

## *Dédicace*

*Nous dédions ce mémoire à :*

✓ *Nos parents :*

✓ *Nos mères, qui ont œuvré pour notre réussite, de par leur amour, leur soutien, tout les sacrifices consentis et leurs précieux conseils, pour leur assistance et leur présence dans nos vies, recevez à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de nos sentiments et de notre éternelle gratitude.*

✓ *Nos pères, qui peuvent être fiers et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour nous aider à avancer dans la vie. Puisse ALLAH faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent que vous nous avez consacré.*

✓ *Nos sœurs et frères qui n'ont cessé d'être pour nous des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

✓ *Nos enseignants du Département de Mécanique de notre Université qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

## Remerciements

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre promoteur Monsieur **Temmar Mustapha** ainsi qu'à notre Co-promotrice mademoiselle **Melzi Nesrine**. Nous les remercions de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions durant nos recherches.

Nous remercions nos chers parents qui ont suivi de loin et de près nos recherches.

Enfin, nous remercions tous nos proches, nos collègues ainsi que nos chers amis et amis qui nous ont accordés leurs sincères amitiés et confiances ; à qui nous devons notre reconnaissance et notre attachement.

À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

## SOMMAIRE

<b>CHAPITRE I : USINAGE AVEC ENLEVEMENT DE MATIERE .....</b>	<b>1</b>
I. 1/DEFINITION.....	1
I.2/LES PROCEDES D’USINAGE.....	1
I.3/COUPE DES METAUX.....	3
I.4/OUTILS DE COUPE.....	6
I. 5/MATERIAUX DES OUTILS DE COUPE.....	8
I.6/LES COPEAUX .....	9
I.7/VITESSE DE COUPE.....	11
I. 8/LUBRIFICATION.....	12
I. 9/LES PROCEDES D’USINAGE.....	13
<b>CHAPITRE II :LE PROCEDE D’USINAGE EN TOURNAGE .....</b>	<b>16</b>
II./DEFINITION.....	16
II. 1/PRINCIPE DE TOURNAGE.....	17
II.2/LES TOURS.....	17
II.3/DIFFERENTS TYPES DE TOURS.....	18
II.4/DIFFERENTES OPERATIONS DE TOURNAGE .....	19
II.5 /OUTIL.....	20
II.6/CONDITION DE COUPE EN TOURNAGE.....	23
II.6.1/VITESSE DE COUPE.....	23
II.6.2/VITESSE D’AVANCE.....	24
II.7/LES PORTES PIECES.....	26
II.8/TYPES DE MONTAGES.....	26

## **CHAPITRE III : ETAT DE SURFACE**

III.1/GENERALITE.....	28
III. 2/COMPORTEMENT MECANIQUE GLOBAL DU SYSTEME PIECE/OUTIL/MACHINE (P/O/M).....	28
III.2.1/DESCRIPTION DU SYSTEME POM.....	29
III.2.2/LES ELEMENT INDEPENDANT DE L'OPERATION D'USINAGE.....	30
III.2.3/LES ELEMENT DEPENDANT DE L'OPERATION D'USINAGE .....	31
III 3/LES ASPECTS TECHNOLOGIQUES DE LA COUPE.....	33
III 4/VIBRATION EN USINAGE.....	34
III 5/TYPES DE VIBRATIONS.....	34
III 6/MECANISME DE FORMATION DE PROFIL MICROGEOMETRIQUE DES SURFACES USINEES.....	35
III.7/MODELISATION DE LA TOPOGRAPHIE DES SURFACES USINES.....	36
III.7.1/MODELE DE CHEUNG ET LEE.....	36
III.8/DESCRIPTION ET MODELISATION .....	41

## **Chapitre IV/SIMULATION NUMERIQUE ET DISCUSSION DES RESULTATS..43**

IV 1/INTRODUCTION.....	43
IV 2/ELABORATION DU MODELE.....	43
IV.3/MODELISATION DE L'USINAGE DE SURFACE.....	43
IV 4/CALCUL DE L'ALTITUDE ZI DU POINT MI DANS LA CASE OU $F < F_{MAX}$ ...	45
IV 4.1/CALCUL DE LA COORDONNEE $X'_i$ ET DE LA DISTANCE X .....	46
IV 4.2/CALCUL DE L'ALTITUDE ZI (SANS VIBRATION).....	47
IV 5/ MODELISATION DU SYSTEME USINANT EN TOURNAGE.....	49
IV 6/ PRESENTATION DES SIMULATIONS.....	54
IV 6.1/SIMULATION SANS VIBRATION.....	54
IV 6.2/SIMULATION AVEC VIBRATION.....	58

**listes des tableaux**

**Tableau IV.1** : Amplitudes

**Tableau IV.2** : Simulations à effectuer (sans vibration)

**Tableau IV.3** : Simulations à effectuer (avec vibration)

**liste des symboles**

Mc: Mouvement de coupe	
Ma : Mouvement d'avance	
Mp: Mouvement de profondeur	
Vc: Vitesse de coupe	m/min
D:Diamètre de la pièce	mm
L : Longueur	mm
N:Vitesse de rotation de la pièce	tr/min
$\alpha$ : L'angle de dépouille	(°)
$\gamma$ :L'angle de coupe	(°)
$\beta$ : L'angle de taillant	(°)
$\varphi$ : L'angle de direction d'avance	(°)
Rt :L'écart totale de la Rugosité	$\mu\text{m}$
$\omega$ : Vitesse angulaire	rad/s
a: Profondeur de passe	mm
f: L'avance de l'outil.	mm
V : La vitesse de rotation de l'axe	tour/min
POM: Pièce / Outil de pièce / Machine -outil	
$\xi$ : Facteur d'amortissement	
$\emptyset$ : L'angle de cisaillement	(°)
A: L'amplitude des vibrations	
re : Rayon du bec de l'outil	
$\mu$ :Angle varie avec un pas de $\Delta\theta$ de 0-360°	(°)
$\Delta\theta$ : Section radial de la spiral,	
$\omega_0$ : Pulsation propre	(rad/s).

## Usinage avec enlèvement de matière

---

$T_0$ : La période	[s]
$f_z$ : Fréquence propre	rad/s
$F_c$ : L'effort de coupe	N
$K_c$ : Force de coupe par unité de surface (valeur indicative à partir de Sandvik).	
$s$ : (profondeur de passe (mm) * l'avance de coup [mm])	
$m$ :Masse de la pièce	kg
$\rho$ : Masse volumique	k g. m-3
$E$ : Module de Young	GPa
$K_x$ : Raideur équivalente dans la direction	N/m
$C_x$ : Coefficient d'amortissement	Ns/m
$h$ :Epaisseur de coupe	mm
$b$ : Largeur de coupe	mm
$Z_i$ : L'altitude de chaque point	
$K_r$ : Angle de direction d'arête	(°)

### **Introduction Générale**

L'usinage par enlèvement de matière est très important dans la fabrication mécanique. Ce domaine est soumis à de fortes contraintes : économiques, technologiques et physiques... etc. Les industriels ont besoin d'améliorer leurs processus de production pour l'augmentation de la productivité en réduisant les inconvénients de ses opérations.

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. Ce système élastique comprend le dispositif de fixation, la pièce et l'outil. L'interaction, entre les systèmes élastiques et les processus d'usinage, constitue le système dynamique du système usinant.

Pour bien comprendre ce phénomène, nous nous sommes intéressés à étudier une opération de dressage du procédé de tournage sur une pièce d'acier XC48 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.

Le présent travail est articulé en quatre chapitres :

Dans le chapitre I, une recherche bibliographique introduira les notions nécessaires sur l'usinage en général.

Le chapitre II sera consacré à l'état de l'art sur le procédé de tournage en particulier et sur le comportement mécanique global du système POM (Pièce-Outil de coupe-Machine-outil) : Dynamique de coupe.



Le chapitre III se rapporte à l'étude de l'état de surface et de la rugosité. Ayant pris connaissance des différents phénomènes liés au procédé de tournage, nous allons étudier les conditions de coupe qui influencent le fini de surface, nous exposerons par la suite le modèle Cheung et Lee.

Le chapitre IV, 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. . Les programmes seront réalisés et simulés à l'aide du logiciel Matlab

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

## **CHAPITRE I : Usinage avec enlèvement de matière**

### **I.1/ DEFINITION :**

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.

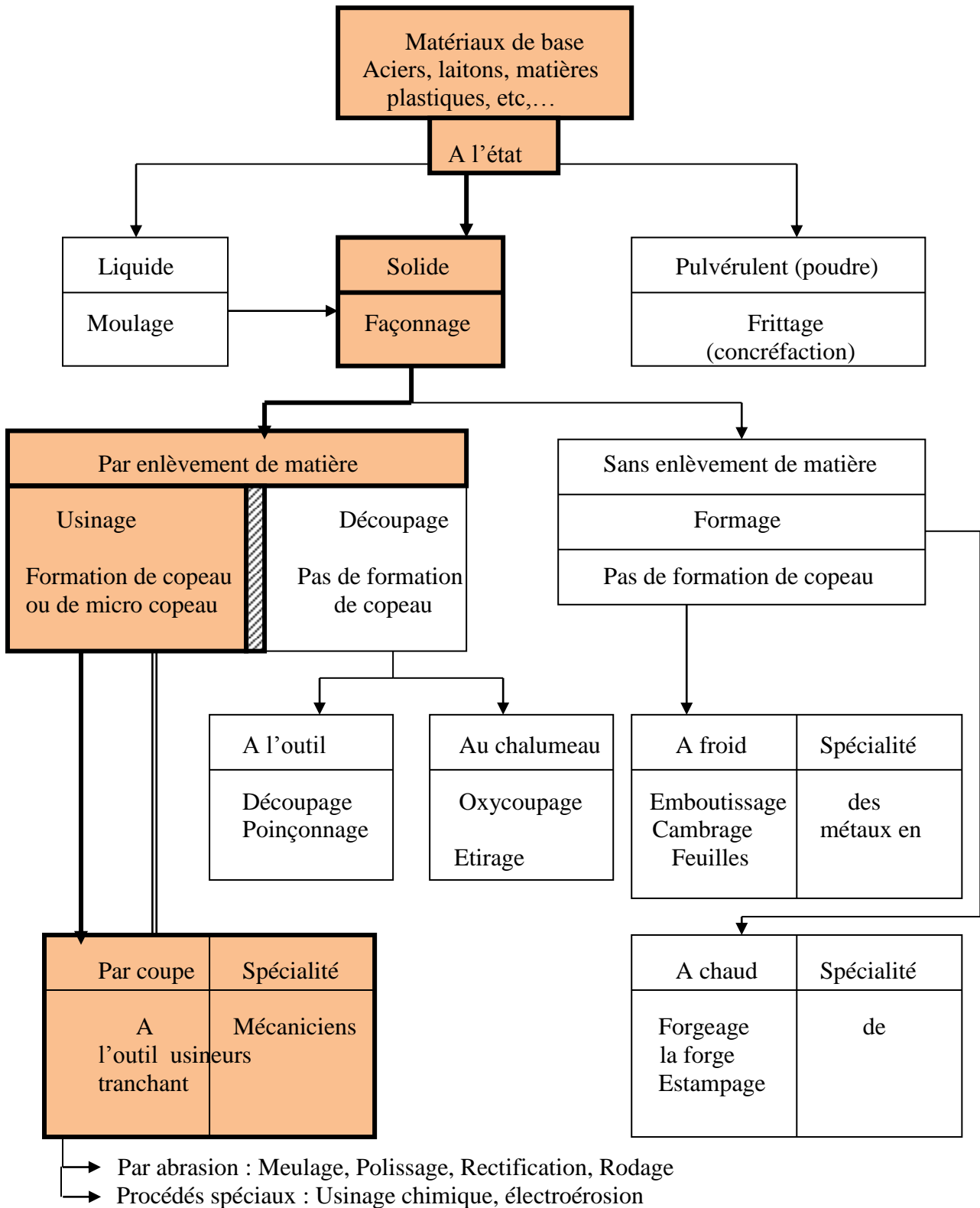
Ces derniers peuvent être classés en deux grandes catégories :

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

### **I.2/ LES PROCEDES D'USINAGE :**

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

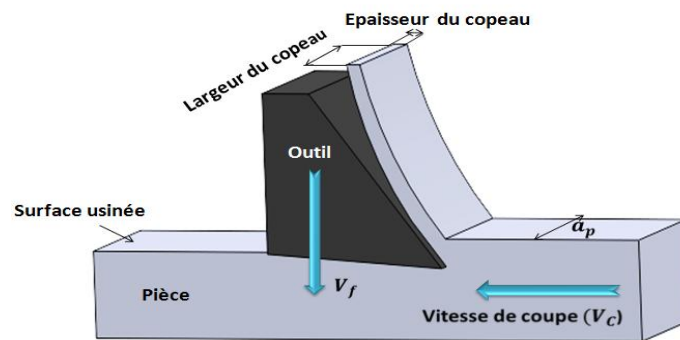
### I.3/ COUPE DES METAUX :

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 ou 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.

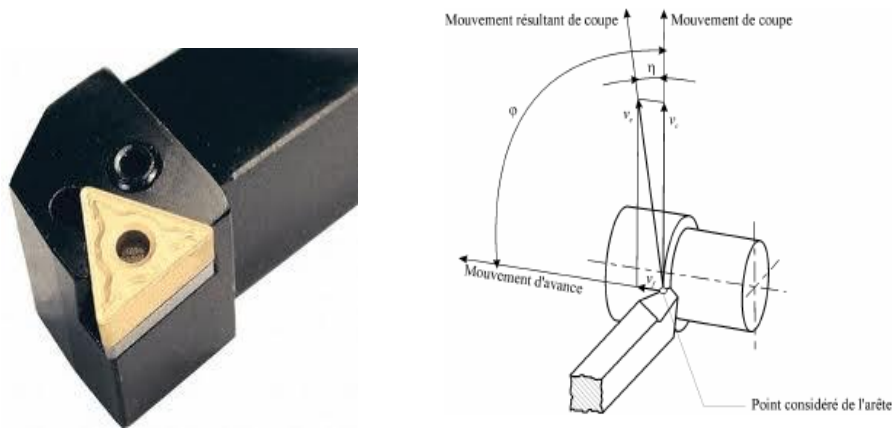
Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation  $n$  et du diamètre  $D$  de l'élément en rotation.

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.

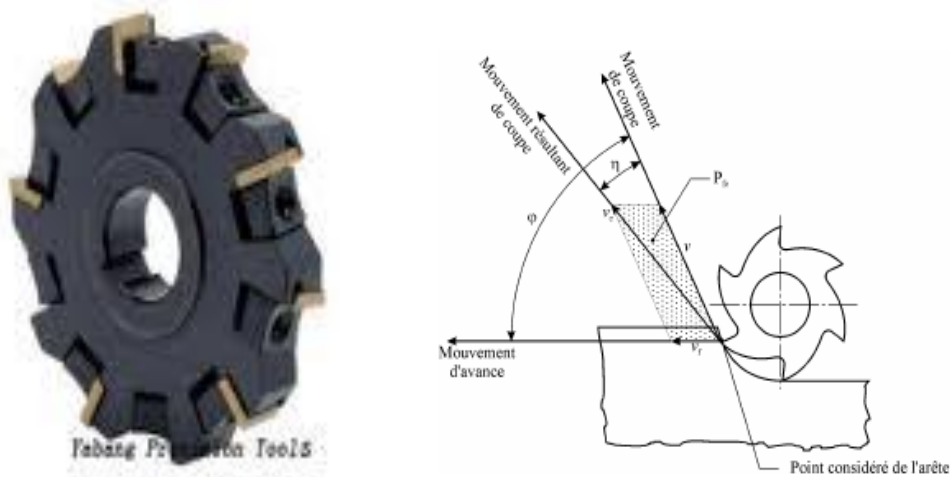
$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} = \text{m/min} \quad (\text{I.1})$$

- **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



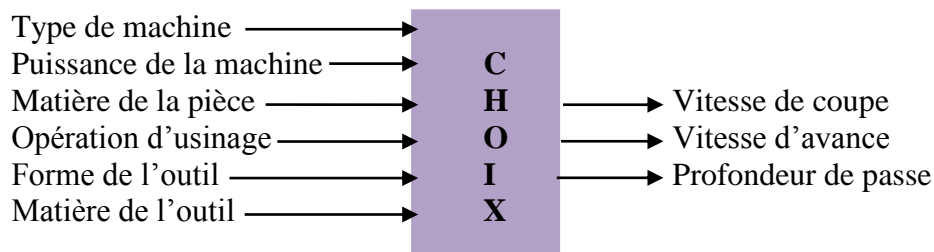
**Figure I.4 :** Mouvements de l'outil et de la pièce en fraisage

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

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).

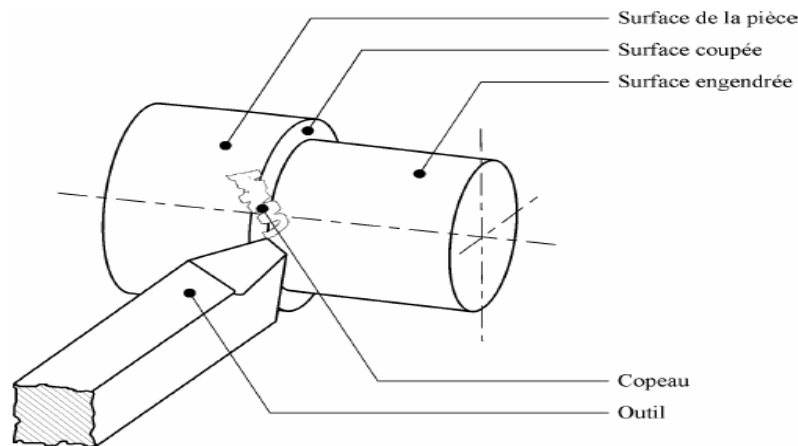
Pour enlever de la matière en cours d'usinage, deux mouvements sont nécessaires : mouvement de coupe et mouvement d'avance. D'une manière générale, ces mouvements de coupe peuvent être donnés soit par la pièce soit par l'outil.

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]

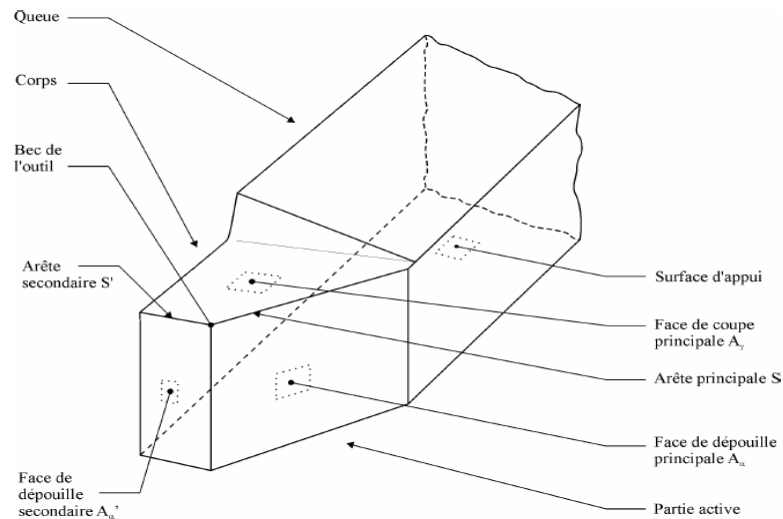
- **Éléments de l'outil :**

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

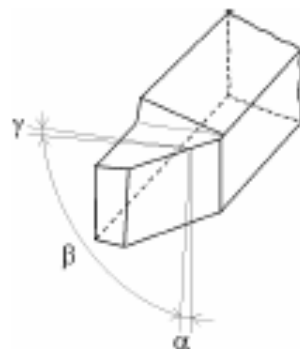
La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces : la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée.

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.

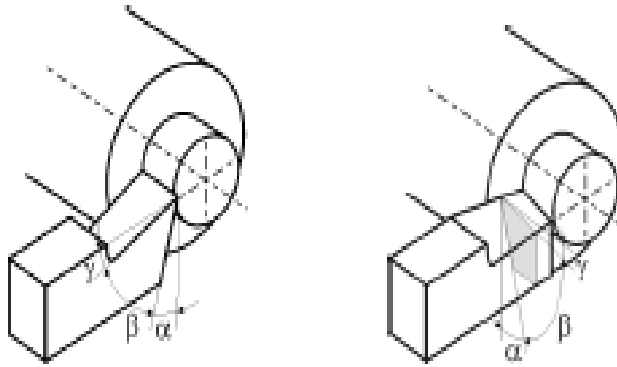
La figure I.8 suivante illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant, l'angle de dépouille  $\alpha$ , l'angle de taillant  $\beta$  et l'angle de coupe  $\gamma$ .





**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  $\alpha$  influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe  $\gamma$  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  $\beta$  affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à  $90^\circ$ .

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

Dans le cas où la somme de  $\alpha$  et de  $\beta$  est supérieure à  $90^\circ$ , on parle de coupe négative ( $\gamma$  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/ LES COPEAUX :

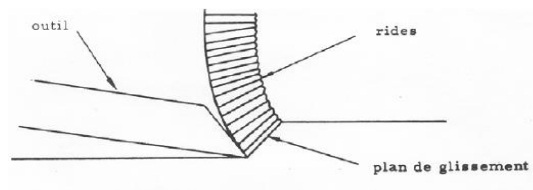
La coupe (formation du copeau) est un processus physique complexe qui s'accompagne de déformations plastiques et élastiques ; elle donne lieu à un frottement important (outil-pièce), au dégagement de chaleur, à la formation d'une arête rapportée (copeau adhérent sur le bec de l'outil), à l'enroulement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

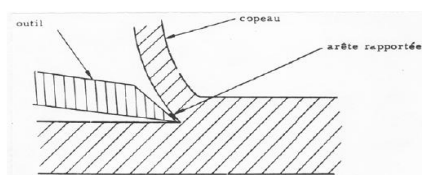
Les formes du copeau varient suivant les conditions d'usinage. L'usinage des métaux plastiques (aciers) donne lieu à trois types de copeaux : continu, cisailé et discontinu. On obtient aussi le copeau fragmenté produit par l'usinage de métaux peu plastiques (fontes, bronzes,...).

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



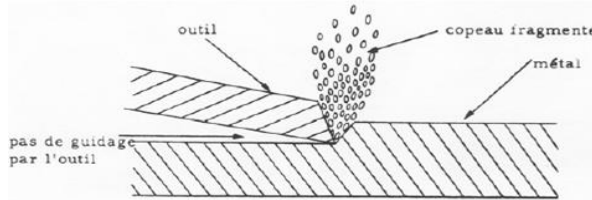
**Figure I.10 :** Copeau continu

- **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/ 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'usage.

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/ 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 :

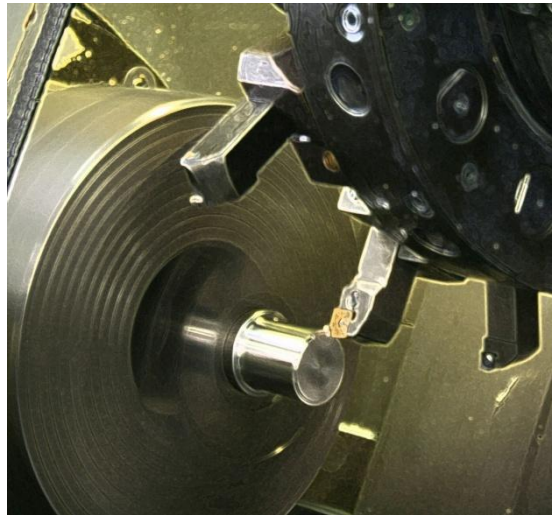
- Les huiles minérales, elles sont issues de la distillation du pétrole,
- Les huiles solubles, ce sont des mélanges d'huiles minérales, d'émulgateurs et d'inhibiteurs de corrosion ajoutés à de l'eau,
- Les fluides synthétiques pour travaux spéciaux.

### **L9/LES PROCÉDES D'USINAGE :**

Lors de l'usinage par enlèvement de matières, on utilise plusieurs procédés.

Les procédés d'usinage les plus répandus sont:

- Tournage,
  - Fraisage,
  - Perçage,
  - Rectification,
  - Rabotage,
  - Usinage sur l'étau-limeur,
  - Etc.,.....
- 
- **Tournage:** Dans ce procédé,  $M_c$  est une rotation continue communiquée à la pièce tandis que  $M_a$  et  $M_p$  sont donnés par l'outil.



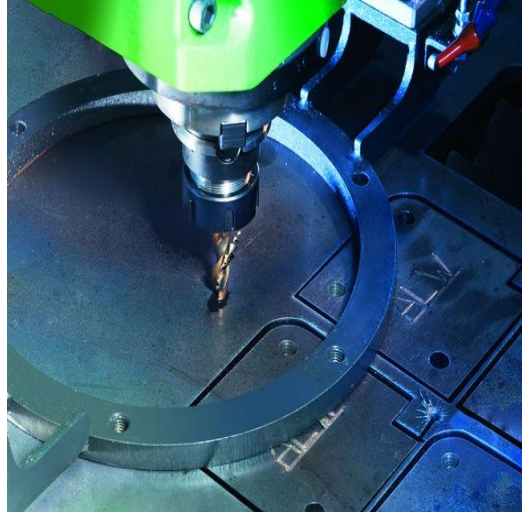
**Figure I.13** : Procédé de tournage

- **Fraisage:** Dans ce procédé,  $M_c$  est une rotation continue communiquée à l'outil (fraise).  $M_a$  et  $M_p$  sont communiqués à la pièce.



**Figure I.14** : Procédé de fraisage

- **Perçage:**  $M_c$  est circulaire et est communiqué à l'outil (forêt ou outil à percer).  $M_a$  est rectiligne et est communiqué à l'outil.  $M_p$  est appliqué par tour de l'outil et se confond à  $M_a$ .



**Figure I.15** : Procédé de perçage

- **Rectification:** C'est un procédé d'usinage utilisé pour les pièces usinées et traitées (traitement thermique). L'outil est la meule.  $M_c$ ,  $M_a$  et  $M_p$  varient suivant le type de rectification.



**Figure I.16** : Procédé de rectification

- **Usinage sur l'étau-limeur:** Dans ce procédé,  $M_c$  est un mouvement rectiligne alternatif de l'outil.  $M_p$  est donné par l'outil et  $M_a$  est communiqué à la pièce.

**Figure I.17** : Procédé d'usinage sur l'étau limeur



## **CHAPITRE II : Le procédé de tournage**

### **II. DEFINITION :**

Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux qui consiste à l'obtention de pièces de forme cylindrique ou/et conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tours. La pièce à usiner est fixée dans une pince, dans un mandrin, ou entre pointes. Il est également possible de percer sur un tour, même si ce n'est pas sa fonction première.

En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant. La combinaison de ces deux mouvements permet l'enlèvement de matière sous forme de copeaux.

Un tour permet de fabriquer principalement des pièces de révolution même si certaines machines peuvent réaliser des formes très complexes (tours de décolletage). Ces pièces peuvent être

- métalliques ou en plastique (tour mécanique)
- en bois (tour à bois)
- en terre (tour vertical de potier).

Les tours à bois et mécaniques conventionnels laissent aujourd'hui de plus en plus la place à des tours à commande numérique, entièrement automatisés. Ces derniers peuvent aisément réaliser des opérations complexes de type fraisage, polygonage, perçages radiaux, etc. La programmation de commande numérique est effectuée par des instructions.[5]



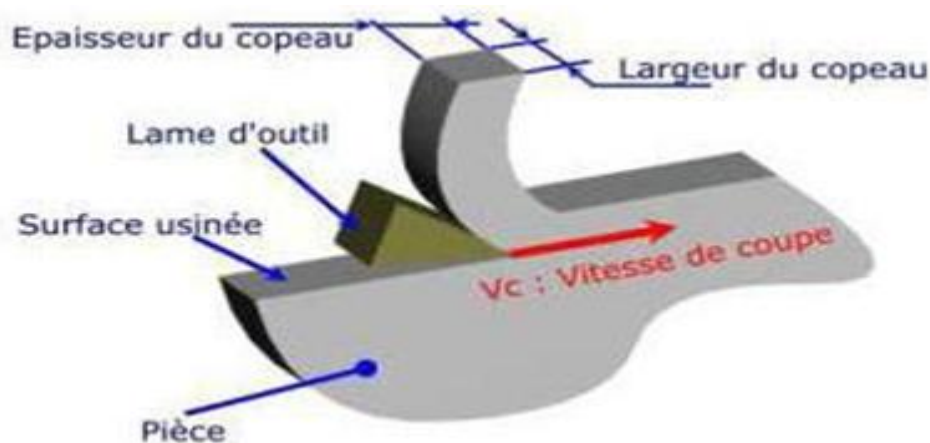
**Figure II.1:** Outil de coupe lors d'une opération de tournage.

### **II.1 principe de tournage :**

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

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.

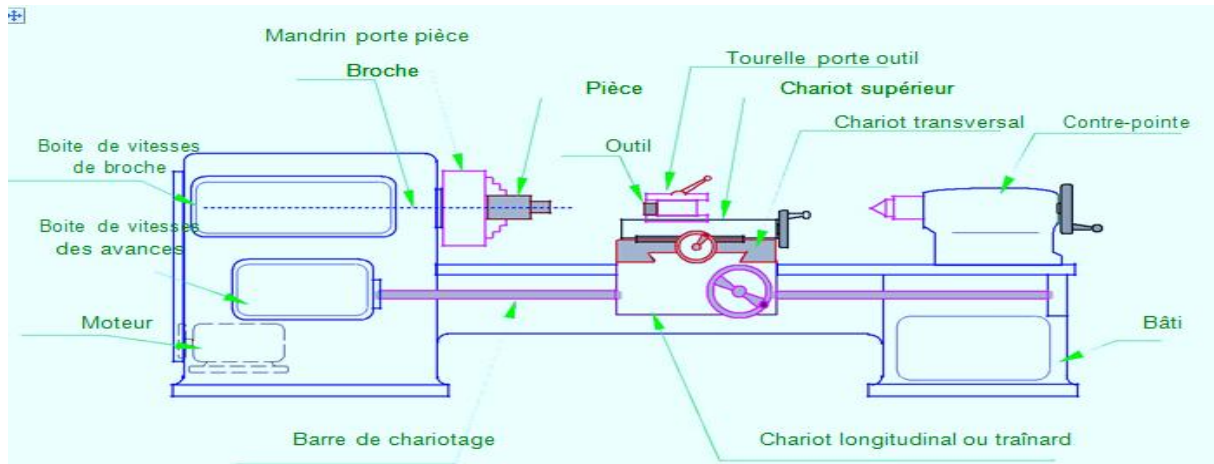
Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [6]



**Figure II.2 :** enlèvement de matière

### **II.2. les tours:**

Les tours permettent de réaliser des surfaces de révolution hélicoïdale cylindrique, cône et plans, sont utilisation principales est dans l'usinage des arbres.



**Figure II.3:** tour

### **II.3 Différents types de tours :**

Afin de répondre à tous les besoins de l'industrie (complexité des pièces, temps d'usinage, capacités), les tours ont évolué. Certains tours sont si complexes qu'ils peuvent être une alternative aux centres d'usinage. Voici les principaux types de tours :

#### **II.3.1 Les tours parallèles à chariotier 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.[7]

#### **Les tours à copier:**

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal.

C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque.[7]

#### **II.3.2 Les tours semi-automatiques:**

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées.

Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises.

La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique.

La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série.[7]

#### **II.3.3 Les tours automatiques:**

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des

comes 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. Elle conviennent pour les très grandes séries.[7]

### **II.3.4 Les tours automatiques multibroches:**

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

### **II.3.5 Les tours à commande numérique:**

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces.

La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives.[7]

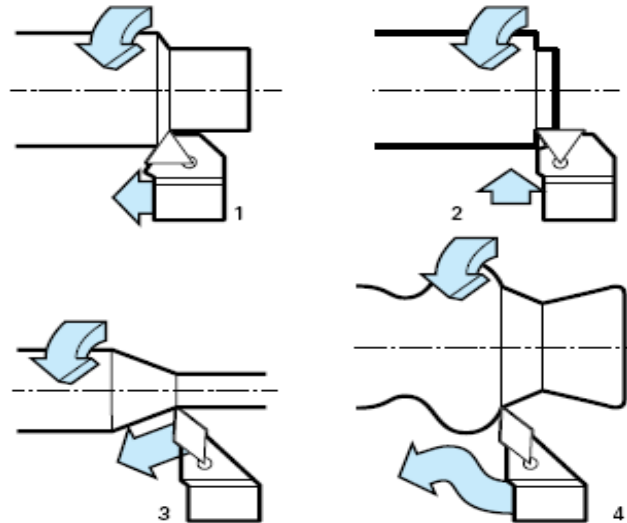
Les formes de la plaquette définissent les angles  $\beta$ ,  $\epsilon_r$  et le rayon de bec  $r_\epsilon$ . Pour une meilleure résistance de la plaquette, le rayon de bec  $r_\epsilon$  et les angles  $\beta$  et  $\epsilon_r$  seront maximum.[8]

## **II.4/ DIFFERENTES 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. contourne.



**Figure II.4 :** 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.

Enfin, en donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque (profil de contournage), 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 ».

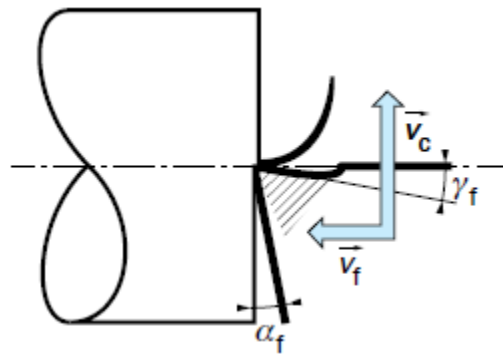
## **II.5/ OUTIL :**

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.

A titre d'exemple, l'angle de coupe latéral est défini dans le plan latéral (Pf) défini par la vitesse d'avance  $V_a$  et la vitesse de coupe  $V_c$ .

Cet angle est représenté dans la figure II.5.



**Figure II.5 :** Angle de coupe latéral

Aussi, et toujours dans le plan latéral ( $V_a$ ,  $V_c$ ), on constate qu'un angle de dépouille,  $\alpha_f$ , est nécessaire pour éviter le frottement de la face en dépouille sur la pièce.

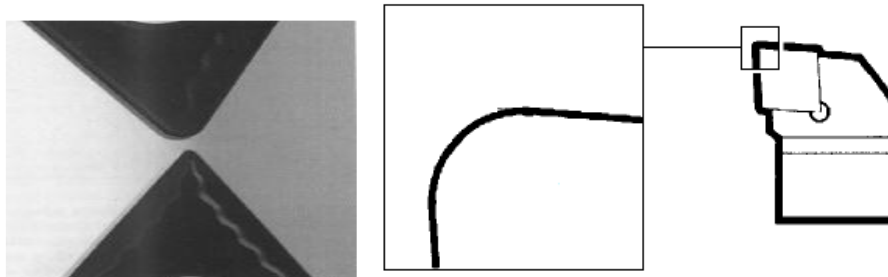
Comme pour l'angle de coupe, sur les outils à pastille rapportée, l'angle de dépouille résulte de la géométrie de plaquette et de l'inclinaison conférée par le porte plaquette.

Ce phénomène est illustré dans la figure II.6

La forme du bec influence l'état de surface.

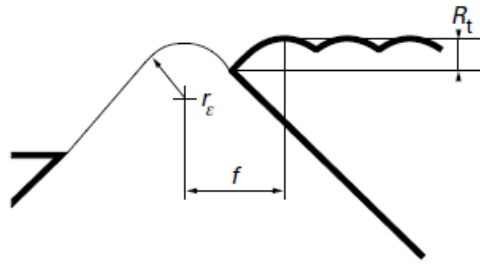
Les principales formes sont :

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



**Figure II.6 :** Rayon du bec

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

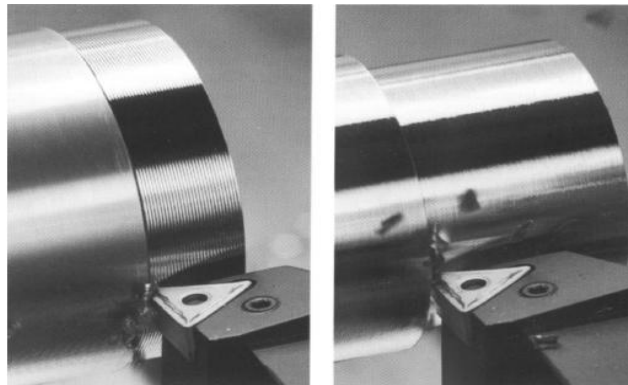


**Figure II.7 :** Influence du rayon de bec sur la rugosité de la surface

**Avec :**

$R_t$  = Rugosité

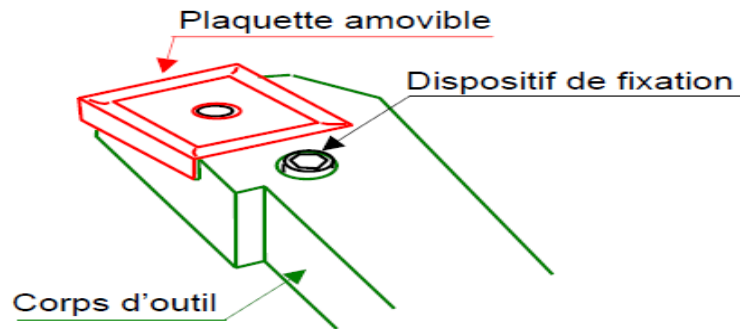
Un trop grand rayon du bec détermine sur une partie de l'arête de coupe des copeaux très minces, dont l'épaisseur ne permet plus la coupe réelle. En conséquence, il y aura une formation d'un copeau gratté avec une usure prématurée de l'outil.



**Figure II.8 :** Etat de surface

Les outils les plus courants sont normalisés. Les parties actives sont des mises rapportées en:

- **Acier rapide** (NF E 66-361 à 373),
- **En carbure :**
  - ✓ Les plaquettes brasées (les outils les plus courants sont normalisés) (NF E 66-331 à 343),
  - ✓ Les plaquettes amovibles à jeter (les principales formes et dimensions sont normalisées),
- **En céramique**, les plaquettes sont brasées ou à jeter.



**Figure II.9 :** Outil à plaquette carbure

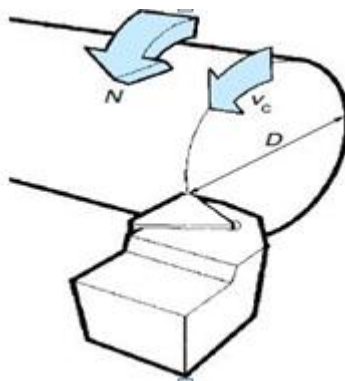
## II.6/Conditions de coupe en tournage

Les paramètres de coupe sont choisis mécaniques de la matière à usiner et de l'outil. Ils sont indépendants de la machine utilisée et des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil.

### II.6.1/Vitesse de coupe

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse  $\omega$  rad / s (soit  $N$  tr / min), cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre  $D$ , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) vaut [9]

$$V_c = \frac{\pi D \cdot N}{100} = (\text{m/min})$$



**Figure II.10-** vitesse de coupe

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe soit, avec les unités traditionnelles de la fabrication mécanique



$V_c$ : vitesse de coupe ( $m / \text{min}$ )

$D$  : Diamètre de la pièce ( $mm$ )

$N$  : Fréquence de rotation( $tr / \text{min}$ )

Il convient d'observer que la vitesse de coupe n'est constante que si la vitesse de broche et le diamètre de la pièce demeurent inchangés. En dressage, par exemple où l'outil se déplace en Direction du centre, la vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante. Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante.

Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment :

- des matériaux de la pièce et de l'outil
- de la lubrification
- de la durée de vie souhaitée pour l'outil.

### **II.6.2/Vitesse d'avance $V_a$ , Avance par tour $f$**

La vitesse d'avance  $V_a$  ( $mm / \text{min}$ ) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti.

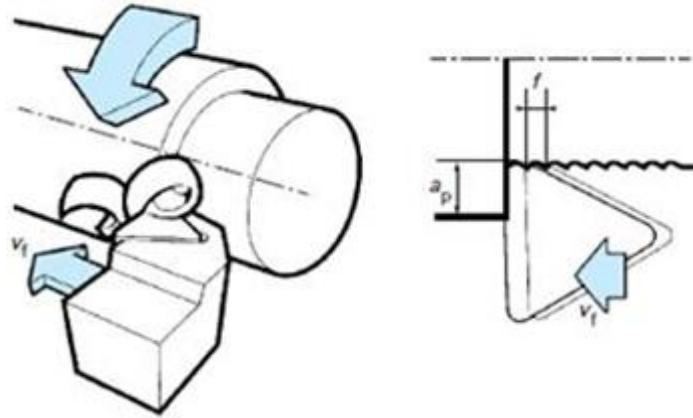
L'avance par tour  $a$  ( $mm / tr$ ) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. [9]

$$V_f = f \cdot N \quad (mm / \text{min})$$

$V_a$  : vitesse d'avance( $mm/ \text{min}$ )

$f$  : L'avance( $mm$ )

$N$ :frequence de rotation ( $tr/\text{min}$ )



**Figure II.11:** vitesse d'avance

### **II.6.2.1 Les types d'avances:**

On distingue trois sortes d'avance :

#### **a) Avance longitudinal**

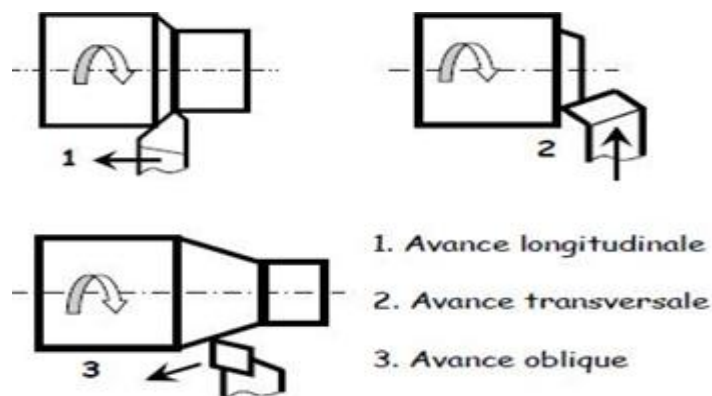
On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.

#### **b) Avance transversale**

On appelle avance transversale si l'outil se déplace perpendiculairement à l'axe de l'ébauche.

#### **c) Avance oblique**

On appelle avance oblique si l'outil se déplace sous un angle par rapport à l'axe de l'ébauche. [10]

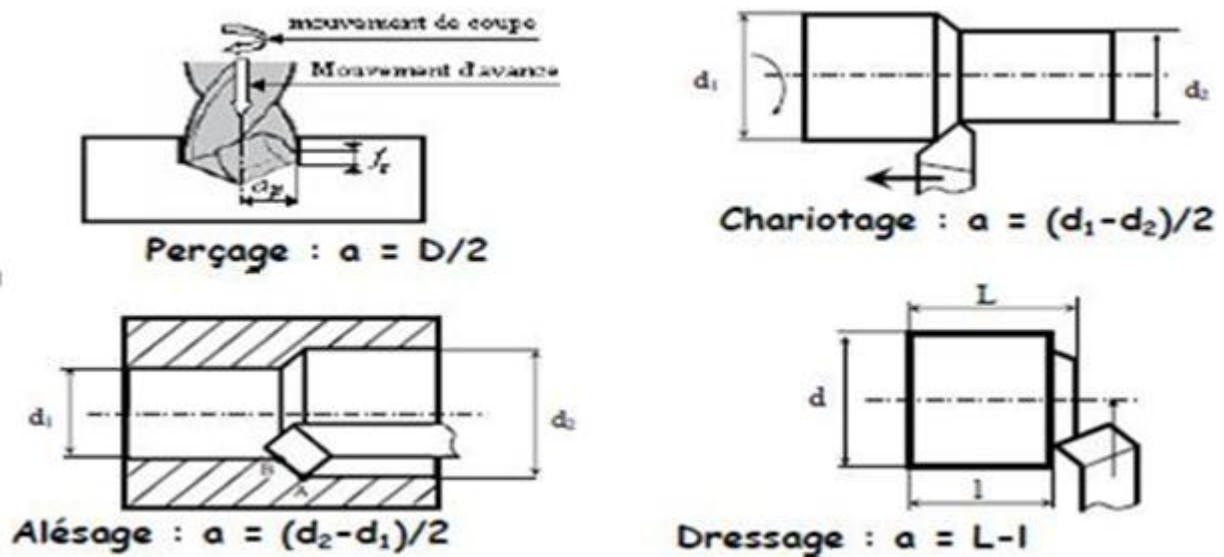


**Figure II.12:** différent types d'avance

### **II.6.3/Profondeur de passe « a »**

La profondeur de passe notée  $a$  en (mm), correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de

l'outil. [11]



**Figure II.13:**profondeur de passe

## II.7/ Les portes pièces:

### II.7.1/ Les portes pièces standards:

Ils font partie de l'équipement standard des tours. Ce sont:

#### **Les mandrins à serrage par mors:**

Ils comportent 2, 3 ou 4 mors. Ces mors peuvent être à serrage concentriques ou indépendants.

On peut monter des mors durs ou des mors doux. les mors doux sont des mors non trempés afin de permettre à l'utilisateur de les usiner pour adapter leurs formes à celles de la pièce ou pour réaliser une Co axialité plus précise qu'avec des mors durs.

La prise de pièce en mandrin peut se faire par l'extérieur ou par l'intérieur des mors

### II.8/Types de montages :

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

- **Montage en l'air :**

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

- **Montage mixte :**

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

- **Montage entre-pointes :**

Pour l'usinage des pièces longues ( $L < 8D$ ), on utilise le montage entre pointes. La pièce est soutenue par ses deux extrémités par deux pointes plus lunette

## Chapitre III : Etat de surface

### III.1/ GENERALITES :

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, ...

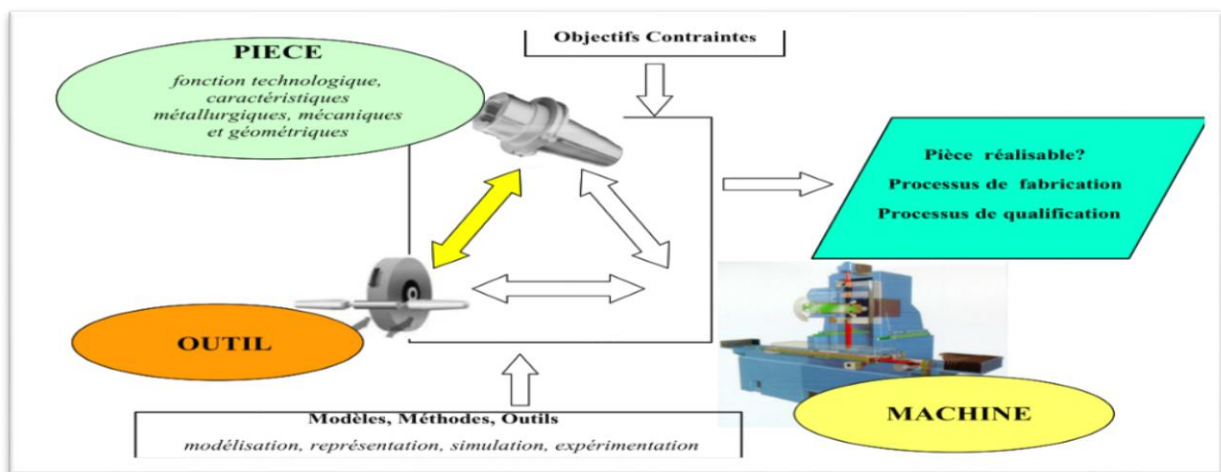
Aussi, le processus d'usinage a un caractère relatif du fait qu'il faut prendre plusieurs paramètres en considération comme la qualité de la pièce à usiner, la qualité de l'outil,...

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

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

### III.2/COMPORTEMENT MECANIQUE GLOBAL DU SYSTEME PIECE/OUTIL /MACHINE (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 donc un véritable système qui doit être étudié comme tel. Tous les éléments, qu'ils soient actifs ou passifs, interagissent. La machine à un comportement dynamique dont ne saurait rendre compte l'étude séparée de chacun de ses éléments.

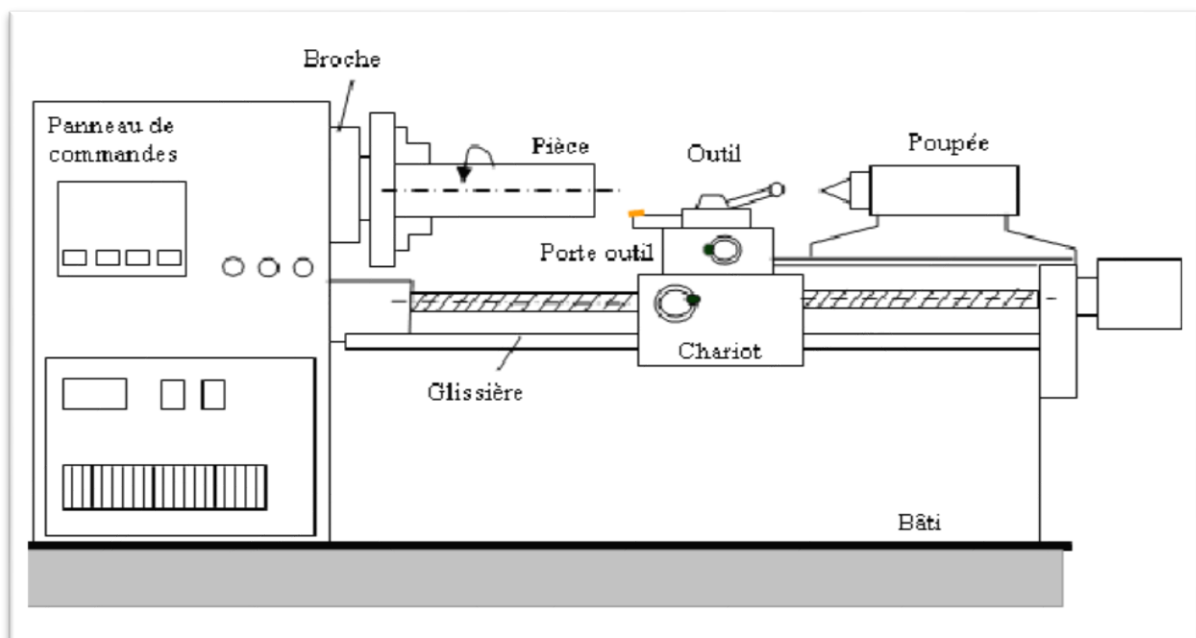


**Figure III.1** : Schéma de principe du concept Pièce / Outil / Machine [12]

### III.2.1/Description du système POM :

La plupart des ouvrages traitant de la machine-outil se répartissent généralement en deux types. Les uns l'abordent de façon encyclopédique et /ou descriptive, tels les travaux de [10],[11]. Ces auteurs décrivent distinctement les organes de chaque machine dont le calcul n'est abordé que de façon assez générale. Les autres abordent le système POM au travers d'applications expérimentales particulières. 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 III.2 : Machine-outil [12]**

### III.2.2/ÉLEMENTS INDEPENDANTS :

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

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

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

### **III.2.3/ÉLÉMENTS DEPENDANTS :**

Dans cette deuxième partie, nous regroupons les éléments suivants :

**PIECE :** La pièce est considérée comme une partie intégrante du système d'usinage. Il ne sert à rien d'avoir une machine de très grande rigidité et très haute qualité si la pièce à usiner se déforme sous l'effet des efforts de coupe ou de bridage. Les pièces peuvent être réparties en trois catégories : pièces massives, pièces flexibles et autres. Les pièces massives, peu déformables, ne jouent pas un rôle important dans la dynamique du système POM autrement que par leur masse qui abaisse les fréquences propres [13]. Les pièces flexibles sont celles, au contraire, qui confèrent au système POM l'essentiel de ses caractéristiques : raideur, modes propres, amortissement, etc. La flexibilité peut être seulement locale, dans le cas d'un usinage de voile mince par exemple. Ces deux cas conduisent à des simplifications de la modélisation du système POM. Les autres types de pièces constituent des cas intermédiaires.

**OUTIL DE COUPE :** L'outil de coupe peut être unique ou multiple. Il 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 peuvent se répartir en trois catégories : indéformables, souples et 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[13], [14]

**PORTE-PIECE :** 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.



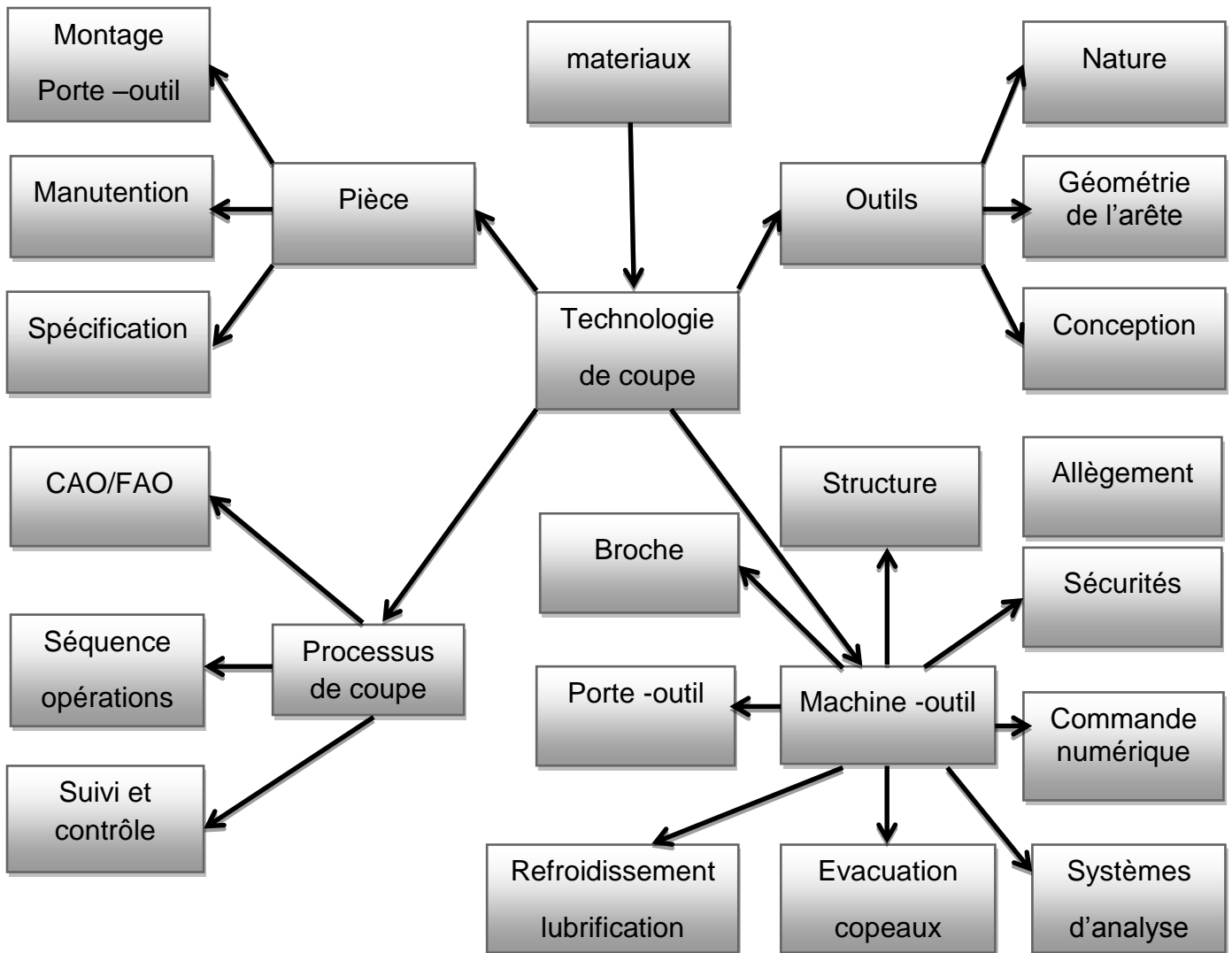


**Figure III.3 :** Les éléments dépendants de l'opération d'usinage

**III.3/LES ASPECTS TECHNOLOGIQUES DE LA COUPE :**

Les divers procédés qui sont qualifiés de traditionnels, sont, de loin, les plus utilisés ; ils ont acquis une nouvelle jeunesse et une vitalité considérable grâce, en particulier, au développement, dans les années 60, des machines-outils à commande numérique qui regroupent une panoplie d'opérations de coupe; centre d'usinage, centre de tournage....]et « Fraiseuses et centres d'usinage ».

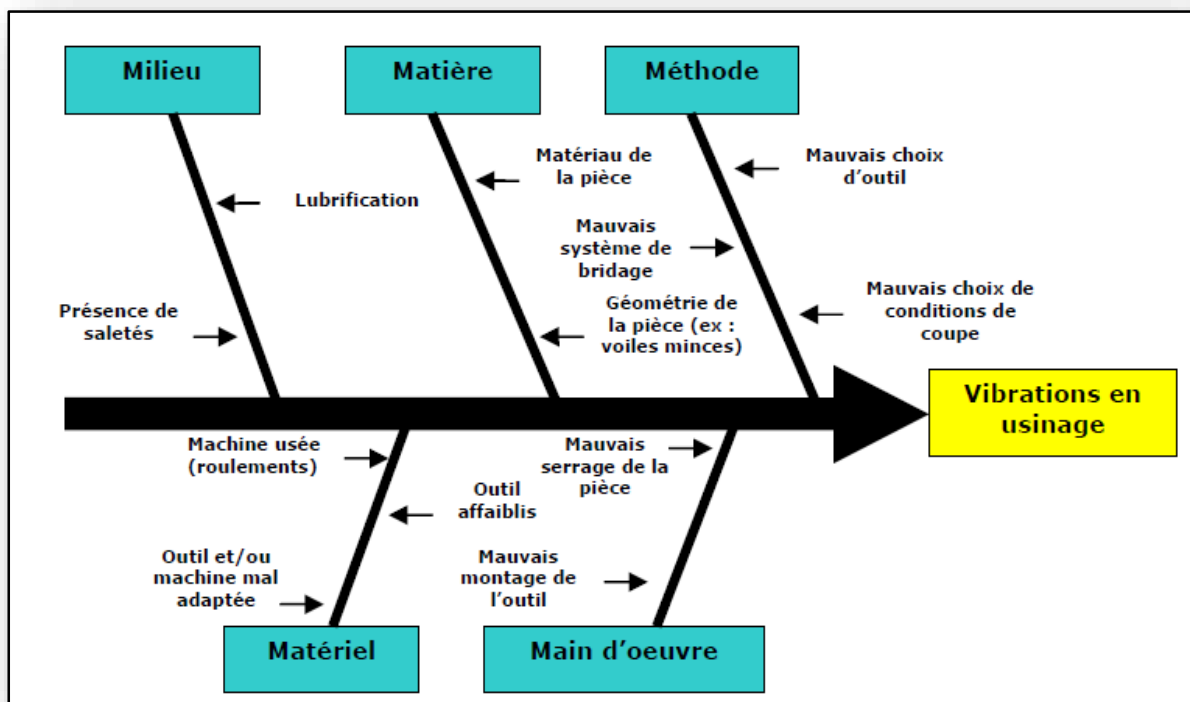
L'opération de coupe consiste à transformer une ébauche, constituée d'un certain matériau, en une pièce par l'action d'outils animés d'un mouvement relatif par rapport à la pièce par la machine -outil .La figure décrit de manière synthétique ce processus et ses caractéristiques principales.



**Figure III.4** : interactions entre la machine-outil et les aspects technologique de la coupe.

### III.4/VIBRATIONS EN USINAGE :

Les vibrations du système POM peuvent se produire sous certaines conditions, qui dégradent la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. 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) [15]



**Figure III.5** : Causes principales des vibrations en usinage.

### III.5/TYPES DE VIBRATIONS :

#### III.5.1/VIBRATIONS FORCEES :

Elles sont propres à la coupe discontinue comme le fraisage, mais elles peuvent apparaître aussi lors du tournage de pièces n'ayant pas de symétrie de révolution.

Elles résultent de l'excitation périodique de la coupe, qui naît en fraisage suite au passage successif des dents lors d'une excentration de la chaîne cinématique (outil de coupe, plaquette, porte-outils, pièce, broche), ou hétérogénéité de la matière usinée.

Les vibrations forcées peuvent également être provoquées par des irrégularités technologiques des éléments dans l'ensemble de la machine-outil. [16]

Peigné dans [17] introduisent d'autres sources possibles de vibrations forcées comme :

- Des hétérogénéités matière.
- Des irrégularités géométriques de la pièce.
- Une usure excessive ou la casse d'une des dents dans le cas du fraisage.....etc.

### **III.5.1/VIBRATIONS AUTO-ENTRETENUES :**

L'apparition des vibrations auto-entretenues correspond à l'instabilité dynamique de la machine-outil. Les vibrations auto-entretenues sont aussi appelées vibrations régénératives.

Les vibrations à l'interface outil de coupe/copeau, lors de l'usinage sont principalement dues aux variations du frottement à l'interface, au contact sur la face en dépouille de l'outil et aux variations d'épaisseur et de largeur usinée. Ces dernières proviennent de la génération d'une surface ondulée lors de la passe précédente, qui influence le comportement dynamique de l'ensemble outil de coupe/porte-outils lors de la passe suivante.

Le mouvement de l'outil est alors entretenu. La fluctuation des efforts de coupe excite le système. Ces mécanismes se produisent simultanément, sont interdépendants et sont à l'origine des vibrations autoentretenues.[18]

### **III.6/ MECANISME DE FORMATION DU PROFIL MICROGEOMETRIQUE DES SURFACES USINEES :**

Lors de l'usinage, et lors du contact de la pièce avec l'outil de coupe, la génération d'une surface usinée fait intervenir autant la forme que les traces laissées par le tranchant (de l'outil de coupe) au contact de la pièce lors du mouvement relatif.

De ce contact et de cette coupe, sont déduits un nombre important de phénomènes. De ces derniers, on peut citer :

- Déformations élastiques et plastiques du matériau utilisé,

- Apparition dans certaines conditions, d'une arête rapportée et de dépôts naissant sur l'arête tranchante de l'outil,
- Effets dynamiques qui se manifestent par les vibrations du système mécanique (POM),
- Frottements entre le copeau et la face de dégagement d'une part et du contact entre facette d'usure sur le plan en dépouille et la pièce usinée d'autre part.

L'existence de ces phénomènes justifie l'affirmation que les traces, (défauts micro géométriques) laissées par l'outil de coupe lors de son passage sur la surface qu'il engendre, différeront du tout au tout de celles que l'on aurait pu attendre en limitant l'analyse à la seule action des parties tranchantes de l'outil.

En conclusion, les propriétés physicomécaniques de la couche superficielle ainsi que son aspect micro géométrique (rugosité) mettent en jeu l'action concomitante de tous les facteurs évoqués précédemment.

### **II.7/ MODELISATION DE LA TOPOGRAPHIE DES SURFACES USINEES :**

Plusieurs modèles mathématiques permettant la reproduction fidèle de la structure géométrique des surfaces usinées ont été développées. Le but était de bien comprendre le mécanisme de la génération des surfaces usinées, et les relations de cette dernière avec la variation de la géométrie des pièces mécaniques. Ces modèles sont établis sur la base d'une description géométrique de la surface usinée et sont fonction des différents paramètres géométrique et cinématique de la coupe. Ces modèles une fois mis au point, permettent l'étude de l'état de surface des pièces usinées et leurs variations en fonction des différents paramètres de coupe qu'il soit géométrique ou cinématique.

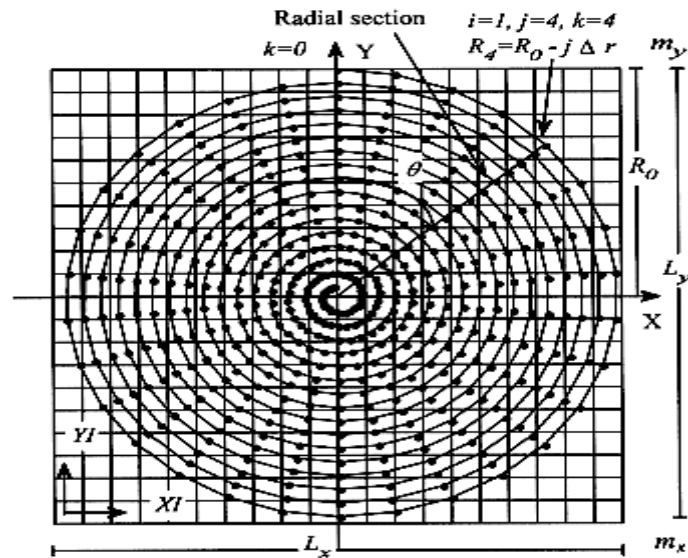
#### **II.7.1/ MODELE DE CHEUNG ET LEE :**

Cheung et Lee ont proposé un autre modèle pour la reproduction de la surface usinée obtenue par une opération de dressage. Ce modèle est basé sur une description géométrique à 2-D de la surface usinée.

Le profil de la rugosité est estimé sur la base d'un modèle 2-d de la topographie de la surface usinée. Le facteur dominant pris en considération est les vibrations. Comme l'effet de l'anisotropie provoquée par le changement de l'orientation cristallographique est pris en considération aussi, un déplacement additionnel de l'outil est introduit dans le système de coupe.

Dans la modélisation de la topographie d'une surface obtenue par dressage, les données de rugosité sont déterminées à partir du profil de rugosité estimé à un nombre fini de sections radiales équidistantes sur la pièce usinée.

La figure III.6 illustre ce modèle.[19]



**Figure III.6 :** Trajectoire de la pointe de l'outil et tracé linéaire des données de la surface

De ce modèle de la figure III.6, le rapport entre les vibrations de la machine  $f_z$  et la vitesse de rotation de l'axe  $V$  en tour/min est déterminé par :

$$\frac{60f_z}{V} = a + \xi \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$a$  est 0 ou un nombre entier positif et  $\xi$  est une fraction décimale comprise entre -0.5 et 0.5. Le déphasage  $\phi$  entre les ondulations successives peut être défini sur la base de  $s$  comme suit :

$$\phi = 2\pi \xi \quad (\text{III.2})$$

En prenant l'axe des  $X$  suivant la direction de l'avance, et l'axe des  $Z$  suivant la profondeur de passe, la position de l'outil dans le plans  $x, z$  peut être exprimée en terme de déphasage  $\phi$  et l'avance  $s$  par :

$$Z_T(x) = Z_m + A[1 - \cos(\phi \frac{x}{s})] \quad (\text{III.3})$$

Avec:

$Z_m(x)$  et  $Z_T(x)$  : vibrations induites par la matière et le déplacement total de l'outil.  $A$  est l'amplitude des vibrations relatives entre l'outil et la pièce usinée.

Lorsque le point de départ de l'outil est considéré à l'origine (périmètre de la pièce), le profil de l'arrête tranchante de l'outil  $z(x)$  peut être exprimé par :

$$Z(x) = \frac{x^2}{2R} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$R$  : rayon du bec de l'outil

Le profil de la surface usinée est constitué par les mouvements successifs de profil de la pointe de l'outil à des intervalles égaux à l'avance de l'outil le long de la position de l'outil. La rugosité de la surface dépend des positions successives du point générateur de l'outil qui débute l'enlèvement de la matière à partir du profil formé par les opérations d'usinage précédentes.

De l'équation (III.3), la position de point générateur de l'outil peut être écrite comme :

$$Z_T(i) = Z_m(i) + A\{1 - \cos[(i-1)\phi]\} \quad \text{pour } i=1,2,\dots,N \quad (\text{III.5})$$

$N$ , représente le nombre des spires produites par l'outil sur la surface usinée, et calculé par :

$$N = \frac{R\phi}{S} \quad (\text{III.6})$$

Le profil du  $i^{\text{ème}}$  outil et le profil du  $(i+1)$  ème outil utilisé peuvent être déterminés à partir des équations citées :

$$Z_i(x_i) = Z_T(i) + \frac{[x_i - (i-1)S]^2}{2R} \quad (\text{III.7})$$

$$Z_{i+1}(x_{i+1}) = Z_T(i+1) + \frac{[x_{i+1} - iS]^2}{2R} \quad \text{avec } i=1,2,\dots,N-1 \quad (\text{III.8})$$

Les intersections  $T_{i,i+1}(x_{i,i+1}, H_{i,i+1})$  du profil formé par le  $i^{\text{ème}}$  et le  $(i+1)^{\text{ème}}$  outil,  $z_i = z_{i+1}$  et  $x_i = x_{i+1}$ , sont données par :

$$X_{i,i+1} = \frac{R[Z_T(i+1) - Z_T(i)] + (i+1/2)s^2}{s} \text{ pour } i=1,2,\dots,N-1 \quad (\text{III.9})$$

La hauteur  $H_{i,i+1}$  de l'endroit d'intersection est déterminée par:

$$H_{i,i+1} = Z_T(i+1) + \frac{\{2R[Z_T(i+1) - Z_T(i)] - s^2\}^2}{8Rs^2} \quad (\text{III.10})$$

Dans le modèle développé par Cheung et Lee, les données de la rugosité sont déterminées à partir d'une description géométrique qui décompose la surface dressée en un nombre fini de sections radiales  $N_p$  et exprimées par :

$$N_p = 2.\pi/\Delta\theta \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$\Delta\theta$  : Résolution angulaire adoptée

La modalisation de la topographie de la surface usinée commence par la détermination de la position de l'outil suivant les trois dimensions. Le déplacement relatif en fonction du temps dans la direction de la coupe  $Z_c(t)$  entre l'outil et la pièce peut être exprimé par :

$$Z_c(t) = Z_m(t) + A \sin(2\pi.f_z t - \phi) \quad (\text{III.12})$$

Le nombre total  $N_t$  des positions occupées par l'outil est exprimé par :

$$N_t = 2\pi N / \omega \Delta t \quad (\text{III.13})$$

La forme discrète de déplacement relative entre l'outil et la pièce peut être dérivé à partir des équations (III.8) et (III.9) comme :

$$Z_c(j) = Z_m\left(\frac{j\Delta\theta}{\omega}\right) + A \sin\left(\frac{2\pi f_z j\Delta\theta}{\omega} - \phi\right) \quad \text{pour } j=0,1,2,\dots,N_t \quad (\text{III.14})$$

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. La spirale décrite par l'outil dans le plan XY peut être exprimée en coordonnées polaires comme :

$$R_j = R_0 - j \Delta r \quad \text{Pour } j = 0, 1, 2, \dots, N_t \quad (\text{III.15})$$

$$\theta_j = j \Delta \theta$$

Les coordonnées correspondantes dans le plan XY sont données par :

$$X_c(j) = (R_0 - j \Delta r) \sin(j \Delta \theta) \quad (\text{III.16})$$

$$\text{Pour } j = 0, 1, 2, \dots, N_t$$

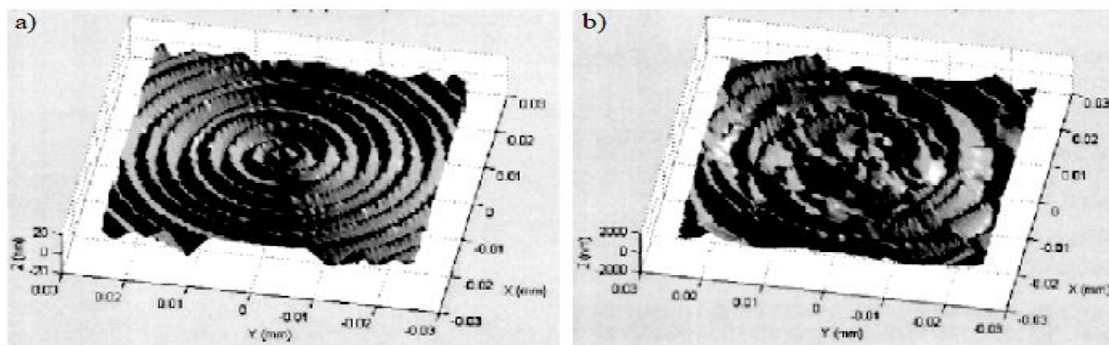
$$Y_c(j) = (R_0 - j \Delta r) \cos(j \Delta \theta) \quad (\text{III.17})$$

Les équations (III.16) et (III.17) décrivent la trajectoire de l'outil dans les trois dimensions. La position de la pointe de l'outil dans la  $k^{\text{ème}}$  section radiale peut être transformée à partir du système de coordonnées cartésiennes X-Y-Z à un système de coordonnées polaires  $R_k$ - $Z_k$  en considérant que  $R_k$  est l'axe suivant le rayon de la  $k^{\text{ème}}$  section radiale avec  $k = 0, 1, 2, \dots, N_p$

Dans la  $k^{\text{ème}}$  section radiale, les coordonnées de la position de la pointe de l'outil dans un système de coordonnées polaires  $R_k$ - $Z_k$  peut être obtenue à partir des équations (III.16) . (III.17) comme suit :

$$\theta_t(i, k) = k \Delta \theta + 2\pi(i-1) \quad (\text{III.18})$$

$$r_t(i, k) = R_0 - [k + (i-1)N_p] \Delta R \quad (\text{III.19})$$



**Figure III.7 :** Image virtuelle de la topographie d'une face dressée  
(Modèle 3D de Cheung et Lee)  
a – Sans prise en compte des vibrations  
b - Avec la prise en compte des vibrations



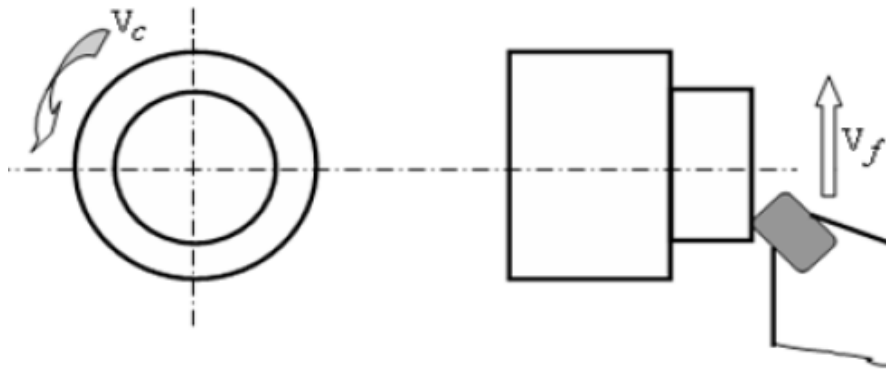
Dans des conditions idéales, le profil de la rugosité est formé par la répétition du profil du point générateur de l'outil à des intervalles égaux à l'avance par tour de la pièce. Mais il existe toujours des vibrations relatives entre l'outil de coupe et la pièce usinée.

### **III.8/ DESCRIPTION ET MODELISATION :**

Dans le cas d'une opération de dressage d'une surface sur un tour parallèle, 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 III.8:** 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 égaux 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 :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - (f/2)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left( \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \left( \frac{(\mu + 2 \cdot P \cdot \pi) \cdot f}{2 \cdot \pi} + f/2 \right) \right)^2} \quad (\text{III.20})$$

Et

$$Z_c(j) = Z_m \left( \frac{j \Delta \theta}{\omega} \right) + A \sin \left( \frac{2 \pi f z j \Delta \theta}{\omega} - \emptyset \right) \text{ pour } j=0,1,2,\dots,N_t \quad (\text{III.21})$$

On obtient :

$$Z_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - (f/2)^2} - \sqrt{r_e^2 - \left( \sqrt{x_i^2 + y_i^2} - \left( \frac{(\mu + 2 \cdot P \cdot \pi) \cdot f}{2 \cdot \pi} + f/2 \right) \right)^2} + A_0 \sin \left( \frac{2\pi f z_j \Delta\theta}{\omega} - \phi \right) \quad (\text{III.22})$$

$A_0$ : 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  $\Delta\theta$ .

## **CHAPITRE IV : Simulation numérique et discussion des résultats**

### **IV.1/ INTRODUCTION :**

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 de 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. Cependant, les modèles élaborés jusqu'à maintenant ont considéré d'autres facteurs comme la vitesse de coupe et les vibrations.

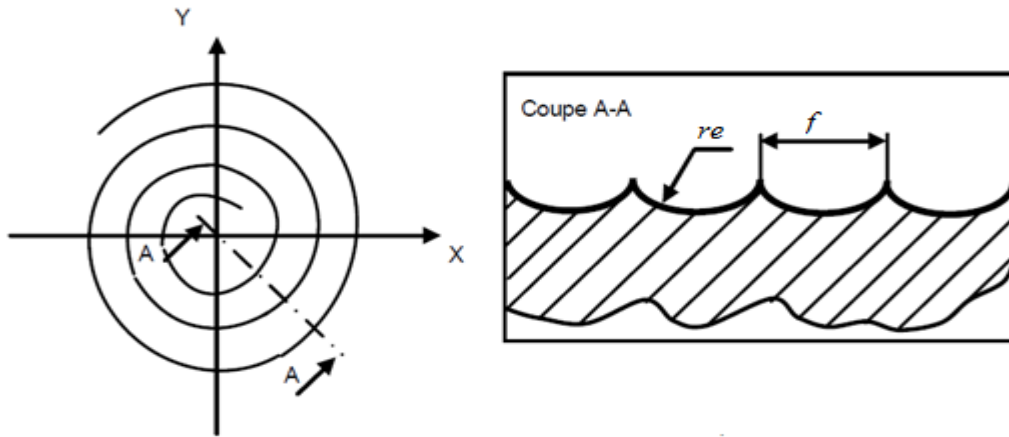
### **IV.2/ ÉLABORATION DU MODELE :**

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.

### **IV.3/ MODELISATION 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,  $q$  définit 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 IV.1).

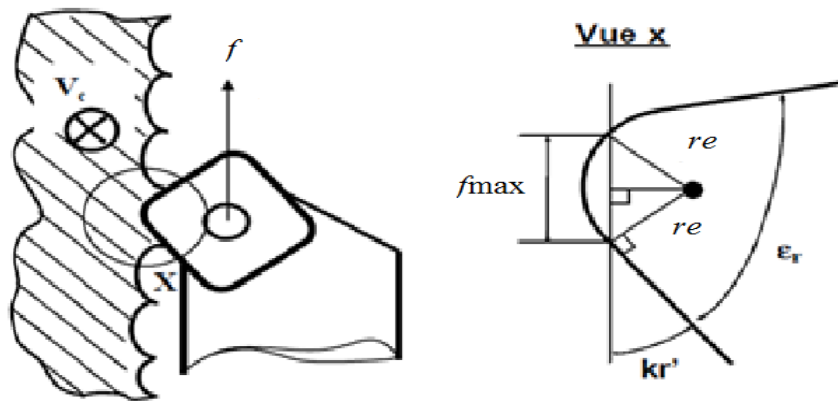


**Figure IV.1 :** Modélisation de l'usinage de la surface. 1 ère approximation

**Condition d'application :**

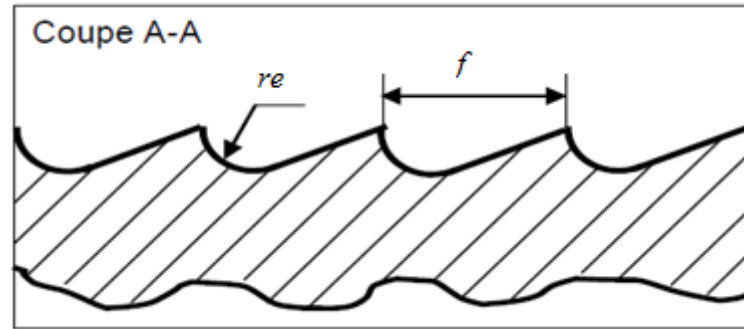
Dans le cas où les sillons générés par le bec de l'outil sont des portions de cercles, il faut que l'avance de l'outil soit trop importante (figure IV.2). Cela se traduit géométriquement par :

$$f < f_{\max} = 2 r \sin(kr') \quad (IV.1)$$



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

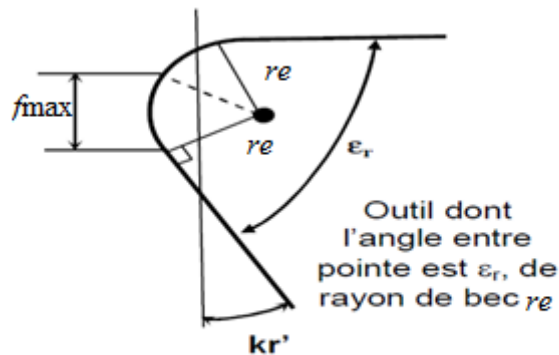
Dans le cas contraire où la forme de l'arrête tranchante de l'outil est une combinaison d'une portion de cercle complétée par une ou deux portions linéaires en fonction de la géométrie de l'outil, le sillon sera une combinaison des deux formes précédentes (figure IV.3).



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

**Condition d'application :**

Cette situation impose une avance:  $f > f_{\max} = 2 r \sin(kr)$ , 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 IV.4).



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

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  $re$ .

**IV.4/ CALCUL DE L'ALTITUDE Zi DE POINT MI DANS LE CAS OU**

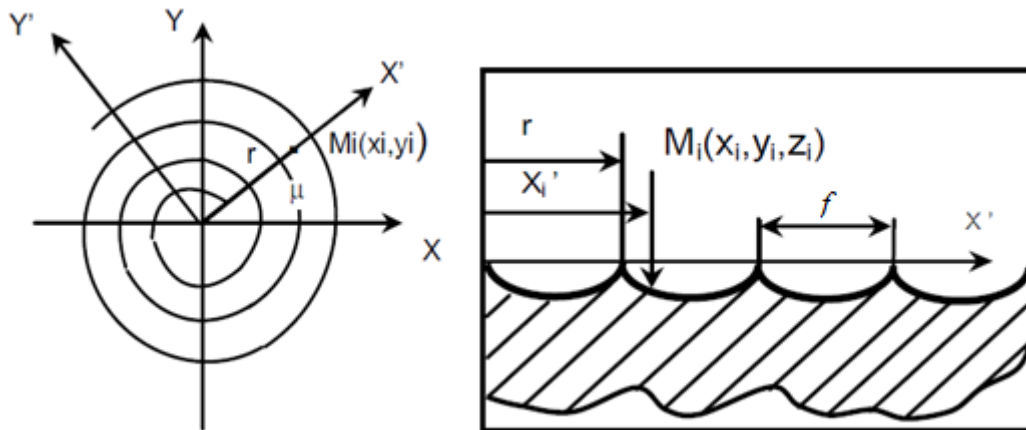
**$f < f_{\max}$  :**

L'altitude  $Z_i$  de point  $M_i$  dépende directement des paramètres géométriques de l'outil tel que le rayon de bec  $re$  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 :

$$N = R_p / f \tag{IV.2}$$

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



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

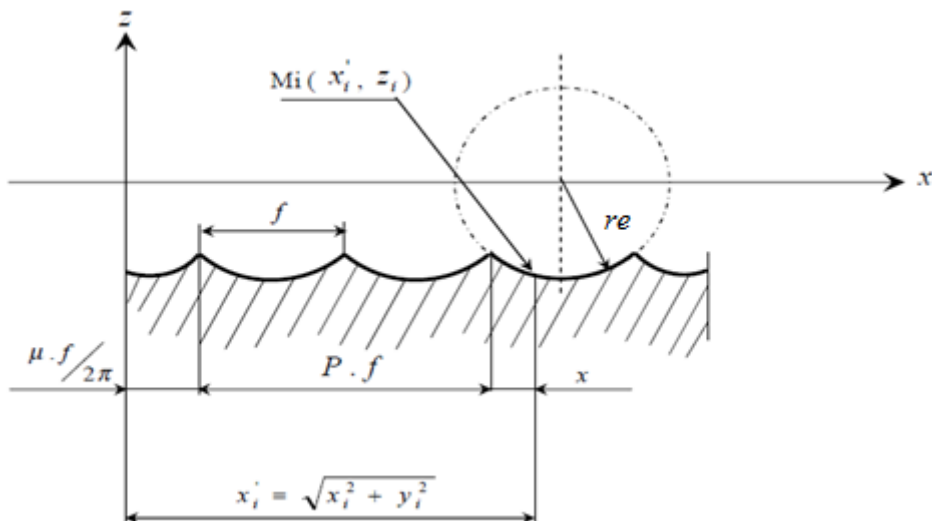
La mise en équation de la spirale en coordonnées polaires dans le cas où ( $f < f_{max}$ ) (figure IV.5) nous donne :

$$r = \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} \quad (IV.3)$$

#### **IV.4.1/ CALCUL DE LA COORDONNEE $x'_i$ 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 IV.6).



**Figure IV.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 :

$$x'_i = \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} + P \cdot f + x \quad (\text{IV.4})$$

D'où

$$x = x'_i - \frac{\mu \cdot f}{2 \cdot \pi} - P \cdot f \quad (\text{IV.5})$$

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

$$x'_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (\text{IV.6})$$

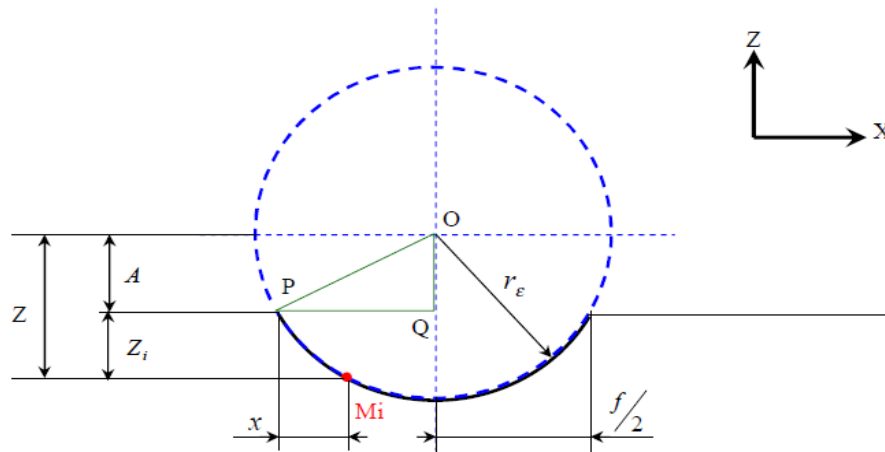
Le changement de  $x'_i$  par son expression dans (équation IV.6) nous donne :

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

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

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

#### **IV.4.2/ CALCUL DE L'ALTITUDE $Z_i$ (SANS VIBRATION) :**



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

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

$$Z_i = A - Z \quad (\text{IV.8})$$

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

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

D'où

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

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

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

D'où

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

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

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

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

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

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

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

Avec :

$\mu = \text{Arctan} \left( \frac{y_i}{x_i} \right)$  elle varie de (0–360°).

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



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

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

L'équation (IV.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.

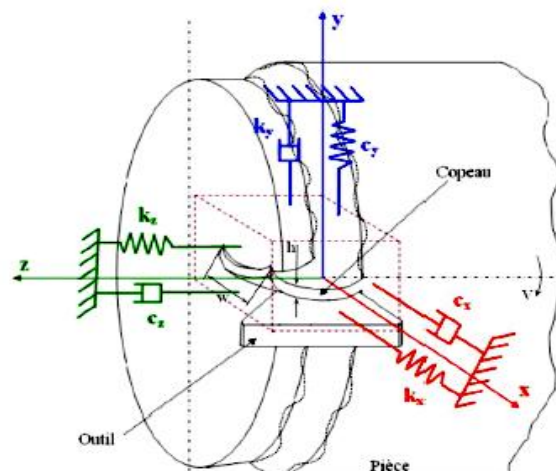
#### **IV.5/ MODÉLISATION DU SYSTÈME USINANT EN TOURNAGE :**

Le système usinant en tournage est conçu de :

- Un outil de type TNMA 160412 en carbures non revêtues sans brise copeau. Le matériau usiné est de type acier au manganèse.
- La pièce est de l'acier dur de diamètre de 30mm.

Les conditions d'usinage sont :

- La vitesse de coupe (m/min)
- L'avance  $f$  (mm/tr)
- La profondeur de passe  $a$  (mm)
- La géométrie de l'outil.



**Figure IV.8 :** Modèle de coupe dynamique 3D.[35]

Le modèle ci-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.

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

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

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 :

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

L'équation IV.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  $F_x$ :

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

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

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

$\xi$  : Facteur d'amortissement visqueux

$$\xi = \frac{c}{2 \cdot m_x \cdot \omega_0} \quad (\text{IV.21})$$

$\omega_0$ : Pulsation propre (rad/s).

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m_x} \quad \text{IV.22}$$

$$T_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0}; \quad T_0 : \text{la période [s].} \quad (\text{IV.23})$$

$$f = \frac{1}{T_0} ; f_z : \text{fréquence propre.} \quad (\text{IV.24})$$

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

$$F_c = K_c \cdot s \quad (\text{N}) \quad (\text{approximativement}) \quad (\text{IV.25})$$

$K_c$  : force de coupe par unité de surface (valeur indicative à partir de Sandvik).

$s = a \cdot f$  (profondeur de passe (mm) \* l'avance de coupe [mm])

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

$$A = \frac{\frac{F_c}{m_x}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2 \cdot \omega_0 \cdot \xi \cdot \omega)^2}} \quad (\text{IV.26})$$

**Calcul du déphasage :**

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot \xi \cdot \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (\text{IV.27})$$

**Caractéristique da la pièce usinée:**

Dimension:200mm×30mm

Type : acier **xc48**

Masse volumique:  $\rho=7.873\text{g.cm}^{-3}$

Module de Young(E):E =210 GPa

Masse : $m= \rho.v =1.11 \text{ Kg}$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_x}} = \frac{1.04 \cdot 10^6}{1.11} = 9.67 \cdot 10^2 \text{ rad/s}$$

Le taux d'usinage est  $\xi \leq 0.05$  ;

À partir de cette équation  $\xi = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_0}$  on trouve c :

$$c = 1.08 \cdot 10^2 \text{ Ns/m};$$

$$k_x = 1.04 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

$\omega = 50 \text{ rad/s}$  (vitesse angulaire))

$$\varphi = \text{Arctg} \frac{2 \cdot \omega_0 \cdot \xi \cdot \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \text{arctg} \left( \frac{2 \cdot 9.67 \cdot 10^2 \cdot 0.05 \cdot 50}{(9.67 \cdot 10^2)^2 - 50^2} \right) = 0.29^\circ$$

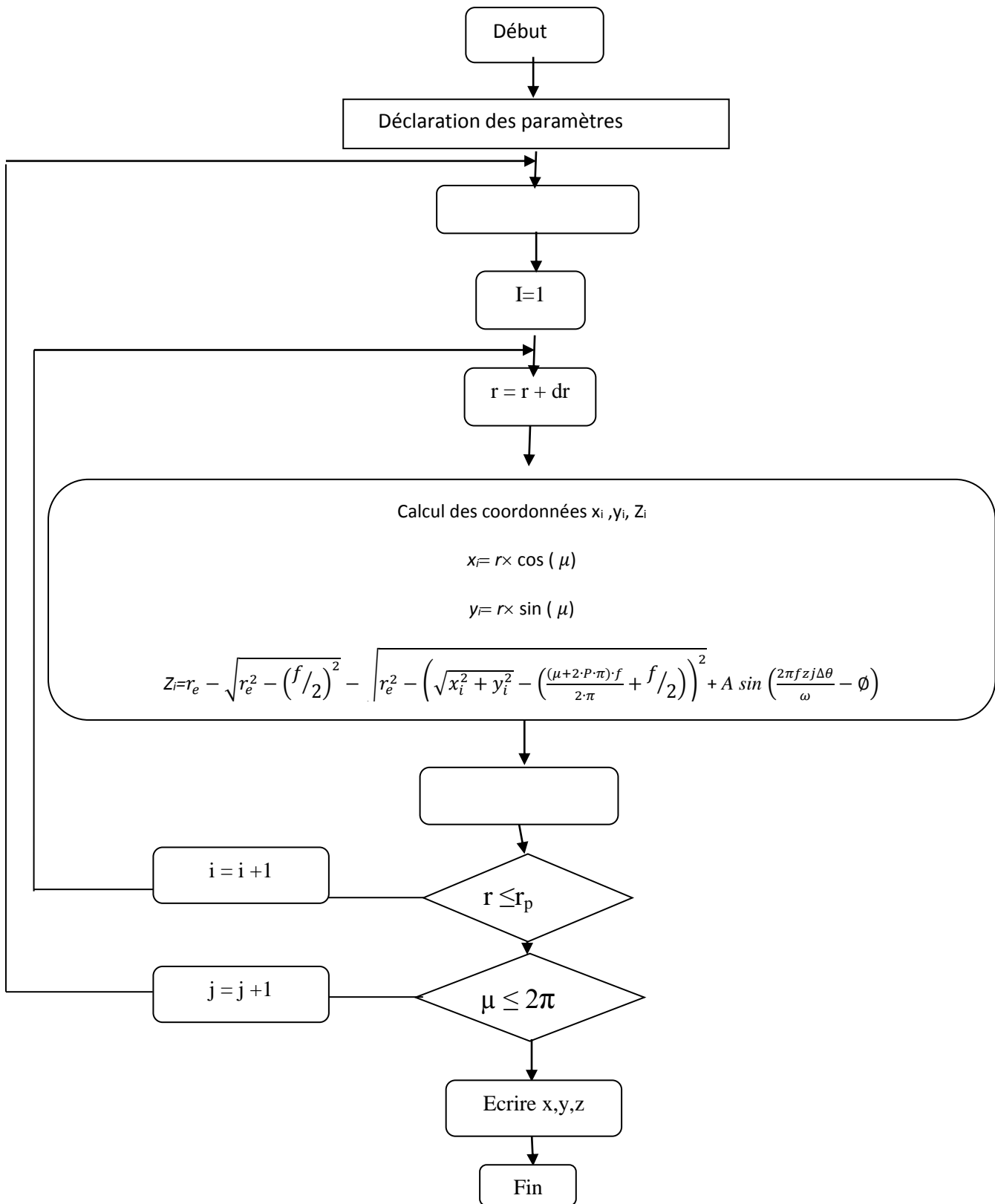
$$T_0 = \frac{2 \cdot \pi}{9.67 \cdot 10^2} = 0.0064 \text{ s}$$

$$f_z = \frac{1}{T_0} = 156.25 \text{ Hz}$$

**Calcul des amplitudes :**

	Avance (mm/tr)	Profondeur (mm)	F <sub>c</sub> [N]	Amplitude (mm)
1	0.2	1	680	6.57*10-4
2	0.4	1	980	9.47*10-4
3	0.8	1	1408	0.001

**Tableau IV.1 : Amplitudes**



**Figure IV.9:** Organigramme pour la génération du fichier des points  $X_i, Y_i, Z_i$

Pendant l'usinage des pièces en tournage et sous l'effet de la vibration qui est très élevée, la surface des pièces est rugueuse, c'est ce qui influe sur le rendement de cette pièce et sur le rendement général de mécanisme.

Pour étudier le comportement du matériau en tournage (opération de dressage), on a utilisé de l'acier XC48 et un outil de type PSKNR 2020 K12 (carbure métallique).

L'usinage des pièces s'est déroulé au niveau de notre atelier de mécanique.

#### **IV.6/ PRÉSENTATION DES SIMULATIONS :**

Une série des simulations a été effectuée et présentée pour évaluer les performances du modèle développé. 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.

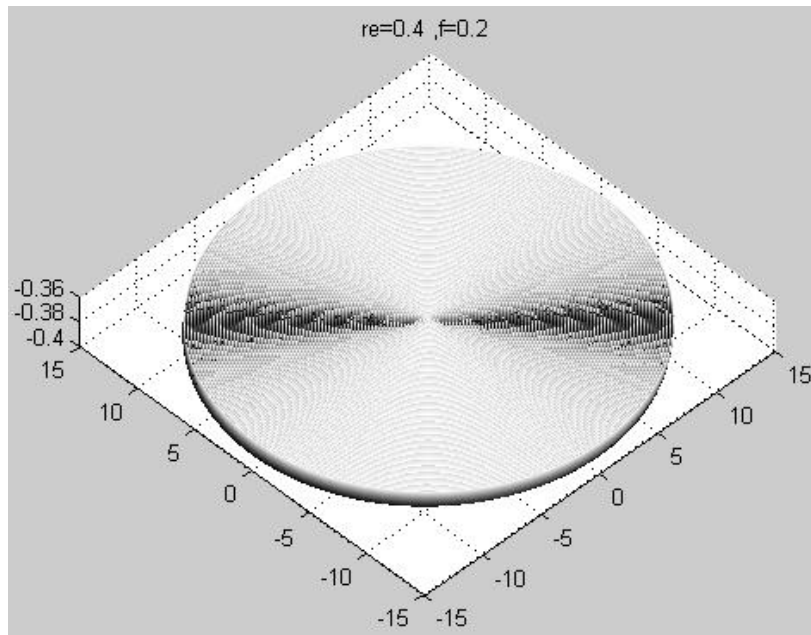
La génération des figures, qui correspondant à ce fichier et réalisée avec le logiciel Matlab, représente l'image virtuelle de la surface obtenue par l'opération de dressage.

#### **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 $re$ (mm)	Avances $f$ (mm/tr)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	0.4	0.2	1120
2	0.8	0.2	1120
3	1.2	0.05	1120

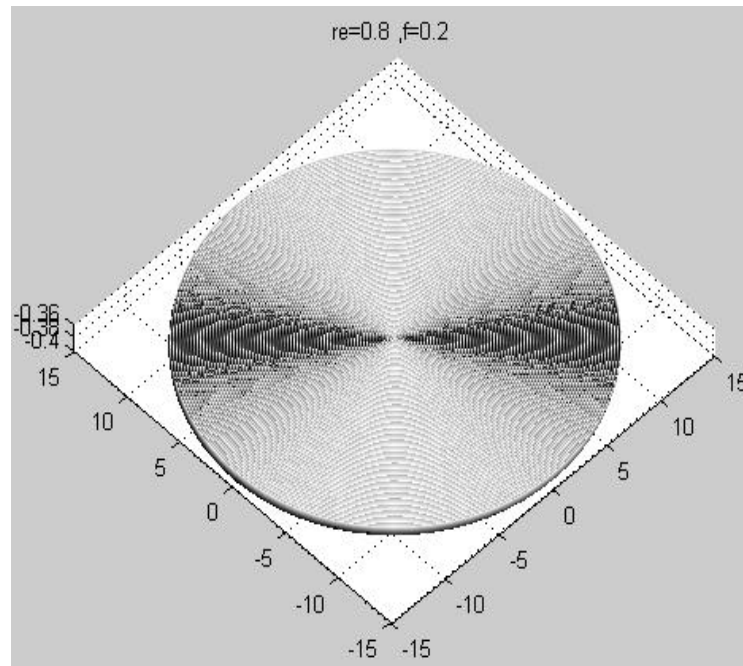
**Tableau IV.2 : Simulations à effectuer (sans vibration)**



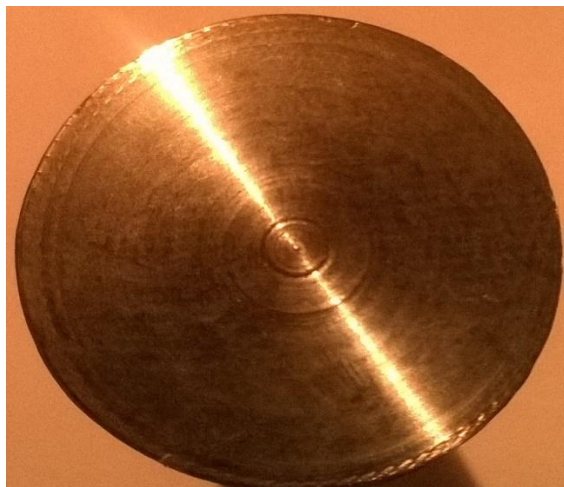
**Figure IV.10:** Image virtuelle de la surface usinée ;  $f = 0.2$  mm/tr,  $re = 0.4$  mm



**Figure IV.11 :** Image réelle de la surface usinée ;  $f = 0.2$  mm/tr,  $re = 0.4$  mm

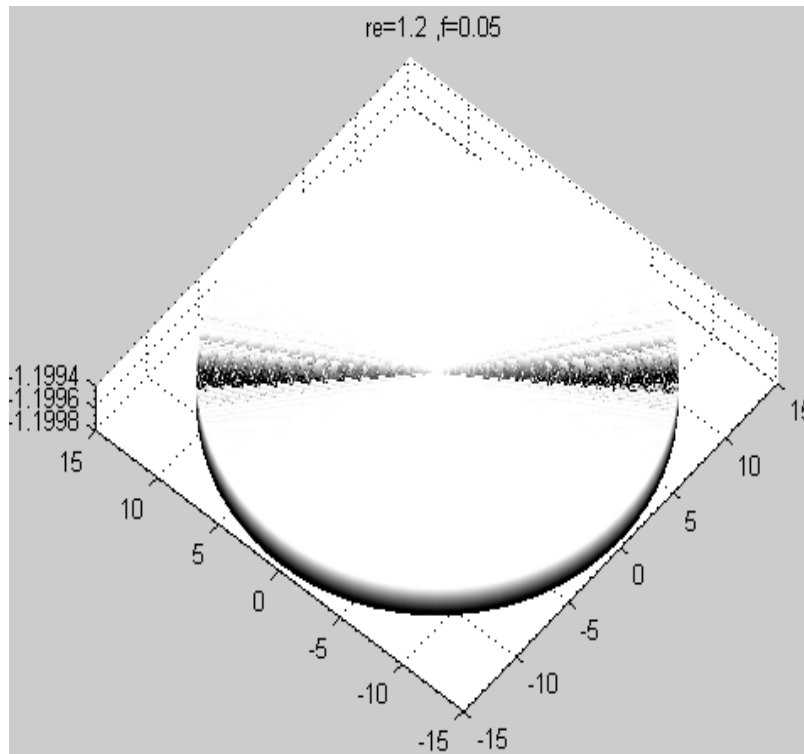


**Figure IV.12 :** Image virtuelle de la surface usinée ;  $f = 0.2\text{mm/tr}$ ,  $re = 0.8\text{mm}$



**Figure IV.13 :** Image réelle de la surface usinée ;  $f = 0.2\text{mm/tr}$ ,  $re = 0.8\text{mm}$





**Figure IV.14 :** Image virtuelle de la surface usinée ;  $f = 0.05\text{mm/tr}$ ,  $re = 1.2\text{ mm}$



**Figure IV.15 :** Image réelle de la surface usinée ;  $f = 0.05\text{mm/tr}$ ,  $re = 1.2\text{ mm}$

**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 et le rayon du bec.

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 :**

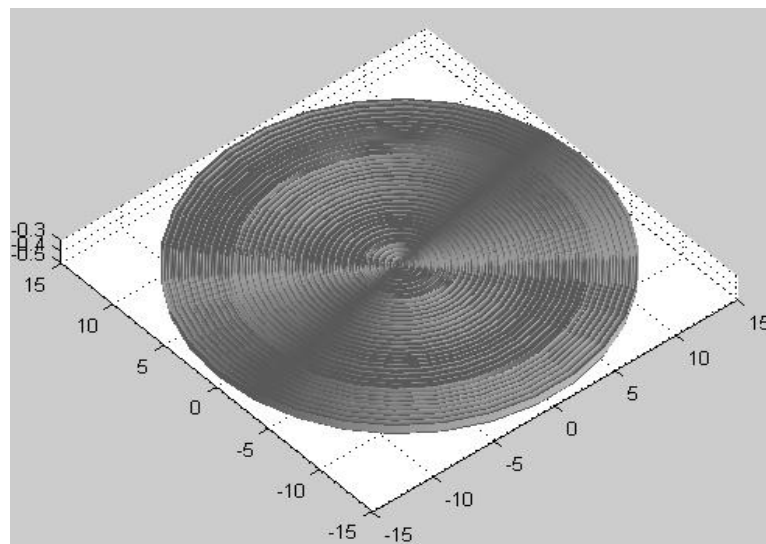
Simulation	Rayons de bec $re$ (mm)	Avances $f$ (mm/tr)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	0.4	0.2	450
2	0.8	0.05	450
3	1.2	0.2	450

**Tableau IV.3 :** Simulations à effectuer (avec vibration)

De la même manière, on fait varier l’avance et le rayon du bec.

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

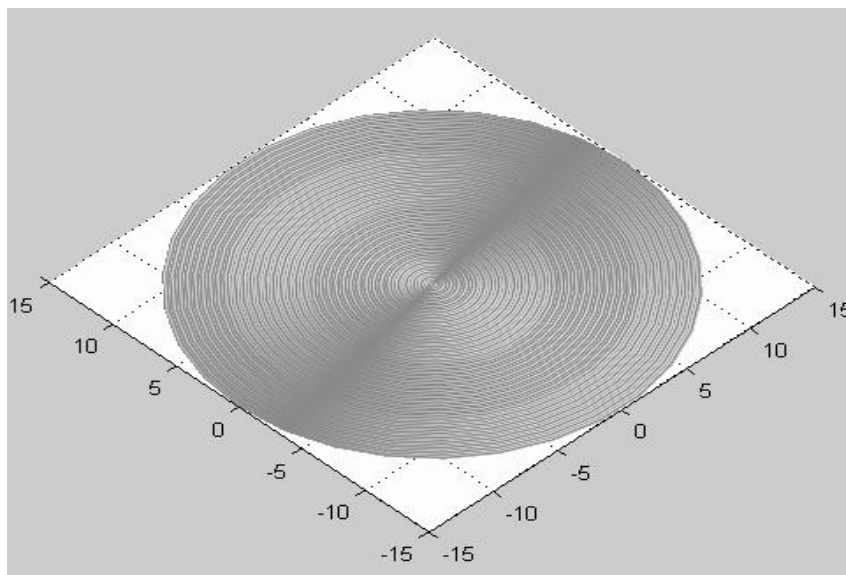
Ainsi, et pour chacun de ces cas, on représente les simulations suivantes :



**Figure IV.16 :** Image virtuelle de la surface usinée ;  $f = 0.2\text{mm/tr}$ ,  $re = 0.4\text{ mm}$



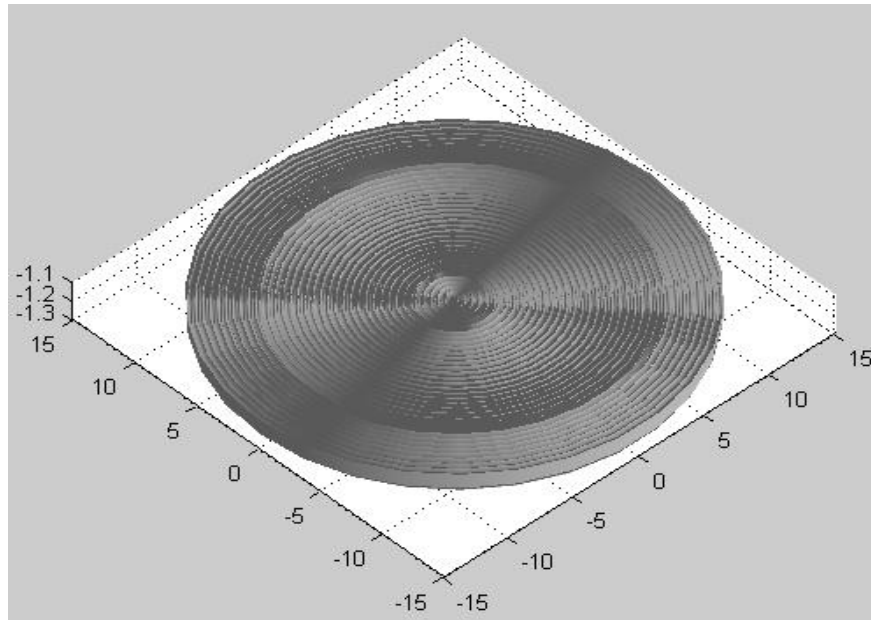
**Figure IV.17 :** Image réelle de la surface usinée ;  $f = 0.2\text{mm/tr}$ ,  $re = 0.4\text{ mm}$



**Figure IV.18 :** Image virtuelle de la surface usinée ;  $f = 0.05\text{mm/tr}$ ,  $re = 0.8\text{mm}$



**Figure IV.19** : Image réelle de la surface usinée ;  $f = 0.05\text{mm/tr}$ ,  $re = 0.8\text{mm}$

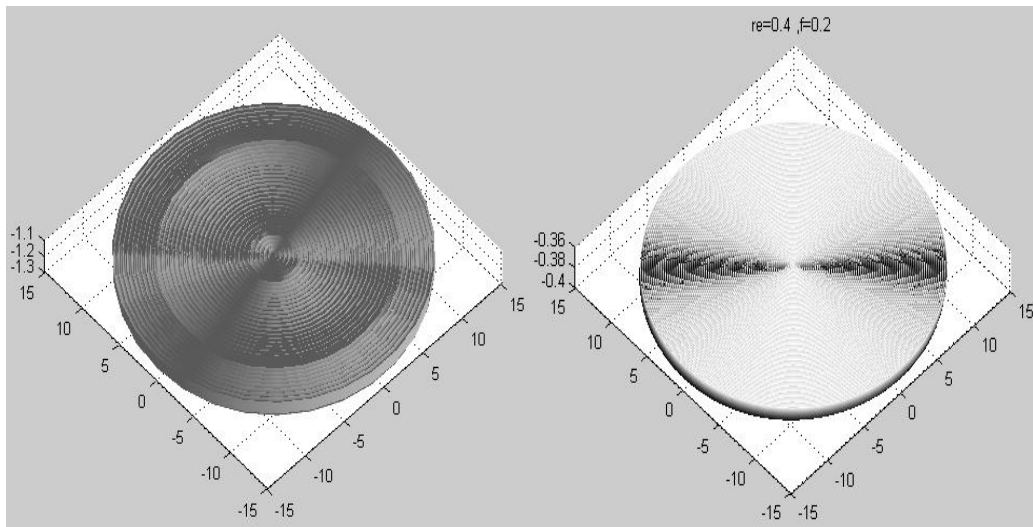


**Figure IV.20** : Image virtuelle de la surface usinée ;  $f = 0.2\text{mm/tr}$ ,  $re = 1.2\text{ mm}$



**Figure IV.21** : Image réelle de la surface usinée ;  $f = 0.2\text{mm/tr}$ ,  $re = 1.2\text{ mm}$

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. La figure suivante illustre cette différence :



**Figure IV.2 :** Différence entre une pièce usinée sans vibration (a) et avec vibration (b):

### CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été réalisé dans le but de simuler 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.

Pour atteindre notre objectif, et sur la base qu'il existe un rapport étroit entre l'état de surface et la qualité dimensionnelle des pièces mécanique usinées, nous avons développé et mis au point un modèle mathématique qui permet de reproduire virtuellement le profil théorique de la topographie d'une surface obtenue par une opération de dressage. Ce modèle est élaboré sur la base d'une description géométrique de la surface usinée. Suivant l'orientation de notre travail précisé plus haut, le modèle exprime l'influence de deux paramètres essentiels qui sont l'avance et le rayon de bec de l'outil sur la surface obtenue par l'opération de dressage.

Un mauvais choix d'un paramètre de coupe conduit à l'obtention d'un mauvais état de surface.

Notre travail nous a permis :

- Pour une opération de tournage (dressage), on a établi des corrélations fortes entre les vibrations auto-entretenues et les paramètres de coupe,
- Grace à ces paramètres de coupe, il est possible d'étudier l'évolution du système vibrant outil-pièce,
- 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

- [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] **N.S.atcherkane**, Machines travaillant par enlèvement de métal, société des publications mécanique Paris , France 1959.
- [4] **D.Gelin and M.Vincent**, Element de fabrication .Les Editions Foucher , 1995.
- [5] **Alain Passeron**, «Tournage»,Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997
- [6] **Jean-Pierre cordebois et coll**, « Fabrication Par Usinage », DUNOD, Paris 2003
- [7] **Rocdacier**, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011
- [5] **M.Balazinski**, Fabrication mécanique avancée, MEC 4530,Ecole polytechnique de Montréal Canada .
- [9] [thèse doctorat : comportement dynamique du systemepiece /outil / machine (pom en rectification plane passe profonde par **Mamadou DIEYE 2006**].
- [10][**Ispas et al, 1999**],**ISPAS C ., GHEORGHIU H.,PARAUSANU I.,ANGHEL V.**  
Vibrations des systèmes Technologique. EditureAgir,Série : Ingénierie Mécanique , Bucurest , 1999.
- [11][**Ryder et al, 1975**]. **RYDER G.H. ? BENNET M.D.**  
Mechanics of machines. Macmillan,London, 1975.
- [12] **thèse doctorat** : étude des vibrations auto entretenues en coupe tridimensionnelle : nouvelle modélisation appliquée au tournage par **ClaudiuFlorinelBisu 2007**
- [13] **Benmohammed,1996**, BenmohamedB,Identification des lois d'effort de coupe de tournage en régime dynamique. Thèse de Doctorat de Mécanique , L'Ecole Nationale superiere d'Arts et Métier-France,N d'ordre : ,1996
- [14] **Ispas et al, 1998, ISPAS C ., PREDINCEA N ., ZAPCIU M,MOHORA C.,BOBOC D**  
Machines outils – Essais et Réception (titre original : MasiniUnelte- Incercare si Receptie) .

Editura Technica, Bucarest, 1998.

[15] [R. YOUNES, Etude de la stabilité des vibrations de l'usinage, XIVème Colloque « Vibrations – Chocs et bruit », Ecole centrale de LYON, 16, 17 et 18 Juin 2004.].

[16] [L. Pimbaud, G. Layes, J. Moulin, Guide pratique de l'usinage, tome 1, Edition Hachette, France, 2003].

[17] [G. PEIGNE. Etude et simulation des effets dynamiques de la coupe sur la stabilité de la coupe et la qualité géométrique de la surface usinée : application au fraisage de profil. 2003.

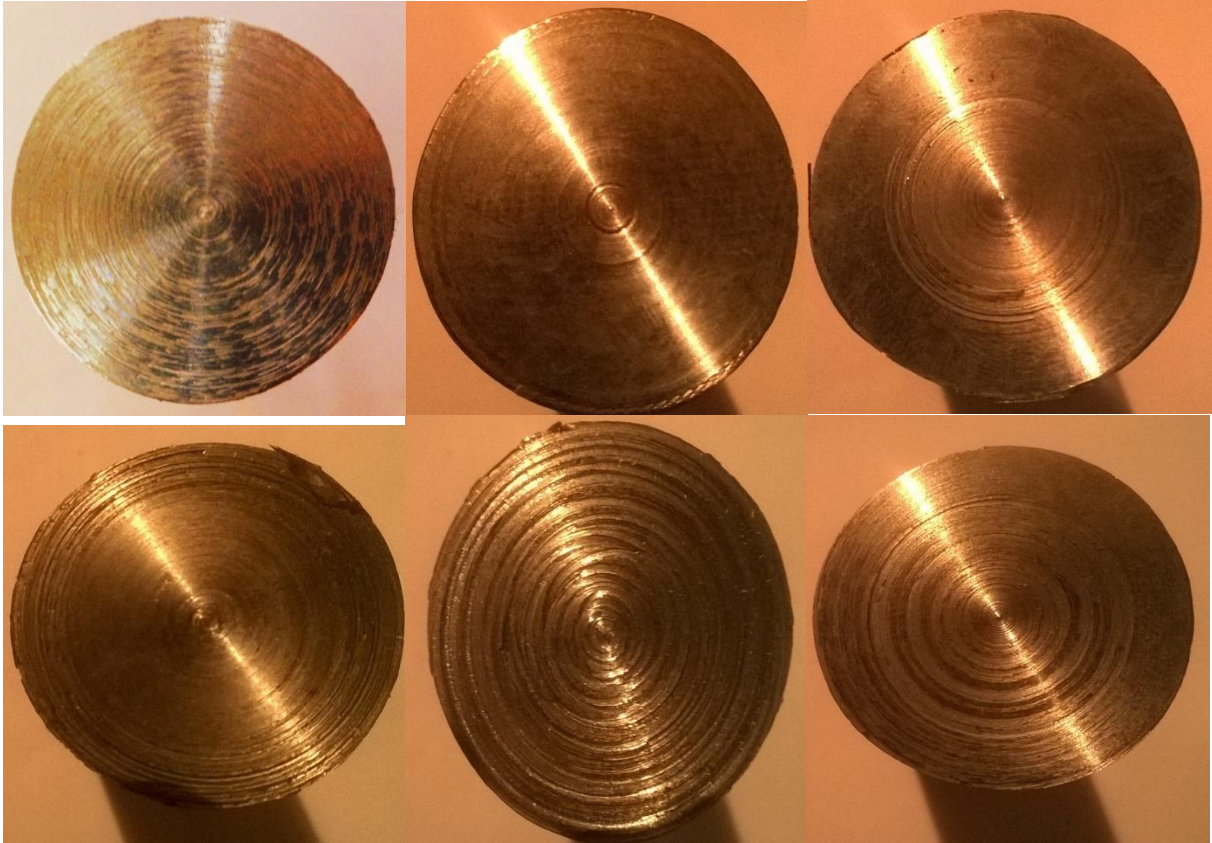
**Doctorat de l'INPG**] et Albrecht dans [A. ALBRECHT, S. S. Park, Y. Altintas et G. Pritschow. High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005, Vol. 45/9, p:993-1008].

[18] [Tlusty et al, 1957] , Tobi TLUSTY J. , POLACEK M.

[19] T.R. Moss Mechanical reliability , JPC Science and technology press, Guilford, 1980



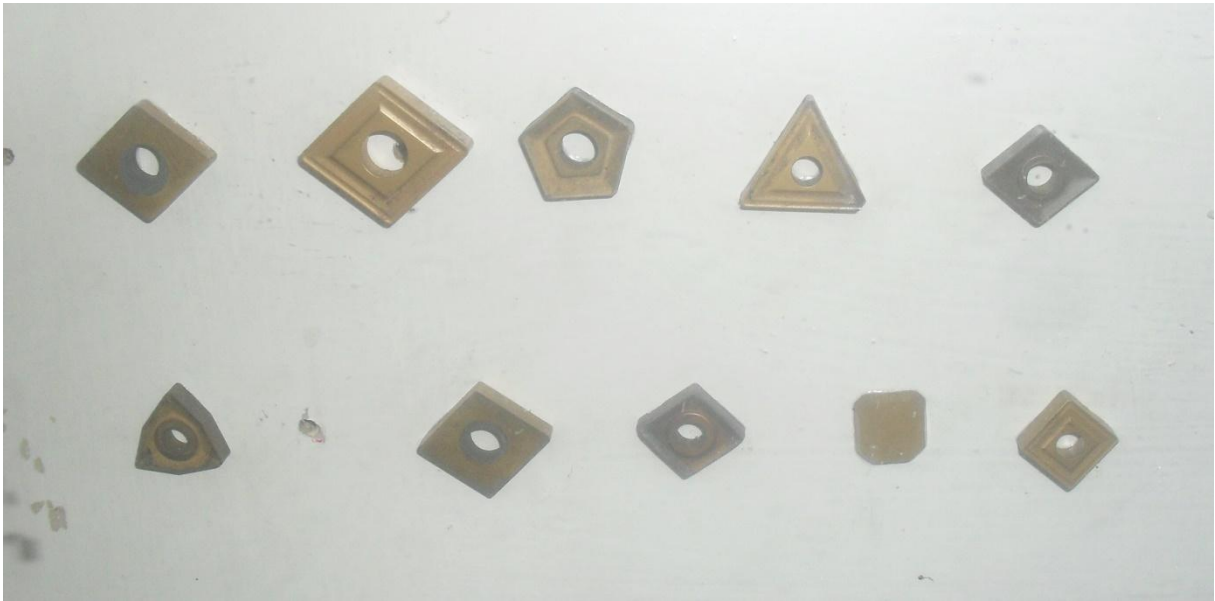
**Annexe :**



**Etat de surface des pièces usinée**



**Tour utilisé**



**Pastilles .**



**outil**