

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**  
**Faculté Des Sciences Appliquées**  
**Département De Génie Mécanique**



**Mémoire**  
**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Génie Mécanique  
Filière : Génie Mécanique  
Spécialité : Fabrication et Génie Productique

Présenté par : **Belahcene Issam**  
**Hamel Ishak**

**Thème**

**INTEGRATION DE L'OPTIMISATION  
COMBINATOIRE DANS LA PLANIFICATION  
DES OPERATION D'USINAGE**

Soutenu publiquement  
Le : **12/06/2018**

Devant le jury :

|     |            |           |             |
|-----|------------|-----------|-------------|
| Mr. | T.Ameur    | Encadreur | UKM Ouargla |
| Mr. | A.Mebarki  | President | UKM Ouargla |
| Mme | R.Khattabi | Examineur | UKM Ouargla |

**Année Universitaire : 2017/2018**

# Remerciements

Je tiens à remercier le dieu, qui m'a donné tout puissant de ma donnée la patience, la santé et le courage pour finir ce travail.

Je tiens à remercier profondément mon encadreur : Monsieur [T.Ameur](#) qui m'a encouragé à faire le maximum d'efforts dan ce travail, sans ces encouragements ce mémoire n'aurait sans doute pas abouti

Et à toutes les personnes qui m'ont aidé de près et de loin.

# *Dédicace*

C'est avec joie que nous dédie ce modeste travail :

À nos très chers parents pour leurs patiences et encouragements. Que dieu les protègent.

À nos amis et nos collègues pour les bons moments que nous passé avec eux

---

## Table des matières

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

---

### Chapitre I

#### Généralité sur le procédé de tournage

---

|   |    |
|---|----|
| I.Introduction .....                            | 2  |
| II.Principe de tournage .....                   | 2  |
| II.1. Surfaces de la pièce .....                | 3  |
| II.2. Faces et arêtes de l'outil .....          | 3  |
| II.3. Angles de l'outil .....                   | 4  |
| II.4. Matériaux de l'outil .....                | 5  |
| III.Opérations et outil de coupe .....          | 6  |
| IV.Machines de tournage (Tour) .....            | 9  |
| IV.1. Les tours parallèles conventionnels ..... | 9  |
| IV.2. Les tours à copier .....                  | 10 |
| IV.3. Les tours semi-automatiques .....         | 10 |
| IV.4. Les tours à commande numérique .....      | 11 |

---

### Chapitre II

#### Conditions de coupe en tournage

---

|   |    |
|---|----|
| I.Introduction .....  | 12 |
| II.Conditions de coupe .....                                  | 12 |
| II.1. Vitesse de coupe $V_C$ .....                            | 12 |
| II.2. Vitesse d'avance $V_f$ et avance par tour $f$ .....     | 13 |
| II.3. Profondeur de passe $a$ et surépaisseur d'usinage ..... | 13 |
| III.Paramètres d'usinage .....                                | 14 |
| III.1. Etat de surface .....                                  | 14 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| III.2. | Effort de coupe et puissance nécessaire à la coupe ..... | 15 |
| III.3. | Température d'interface .....                            | 18 |
| III.4. | usure des outils .....                                   | 18 |
| a-     | Effet mécanique .....                                    | 19 |
| b-     | phénomène physico-chimique .....                         | 19 |
| IV.    | Paramètres économiques d'usinage .....                   | 20 |
| IV.1.  | Temps total d'usinage .....                              | 20 |
| IV.2.  | Coût d'usinage .....                                     | 21 |

---

### Chapitre III

#### **Optimisation des conditions de coupe**

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| I.   | Initiations à l'optimisation: .....                           | 23 |
| I.1. | Définitions .....   | 23 |
| I.2. | Classification des problèmes d'optimisation .....             | 24 |
| a.   | Problème d'optimisation linéaire ou non linéaire .....        | 24 |
| b.   | Problème d'optimisation mono-objectif et multi-objectif ..... | 24 |
| c.   | Problème d'optimisation combinatoire.....                     | 24 |
| I.3. | Méthodes d'optimisation .....                                 | 25 |
| a.   | Méthodes déterministes .....                                  | 25 |
| b.   | Méthodes probabilistes.....                                   | 26 |
| II.  | Planification optimisée d'une opération de Chariotage.....    | 27 |
| III. | Application.....  | 30 |
|      | Conclusion Générale .....                                     | 34 |

**Liste des figures**

Chapitre I

**Généralités sur le porcidé de tournage**

Figure I.1 : Principe de coupe.....2

Figure I.2 : surfaces de la pièce.....3

Figure I.3 : Faces et arêtes de l’outil.....4

Figure I.4: les angles du taillant.....4

Figure I.5: Domaines d’emploi des divers matériaux à outil coupant.....5

Figure I.6 : les outils à charioter .....6

Figure I.7: les outils à dresser .....6

Figure I.8 : les outils à aléser.....7

Figure I.9: les outils à rainurer.....7

Figure I.10 : les outils à perçage.....7

Figure I.11 : les outils à chan freinage.....8

Figure I.12 : les outils à tronçonner.....8

Figure I.13 : les outils à fileter.....8

Figure I.14 : tour parallèles.....9

Figure I.15 : tour à copier.....10

Figure I.16 : tour semi- automatiques.....10

Figure I.17 : tour à commande numérique.....11

Chapitre II

**Conditions de coupe en tournage**

|   |    |
|---|----|
| Figure II.1 : paramètre de coupe.....                                 | 12 |
| Figure II.2 : vitesse de coupe.....                                   | 13 |
| Figure II.3 : Vitesse d'avance et avance.....                         | 13 |
| Figure II.4 : Profondeur de passe.....                                | 14 |
| Figure II.5 : Paramètre de rugosité.....                              | 14 |
| Figure II.6 : Rugosité totale de surface.....                         | 15 |
| Figure II.7: Présentation les composantes des efforts de coupe.....   | 16 |
| Figure II.8 : Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil..... | 18 |

## Liste des tableaux

---

### Chapitre III

#### Optimisation des conditions de coupe

---

|   |    |
|---|----|
| Tableau III.1 Paramètres d'usinage..... | 31 |
| Tableau III.2 Résultats .....           | 32 |



Nomenclature

| Symbole         | Designation                                   | Unité             |
|-----------------|---|-------------------|
| $V_c$           | Vitesse de coupe                              | m/min             |
| N               | Fréquence de rotation                         | tr/min            |
| D               | Diamètre de la pièce                          | mm                |
| $V_f$           | La vitesse d'avance                           | mm/min            |
| f               | Avance par tour                               | mm/tour           |
| $a_p$           | Profondeur de passe                           | mm                |
| $\alpha$        | Angle de dépouille                            | rad               |
| $\beta$         | Angle de taillant                             | rad               |
| $\gamma$        | Angle de coupe                                | rad               |
| $K_c$           | Effort spécifique de coupe.                   | N/mm <sup>2</sup> |
| A               | Section de coupe.                             | mm <sup>2</sup>   |
| $F_c$           | L'effort tangentiel de coupe                  | N                 |
| $F_f$           | L'effort axial                                | N                 |
| $F_a$           | L'effort radial                               | N                 |
| $F_t$           | L'effort total                                | N                 |
| $t_m$           | Temps de machine                              | min               |
| $t_{cs}$        | Temps de changement d'outil                   | min               |
| $t_r$           | Temps de retour d'outil                       | min               |
| $t_h$           | Temps de montage e démontage de la pièce      | min               |
| $T_p$           | Le temps de production                        | min               |
| $C_0$           | Coût de machine                               | \$/min            |
| $C_t$           | Coût d'une arrête de coupe                    | \$/arrêt          |
| $C_p$           | Coût d'usinage                                | \$                |
| $C_s$           | Coût d'outil                                  | \$/arrêt          |
| $C_m$           | Coût de réalisation d'une opération d'usinage | \$                |
| $C_v$           | Constante dépendant du couple outil-matière   |                   |
| T               | Durée de vie de l'outil de coupe.             | min/arrêt         |
| VB              | Hauteur de L'usure en dépouille               | mm                |
| K               | Constant dépend de la nuance de l'outil       |                   |
| $a_1, a_2, a_3$ | Exposants dépendants de la nuance de l'outil  |                   |
| P               | Puissance nécessaires à la coupe              | kW                |

|                  |  |                 |
|------------------|--|-----------------|
| n                | Exposant de Taylor   |                 |
| R <sub>t</sub>   | Rugosité totale  | μm              |
| R <sub>a</sub>   | Rugosité moyenne arithmétique  | μm              |
| R <sub>q</sub>   | Rugosité moyenne quadratique   | μm              |
| F <sub>max</sub> | le maximum autorise de la force de coupe pour toutes les opérations. | N               |
| R <sub>max</sub> | le maximum autorise de rugosité de surface.                          | μm              |
| P <sub>max</sub> | le maximum autorisé de puissance pour toutes les opérations          | kw              |
| h                | Épaisseur de copeau  | mm              |
| V                | Volume de matière élevé  | mm <sup>3</sup> |
| Q                | Débite coupeau   | mm/min          |
| N <sub>max</sub> | Nombre maximale possible de passe                                    |                 |
| S                | Surépaisseur d'usinage   | mm              |

# Introduction Générale

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'usinage consiste à réaliser de diverses formes géométriques sur les pièces par l'enlèvement de matière. La réalisation d'une opération de tournage nécessite un plan d'action complet. Dans ce plan, toutes les données concernant la machine, l'outil ou la pièce doivent être fournies. Cependant, on trouve que la détermination des données concernant le réglage de la machine (conditions de coupe) constitue l'objectif le plus important. Car la réussite d'une opération de tournage est évaluée à travers les paramètres technologiques et économiques produits (productivité, coût, état de surface...etc.) influencés dans la plus grande partie par les conditions de coupe utilisées.

Toutefois, la planification d'une opération de tournage se fait en deux parties; la détermination du nombre de passes nécessaire à l'enlèvement de surépaisseur d'usinage puis à la sélection des conditions de coupe pour chacune de ces passes. Cela nécessite souvent un temps doublé et implique des possibilités d'erreur plus grandes.

L'objectif décidé dans cette étude est d'introduire l'outil d'optimisation dans la planification des opérations de tournage à passe multiple. Sachant que ce plan doit fournir, à la fois le nombre de passes nécessaire et les conditions de coupe affectées à chacune, nous avons introduit les variables combinatoires dans ce procédé d'optimisation.

A la fin, et à travers un cas d'application, les intérêts de la planification optimisée d'une opération de chariotage minimisant le temps total de production sont discutés.

La représentation travaux réalisés, dans ce mémoire, s'articule de la façon suivante :

Le chapitre I : S'intéresse par l'initiation des principes de procédé de tournage ainsi qu'aux outils utilisés et aux opérations inclus dans ce procédé.

Le chapitre II : Est consacré à la présentation des conditions de coupe et des paramètres techno-économique issus d'une opération de tournage.

Le chapitre III : Présente une méthode d'optimisation de la planification d'une opération de chariotage. Ainsi, et à travers un cas d'application, les résultats formant un plan exécutif d'usinage est discuté.

# Chapitre I

Généralités sur le procédé de  
tournage

## I. Introduction :

L'usinage consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement du métal à froid et sans déformation en utilisant un tranchant. La quantité de matière enlevée est dite "copeaux" et l'instrument avec lequel est enlevée la matière est appelé "outil de coupe". L'opérateur utilise des machines dites "machines-outils" pour réaliser l'usinage d'une pièce.

## II. Principe de tournage :

Le tournage est un procédé d'usinage mettant en jeu des outils de coupe à arête unique. Il est utilisé pour la réalisation des surfaces, généralement, de révolution.

En plus à l'alimentation en matière, traduite par la pénétration de l'arête tranchante de l'outil dans la matière de la pièce, la coupe en tournage est basée sur deux mouvements :

- 1- La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe) qui est le mouvement principale du procédé.
- 2- 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.

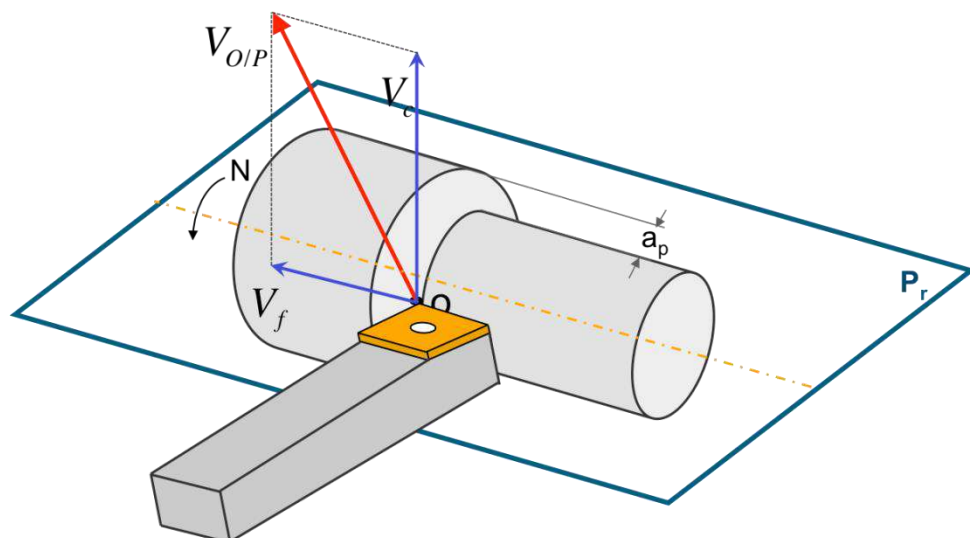


Figure I.1 : Principe de coupe en tournage.

On trouve, ainsi, que le déroulement de l'opération de coupe est basée sur les caractéristiques des deux éléments essentiels; la pièce et l'outil.

## II.1. Surfaces de la pièce :

Lors de tournage, la pièce subit une transformation qui élimine des surfaces et résulte d'autres. La figure I.2 présente ces principales surfaces. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce, c'est la limite initiale de matière de la pièce brute. La 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.

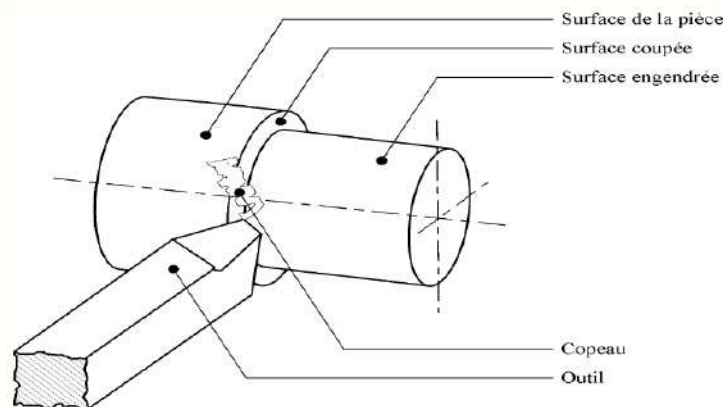


Figure I.2 : surfaces de la pièce [5].

## II.2. Faces et arêtes de l'outil :

Un outil de coupe est constitué, généralement, d'un corps et comporte une ou plusieurs parties actives. En tournage, où les outils sont caractérisés par une partie active unique, on définit deux parties; le corps d'un outil ou le queue de l'outil et les arêtes de coupe. Les faces constituant le corps de l'outil sont utilisées pour la fixation ou l'appuie. 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. Cette partie peut être constituée du même matériau que le corps, on parle alors d'outils monoblocs (carbures et aciers rapides) ou d'un matériau différent (inserts rapportés ou plaquettes pour les carbures, les cermets, les céramiques, les polycristallins de bore ou de diamant). La figure I.3 illustre le vocabulaire relatif aux différentes parties d'un outil de tournage.

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.

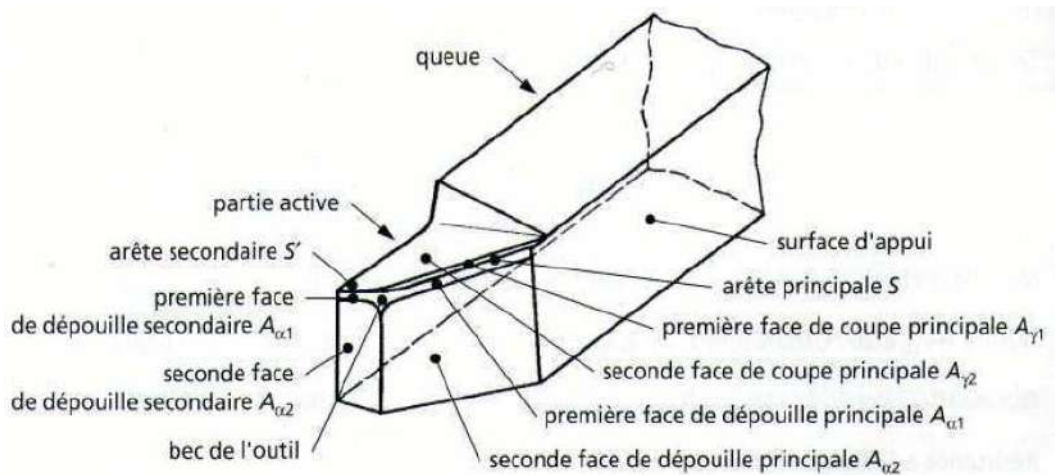


Figure I.3 : Faces et arêtes d'un outil de tournage [3].

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.

### II.3. Angles de l'outil :

La géométrie d'un outil de tournage ne dépend pas uniquement des surfaces, mais aussi de l'inclinaison de ces surfaces par rapport à la ligne horizontale et la ligne verticale. On trouve ainsi trois angles principaux. L'angle de taillant  $\beta$ , qui délimite la partie active de l'outil, l'angle de dépouille  $\alpha$  qui représente l'inclinaison de la surface de dépouille par rapport à la ligne horizontale et l'angle de coupe  $\gamma$  qui représente l'inclinaison de la surfaces de coupe à la ligne verticale. Ces angles sont illustrés, dans le système de référence outil en travail, dans la figure I.4.

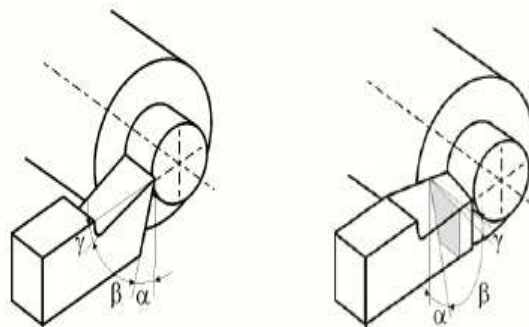


Figure I.4: les angles du taillant [5].



Généralement, l'angle de dépouille  $\alpha$  influe sur le frottement entre l'outil et la pièce. 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 les dégagements de chaleur. L'angle de taillant  $\beta$  affecte la résistance à la rupture du taillant.

## II.4. Matériaux de l'outil

La partie active de l'outil joue un rôle primordial dans l'opération de coupe. Elle subit des efforts énormes, criés par l'effet d'arrachement de matière et des frottements liés à l'écoulement des copeaux. En effet, les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés mécaniques et physico-chimiques:

- 1- une bonne résistance mécanique au frottement, résistance à l'usure
- 2- une bonne résistance aux chocs - ténacité
- 3- une bonne résistance à la pénétration - dureté.
- 4- une bonne résistance à la chaleur.
- 5- une bonne résistance à la pression.
- 6- une grande stabilité chimique vis-à-vis du matériau usiné et de l'atmosphère environnante.
- 7- une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température.
- 8- un bas prix d'achat et de mise en forme, ainsi que l'abondance des éléments de composition.

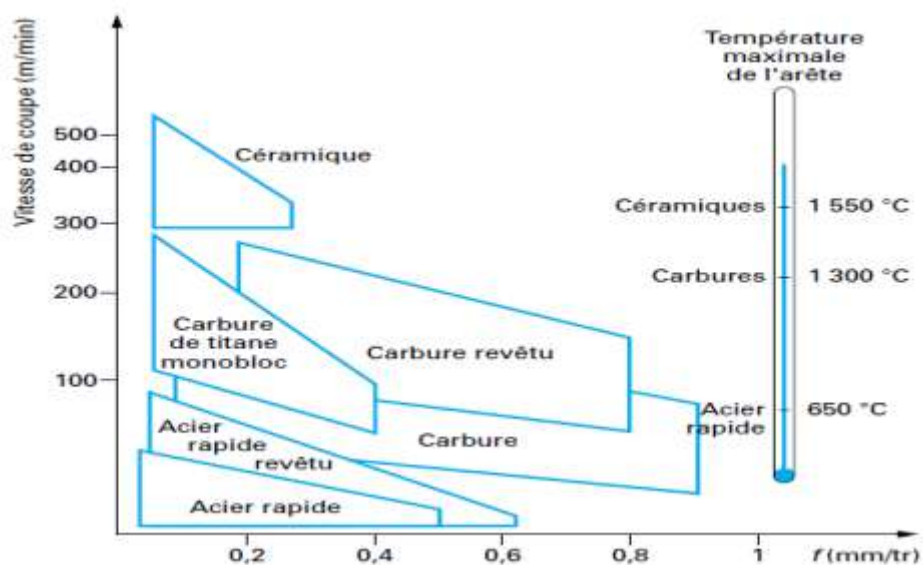


Figure I.5: Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant [12].

La figure I.5 représente le domaine d'emploi de chacun des matériaux utilisés dans la fabrication des outils de coupe. Dans ce même graphe délimité par les vitesses de coupe et les avances par tour, la température limite d'interface outil-pièce est représentée.

### III. Opérations et outils de coupe :

Dans le tournage, on peut classer, selon le profil de la pièce demandée, les opérations en deux classes principales :

- 1- Tournage intérieur
- 2- Tournage extérieur

Pour les deux classes, on peut distinguer, suivant les formes obtenues, les opérations et les outils suivants :

- **Chariotage** : Une opération consistant à usiner un cylindre d'un certain diamètre par déplacement de l'outil de coupe suivant un axe parallèle à l'axe de rotation de la pièce.

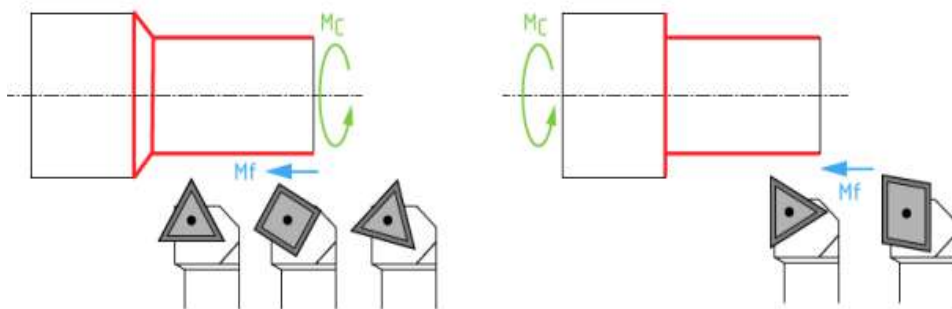


Figure I.6 : les outils à charioter [4].

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

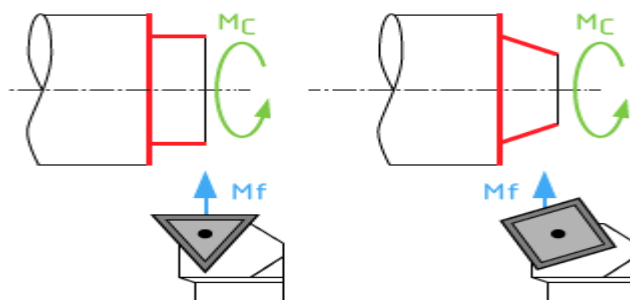


Figure I.7: les outils à dresser [4].

- **Alésage**: Une opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.

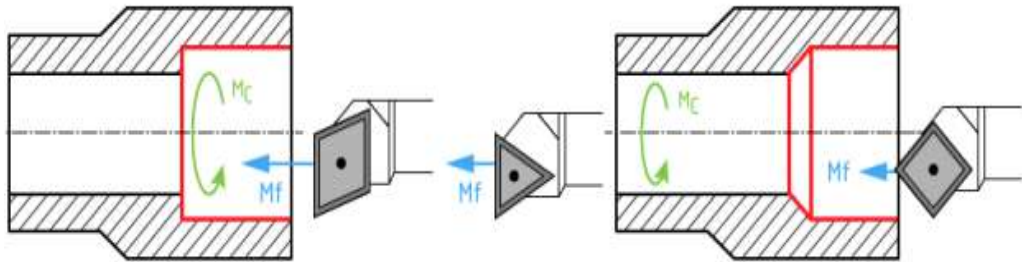


Figure I.8 : les outils à aléser [4].

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

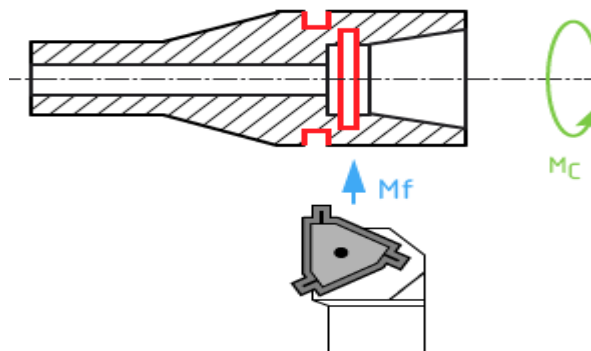


Figure I.9: les outils à rainurer [4].

- **Perçage** : Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'une forêt.

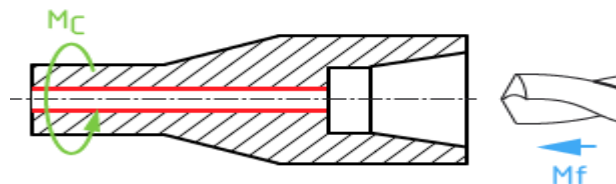


Figure I.10 : les outils à perçage [4].

- **Chanfreinage** : Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.

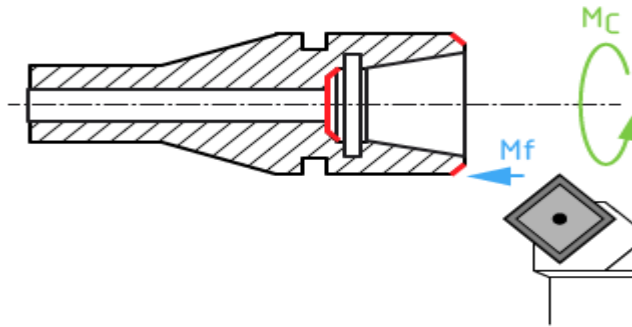


Figure I.11 : les outils à chanfreinage [4].

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

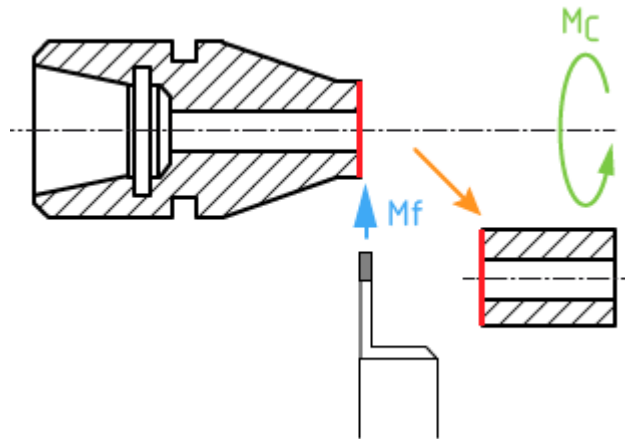


Figure I.12 : les outils à tronçonner [4].

- **Filetage** : Une opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur (taroudage).

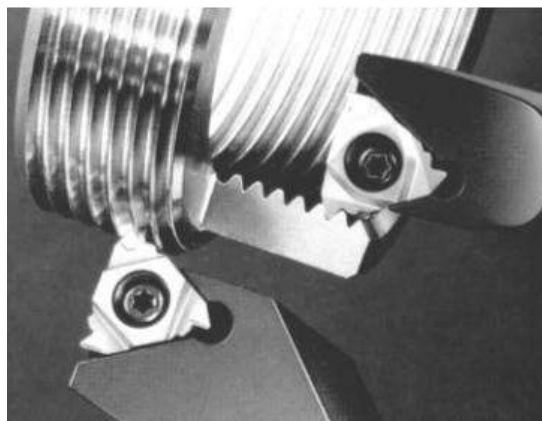


Figure I.13 : les outils à fileter.

#### IV. Machines de tournage (Tours) :

L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des pièces cylindriques. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil est maintenu par la tourelle fixée sur le chariot qui assure les déplacements transversaux, longitudinaux ou combinés. Dans le cas d'usinage des pièces longues, on utilise pour la fixation, avec le mandrin, la poupée mobile.

La structure de la machine doit assurer une rigidité et une puissance de transmission qui permettent l'enlèvement de matière. Elle présente aussi une gamme de conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour) plus au moins large permettant ainsi l'usinage de plusieurs matériaux à l'aide de plusieurs types d'outils.

En industrie, les machines-outils les plus couramment utilisées pour le tournage sont :

##### IV.1. Les tours parallèles conventionnels :

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.

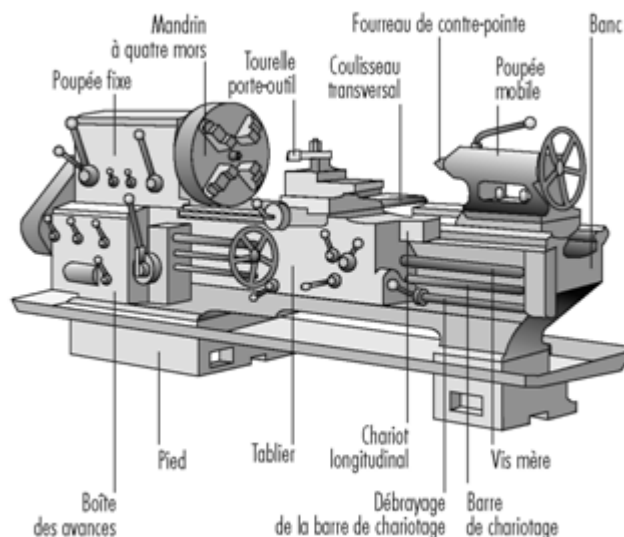


Figure I.14 : Tour parallèle.

#### IV.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.



Figure I.15 : Tour à copier.

#### IV.3. Les tours semi-automatiques :

Un tour semi-automatique est 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.



Figure I.16 : Tour semi- automatiques.

**IV.4. 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.



Figure I.17 : Tour à commande numérique.

# Chapitre II

## Conditions de coupe en tournage



## I. Introduction :

L'enlèvement de matière nécessite l'emploi d'un élément physique permettant d'extraire de la matière du volume de base appelé "brut". Cet élément est très souvent un outil dont la résistance et la géométrie sont spécifiques.

## II. Conditions de coupe :

Avant de réaliser une opération d'usinage, il faut choisir les paramètres nécessaires à l'obtention d'un bon résultat (précision, état de surface, ... etc.). Cependant, ce choix doit être pris selon plusieurs critères:

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

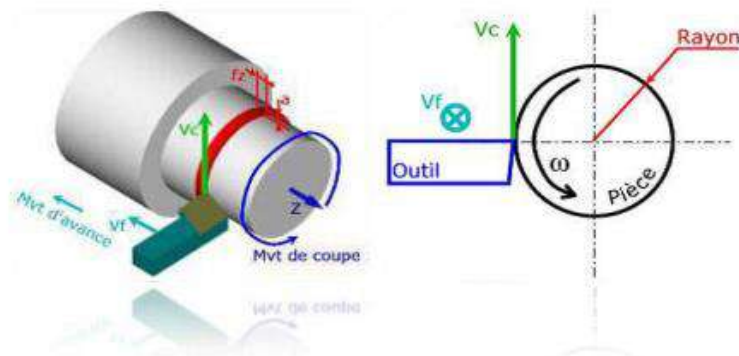


Figure II.1 : Paramètre de coupe [1].

Dans le cas du tournage deux mouvements combinés permettent l'usinage. La rotation de la pièce (mouvement de coupe) et la translation de l'outil (mouvement d'avance)

### II.1. Vitesse de coupe $V_c$ :

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire  $\omega$ . Cette vitesse étant communiquée par la broche de la machine vers la porte pièce. La vitesse de coupe  $V_c$  est la vitesse instantanée d'un point situé au périmètre. Elle est donnée par :

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} (m/min) \quad (II.1)$$

Où

D: Diamètre de la pièce (mm).

N: Fréquence de rotation (tr / min)

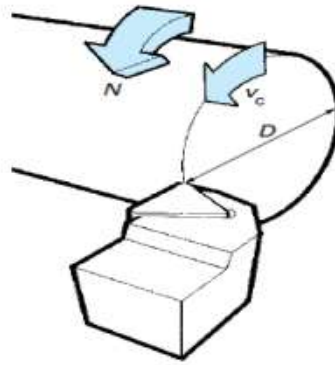


Figure II.2 : Vitesse de coupe. [10]

### II.2. Vitesse d'avance $V_f$ et avance par tour $f$ :

La vitesse d'avance  $V_f$  (mm/min), présenté dans la figure (II. 3), est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour  $f$  (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce réalise un tour. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. Il influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

La vitesse d'avance  $V_f$  est donnée par la formule suivante :

$$V_f = f(\text{mm/tr}) \times N(\text{tr/min}) \quad \text{II.2}$$

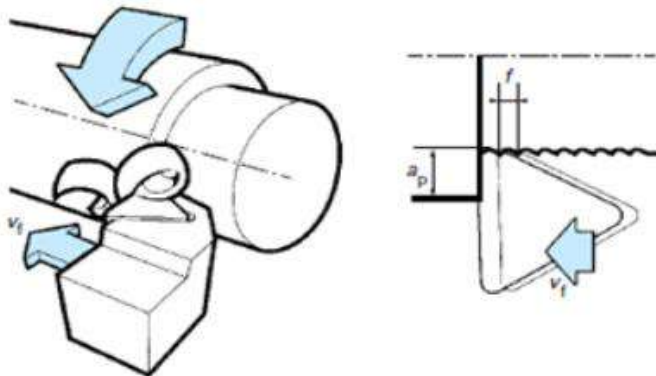


Figure II.3 : Vitesse d'avance et avance. [10]

### II.3. Profondeur de passe $a_p$ et surépaisseur d'usinage :

En chariotage, la surépaisseur d'usinage (figure. II.4) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). Si l'opération de tournage est répartie en plusieurs passes, ce surépaisseur est réparti, lui aussi, en plusieurs parties dit "profondeur de passe". Ce

dernier est toujours mesurée dans une direction perpendiculaire à la direction de l'avance et non pas suivant l'arrête de l'outil.

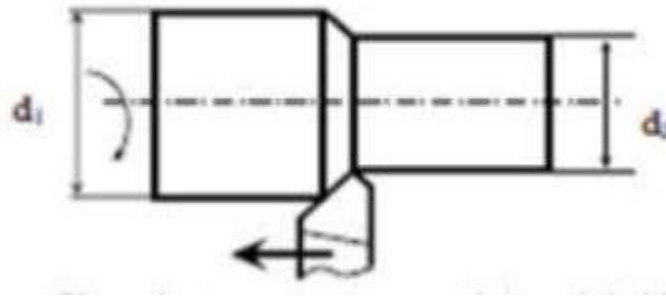


Figure II.4 : Profondeur de passe. [11]

### III. Paramètres d'usinage :

Une opération de tournage résulte, selon les régimes de coupe employés, plusieurs paramètres techno-économiques. Les mesures de ces paramètres sont, souvent, considérés comme critères de réussite de l'opération.

#### III.1. Etat de surface :

Les surfaces usinées sont caractérisées par des défauts ou des écarts par rapport à un nominal. La génération d'une surface usinée fait intervenir autant la forme que les traces laissées par le tranchant au contact de la pièce pendant leur mouvement relatif. Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (Figure II.5). Cette coupe représente principaux critères de rugosité par rapport à ligne moyenne.

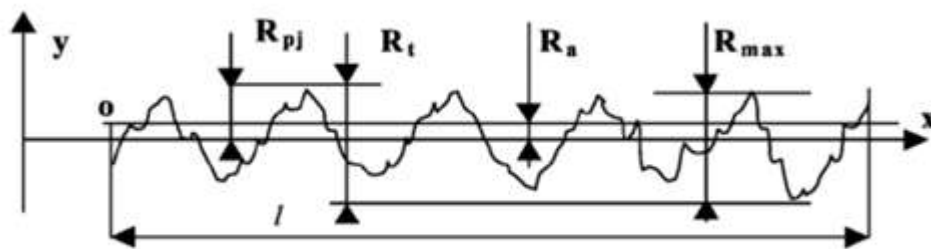


Figure II.5 : Paramètre de rugosité [7].

**Rugosité moyenne arithmétique  $R_a$** : représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à ligne "0".

**Rugosité moyenne quadratique  $R_q$** : ce critère représente l'écart moyen quadratique par rapport à ligne "0".

**Rugosité max  $R_{\max}$** : hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité.

**Rugosité totale  $R_t$** : l'écart totale entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil relevé sur toute la longueur de planage.

En tournage le passage de l'outil génère une topographie de surface hélicoïdale qui varie suivant le rayon de bec de l'outil et l'avance par tour  $f$ . La rugosité totale dans ce cas est exprimée par:

$$R_t = \frac{f^2}{8r} \quad \text{II.3}$$

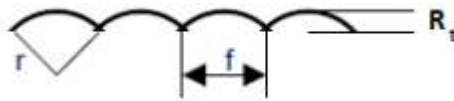


Figure II.6 : Rugosité totale de surface [8].

Les paramètres de rugosité sont théoriquement indépendants de la vitesse de coupe (modèle géométrique). Cependant, et dans la pratique, cette indépendance est conditionnée par la présence de l'arête rapportée pour les basses vitesses de coupe. Par conséquent, la vitesse de coupe possède une influence significative sur la rugosité de surface. L'état de surface s'améliore lorsque la vitesse de coupe augmente.

D'autre part, et d'une manière théorique, la rugosité est indépendante aussi de la profondeur de passe. Mais il apparaît qu'aux faibles profondeurs de passe, utilisées en finition, une influence non linéaire peut apparaître. En effet, la profondeur de passe apporte une légère augmentation des critères de rugosité.

D'une manière générale, la vitesse d'avance est le paramètre le plus important par rapport aux autres facteurs qui affectent la rugosité de surface.

### III.2. Effort de coupe et puissance nécessaire à la coupe :

L'étude de l'évolution des forces de coupe basée sur des essais expérimentaux a permis la mise en évidence de l'influence des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) sur les composantes de l'effort de coupe.

L'effort total subit par la pièce, lors de la coupe, est défini par trois composantes. La figure II.7 présente cette composition en liaison avec les conditions de coupe employées.

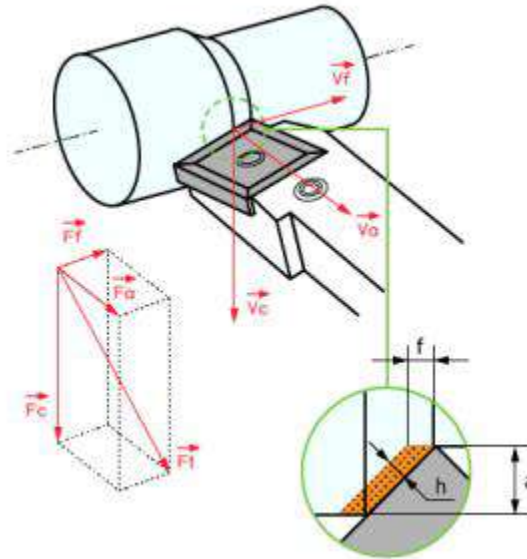


Figure II.7: Présentation les composantes des efforts de coupe. [4]

D'une manière simpliste, l'effort total est formulé donc par l'équation de résultante suivante:

$$F_t = \sqrt{F_f^2 + F_a^2 + F_c^2} \quad \text{II.4}$$

Où

$F_c$ : l'effort tangentiel de coupe

$F_f$ : l'effort axial

$F_a$ : l'effort radial

$F_t$ : l'effort total

L'effort de coupe  $F_c$  appelé effort « générateur de puissance » est décisif, tout comme la vitesse de coupe, pour le calcul de la puissance de coupe ou d'entraînement de la machine outil. L'importance de cet effort dépend essentiellement de la matière à usiner et des conditions de coupe actives.

$$F_c = K_C \cdot A \quad \text{II.5}$$

Où

$K_C$ : Effort spécifique de coupe.

$A$ : section de coupe.

Dans le cas général, la puissance nécessaire à la coupe est le produit scalaire entre le vecteur d'effort et vitesse :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{V} \quad \text{II.6}$$

D'où

$$P = F_a \cdot V_a + F_f \cdot V_f + F_c \cdot V_c \quad \text{II.7}$$

En chariotage nous négligeons l'effort d'avancement et l'effort radial, en effet la puissance nécessaire à la coupe sera formulée par:

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad \text{II.8}$$

Ainsi, on trouve que l'effort de coupe s'évolue inversement à la vitesse de coupe. On dit que la vitesse enlevées devisent la coupe.

L'augmentation de la vitesse conduit à une diminution des composantes de l'effort de coupe. À cause de la haute température dans la zone de coupe qui rend le métal travaillé plus plastique et par conséquent l'effort nécessaire pour la coupe diminue. Il est à noter aussi que les vitesses de coupe enlevée ne favorisent pas l'apparition de l'arête rapportée.

Les investigations antérieures montrent une nette augmentation des efforts de coupe avec l'augmentation de la profondeur de passe et cela à cause de l'augmentation de l'épaisseur (section) du copeau et par conséquent l'augmentation du volume du métal déformé. Cette augmentation est presque linéaire.

L'effort tangentiel et axial dépasse l'effort radial. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon du bec aux petites profondeurs de passe. Avec l'augmentation de  $a_p$ , la coupe se fait en dehors de la limite du rayon de bec et la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier axial, car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente. Autrement dit l'outil ne travaille plus par son rayon seulement.

Avec l'augmentation des ces deux facteur, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus à la formation du copeau et la valeur des efforts nécessaire pour assurer la coupe est plus importante.

En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance. Parcellements, L'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel.

### III.3. Température d'interface :

Le thermique joue un rôle prépondérant dans les différents procédés d'usinage. En tournage, on rappelle que la température à l'interface outil-copeau provient de deux sources de chaleur distinctes.

- 1- L'échauffement dû à la déformation plastique dans la zone primaire de cisaillement.
- 2- L'augmentation de température due aux frottements entre le copeau et la face de coupe de l'outil.

L'étude expérimentale a permis de constater que cette température augmente avec les conditions de coupe ( $V_c, f, a$ ).

### III.4. Usure et durée de vie des outils :

Le tranchant de l'outil qui constitue l'élément active, effectuant le travail de déformation, est soumis à des sollicitations mécaniques et thermiques très sévères qui provoquent, ainsi, son usure et sa détérioration dans un temps relativement limité. Le frottement à l'interface outil-copeau s'effectue entre un métal naissant et l'outil à des pressions très élevées et des températures élevées ce qui peut donner naissance à des effets physico-chimiques aggravant l'usure de l'outil.

La figure II.8 représente les principaux types d'usure qui apparaissent sur un outil de coupe; l'usure en dépouille, l'usure en entaille, l'usure en adhérence.

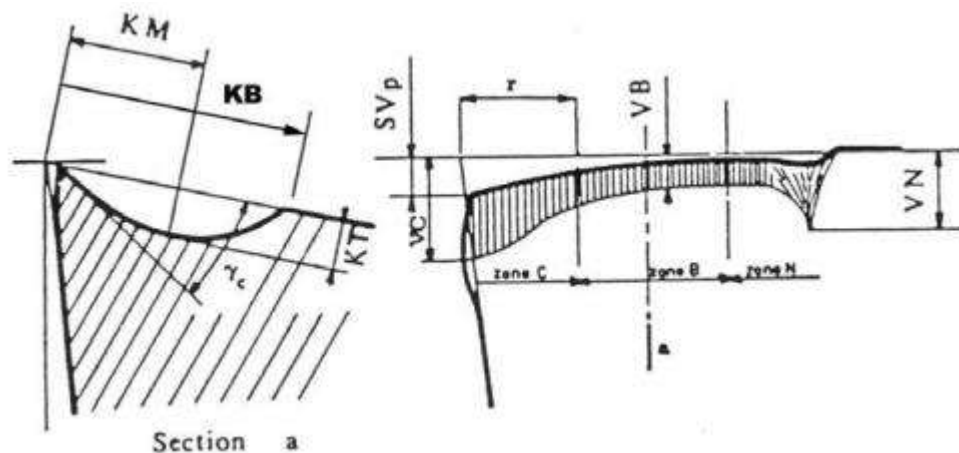


Figure II.8 Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil [7].

On trouve, ainsi, que l'usure est dû à deux types d'effet: effets mécaniques et effets physico-chimiques.

**a. Effet mécanique :**

- **Par adhésion :** L'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'à une vitesse critique. Cette usure peut être entretenue lorsque les surfaces flottantes ne sont en contact que sur une partie de leurs surfaces apparentes de frottement, soit à cause de l'état de surface des faces d'attaque et en dépouille.

- **Par abrasion :** L'usure par abrasion est consécutive à l'enlèvement de matière sur l'outil par des constituants durs dans le matériau usiné.

- **Par déformation plastique :** L'usure par déformation plastique est sujette à une déformation permanente de l'outil et à un effet de fluage, sous le travail de haute température et de haute pression dans la zone de contact outil-copeau.

- **Par fissuration :** La fissuration des outils en chocs résultant de vibrations ou de fissures microscopiques peut être considérée comme ayant été formée sur le bord de l'instrument et la fissuration peut, également, être due à la faiblesse de l'outil.

**b. phénomène physico-chimique :**

- **Par corrosion :** C'est le problème majeur, avec l'élévation de température de l'outil la vaporisation de l'eau contenue dans les huiles solubles au contact de l'outil et l'oxygène de l'air provoquent localement une fragilisation de l'outil.

- **Par diffusion :** La diffusion de matière de l'outil vers le copeau est un phénomène qui ne peut se produire qu'à des températures élevées.

La durée de vie d'un outil de coupe est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considérée dans des conditions de coupe données.

A partir des études théoriques, présentées antérieurement, on peut choisir comme critère d'usure des outils de coupe l'un des trois critères suivants :

1. Défaillance brutale due à la déformation plastique de l'arête. Ce critère n'est employé que pour les outils en acier rapide ou les outils en céramique.
2. Usure frontale, employé pour tous les outils, caractérisés soit par l'usure frontale moyenne soit par l'usure frontale maximale.
3. Usure en cratère, employé seulement pour les outils en carbure métallique, caractérisé par la profondeur du cratère.



Généralement, seules les conditions de coupe sont prises en considération dans l'établissement des lois d'usure, pour des outils parfaitement définis, un matériau usiné bien déterminé et dans des conditions de lubrification données.

Cependant, on arrive à des lois d'usure reliant la durée de vie d'outil aux conditions de coupe, de la forme:

$$T = F(V_c, f, a_p) \quad \text{II.9}$$

Ces modèles sont généralement dérivés du modèle de Taylor exprimant la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe:

$$T = C_v \cdot V_c^n \quad \text{II.10}$$

Où

$C_v$  est la constante dépend du couple outil-matière.

En pratique, la durée de vie des outils de tournage est souvent donnée par la formule empirique suivante:

$$T = K \frac{1}{a_3} \cdot V_c^{-1} \cdot f^{-\frac{a_1}{a_3}} \cdot a_p^{-\frac{a_2}{a_3}} \quad \text{II.11}$$

$K$  : constante dépendent de la nuance de l'outil et du matériau usiné.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ : des exposants dépendants de la nuance de l'outil.

#### IV. Paramètres économiques d'usinage :

On trouve aussi qu'une opération d'usinage est caractérisée par des paramètres économiques. Ces derniers représentent les qualités essentielles de cette opération.

D'une manière générale, la réalisation d'une opération de tournage nécessite un temps bien déterminé. Celui affecte le coût de cette opération par l'utilisation de l'outil et de la machine. En effet on trouve que ce paramètre est principale en fabrication.

##### IV.1. Temps total d'usinage :

Le temps nécessaire à la réalisation d'une opération d'usinage est composé de :

- 1- Temps nécessaire à la préparation  $t_h$ . Il est composé du temps de montage et de démontage de la pièce et du temps de réglage de la machine.
- 2- Temps nécessaire à l'enlèvement de matière  $t_m$  appelé "temps machine". Pour une passe, il est donné par:

$$t_m = \frac{V}{Q} \quad \text{II.12}$$

Où

V est le volume de matière éliminé [mm<sup>3</sup>]. Pour une passe, il est donné par :

$$V = \pi \cdot D \cdot L \cdot a_p \quad \text{II.13}$$

Et Q est le débit de coupe [mm<sup>3</sup>/min]. Pour une passe, ce débit est formulé comme suit :

$$Q = 1000 \cdot V_c \cdot f \cdot a_p \quad \text{II.14}$$

3- Le temps de retour de l'outil  $t_r$  : Temps nécessaire au retour à la position initial après la réalisation d'une passe.

4- Le temps de remplacement et de réaffûtage de l'outil. Ce temps est caractéristique pour une opération entière. À chaque passe, on affecte une partie de ce temps. Cette partie est proportionnelle à sa consommation en outil. Elle est donnée par :

$$t_c = \frac{V}{Q \cdot T} \cdot t_{cs} \quad \text{II.15}$$

Où

$T_{cs}$  est le temps de changement d'outil.

Et T est la durée de vie de l'outil. Pour une passe, elle est donnée par :

$$T = K \frac{1}{a^3} \cdot V_c^{-\frac{1}{a^3}} \cdot f^{-\frac{a_1}{a^3}} \cdot a^{-\frac{a_2}{a^3}} \quad \text{II.16}$$

En effet, et pour une passe, le temps total de production est donné par :

$$T_p = t_m + t_c + t_h + t_r \quad \text{II.17}$$

#### IV.2. Coût d'usinage :

Le coût de réalisation d'une opération d'usinage est réparti en deux coûts. Le premier est lié à l'utilisation de la machine. C'est le coût machine. Il est donné par :

$$C_m = C_o T_p \quad \text{II.18}$$

Où

$C_o$  est le coût machine.

Le deuxième est lié à l'emploi de l'outil c'est le coût outil. Il est donné par :

$$C_s = C_t \frac{v}{Q.T} \quad \text{II.19}$$

Où

$C_t$  est le coût d'une arête de coupe.

En effet, et pour une opération, le coût d'usinage est donné par:

$$C_p = C_m + C_s \quad \text{II.20}$$

# Chapitre III

## Optimisation des conditions de coupe

## I. Initiations à l'optimisation :

L'optimisation peut être définie comme la science qui détermine la meilleure solution à certains problèmes, mathématiquement définie, qui sont souvent des modèles de la physique réelle. C'est une technique qui permet de « quantifier » les compromis entre des critères parfois non commensurables. En fait, l'optimisation cherche à améliorer une performance en se rapprochant d'un point optimum.

La résolution d'un problème d'optimisation s'appuie généralement sur un algorithme d'optimisation. L'algorithme d'optimisation cherche le jeu de paramètres de l'objet à optimiser donnant à une fonction relative au problème, la valeur maximale ou minimale. L'algorithme d'optimisation doit permettre de converger vers l'objet optimal en minimisant ou maximisant cette fonction par rapport aux paramètres variables.

### I.1. Définitions :

Un problème d'optimisation est défini par un ou plusieurs fonction-objectif(s) et un ensemble de contraintes. Il consiste à déterminer l'ensemble des valeurs des variables de décision conduisant aux meilleures conditions de fonctionnement du système (ce qui revient à minimiser ou maximiser la fonction-objectif), tout en respectant les contraintes traduites par des relations d'égalités ou d'inégalité.

- 1- Les variables de problème :** Les variables fournissent la solution requise par les valeurs exactes de ces variables qui expriment des données quantitatives ou qualitatives, et sont appelées la solution optimale. Ces inconnus peuvent être de nature différente (réelles, complexes, entières, combinatoire, ... etc.)
- 2- Les fonctions-objectif :** Le terme de fonction-objectif est utilisé en optimisation mathématique pour désigner une fonction qui sert de critère pour déterminer la meilleure solution à un problème d'optimisation.
- 3- Les contraintes :** Les contraintes sont des conditions que doivent satisfaire la solution d'un problème d'optimisation. On distingue deux types de contraintes : les contraintes d'égalité et d'inégalité. Donc, on appelle les contraintes toutes les relations limitant le choix des valeurs possibles des variables. Ces relations peuvent être de simples bornes sur les variables.

## **I.2. Classification des problèmes d'optimisation :**

On peut classer les problèmes d'optimisation de plusieurs manières:

- Suivant la nature des variables de décision : soit continu et on parle alors de problème continu, soit discret et on parle donc de problème combinatoire.
- la nature du modèle mathématique d'optimisation : soit linéaire et on parle alors de problème linéaire, soit non linéaire et on parle donc de problème non linéaire.
- le nombre de fonction-objectif ou de critères à optimiser : soit une seule fonction scalaire et on parle alors de problème mono-objectif, soit une fonction vectorielle et on parle donc de problème multi-objectif.
- la présence ou non des contraintes : on parle de problème sans contrainte ou avec contrainte.

### **a. Problème d'optimisation linéaire ou non linéaire**

La grande difficulté d'un problème de conception provient du fait qu'il s'agit d'un problème d'optimisation non linéaire et implicite dans les variables de conception. Les méthodes d'approximation les plus populaires pour résoudre les problèmes non linéaires étant la méthode de gradient, méthode de pénalité intérieure et méthode de Newton-Raphson... etc.

La programmation linéaire traite la résolution des problèmes d'optimisation pour lesquels la (ou les) fonction-objectif et les contraintes sont présentés à l'aide de fonctions mathématiques linéaires. La programmation linéaire est un branche des mathématiques que s'intéresse à l'optimisation des fonctions linéaires comportant une ou plusieurs variables (réel) indépendantes soumises des contraintes (égalités ou inégalités)

### **b. Problème d'optimisation mono-objectif et multi-objectif**

Un problème d'optimisation mono-objectif consiste à trouver la solution optimale globale que résulte en meilleure valeur (plus petit ou plus grande) de la fonction-objectif unique. Dans un problème d'optimisation multi-objectif, il ya plus qu'une fonction-objectif, pour chaque fonction pouvant avoir une solution optimale différente. Le but de problème d'optimisation, dans ce cas, est de trouver de bon compromis. Lorsqu'il y a plusieurs objectifs, la notion d'optimum change et il est préférable d'utiliser un autre terme "compromis".

### **c. Problème d'optimisation combinatoire**

L'optimisation combinatoire, appelée aussi optimisation discrète, consiste à minimiser (maximiser) une fonction sur un ensemble fini potentiellement très grand. L'optimisation

combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes domaines d'activité. Son importance se justifie d'une part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation et d'autre part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire

### I.3. Méthodes d'optimisation :

En optimisation, on trouve deux principales classes de méthodes:

#### a. Méthodes déterministes

On dit que la méthode d'optimisation est déterministe lorsque l'évolution vers la solution du problème est toujours la même pour un même contexte initial donné. Cette évolution est basée sur des transitions déterministes et ne laissant aucune place au hasard. Ces méthodes sont, en général, efficaces et peut coûteuses, mais elles nécessitent une configuration initiale spécifique (point de départ) pour résoudre le problème. Considérées souvent comme des méthodes globales, elles sont basées sur l'exploitation d'une solution initiale tout en l'améliorant afin de trouver une solution optimale globale.

Dans cette catégorie, on trouve plusieurs méthodes. Les plus importantes sont :

- **Méthode du simplexe** : L'intérêt principale de la méthode du simplexe par rapport aux autres méthodes est qu'elle ne nécessite pas le calcul de gradient, elle est uniquement basée sur l'évolution de fonction. Cela rend utilisable pour des fonctions bruitées.

Soit une fonction à minimiser  $f$ . On appelle simplexe de  $\mathbb{R}^n$  un ensemble  $(x_0, x_1 \dots x_n)$  de point de  $\mathbb{R}$  tel que:

$$f(x_0) \geq f(x_i) \quad \forall i \in [1 \dots n] \quad \text{III.1}$$

On peut dire, donc, que  $x_0$  est le meilleur élément et  $f(x_0)$  est la valeur optimale.

- **Méthode du gradient** : Ces méthodes permettent de résoudre des problèmes non linéaire et sont basées sur une hypothèse forte. Elles procèdent de la façon suivante :

On choisit un point de départ  $x_0$  et on calcule le gradient  $\nabla f(x_0)$  en  $x_0$ . Ce gradient indique la direction de la plus grande augmentation de  $f$ . On se déplace d'une quantité  $\lambda_0$  dans le sens opposé au gradient et on définit le point  $x_1$ , tel que :

$$x_1 = x_0 - \lambda_0 \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|} \quad \text{III.2}$$

Cette procédure engendre les points  $x_0, x_1, \dots, x_k$  ainsi pas à pas la distance entre le point d'indice  $k$  et l'optimum diminue.

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|} \quad \text{III.3}$$

$\lambda_k$  est le pas de déplacement à chaque itération.

– **La méthode de Newton** : L'idée de base de la méthode de Newton pour l'optimisation sans contrainte consiste à utiliser de manière itérative l'approximation quadratique de la fonction-objectif  $f$  à l'itération courante  $x_k$  et de minimiser cette approximation. Cette méthode suppose que la fonction  $f$  est continue et deux fois différentiable et le Hessien  $\nabla^2 f(x^k)$  est défini positif.

De la même manière que la méthode du gradient la suite  $\{x_k\}$  est définie par :

$$x_{k+1} = x_k - [\nabla^2 f(x_k)]^{-1} \nabla f(x^k) \quad \text{III.4}$$

### b. Méthodes probabilistes

Ces méthodes appartiennent à la famille des méthodes non constructives. Elles ont été appliquées à plusieurs domaines des mathématiques tels que la théorie des nombres, l'algèbre linéaire et l'analyse réelle. Son principe est de montrer que si l'on choisit au hasard des objets d'une catégorie, la probabilité que le résultat soit d'un certain type est plus que zéro. Bien que la démonstration utilise la théorie des probabilités, la conclusion finale est déterminée de façon certaine. Considérées comme méthodes de recherche locale, elles sont basées sur l'exploration d'espace de recherche afin de trouver une solution optimale.

– **Monte Carlo**: On appelle méthode de Monte-Carlo toute méthode visant à calculer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes. Elles sont particulièrement utilisées pour calculer des intégrales en dimensions plus grandes que 1 (en particulier, pour calculer des surfaces et des volumes).

– **Algorithme génétique**: Le principe de calcul de ces algorithmes est inspiré des principes évolutifs darwiniens : les espèces s'adaptent, de génération en génération, à leur environnement par l'acquisition, la sélection et la conservation de certaines caractéristiques.

Pour utiliser l'algorithme, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- 1) Un principe de codage de l'élément de population.
- 2) Un mécanisme de génération de la population initiale.



- 3) Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.
- 4) Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état.
- 5) Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

– **La méthode des essais de particules:** Ces algorithmes d'optimisation ont été introduits en 1995 par J. Kennedy et R. Eberhart comme alternative aux algorithmes génétiques standards. Ils représentent une simulation des espèces vivant en groupe.

## II. Planification optimisée d'une opération de Chariotage:

Une opération de chariotage (tournage) consiste à enlever un volume de matière délimité par le surépaisseur d'usinage  $S$ . Ce volume ne peut être coupé qu'à travers plusieurs passes. Chacune de ces passes est caractérisée par une profondeur  $a_p$ , dont la somme de ces profondeurs est égale une surépaisseur d'usinage.

Le nombre maximale possible des passes peut être, alors, donné par ;

$$N_{max} = \text{Arrondis}(S/a_{pmin}) \quad \text{III.5}$$

Où  $a_{pmin}$  est la profondeur de passe minimale.

En effet, la planification d'usinage est basée sur la répartition de l'opération en un nombre de passes dont la dernière est réservée à la finition. Cette passe de finition doit être obligatoirement réalisée. Par conséquent, l'opération de chariotage doit être réalisée par  $(N_{max}-1)$  passes d'ébauche et une seule passe de finition. Chacune des passes d'ébauche a une probabilité d'être réalisée entre 0 et 1.

Si on affecte à chaque passe d'ébauche " $i$ " une variable combinatoire  $p_i$  qui détermine la probabilité de réalisation de cette passe. Soit :

$$\begin{cases} 0 \leq p_i \leq 0.5 ; & \text{la passe ne se réalise pas,} \\ 0.5 < p_i \leq 1 ; & \text{la passe se réalise} \end{cases}$$

En plus à cette variable combinatoire, la passe "i" est représentée par trois variable réelles représentant les conditions de coupe :  $a_{pi}, V_{ci}, f_i$ .

La passe de finition est uniquement représentée par les variables réelles liés aux conditions de coupe :  $a_{pf}, V_c, f_f$ .

En effet, le nombre totale des variables de problème est égal à  $(4N_{max} - 1)$

Cette représentation permet le calcul du temps total ou le coût total de production d'une opération de chariotage.

Si l'optimisation des conditions de coupe choisie est basée sur la minimisation de temps de production, ou adapte la formulation mathématique suivante:

En se basant sur les définitions présentées dans le deuxième chapitre, la réalisation d'une passe d'ébauche "i" résulte les paramètres suivant :

- Volume de matière enlevé:

$$V_i = \pi D L a_{pi} \quad \text{III.6}$$

Où D et L sont, respectivement, le diamètre et la longueur d'usinage.

- Débit de copeaux:

$$Q_i = 1000 V_{ci} f_i a_{pi} \quad \text{III.7}$$

- Durée de vie de l'outil:

$$T_i = \frac{k_T}{V_{ci}^{\alpha_1} f_i^{\alpha_2} a_{pi}^{\alpha_3}} \quad \text{III.8}$$

Où  $k_T$  est la constante de la durée de vie et  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  sont les exposants empiriques de la durée de vie.

En utilisant ces paramètres technologiques, le temps nécessaire à la réalisation d'une passe d'ébauche est donné par:

$$T_{ei} = \text{Arondi}(p_i) \cdot \left[ \frac{V_i}{Q_i} + t_{cs} \cdot \frac{V_i}{Q_i T_i} + t_r \right] \quad \text{III.9}$$

Où  $t_{cs}$  est le temps de changement d'outil et  $t_r$  est le temps de retour rapide de l'outil.

De la même manière, la réalisation de la passe de finition nécessite le temps suivant:

$$T_f = \frac{V_f}{Q_f} + t_{cs} \cdot \frac{V_f}{Q_f T_f} + t_r \quad \text{III.10}$$

Où

$$V_f = \pi D L a_{p_f} \quad \text{III.11}$$

$$Q_f = 1000 V_{c_f} f_f a_{p_f} \quad \text{III.12}$$

$$T_f = \frac{K_T}{V_{c_f}^{\alpha_1} f_f^{\alpha_2} a_{p_f}^{\alpha_3}} \quad \text{III.13}$$

Sachant que le temps total de production  $T_p$  est la somme des temps de réalisation de toutes les passes (d'ébauche et de finition), on aura:

$$T_p = \sum_{i=1}^{(N_{max}-1)} T_{e_i} + T_f + t_h \quad \text{III.14}$$

Où  $t_h$  est le temps de préparation.

Cependant, la réalisation de ces passes doit résulter l'enlèvement d'un surépaisseur d'usinage égale à  $S$ . En effet, les profondeurs de passe doivent satisfaire au condition suivante:

$$\sum_{i=1}^{(N_{max}-1)} \text{Arondi}(p_i) \cdot a_{p_i} + a_{p_e} = S \quad \text{III.15}$$

Ainsi, et dans le but de bon déroulement et la sûreté de l'opération, les conditions de coupe doivent satisfaire aux limites d'utilisation de la machine et de l'outil. Cela implique les limitations suivantes:

$$\begin{cases} a_{p_{min}} \leq a_{p_i} \leq a_{p_{max}} \\ V_{c_{min}} \leq V_{c_i} \leq V_{c_{max}} \\ f_{min} \leq f_i \leq f_{max} \end{cases} \quad \text{III.16}$$

Et

$$\begin{cases} a_{p_{min}} \leq a_{p_f} \leq a_{p_{max}} \\ V_{c_{min}} \leq V_{c_f} \leq V_{c_{max}} \\ f_{min} \leq f_f \leq f_{max} \end{cases} \quad \text{III.17}$$

D'autre part, les exigences technologiques liées à la capacité de la machine-outil (puissance de coupe admise), à la rigidité des montages (de l'outil et de la pièce) et la rugosité de surface usinée doivent être assurées. Cette exigence se traduit, en ébauche, par l'ensemble de contraintes suivant:[16]

$$\begin{cases} 0.0373.V_{c_i}^{0.91}.f_i^{0.78}.a_{p_i}^{0.75} \leq P_{max} \\ 844.V_{c_i}^{-0.1013}.f_i^{0.725}.a_{p_i}^{0.75} \leq F_{max} \\ 14.785.V_{c_i}^{-1.25}.f_i^{1.004}.a_{p_i}^{0.25} \leq Ra_e \end{cases} \quad \text{III.18}$$

En ébauche, ces exigences sont traduites par le groupe de contraintes suivant:

$$\begin{cases} 0.0373.V_{c_f}^{0.91}.f_f^{0.78}.a_{p_f}^{0.75} \leq P_{max} \\ 844.V_{c_f}^{-0.1013}.f_f^{0.725}.a_{p_f}^{0.75} \leq F_{max} \\ 14.785.V_{c_f}^{-1.25}.f_f^{1.004}.a_{p_f}^{0.25} \leq Ra_f \end{cases} \quad \text{III.19}$$

En conclusion, La planification d'une opération de tournage peut être présentée par le problème d'optimisation qui minimise le temps total de production, formulé par la relation III.14, et qui satisfait aux contraintes présentées par les relations: III.15, III.16, III.17, III.18, III.19. En ébauche, seules les conditions de coupe liées à une variable  $p_i > 0.5$  sont maintenues et les passes "i" sont considérées. Par conséquent, cette planification consiste implicitement à déterminer le nombre nécessaire des passes d'ébauche puis à la détermination des conditions de coupe liées aux passes considérées.

### III. Application:

Considérons l'opération de chariotage d'une pièce de diamètre  $D=152 \text{ mm}$  sur une longueur  $L=200 \text{ mm}$  et dont les paramètres sont donnée sur le tableau III.1.[16,17]

En utilisant les données de ce tableau et en se basant sur la formulation mathématique présentée dans le paragraphe précédant, le problème de planification de cette opération est modélisé sous la forme d'un problème d'optimisation.

Cependant, on trouve que ce problème est caractérisé par une nature quasi non linéaire ainsi qu'à l'utilisation des variables combinatoires. Cela nécessite l'utilisation, pour la résolution, d'une méthode probabiliste. En effet, nous avons choisis d'utiliser les algorithmes génétiques dans cette tâche.

**Tableau III.1:** Paramètres d'usinage. [17]

| Paramètre          | Valeur      | Paramètre             | Valeur |
|--------------------|-------------|-----------------------|--------|
| $V_{cmax}$ [m/mim] | 200         | $Ra_e$ [ $\mu m$ ]    | 8      |
| $V_{cmin}$ [m/min] | 30          | $Ra_e$ [ $\mu m$ ]    | 2      |
| $f_{max}$ [mm/tr]  | 0.762       | $\alpha_1$            | 1.4    |
| $f_{min}$ [mm/tr]  | 0.254       | $\alpha_2$            | 4      |
| $a_{pmax}$ [mm]    | 5           | $\alpha_3$            | 1.16   |
| $a_{pmin}$ [mm]    | 1           | $t_h$ [min/pièce]     | 1.5    |
| $F_{max}$ [N]      | 1100        | $t_r$ [min/passe]     | 0.13   |
| $P_{max}$ [kW]     | 5           | $t_{cs}$ [min/arrête] | 0.5    |
| $k_T$              | 396153004.7 | $S$ [mm]              | 6      |

Ce choix est réalisé à travers la fonction "ga" du MATLAB. Dans ce but, la fonction-objectif et les contraintes sont introduits à l'aide des fichiers **.m**. Cette présentation permet aux programmes implantés sur MATLAB d'évaluer ces fonctions à chaque itération.

Puisque les algorithmes génétiques sont basés sur l'exploration de l'espace de recherche en se basant sur les relations de transition aléatoires, on trouve que le programme utilisé donne à chaque exécution une solution optimale différente. En effet, et pour vaincre l'aspect probabiliste, nous avons réalisé vingt différentes exécutions. Les résultats de ces exécutions sont présentés sur le tableau III.2.

En examinant ce tableau, on trouve que les solutions optimales obtenues sont de deux différents types. Le premier est basé sur l'adoption de deux passes; l'une d'ébauche et l'autre de finition. Ce type de solutions procède à la minimisation du temps de production par le choix d'un profondeur de passe important en ébauche. Cela maximise le débit de copeaux et réduit à la fois le temps nécessaire au retour rapide de l'outil. D'autre coté, cette stratégie réduit la durée de vie de l'outil, et par conséquent, elle augmente le temps nécessaire au changement d'outil. Le deuxième type de solutions propose la réalisation de la phase ébauche en deux passes dont le profondeur est réduit. Malgré l'augmentation du temps de retour de l'outil, ce choix minimise considérablement le temps de production par la réduction du temps affecté au changement de l'outil due à l'augmentation de la durée de vie de ce dernier.

**Tableau III.2:** Résultats.

| N°        | Ebauche<br>( $a_{pi}$ $V_{ci}$ $f_i$ )         | Finition<br>( $a_{pf}$ $V_{cf}$ $f_f$ ) | $T_p$<br>[min] | Itérations |
|-----------|--|---|----------------|------------|
| 01        | (3.81 105.23 0.385) (1.19 129.91 0.762)        | (1.00 171.34 0.506)                     | 7.964          | 05         |
| 02        | (4.31 104.87 0.336)                            | (1.69 149.19 0.309)                     | 8.131          | 03         |
| 03        | (2.40 110.69 0.566) (1.60 118.33 0.731)        | (2.00 142.60 0.294)                     | 8.428          | 03         |
| <b>04</b> | <b>(2.72 107.02 0.547) (2.17 113.32 0.666)</b> | <b>(1.11 158.12 0.436)</b>              | <b>7.687</b>   | <b>05</b>  |
| 05        | (2.18 113.28 0.533) (2.82 116.82 0.254)        | (1.00 150.83 0.278)                     | 10.438         | 05         |
| 06        | (1.10 134.14 0.758) (3.68 113.06 0.399)        | (1.22 165.00 0.321)                     | 8.596          | 03         |
| 07        | (4.96 108.29 0.254)                            | (1.04 169.71 0.494)                     | 8.081          | 03         |
| 08        | (4.88 106.93 0.272)                            | (1.12 160.02 0.442)                     | 8.012          | 03         |
| 09        | (1.11 132.99 0.762) (3.89 105.21 0.376)        | (1.00 171.75 0.507)                     | 8.007          | 05         |
| 10        | (1.96 115.98 0.708) (3.04 106.43 0.487)        | (1.00 160.28 0.457)                     | 7.708          | 05         |
| 11        | (5.00 106.22 0.270)                            | (1.00 167.50 0.489)                     | 7.881          | 03         |
| 12        | (4.59 104.58 0.316)                            | (1.41 150.08 0.379)                     | 7.858          | 03         |
| 13        | (5.00 105.05 0.279)                            | (1.00 161.59 0.442)                     | 7.885          | 03         |
| 14        | (4.14 106.89 0.331)                            | (1.86 143.44 0.316)                     | 8.171          | 03         |
| 15        | (5.00 104.67 0.287)                            | (1.00 152.26 0.254)                     | 8.831          | 03         |
| 16        | (5.00 108.03 0.263)                            | (1.00 160.18 0.305)                     | 8.66           | 03         |
| 17        | (5.00 105.15 0.279)                            | (1.00 168.91 0.379)                     | 8.094          | 03         |
| 18        | (3.06 106.47 0.482)                            | (2.94 130.05 0.254)                     | 8.094          | 03         |
| 19        | (2.29 109.45 0.622) (2.21 111.38 0.611)        | (1.50 151.41 0.379)                     | 7.925          | 03         |
| 20        | (2.37 110.28 0.624) (2.29 112.84 0.652)        | (1.34 152.36 0.379)                     | 7.799          | 03         |

On trouve, ainsi, que la meilleure solution correspond à l'exécution 04. Cette solution propose de réaliser l'opération de chariotage en trois passes; les deux premières d'ébauche caractérisées par des profondeurs de passe et des vitesses de coupe moyennes et une passe de finition caractérisée par un profondeur, plus au moins, réduit et une vitesse de coupe élevée. Cette planification assure la réalisation de cette opération en *7.687 min*.

Mais, d'une manière générale, la différence dans le temps de production est d'une minute (01 min) la moyenne.

Sachant que la détermination du nombre de passes nécessaire à la réalisation d'une opération de tournage et les conditions de coupe liées à chacune de ces passes était réalisée au moins en deux parties, la méthodologie utilisée dans cette application présente un outil très

performant de planification. Elle permet aux utilisateurs de déterminer, en une seule exécution le plan complet de réalisation d'une opération de tournage. Cet avantage est considéré, en productique, comme un atout majeur de la planification.

# Conclusion Générale



# Conclusion Générale

---

## Conclusion Générale

La planification optimale des opérations de tournage à passes multiples constitue un défi important. Les difficultés de cette tâche résident dans la recherche simultanée du nombre nécessaire des passes et des conditions de coupes optimales pour chacune. Le traitement de ce type de problèmes résulte, le plus souvent, des modèles mathématiques fortement non linéaires avec un nombre important de variables. A tout cela s'ajoute l'utilisation des variables combinatoires et qui engendrent des difficultés supplémentaires.

En acceptant ce défi, nous avons présenté, dans ce travail, une méthodologie complète pour l'optimisation multi-passes des conditions de coupe en tournage. Cette méthodologie est basée sur une modélisation en variables réelles et combinatoires. En effet, il a été nécessaire d'utiliser une méthode stochastique pour la résolution du problème. L'utilisation des algorithmes génétique a permis de trouver, efficacement, des solutions optimales pour les problèmes minimisant le temps total de production.

Les résultats obtenus, dans la présente étude, ont été très encourageants. Ils ont permis non seulement d'avoir un plan d'action complet, pour la réalisation d'une opération de tournage, mais aussi de comprendre les différentes interactions entre les paramètres techno-économiques d'usinage.

**Bibliographie**

- [1] **B. Ould Med lamine** : « notes de cours de production mécanique », institut supérieur d'enseignement technologique de Rosso ,2009.
- [2] **M.A.YALLESE1, L. BOULANOUAR2, S. BELHADI1, N. OUELAA1** : « influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100cr6 (60hrc) avec le CBN », laboratoire mécanique et Structure (LMS) Université de Guelma, 2Laboratoire Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle Structure (LR3MI) Université de Annaba Algérie 2007.
- [3] **G. Levaillant et al** : « Usinage par enlèvement de copeaux », Groupe Eyrolles, 2005.
- [4] **I.C. Gruescu, F.Defourne, P.Quaegebeur** «étude de fabrication et analyse d'usinage », Université Lille1, 2014.
- [5] **J.Vergnas** : « Usinage Technologie et Pratique, Génie Mécanique », Dunod. 1982.
- [6] **M.richard** : «efforts de coupe », lycée P. Deuz cambrai, juin 2007.
- [7] **Mehdi REMADNA** «le comportement du système usinant en tournage dur.Application au cas d'un acier trempe usiné avec des plaquettes CBN (nitrure de bore cubique)» thèse doctorat, de l'INSA de LYON2001
- [8] **Jean-Pierre cordebois et coll,** « Fabrication Par Usinage », DUNOD, Paris 2003
- [9] **MERDJAOUI BRAHIM** : « optimisation multi objectif sous contraintes des conditions de coupe en tournage par la technique des algorithmes génétiques », thèse doctorat, université de boumer des Algérie, 2001.
- [10] **M.RAHOU, F.SEBA**A : « automatisation des instructions d'usinage cas paramètres de coupe », 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2007
- [11] **J. Vergnas,** « Usinage Technologie et Pratique », Génie Mécanique DUNOD, ISBN 2-04-011186-7, BORDAS, Paris 1982
- [12] **Alain Passeron,** «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997

- [13] **Alain Berro**, « Optimisation multi objectif et stratégies d'évolution en environnement dynamique », Université de Toulouse I, 18 décembre 2001
- [14] **A. Belloufi**, « Contribution à l'analyse de l'efficacité des techniques d'optimisation appliquées en production industrielle », thèse doctorat, Université de Biskra, 2015.
- [15] **M.Hafid Zidani** « représentation de solution en optimisation continue, multi-objectif et application » thèse doctorat, l'école Mohammedia d'ingénieurs, 2013.
- [16] **M.Bakar Benglia, A.Debbache** « Optimisation Multi-Passe des Régimes de coupe En Chariotage », Mémoire d'ingénieure, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2011.
- [17] **A.Guerrah, C.Bettayeb** « Optimisation non linéaire des conditions de coupe », Mémoire d'ingénieure, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2009.

## الملخص:

واحدة من الاتجاهات الحالية في الإنتاج الميكانيكي هي البحث عن طرق التخطيط التي تضمن أفضل الصفات بأقل التكاليف الممكنة في أقصر وقت ممكن. يعتبر استخدام أداة التحسين موضع اهتمام كبير لهذا النوع من المشكلات. الدراسة المقدمة في هذه المذكرة تقترح إستراتيجية لاختيار الأمثل لشروط القطع لعمليات الخراطة متعددة الخطوات. تستند هذه الإستراتيجية على إدخال المتغيرات الاندماجية في نمذجة المشكلة واستخدام الخوارزميات الجينية للقرار. النتائج التي تمت مناقشتها ، في هذا العمل ، تسمح ببنتمين المصالح الناجمة عن استخدام التحسين في مجال الإنتاجية.

**الكلمات المفتاحية :** التحسين التوافقي، الخراطة، تخطيط متعدد الخطوات، شروط القطع.

## **Abstract:**

One of the current trends in mechanical production is to look for planning methods that ensure the best qualities with minimum costs in the shortest possible time. The use of the optimization tool is of great interest for this type of problem.

The study presented in this thesis proposes a strategy for optimal selection of cutting conditions for multiple-pass turning operations. This strategy is based on the introduction of combinatorial variables in problem modeling and the use of genetic algorithms for resolution. The results discussed, in this work, allow the valorization of the interests brought by the use of optimization in the field of productivity.

Keys words: Optimization; Turning; Multi-pass planning; Cutting conditions.

## **Résumé:**

L'une des tendances actuelles de la production mécanique est de chercher des méthodes de planification qui assurent les meilleures qualités avec les coûts minimales dans les délais les plus courts possible. L'utilisation de l'outil optimisation est d'un grand intérêt pour ce type de problème.

L'étude présentée dans ce mémoire propose une stratégie de sélection optimale des conditions de coupe pour les opérations de tournage à passes multiples. Cette stratégie est basée sur l'introduction des variables combinatoires dans la modélisation du problème et l'utilisation des algorithmes génétiques pour la résolution. Les résultats discutés, dans ce travail, permettent la valorisation des intérêts apportés par l'utilisation d'optimisation dans le domaine de productique.

**Mots clés:** Combinatorial optimization; Tournage; Planification multi-passe; conditions de coupe.