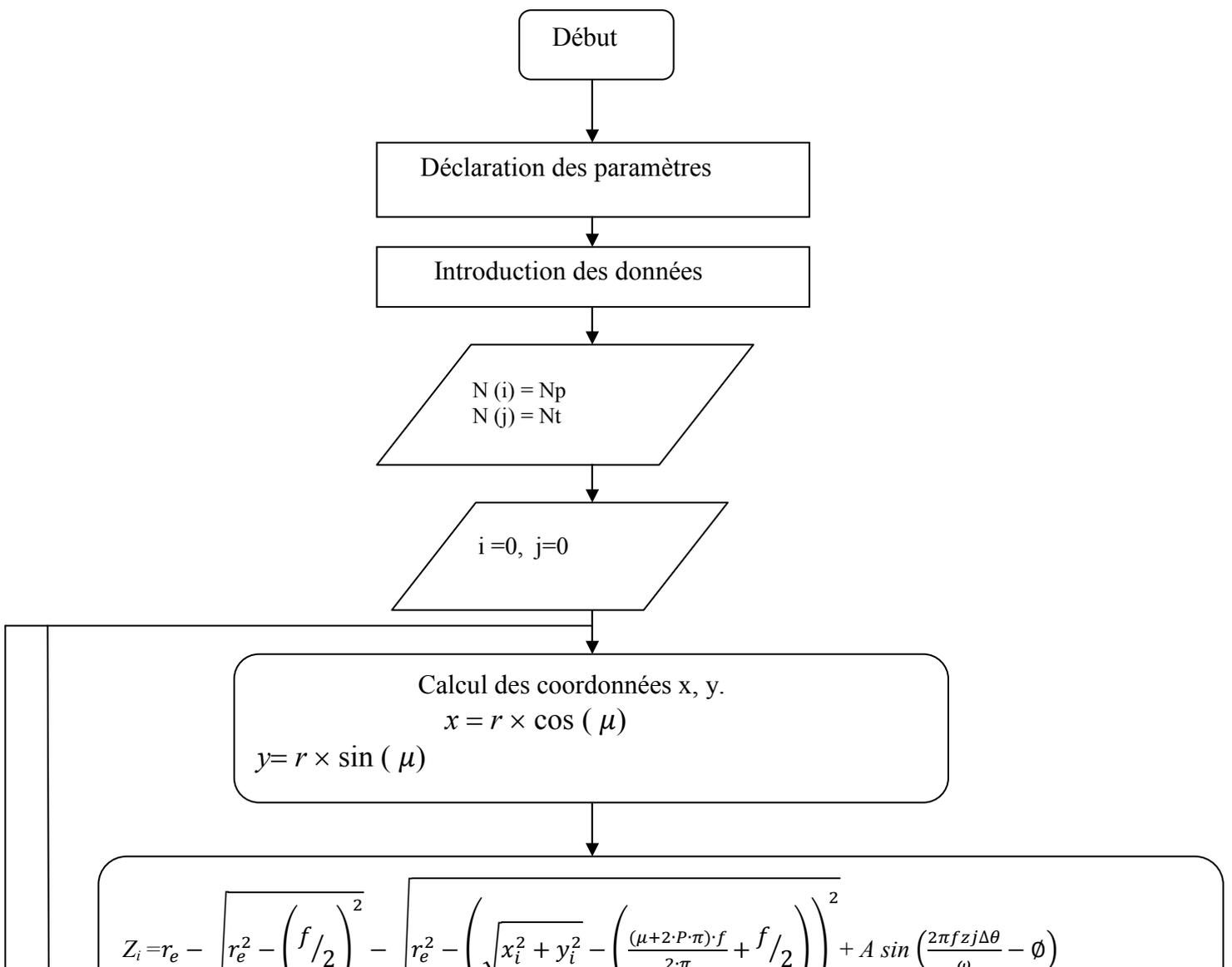
$\phi$  : Déphasage,

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

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

Après avoir obtenu le modèle mathématique exprimant l'altitude  $Z_i$  du point  $M_i$  à partir d'une modélisation de l'usinage de la surface et de l'empreinte laissée par le point générateur de l'outil,

on l'introduit dans un simulateur approprié permettant de générer un fichier de point  $X_i, Y_i, Z_i$  qui représente l'image virtuelle de la surface usinée



**Figure III.13** : Organigramme pour la génération du fichier des points  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ .

# Chapitre IV

## Simulation numérique et Discussion des résultats

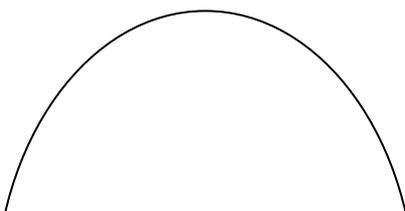
### **IV.1 Introduction :**

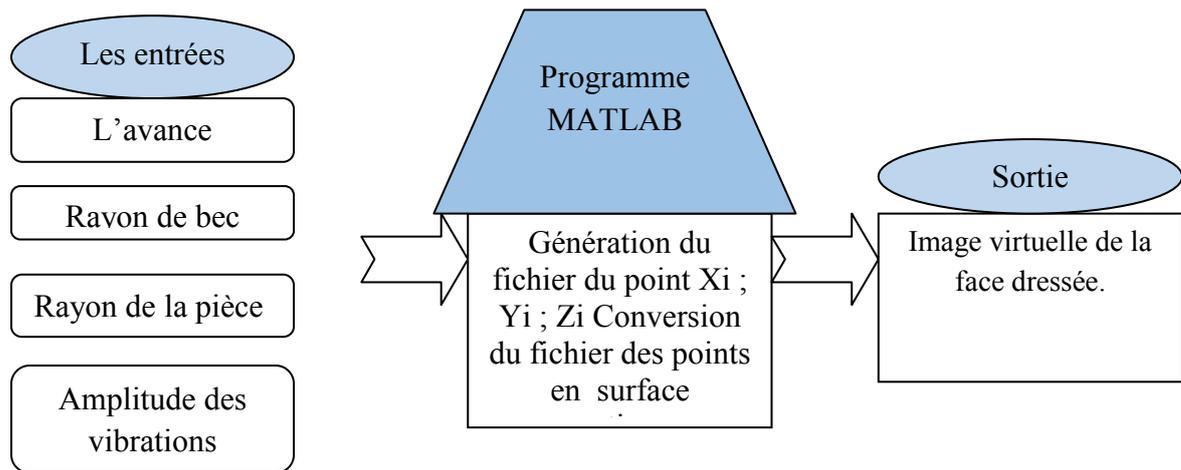
La simulation numérique est largement répandue dans l'étude des procédés de mise en forme par enlèvement de matière sous forme de copeau. Cet outil de travail est très puissant pour l'évaluation des performances du processus sans le besoin d'effectuer des expériences longues et coûteuses.

Dans ce chapitre, une série de simulations a été effectuée et présentée pour évaluer les performances du modèle développé dans le chapitre III. Par ces simulations, 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 simulation, représentée dans la (figure IV.1), est élaborée selon deux étapes :





**Figure IV.1** : Diagramme schématique de la simulation.

- La génération d'un fichier de points à l'aide d'une utilisation d'un programme du logiciel Matlab,
- Ces points, représentant les coordonnées  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ , des points  $M_i$ , appartiennent à la surface dressée.

La génération des figures, qui correspondent à ce fichier et réalisée avec le logiciel Matlab, représente l'image virtuelle de la surface obtenue par l'opération de dressage.

#### **IV.2 Choix des avances de coupe :**

Comme précisé plus haut, le facteur le plus important influant sur la rugosité théorique (défaut de troisième ordre) est l'avance.

Pour notre cas, nous avons choisi pour les valeurs suivantes :

- 1-  $f = 0.2$  mm/tr
- 2-  $f = 0.4$  mm/tr

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

#### **IV.3 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 les valeurs suivantes qui permettent de mieux apprécier la trace de l'empreinte de l'outil (spirale) :

- 1-  $r_e = 0.4$  mm
- 2-  $r_e = 0.8$  mm

## **IV.4 Présentation des simulations :**

### **IV.4.1 Simulation sans vibration :**

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

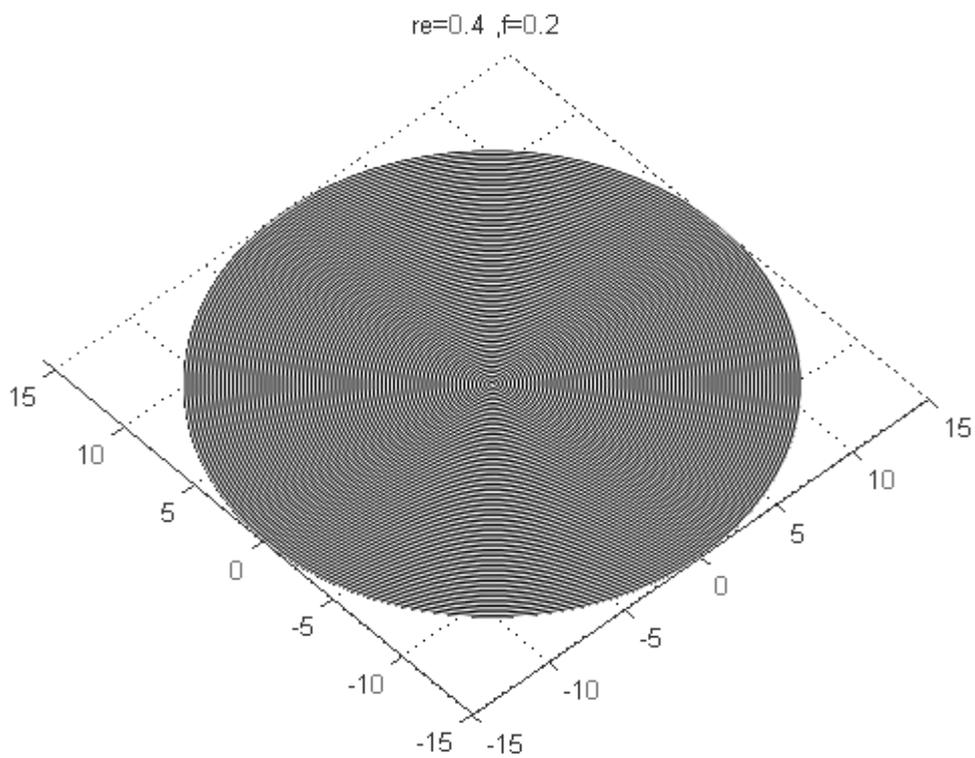
**Tableau IV.1:** Les simulations à effectuer (sans vibration)

#### **IV.4.1.1 Etat de surface des pièces usinées (sans vibration) :**

<b>Pièces</b>	<b>Rayons de bec <math>re</math> (mm)</b>	<b>Avances <math>f</math> (mm/tr)</b>	<b>Vitesse de rotation (tr/mn)</b>
1	0.4	0.2	355
2	0.4	0.4	
3	0.8	0.2	
4	0.8	0.4	



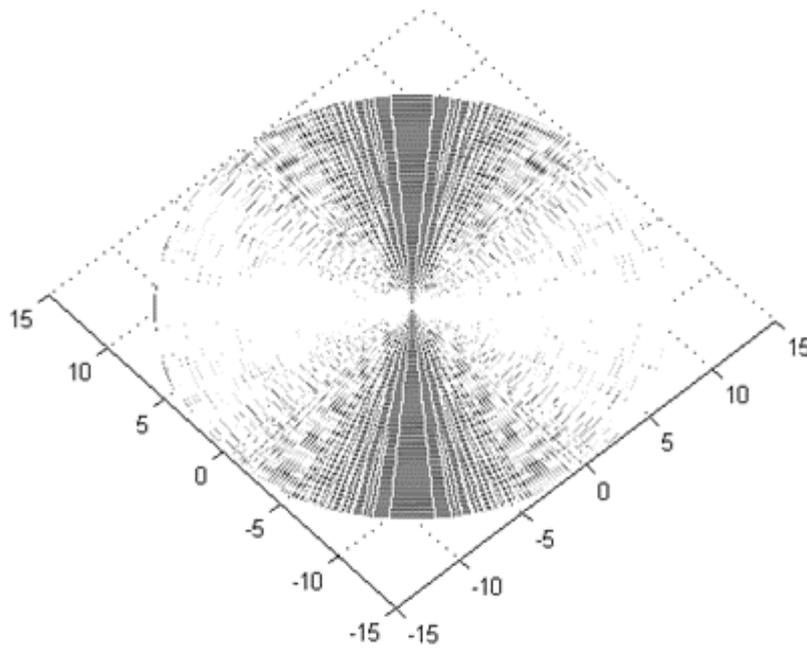
**Figure IV.2:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr



**Figure IV.3:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr



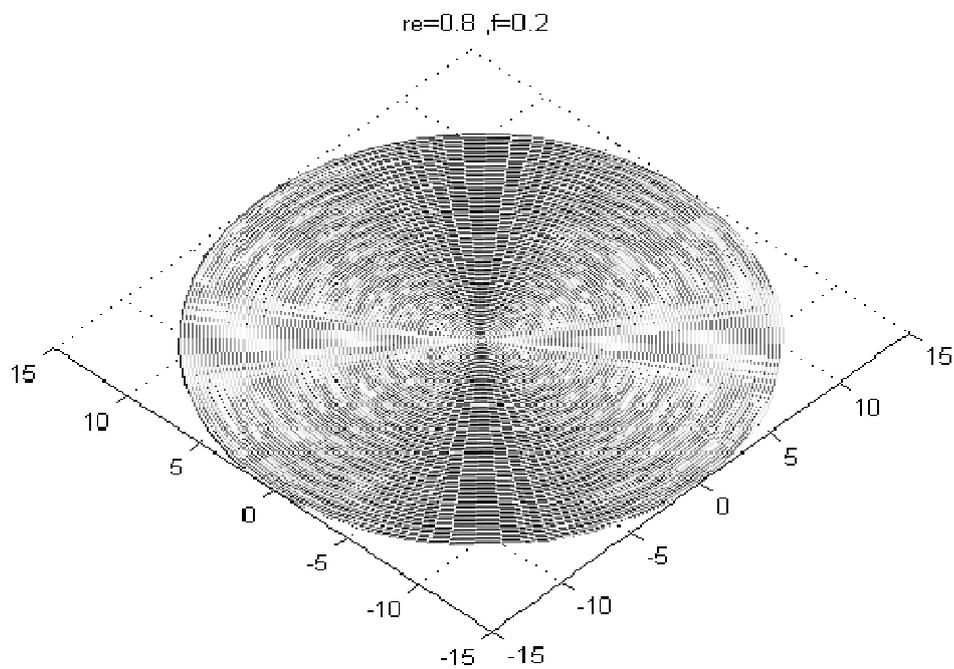
**Figure IV.4:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.4$  mm/tr



**Figure IV.5:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.4$  mm/tr



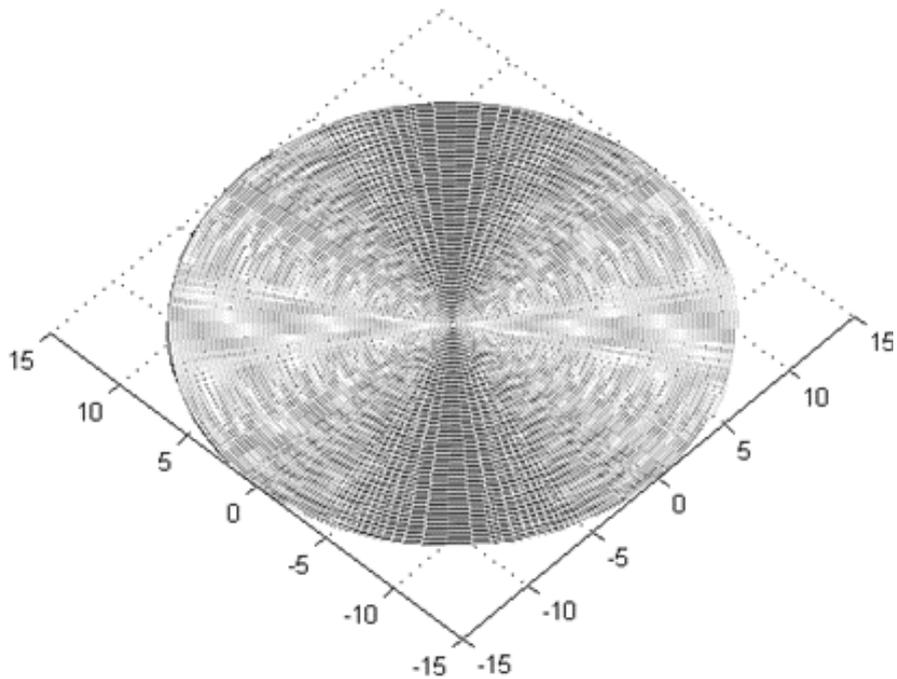
**Figure IV.6:** Image réelle de la surface usinée ;  $r_e = 0.8$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr



**Figure IV.7:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $r_e = 0.8$  mm,  $f = 0.2$  mm/tr



**Figure IV.8:** Image réelle de la surface usinée ;  $r_e = 0.8$  mm,  $f = 0.4$  mm/tr



**Figure IV.9 :** Image virtuelle de la surface usinée ;  $r_e = 0.8$  mm,  $f = 0.4$  mm/tr

#### **IV.4.1.2 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.4.2 Simulation avec vibration:**

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

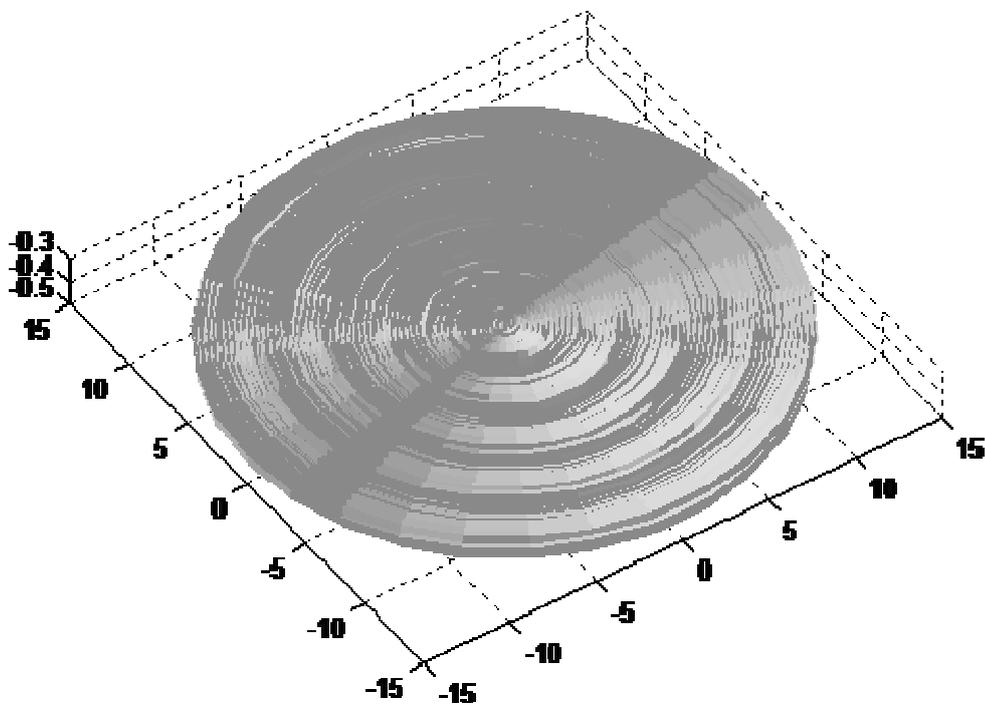
<b>Pièces</b>	<b>Rayons de bec <math>r_e</math></b> <b>(mm)</b>	<b>Avances <math>f</math></b> <b>(mm/tr)</b>	<b>Amplitude A</b> <b>(mm)</b>	<b>Vitesse de</b> <b>Rotation Vr</b> <b>(tr/mm)</b>
1	0.4	0.2	$2.45 \cdot 10^{-8}$	140
2	0.4	0.4	$3.53 \cdot 10^{-8}$	
3	0.8	0.2	$2.45 \cdot 10^{-8}$	
4	0.8	0.4	$3.53 \cdot 10^{-8}$	

**Tableau IV.2 :** Les simulations à effectuer (avec vibration)

#### IV.4.2.1 Etat de surface des pièces usinées (avec vibration) :



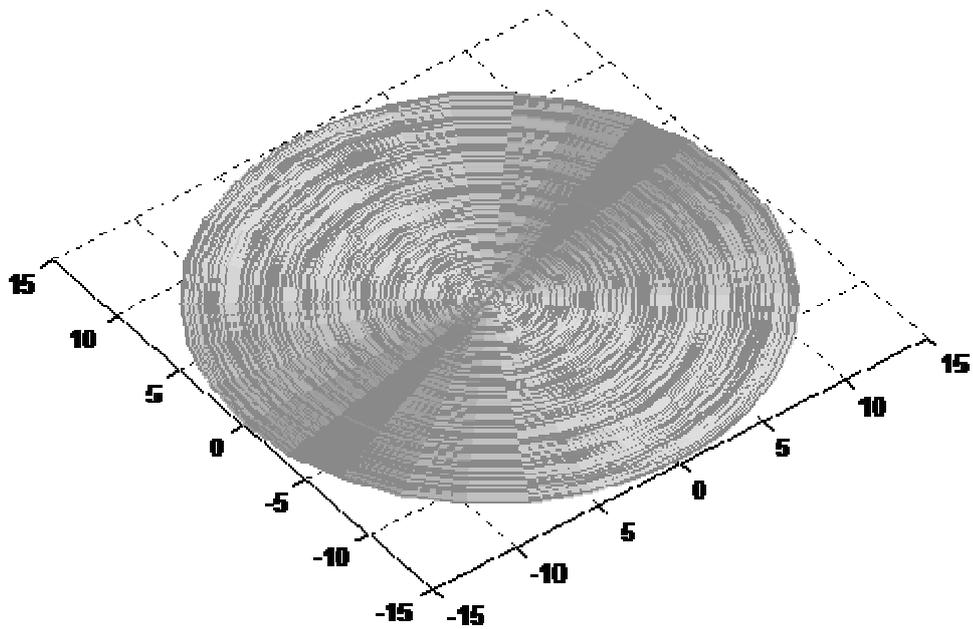
**Figure IV.10:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.4 \text{ mm}$ ,  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$



**Figure IV.11:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.4 \text{ mm}$ ,  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$



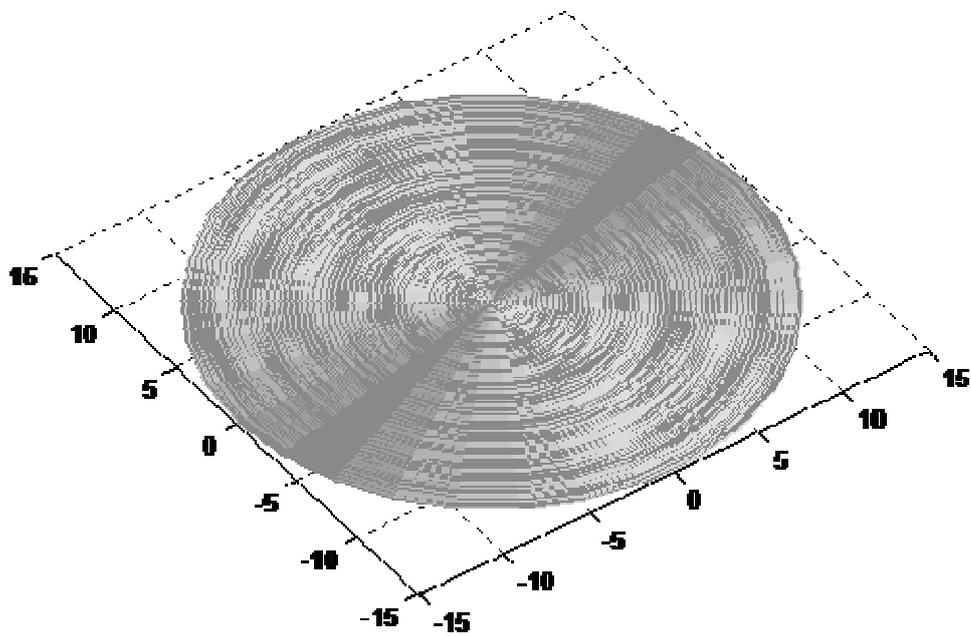
**Figure IV.12:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.4$  mm,  $f = 0.4$  mm/tr



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



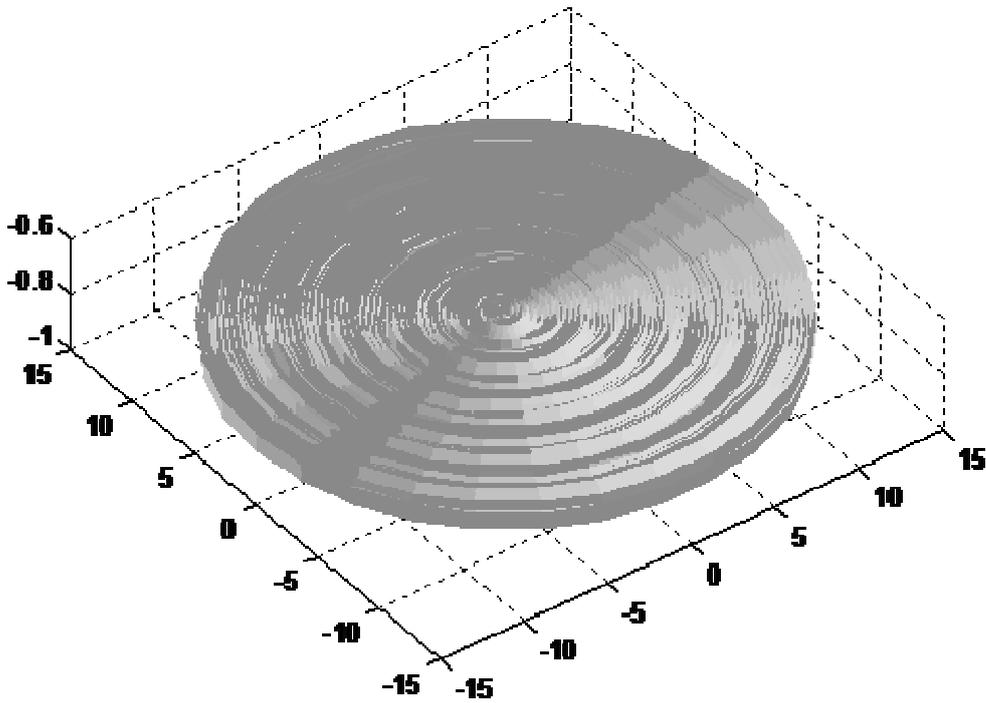
**Figure IV.14:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.8 \text{ mm}$ ,  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$



**Figure IV.15:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.8 \text{ mm}$ ,  $f = 0.2 \text{ mm/tr}$



**Figure IV.16:** Image réelle de la surface usinée ;  $re = 0.8 \text{ mm}$ ,  $f = 0.4 \text{ mm/tr}$



**Figure IV.17:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $re = 0.8 \text{ mm}$ ,  $f = 0.4 \text{ mm/tr}$

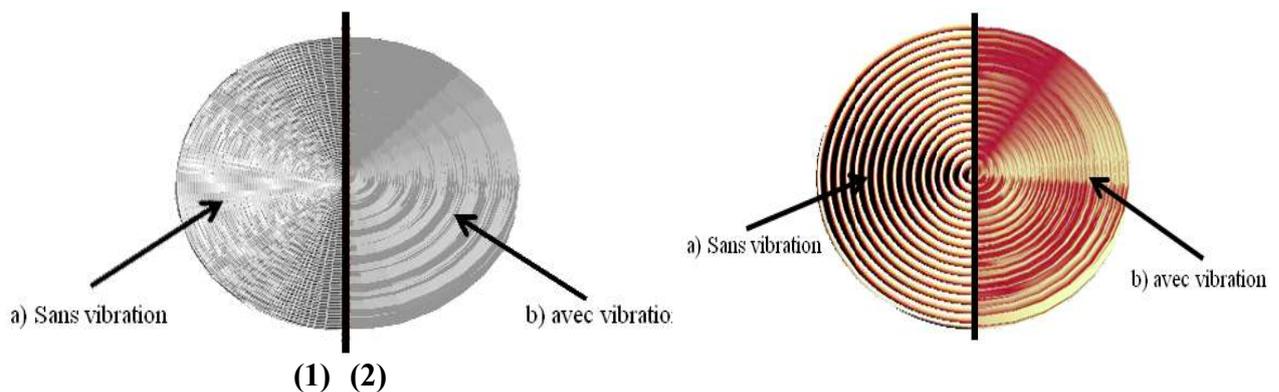
#### IV.4.2.2 Discussion des résultats :

Les figures présentées ci-dessus représentent l'image virtuelle d'une surface usinée obtenue par une opération de dressage. Nous avons obtenu ces résultats par simulation numérique qui est basée sur le modèle développé dans le chapitre précédent. Lors de la simulation, les paramètres considérés sont l'avance, et le rayon du bec de l'outil de coupe.

En comparant les deux cas cités (avec et sans vibration), l'allure de la forme de spirale diffère. En effet, et pour le cas de vibrations, la forme de l'allure n'est pas homogène et conforme. Cette différence peut être traduite par les mouvements engendrés par l'outil et surtout lors de l'interaction entre les paramètres de coupe

#### IV.5 Comparaison des résultats obtenus avec les résultats extraits de mémoire

[23] :



**Figure IV.18:** Différence des allures des états de surface

(a=sans vibration et b=avec vibration)

(1) résultats de notre simulation / (2) résultats de [23]

A travers nos différentes expériences et résultats, nous avons constaté que notre modèle utilisé permet d'obtenir la qualité de surface où l'allure de la forme de spirale n'est pas homogène.

En comparant notre travail avec celui de KASSA TOUFIK et BOUAAM SIDALI [23], puisque on s'intéresse à la rugosité théorique, l'état de surface est meilleur dans (Figure IV.18), cette différence peut être due aux conditions de coupe appliquées sur le matériau du fait que les aciers inoxydables sont difficiles à usiner ou bien sur la stabilité du système POM.

## **IV.6 Conclusion :**

Dans le présent chapitre nous proposons un modèle mathématique qui permet de donner une image virtuelle de la surface obtenue par une opération de dressage. Puisque on s'intéresse à la rugosité théorique, qui est influencée principalement par l'avance et le rayon du bec de l'outil.

Une description de la surface usinée et une modélisation géométrique de la trace laissée par l'outil de coupe ont été faites. Le développement détaillé du modèle mathématique et la procédure à suivre pour reproduire la surface usinée est présenté. Ensuite, un organigramme qui permet d'utiliser le modèle développé pour générer le fichier de points qui représente l'image virtuelle de la surface obtenue par une opération de dressage est réalisé.

## CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés à étudier une opération de dressage du procédé de tournage sur une pièce d'acier inoxydable et l'étude de l'influence des phénomènes induits lors de cette opération.

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 l'étude du comportement mécanique global du système POM (Pièce-Outil de coupe-Machine-outil) du fait que les paramètres de coupe utilisés lors de l'usinage influent d'une manière importante sur l'état de surface. L'étude dynamique et l'étude des vibrations ont été importantes pour la modélisation et la simulation de notre système dans les chapitres III et IV.

Dans notre travail, nous avons présenté les résultats des simulations relatives à un modèle mathématique qui permet de donner l'image virtuelle de la surface d'une pièce obtenue par usinage (tournage/dressage). Tous les programmes ont été réalisés et simulés avec le logiciel Matlab.

Les simulations ont montré que la rugosité théorique est conditionnée principalement par deux paramètres : l'avance de l'outil de coupe et la géométrie de l'outil de coupe (rayon du bec), l'application d'un mauvais choix d'un paramètre de coupe conduit à l'obtention d'un mauvais état de surface.

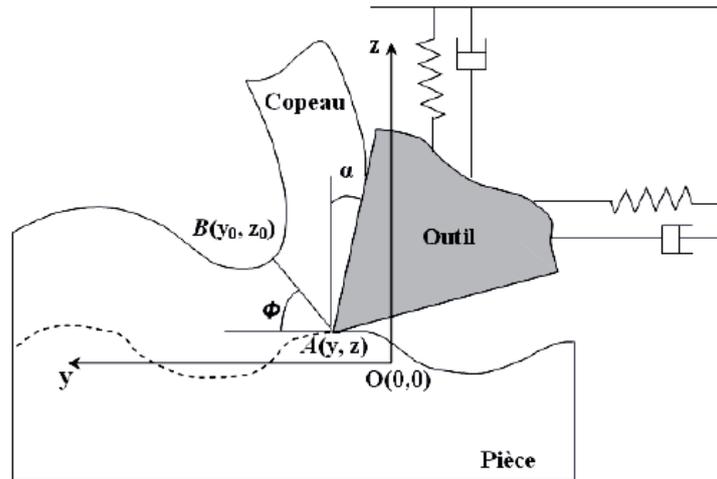
## **Bibliographie :**

[1] **Alain Passeron**, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997

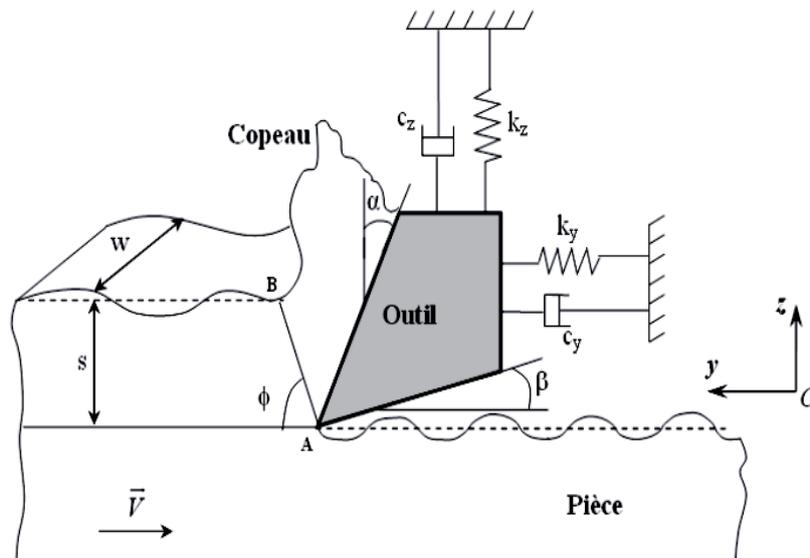
- [2] **M. Assas, M. Djenane**, «Optimisation des Conditions d'Usinage Basé sur un Critère Combiné», Deuxième Journées de Mécanique EMP, Alger 23 et 24 Décembre 2001
- [3] **A. TOUMINE**, « Usinage », INSA de LYON, Groupe conception - productique, 2007
- [4] **Rocdacier**, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011
- [5]**Luc Masset**, « Analyse de gammes d'usinage par la méthode des éléments finis »,2004
- [6] **Toufic WEHBE**, « Étude des vibrations de pièce mince durant l'usinage par stéréo corrélation» vendredi 24 septembre 2010
- [7]**Vincent MOREAU**, « Etude dynamique de l'usinage et de l'interaction pièce-outil par mesure des d'emplacements : application au fraisage et au tournage » 28 Janvier 2010
- [8]**B. R. PATEL, B. P. Mann et K. A. Young**. «*Uncharted islands of chatter instability in milling*». International Journal of Machine Tools and Manufacture». 2008, Vol. 48/1,p: 124-134.
- [9] **M. L. CAMPOMANES et Y. Altintas**. « *An Improved Time Domain Simulation for Dynamic Milling at Small Radial Immersions* ». Journal of Manufacturing Science and Engineering.2003, Vol. 125/3, p: 416-422.
- [10] **Arnaud CROLET**, «contribution à l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système (pièce– outil – machine) sur la qualité de surface obtenue en tournage de superfinition»29 septembre 2008
- [11]**RAPHET, B.**, États de surface - Caractérisation, in Techniques de l'Ingénieur -Sciences & Techniques. 2005, Vol. R 1230. p. 22
- [12] **BENMOHAMMED B**. «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 : 1996
- [13] **ISPAS C., PREDINCEA N., ZAPCIU M., MOHORA C. BOBOC D.** «Machines-outils- Essais et Réception», 1998
- [14] **BENMOHAMMED B**. «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 : 1996

- [15] **ISPAS C., GHEORGHIU H., PARAUSANU I., ANGHEL V.** «Vibrations des systèmes Technologiques». Éditeur Agir, Série : Ingénierie Mécanique, Bucarest, 1999.
- [16] **Claudiu-Florinel Bisu**, «Etude des vibrations auto-entretenues en coupe tridimensionnelle : nouvelle modélisation appliquée au tournage», 20 Avril 2008.
- [17] **G. Paquet, Guide de l'usinage**, les Guides Industriels Edition DELAGRAVE, France, 2000.
- [18] **W.WU D et C.R.LUI**, An analytical model of cutting dynamics. Part 1 : model building. Trans. ASME J. Engng. Ind, Vol. 107, pp. 107-111 , 1985a.
- [19] **W.WU D et C.R.LUI**, An analytical model of cutting dynamics. Part 2 : vérification. Trans. ASME J. Engng. Ind, Vol. 107, pp. 112-118, 1985b.
- [20] **SEGRETI M**, Vibrations en coupe orthogonale. Modélisation, étude de stabilité et validation expérimentale. Thèse de Doctorat de Mécanique, Universités de Metz - France, N° d'ordre, 2002.
- [21] **R. Laheurte**, Application de la théorie du second gradient a la coupe des matériaux Thèse de Doctorat de Mécanique, Universités de Bordeaux 1 - France, N° d'ordre : 2935, 2004.
- [22] **C.F.Bisu**, Etude des vibrations auto-entretenues en coupe tridimensionnel : nouvelle modélisation appliquée au tournage, thèse de doctorat, université bordeaux I et Université politehnica de Bucarest.
- [23] **T.Kassa et S.Bouam**, Simulation numérique d'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, 26 juin 2012

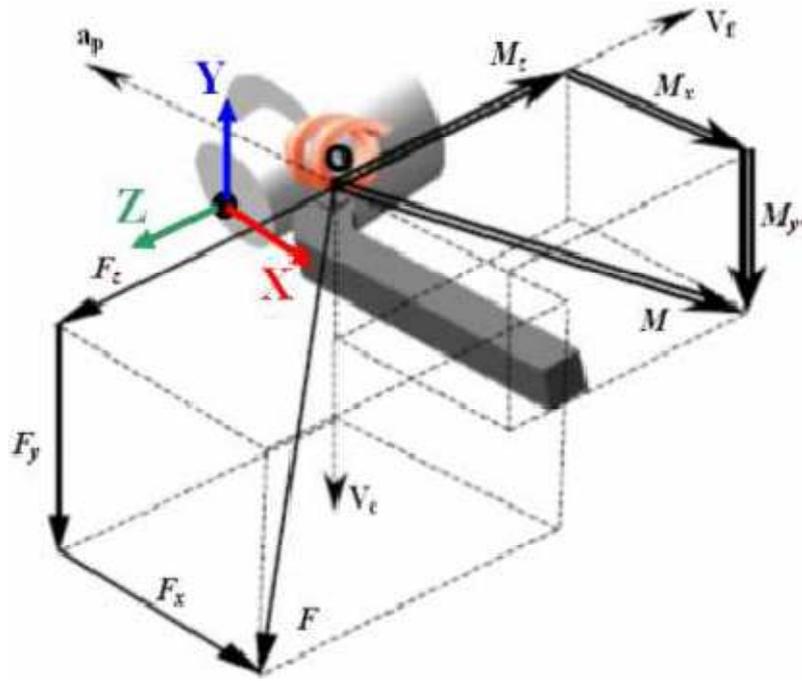
## **Annexe I**



**Modèle de Wu et Liu**



**Modèle de Segreti**



Modèle de Laheurte