

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche scientifique



Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences et Technologies

Département des Sciences et Technologie

N° d'ordre :

N° de série :

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

**Domaine** : Sciences et Technologies

**Filière** : Electromécanique

**Spécialité** : Maintenance Industrielles

**Par** : *Imad LASSOUAD*

*Abdessamie YAHIA*

**Thème**

***Modélisation et Optimisation des conditions de coupe du procédé de tournage - Cas de chariotage .***

**Soutenu publiquement le** : 20/06/2018

**Devant le jury** :

<b>Mohammed ALLALI</b>	<b>Maître Assistant</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>Faouzi AKRMI</b>	<b>Maître Assistant</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Sofiane MOUAT</b>	<b>Maître Assistant</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Ibrahim KETILA</b>	<b>Maître Assistant</b>	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

---

**Année universitaire : 2017/2018**



*À la science,*

*À nos parents,*

*À nos familles,*

*À nos amis.*

## *REMERCIEMENT*

*Premièrement nous remercions le dieu notre créateur.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur **Mr ALLALI Mohammed** D'avoir accepté de diriger ce travail d'avoir mis ma disposition tous les moyens qui m'ont permis de mener à Complément cette étude et aussi pour ses précieux conseils et ses encouragement*

*Je tiens aussi remercie **Mrs AKRMI Faouzi** et **MOAT Sofiane** Pour l'intérêt qu'il à bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.*

*Mes remerciements vont également à **Mr KHETILA Ibrahim** Pour s'être intéressé travail et d'avoir bien voulu m'honorer de leur présence dans ce jury*

## Table des matières

Introduction générale.....	1
 <b>CHAPITRE I : Généralité sur l'usinage .</b>	
I.1 Introduction :.....	3
I.6 Procédé de perçage :.....	3
I.2.1 Conditions de coupe :.....	4
I.2.1.1 Profondeur de passe :.....	4
I.2.1.2 Vitesse de coupe et avance :.....	4
I.2.1.3 Paramètres de réglage de la machine :.....	5
I.2 Procédé de fraisage :.....	5
I.3.1 Conditions de coupe :.....	7
I.3.1.1 Profondeur de passe :.....	7
I.3.1.2 Vitesse de coupe et avance par dent :.....	8
I.3.1.3 Paramètres de réglage de la machine :.....	8
I.4 Procédé de rectification :.....	9
I.4.1 Conditions de coupe :.....	10
I.4.1.2 Vitesse d'avance :.....	13
I.4.1.3 Profondeur de passe :.....	15
I.5 Procédé de tournage.....	15
I.5.1 Conditions de coupe.....	16
I.5.1.1 Profondeur de passe :.....	17
I.5.1.2 Avance :.....	20
I.5.1.3 Vitesse de rotation de la broche :.....	20
I.6 Conclusion :.....	21
 <b>CHAPITRE II : Généralité sur le Tournage</b>	
II.1 Introduction :.....	22

---

II.2	Définitions : .....	22
II.2.1	Le tournage : .....	22
II.2.2	Principe de tournage : .....	23
II.2.3	Les tours : .....	24
II.2.4	Classification des machines de tour : .....	25
II.2.4.1	Les tours parallèles à charioter et à fileter : .....	25
II.2.4.2	Les tours à copier : .....	25
II.2.4.3	Les tours semi-automatiques : .....	26
II.2.4.4	Les tours automatiques : .....	26
II.2.4.5	Les tours automatiques multibroches : .....	26
II.2.4.6	Les tours à commande numérique : .....	27
II.2.5	Différentes opérations de tournage: .....	27
II.2.5.1	Chariotage : .....	27
II.2.5.2	Alésage : .....	27
II.2.5.3	Dressage : .....	28
II.2.5.4	Perçage : .....	28
II.2.5.5	Rainurage : .....	28
II.2.5.6	Chanfreinage : .....	29
II.2.5.7	Tronçonnage : .....	29
II.2.5.8	Filetage : .....	29
II.3	Conditions de coupe en tournage : .....	30
II.3.1	Vitesse de coupe : .....	30
II.3.2	Vitesse d'avance $Vf$ , Avance par tour $f$ : .....	32
II.3.2.1	Les types d'avances : .....	32
II.3.3	Profondeur de passe « $a$ » : .....	33
II.4	Paramètres géométriques de coupe : .....	34
II.5	Éléments d'outil : .....	35

II.5.1	Faces et arêtes de l'outil : .....	36
II.5.2	Angles de l'outil : .....	38
II.5.3	Outil de coupe à plaquette rapportée : .....	40
II.6	Matériaux de l'outil .....	41
II.7	Paramètres techno-économiques d'usinage .....	42
II.7.1	Temps d'usinage .....	42
II.7.2	Coût d'usinage .....	43
II.7.3	Durée de vie d'un outil de coupe.....	44
II.7.3.1	Principaux modèles mathématiques de l'usure .....	45
a)	Loi de Taylor : .....	45
b)	Loi de Gilbert : .....	46
c)	Loi de Kronenberg.....	47
d)	Loi de König-Depiereux :.....	47
II.8	Mécanique de coupe en tournage : .....	48
I.8.2	Formation du copeau : .....	48
II.8.2	Efforts de coupe : .....	48
II.8.3	Puissance de coupe : .....	49
II.8.4	Rugosité d'une surface usinée : .....	50
II.9	Conclusion .....	51

### **CHAPITRE III: Modélisation Multi Passe et Optimisation Des Condition De Coupe En tournage**

III.1	Introduction : .....	52
III.2	Formulation mathématique d'un problème d'optimisation non linéaire .....	52
III.3	Problème de modélisation d'une opération de tournage : .....	53
III.4	Formulation mathématique d'un problème d'optimisation : .....	54
III.4.1	Critères d'optimisation : .....	55
III.4.1.1	Temps de production : .....	55

---

III.4.1.2	Consommation en outil : .....	58
III.4.1.3	Coût de production : .....	59
III.4.2	Contraintes : .....	59
III.4.3	Expressions des problèmes d'optimisation : .....	61
B.	Minimisation de la consommation en outil: .....	63
C.	Minimisation de coût de production : .....	64
III.5	Exemple d'application : .....	65
B.	Minimisation de consommation de l'outil : .....	67
C.	Minimisation de coût de production : .....	68
III.6	Discussion : .....	73
III.7	Conclusion .....	74
CHAPITRE IV : Optimisation Réelle		
IV.1	Introduction : .....	75
IV.2	Définition d'atelier : .....	75
IV.3	Définition de machine : .....	75
IV.4	Pièce à usiné : .....	75
IV.5	Résultats obtenus : .....	76
IV.6	La moyenne des résultats obtenus : .....	76
IV.7	Discussion : .....	76
IV.7.1	Observation : .....	76
IV.7.2	Comparaissant entre la résultat de simulation et la résultat de réalité .....	77
IV.7.3	Les causes de l'inégalité sont résumées dans les points suivants : .....	77
IV.8	Conclusion .....	77
Conclusion générale .....		78



---

---

## Liste de figure

Figure I.1 Principe de perçage.....	3
Figure I.2 principe de fraisaige. ....	6
Figure I.3 Les copeaux. ....	6
Figure I.4 Conditions de coupe <i>de fraisaige</i> . ....	7
Figure I.5 Vitesse de rotation de la meule et la vitesse de rotation de la pièce. ....	10
Figure I.6 Rectification cylindrique. ....	14
Figure I.7 Procédé de tournage.....	16
Figure I.8 Opération de chariotage. ....	17
Figure I.9 Opération de dressage. ....	18
Figure I.10 Opération d'alésage. ....	18
Figure I.11 Opération de filetage. ....	19
Figure I.12 Outil de opération de tronçonnage. ....	19
Figure II.1 Procédure de tournage.....	23
Figure II.2 Principe de tournage.....	24
Figure II.3 Composantes de tour.....	25
Figure II.4 Chariotage.....	27
Figure II.5 Alésage.....	27
Figure II.6 Dressage.....	28
Figure II.7 Perçage.....	28
Figure II.8 Rainurage.....	28
Figure II.9 Chanfreinage.....	29
Figure II.10 Tronçonnage.....	29
Figure II.11 Filetage.....	29
Figure II.12 Conditions de coupe.....	30

---

Figure II.13 Vitesse de coupe.....	30
Figure II.14 Vitesse d'avance $V_f$ , Avance par tour $f$ .....	32
Figure II.15 Différente types d'avance .....	33
Figure II.16 Les profondeurs de passe.....	34
Figure II.17 Paramètres géométriques de coupe.....	35
Figure II.18 Arêtes et parties actives d'un outil de tournage.....	36
Figure II.19 Mouvement relatif outil/ pièce en tournage.....	37
Figure II.20 Angles du taillant (outil en main).....	38
Figure II.21 Angles du taillant (outil en travail).....	39
Figure II.22 Plaquettes .....	40
Figure II.23 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant.....	41
Figure II.24 Paramètres de temps technologique.....	42
Figure II.25 Critère d'usure VB .....	44
Figure II.26 Schéma générale de formation d'un copeau.....	48
Figure II.27 présentation les composantes des efforts de coupe.....	49
Figure II.28 paramètres de rugosité .....	52
Figure III.1 Comparaison des résultats.....	74

---

## Liste de tableau

Tableau I.1	Vitesse de coupe et l'avance de perçage. ....	5
Tableau I.2	Vitesse de coupe et l'avance de fraisage.....	8
Tableau I.3	Vitesse de la meule . ....	12
Tableau I.4	Type de meule. ....	12
Tableau I.5	Les valeurs limites des vitesses de la pièce. ....	13
Tableau I.6	La vitesse par meule tangentielle. ....	14
Tableau I.7	Les valeurs limites de la profondeur de passe. ....	15
Tableau II.1	Valeurs approximative de n pour A.R.E.S.....	46
Tableau II.2	Valeurs approximative de n pour carbure.....	46
Tableau III.1	Les donnes d'exemple d'application ....	65
Tableau III.2	Résultats de minimisation de temps de production. ....	72
Tableau III.3	Résultats de minimisation de la consommation de l'outil. ....	72
Tableau III.4	Résultats de minimisation de la coût de production.....	72
Tableau IV.1	Minimisation du temps de production ....	74
Tableau IV.2	Le moyenne Minimisation du temps de production : ....	76
Tableau IV.3	Différents résultats que représenter le temps de production ....	77

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
$a_p$	Profondeur de passe	mm
$a_e$	Profondeur de passe en ébauche	mm
$a_f$	Profondeur de passe en finition	mm
$(a_1, a_2, a_3)$	Constants empiriques	
$b$	Largeur de coupe	mm
$b_D$	Largeur nominale de coupe	mm
$C_0$	Coût de machine	\$/min
$C_t$	Coût de l'outil	\$/Arrête
$C_u$	Coût de production	\$
$C_v$	Constante dépendant du couple outil/pièce	
$C_p, b, c, d$	Coefficients spécifiques et exposantes de la puissance de la machine	
$C_f, x, y, z$	Coefficients spécifiques et exposantes de la force de coupe	
$C_s, e, g, i$	Coefficients spécifiques et exposantes de la rugosité de surface résultante	
$D$	Diamètre de la pièce	
$f$	Avance par tour	mm/tr
$f_e$	L'avance par tour en ébauche	mm/tr
$f_f$	L'avance par tour en finition	mm/tr

$F_{max}$	La force maximale de coupe pour toutes les opérations	N
$F_a$	Effort radial du au mouvement de coupe	N
$F_c$	Effort tangentiel de coupe du au mouvement de coupe	
$F_f$	Effort tangentiel d'avancement du au mouvement d'avance	N
$h$	Épaisseur de coupe	mm
$N$	Fréquence de la broche	tr/min
$N$	Nombre les passes d'ébauche	
$n$	Exposant de TAYLOR	
$k_r$	Angle de direction	rad
$k, x, y$	Exposants dépendants de la nuance de l'outil	
$k$	Constant de durée de vie	
$P_{max}$	La puissance maximale pour toutes les opérations	KW
$R_a$	Rugosité arithmétique moyenne	$\mu\text{m}$
$R_t$	Rugosité théorique totale	$\mu\text{m}$
$R_{max}$	La rugosité maximale autorisée de surface	$\mu\text{m}$
$T_u$	Le temps de production	min
$t_r$	Temps de routeur	min
$t_h$	Temps de montage et démontage de la pièce	min
$t_{cs}$	Temps de changement d'outil	min
$t_m$	Temps de machine	Nomenclature
$t_{me}$	Le temps de coupe en ébauche	min
$t_{mf}$	Le temps de coupe en finition	min

$V_{cf}$	Vitesse de coupe en finition	m/min
$V_{ce}$	Vitesse de coupe en ébauche	m/min
$VB$	L'usure en dépouille	mm
$\alpha$	Angle de dépouille	rad
$\beta$	Angle de taillant	rad
$\gamma$	Angle de coupe	rad

# Introduction générale

## Introduction générale

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

Le tournage est l'un de procédé d'usinage les plus utilisé, ses résultats dépend initialement du choix des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour ou vitesse d'avance et la profondeur de passe). La réussite d'une opération de tournage est évaluée à l'aide des paramètres technologiques et économiques (productivité, coût, état de surface ....etc. .) résultants. Les études expérimentales ont permis de modéliser le problème de la sélection des conditions de coupe, Les modèles trouvés sont en générale composés des relations empiriques reliant les paramètres d'usinage aux conditions de coupe.

L'optimisation est une science qui consiste à trouver une meilleure solution pour un problème mathématique. Dans notre cas d'application, la sélection optimale des conditions de coupe, pour une opération à passe multiple , est basée sur la minimisation de certains paramètres d'usinage dit objectif ( temps d'usinage , consommation en outil , coût d'usinage). Les conditions sélectionnées doivent respecter les limites de performances de la machine et de l'outil et de la matière usinée. Ces limites sont traduites par des équations d'inégalité dit contraintes que doivent être satisfaites .

Le travail réalisé dans ce mémoire s'articule de la façon suivante :

Le premier chapitre présente une généralité sur l'usinage .

Le deuxième chapitre porte l'étude de procédé de tournage modélisant ainsi les paramètres économique et technologique d'une opération . Les issus de ce chapitre peuvent être utiles pour la sélection optimale des conditions de coupe .

Le troisième chapitre présenté la modélisation d'une opération de tournage à passe multiple. L'interprétation et la discussion des résultats obtenu lors de la résolution d'optimisation des conditions de coupe pour une opération de chariotage sont ainsi présentées .

Dans le quatrième chapitre, nous avons essayé les résultats réels et les nous avons comparés avec les résultats de la simulation pour la solution optimale.

# **Chapitre 1 : Généralité sur l'usinage**

## I.1 INTRODUCTION :

L'usinage est une opération consistant à soumettre une pièce à l'action d'une ou de plusieurs machines-outils essentiellement dans le cas où cette action consiste à un enlèvement de matière. Le terme usinage, synonyme du mot enlèvement de matière ou enlèvement de copeaux, désigne tous les moyens mis en œuvre pour obtenir une pièce ayant des côtes et des tolérances fixées à l'avance, à partir d'une pièce brute venue de la forge ou de fonderie.

L'usinage d'une pièce mécanique met en œuvre un (ou un ensemble de) procédé(s), à savoir : le tournage, le fraisage, le perçage ou/et les procédés d'usinage par abrasion (tel que la rectification, le polissage, la super finition etc.) [1].

## I.2 Procédé de perçage :

Le perçage est un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux qui sert à produire des surfaces cylindriques, coniques ou hélicoïdales intérieures sous l'action d'un outil coupant utilisant des machines relativement simples appelées perceuses.

La génération des surfaces nécessite deux mouvements, à savoir :

- Une rotation autour de l'axe de l'outil appelée mouvement de coupe  $M_C$  ;
- Une translation parallèle à l'axe de l'outil appelée mouvement d'avance  $M_a$  noté encore  $M_f$ . [1].

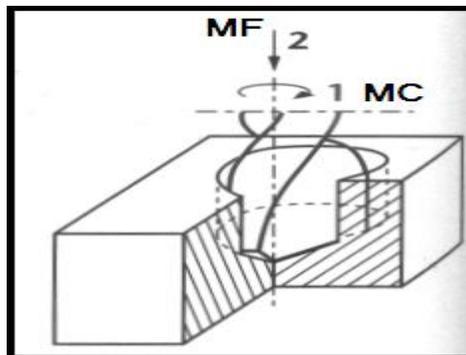


Figure I.1 Principe de perçage. [1].

Le mouvement de coupe est communiqué à l'outil et celui d'avance est donné soit à la pièce soit à l'outil selon la machine utilisée. Ce dernier est choisi en fonction des caractéristiques dimensionnelles et géométriques de la forme intérieure à générer. [1].

### I.2.1 Conditions de coupe :

Comme en tournage, pour une opération de perçage, les paramètres de coupe sont :

- $V_C$  : vitesse de coupe en m/min.
- $f$  : avance en mm/tr et
- $a$  : profondeur de passe en mm

Et les paramètres de réglage de la machine sont :

- $f$  : avance en mm/tr et
- $N$  : vitesse de rotation de la broche en tr/min.

#### I.2.1.1 Profondeur de passe :

La profondeur de passe en perçage  $p$  est donnée par l'une des expressions suivantes :

$$a = \frac{D}{2} \text{ si la pièce ne renferme pas un avant trou.}$$

$$a = \frac{D-d}{2} \text{ si la pièce ne renferme un avant trou de diamètre } D.$$

$D$  désigne la diamètre du trou à percer.

#### I.2.1.2 Vitesse de coupe et avance :

Comme en tournage et en fraisage, le choix de la vitesse de coupe et de l'avance se produit directement depuis le tableau des conditions de coupe en perçage.

Les conditions de coupe dans le tableau sont établies pour une longueur percée inférieure à 3 fois le diamètre du foret. Pour des perçages plus profonds, il faut prendre les facteurs de correction  $K_1$  pour la vitesse de coupe et  $K_2$  pour l'avance selon le tableau suivant : [1].

**Tableau I.1** Vitesse de coupe et l'avance de perçage.

L	3D	4D	5D	6D	8D
K <sub>1</sub>	0,9	0,8	0,8	0,65	0,6
K <sub>2</sub>	0,95	0,9	0,85	0,8	0,8

L désigne la profondeur du trou à percer.

### I.2.1.3 Paramètres de réglage de la machine :

La vitesse de rotation de la broche est calculée par la même formule présentée en tournage ou en fraisage :

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad \text{I.1}$$

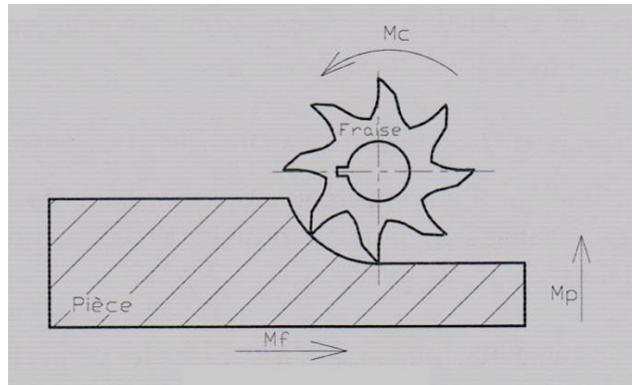
D désigne le diamètre de l'outil tournant. [1].

### I.3 Procédé de fraisage :

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisable sur des machines outil appelées fraiseuses. Il permet la réalisation des pièces prismatiques ou de révolution, des profils spéciaux tel que les hélices, les cames, les roues dentées etc.

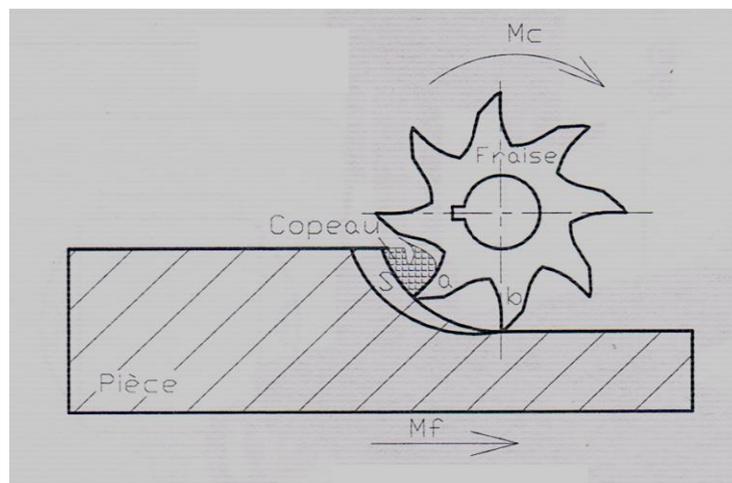
L'outil, appelé fraise, est toujours animé d'un mouvement de rotation nommé mouvement de coupe  $M_c$  autour de son axe. Il est situé et bloqué sur un porte-fraise, lui-même fixé dans la broche de la machine. Un ensemble de chariots se déplaçant suivant trois axes orthogonaux, permet d'animer la pièce d'un mouvement d'avance  $M_f$  (nommé encore  $M_a$ ) dans l'espace. [1].

Un mouvement de pénétration  $M_p$  donné à la pièce (et dans certaines machines particulières à l'outil) est indispensable pour régler la surépaisseur  $S$  enlever à chaque passe (figure I.2). [1].



**Figure I.2** Principe de fraisaige. [1].

En tournant, la fraise enlève de la pièce des copeaux de dimensions relativement petites. Chaque partie coupante (dent a, dent b etc) s'enfonce dans la matière à usiner et détache un copeau en forme de virgule S (figure I.2). En fraisage, une arête coupante-ou taillant-de la fraise ne se trouve pas impliquée dans l'enlèvement des copeaux pendant la totalité du temps d'usinage comme en tournage. De ce fait, lorsqu'elle n'est pas en contact avec la pièce, elle peut se refroidir. [1].



**Figure I.3** Les copeaux. [1].

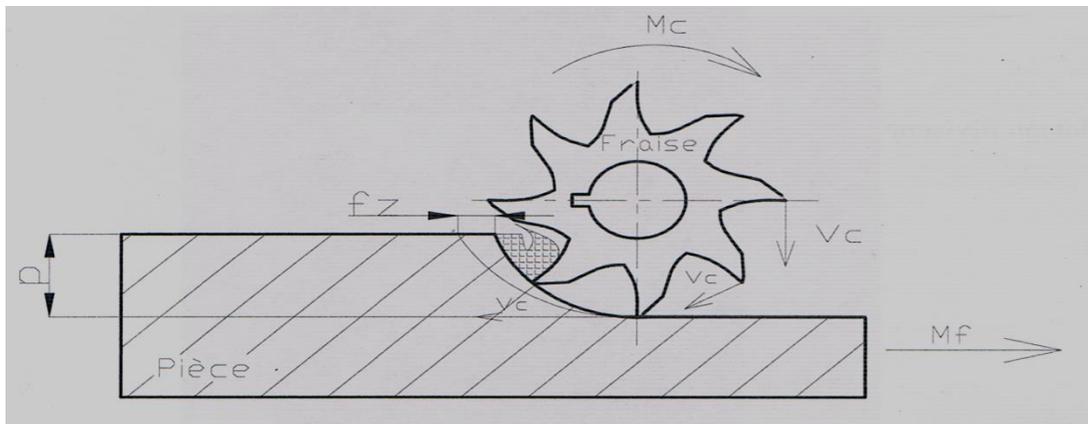
### I.3.1 Conditions de coupe :

En fraisage les paramètres de coupe sont les suivants :

- $a$  : profondeur de passe en mm.
- $V_c$  : vitesse de coupe en m/min
- $f_z$  : avance par dent en mm/tr/dent. Elle varie suivant le diamètre de la fraise, le matériau de la pièce, le matériau de la fraise et l'opération de fraisage.

et les paramètres de réglage de la machine sont :

- $N$  : vitesse de rotation de la broche en tr/min et
- $V_f$  : vitesse d'avance en mm/min.



**Figure I.4** Conditions de coupe de fraisage. [1].

#### I.3.1.1 Profondeur de passe :

En comparant le dessin de définition de la pièce usinée aux dimensions de la pièce brute, l'écart dimensionnel correspond à la surépaisseur à enlever  $S_e$ . Selon la puissance de la machine et le temps alloué à l'exécution de l'opération, le fabricant choisit le nombre de passes  $N_{passes}$  convenable. La profondeur de passe est donnée par l'expression :

$$a = \frac{S_e}{N_{passes}} \quad \text{I.2}$$

### I.3.1.2 Vitesse de coupe et avance par dent :

La vitesse de coupe est l'espace parcouru, en mètres, par l'extrémité d'une dent de la fraise en une minute.  $V_c$  et  $f_2$  sont déterminés à partir des tableaux des conditions de coupe en fraisage présentés en annexe. Ces derniers sont établis à partir des hypothèses suivantes :

La durée de vie de l'outil est fixée à 90 minutes pour les fraises en ARS et 45 minutes pour les fraises à plaquettes en carbure (brasées ou amovibles).

épaisseur de coupe minimale  $h_{1min}$  en fraisage en roulant est de 0,05mm.

Quand les impératifs d'établissement des conditions de coupe ne sont pas respectés, des facteurs de correction des valeurs des avances et vitesses de coupe en fonction de la nature du travail effectué sont utilisés [1]..

En effet s'il s'agit d'un :

Fraisage combiné à prédominance en bout, il faut prendre les paramètres de coupe du fraisage par surfaçage bout.

fraisage combiné à prédominance en roulement, il faut prendre les paramètres du tableau si  $\frac{e}{D} = 1$ .

Sinon, il faut prendre les facteurs de correction  $c$  suivants pour la vitesse de coupe et l'avance :

**Tableau I .2** Vitesse de coupe et l'avance de fraisage.

$e/D$	0,5	1,5	2
$c$	1,25	0,75	0,5

- $D$  : d'signe le diamètre de la fraise ;
- $e$  : la largeur de contact outil/pièce.

Rainurage en bout, en travaillant avec des fraises normale, prendre les mêmes paramètres indiqués dans le tableau. Pour les fraises série longue, faire une correction de 0,5 pour l'avance.

### I.3.1.3 Paramètres de réglage de la machine :

Les paramètres à régler sur la machine sont :

$N$  qui désigne la fréquence de rotation de la broche nommée encore fréquence de rotation de la fraise. Elle est calculée moyennant la formule :

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D} \quad \text{I.3}$$

Où  $D$  désigne le diamètre de la fraise en mm et  $V_c$  la vitesse de coupe en m/min. le facteur 1000 est utilisé pour la conversion d'unité.

et  $V_f$  qui définit la vitesse d'avance en mm/min. elle est calculée par la formule :

$$V_f = N_f = N_z f_z \quad \text{I.4}$$

$N$  définit la vitesse de rotation de la broche en tr/min,  $f$  l'avance par tour en mm/tr,  $f_z$ , l'avance par tour par dent nommée encore l'avance par dent en mm/tr/dent et  $Z$  le nombre de dents de la fraise. [1].

#### I.4 Procédé de rectification :

L'usinage par abrasion est un procédé de fabrication par enlèvement de matière sous forme de copeaux minuscules arrachés par un grand nombre de grains abrasifs : il s'agit d'une technique très ancienne qui a précédé l'usinage par outils de soude.

Bien que le travail par abrasion conduit, en général, à des débits de matières plus faibles qu'en usinage par outil de coupe, cette technique s'impose dans plusieurs cas et en particulier pour :

L'usinage des matériaux durs tels que les aciers traités, les céramiques, les verres, etc.  
L'affûtage des outils. [1].

Les travaux de finition dans le but de réaliser une bonne qualité de surface et une bonne précision géométrique et dimensionnelle.

Les techniques d'usinage par abrasion diffèrent par le mode d'application de l'abrasif et le mouvement relatif outil/pièce. Ils se produisent sur des pièces préalablement usinées (tournées ou fraisées) et parfois trempées. [1].

### I.4.1 Conditions de coupe :

Il s'agit de définir la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de passe.

Vitesse de coupe :

La vitesse de coupe  $V_c$ , dans le cas de la rectification, définit la vitesse relative entre la meule et la pièce au point où la matière est enlevée. En supposant  $V_w$  la vitesse de la pièce et  $V_s$  celle de la meule, la vitesse de la pièce est donnée par l'expression :

$$V_w = \frac{\pi D N}{1000} \quad \text{I.5}$$

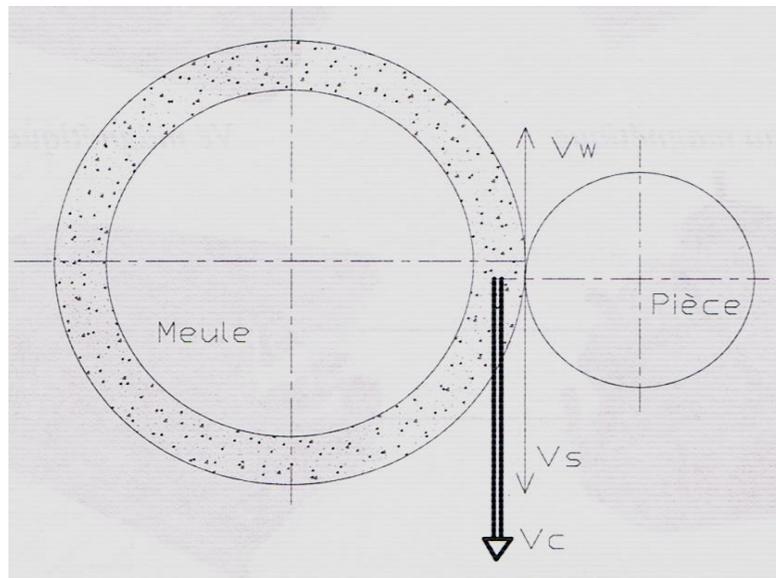
$N$  désigne la vitesse de rotation de la pièce et  $D$  son diamètre.

La vitesse circonférentielle de la meule, inscrite sur son étiquette, est donnée par l'expression :

$$V_s = \frac{\pi D_m N_m}{60000} \quad \text{I.6}$$

$N_m$  définit la vitesse de rotation de la meule et  $D_m$  son diamètre.

La tradition en rectification veut que la vitesse de la pièce s'exprime en m/min et celle de la meule en m/s.



**Figure I.5** Vitesse de rotation de la meule et la vitesse de rotation de la pièce. [1].

La vitesse de coupe  $V_c$  peut être donnée par l'expression :

$$\vec{V}_c = \vec{V}_w + \vec{V}_s \quad \text{I.7}$$

En rectification de révolution, les sens de rotation de la pièce et de la meule sont contraires. La vitesse de coupe s'obtient en additionnant  $V_w$  et  $V_s$ .

En rectification plane par meule tangentielle, la pièce passe sous la meule dans un sens et dans l'autre. Pendant une course, les mouvements meule/pièce sont en opposition et pendant l'autre en avalant.

Pour un travail en opposition :

$$V_c = |V_s| + |V_w| \quad \text{I.8}$$

Pour un travail en avalant :

$$V_c = |V_s| - |V_w| \quad \text{I.9}$$

Les valeurs limites de  $V_s$  dépendent du genre de la rectification, du type de la meule et de la matière de la pièce comme indiqué dans les deux tableaux présentés ci-dessous.

**Tableau I.3** Vitesse de la meule .

Vitesse périphérique de la meule en mis						
Type de meule	Agglomérant					
	Vitrifié Silicate			Organique		
	Grade de la meule			Grade de la meule		
	Tendre	Moyen	Dur	Tendre	Moyen	Dur
Plate ou à bord profilé Plate à 1 ou 2 embrèvements Assiette	28	30	33	33	40	48
Cylindre ou couronne	23	28	30	25	30	35
Boisseau conique	23	28	30	30	40	48
Boisseau droit Segmentée	23	25	28	30	40	40
Meule à tronçonner	-	-	-	-	-	80

**Tableau I.4** Type de meule.

Genre de rectification	Type de meule	Agglomérant	Matière à rectifier	Vitesse en mis
Rectification extérieure de révolution	Plate	Vitrifié ou Silicate	Acier trempé	20-28
			Acier non traité	29-33
			Fonte, bonze, laiton	20-30
			Aluminium et ses alliages	16-20
Rectification intérieure de révolution	Cylindre		Acier trempé	7-20
			Acier recuit	10-29
			Fonte, bronze, laiton	8-20
			Aluminium et ses alliages	7-16
Rectification plane	Plate		Acier trempé	20-27
			Acier non traité	28-33
			Fonte, bronze, laiton	20-30
			Aluminium et ses alliages	16-20
	Assiette segmentée	Acier trempé	18-22	
		Acier non traité	22-28	
		Fonte, bronze, laiton	20-26	
		Aluminium et ses alliages	16-20	

## Aluminium et ses alliages

Pour les meules à agglomérant résinoïde, la vitesse limite  $V_s$  est entre 23 à 27m/s.

Pour les meules à agglomérant métallique, la vitesse limite  $V_s$  est entre 14 à 24m/s.

Les valeurs limites des vitesses de la pièce en m/mon sont données dans le tableau suivant :

**Tableau I.5** Les valeurs limites des vitesses de la pièce.

Matière	Rectification de révolution extérieure	Rectification de révolution intérieure
Aciers courants	12-25	8-15
Aciers alliés	10-18	7-12
Fontes	14-22	10-20
Bronzes, laitons	14-24	12-22
Alliages légers	16-30	14-25
Carbures métalliques	5-10	5-8

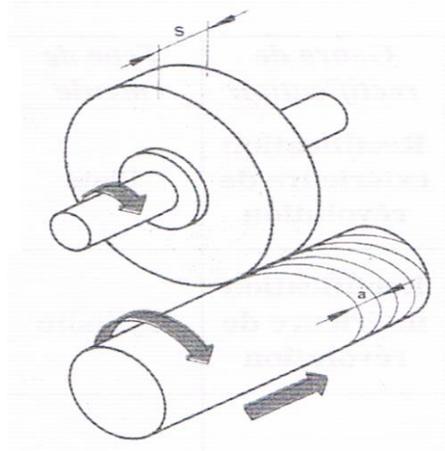
Et puisque la vitesse de la meule est beaucoup plus grande que celle de la pièce, la vitesse de coupe est assimilable à la vitesse périphérique de la meule :

$$V_c = V_s \quad \text{I.10}$$

#### I.4.1.2 Vitesse d'avance :

Dans le cas de la rectification cylindrique, la vitesse correspondant au mouvement longitudinal de la table, s'établit en fonction du nombre de tours de la pièce. En supposant  $f$  l'avance (en mm) de la table pour un tour de la pièce :  $s$  l'épaisseur de la meule en mm et  $N$  le nombre de tours par minute de la pièce, la vitesse de la table (en m/min) est donnée par l'expression :

$$V_t = f \cdot N \quad \text{I.11}$$



**Figure I.6** Rectification cylindrique. [1].

Les valeurs de  $f$  dépendent de l'épaisseur  $s$  de la meule employée tel que dans la formule suivante :

$$f = k \cdot s \quad \text{I.12}$$

$k$  prend les valeurs 1/2 à 4/5 pour le dégrossissage et 1/10 à 1/4 pour le finition.

En rectification plane par meule tangentielle, la vitesse de la table est choisie depuis le tableau suivant :

**Tableau I.6** La vitesse par meule tangentielle

<i>Matières</i>	<i>Vitesse table (m/min)</i>
Aciers courants	6 à 15
Aciers allés	5 à 12
Fontes	8 à 15
Bronzes : Laitons	10 à 16
Alliages légers	14 à 25
Carbures métalliques	3 à 5

### I.4.1.3 Profondeur de passe :

Il s'agit de l'épaisseur de matière enlevée par la meule à chacun de ses passages sur la pièce. Son choix, dépend de nombreux facteurs, à savoir :

La puissance disponible sur la meule et sur la pièce.

La stabilité de la machine, les caractéristiques de la meule.

Le tableau ci-dessous donne des valeurs limites, à titre indicatif, de la profondeur de passe (en mm pour passe) dans le cas de la rectification cylindrique extérieure.

**Tableau I.7** Les valeurs limites de la profondeur de passe.

<i>Matières</i>	<i>Ebauche</i>	<i>Finition</i>
Acier trempé	0,02 à 0,03	0,005 à 0,01
Acier non traité	0,03 à 0,06	0,005 à 0,05
Fonte	0,08 à 0,16	0,02 à 0,05
Laiton aluminium	0,125 à 0,25	0,02 à 0,1

Pour la rectification cylindrique intérieure, les valeurs sont moindres, elles vont de 0,002 à 0,01 mm.

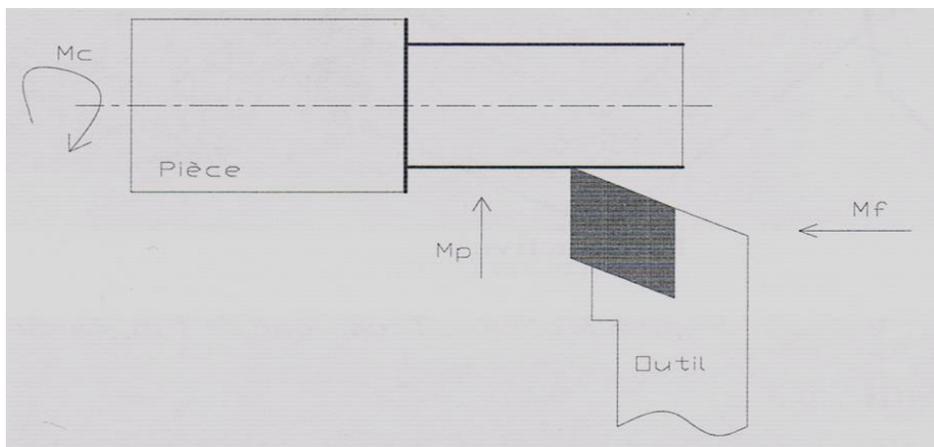
Pour la rectification plane, la profondeur de passe varie de 0,01 à 0,2mm. [1].

## I.5 Procédé de tournage

Le tournage est un procédé d'usinage permettant l'obtention des surfaces de révolution extérieures et/ou intérieures, des surfaces planes, coniques ainsi que d'autres surfaces spéciales telles que celles obtenues par filetage etc sur une machine nommée tour. Pour générer une surface de révolution sur un tour conventionnelle, il faut appliquer à la pièce et à l'outil deux mouvements conjugués (figure I.7) .

A la pièce : un mouvement circulaire continu rapide donné par sa rotation. Il prend le nom de mouvement de coupe et est désigné par  $M_c$ .

A l'outil : un mouvement généralement rectiligne uniforme lent généré par la translation de l'outil. Il prend le nom de mouvement d'avance et est désigné par  $M_a$  ou  $M_t$  Pendant ce mouvement l'outil coupe la matière. [1].



**Figure I.7** Procédé de tournage. [1].

Pour que les dimensions de la pièce usinée correspondent à celles existants dans le dessin de définition, un réglage de position de l'outil est nécessaire. Ce troisième mouvement est de translation et est appelé mouvement de pénétration ou mouvement de prise de passe. Il est désigné par  $M_a$ . La différence par rapport au mouvement de coupe  $M_c$  réside dans le coupe pas la matière. [1].

### I.5.1 Conditions de coupe

Pour une opération de tournage, les paramètres de coupe sont au nombre de trois, à savoir :

- $V_c$  ; la vitesse de coupe en m/min
- $f$  : l'avance en mm/tr et
- $a$  : la profondeur de passe en mm

et les paramètres à régler sur la machine (tour parallèle) sont au nombre de deux, à savoir :

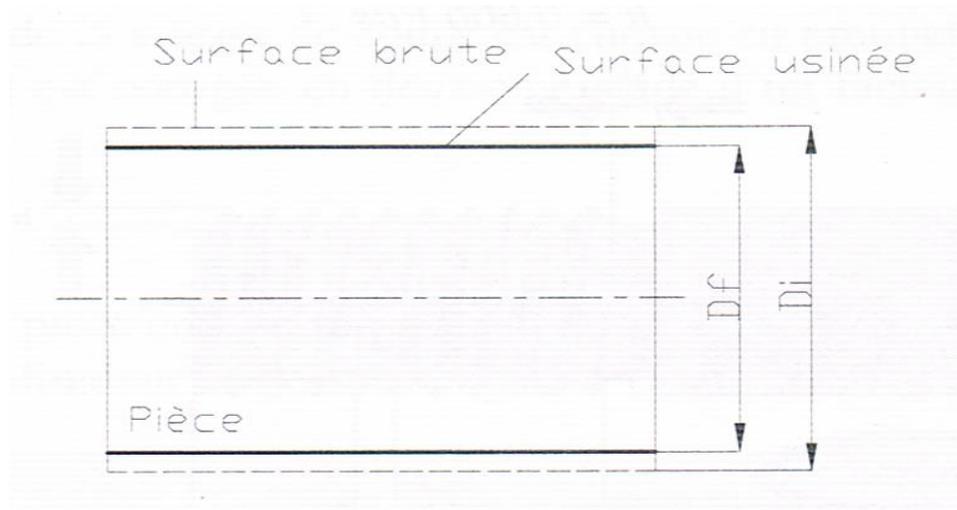
- $f$  : l'avance en mm/tr ;
- $N$  : la vitesse de rotation de broche en tr/min : elle nommée encore fréquence de rotation de broche ou vitesse (respectivement fréquence) de rotation de la pièce ou vitesse (respectivement fréquence) de rotation du mandrin.

### I.5.1.1 Profondeur de passe :

La profondeur de passe est un paramètre fonction de l'opération, il est déterminé en comparant les dimensions de la pièce avant et après usinage.

Pour une opération de chariotage, la profondeur de passe  $a$  est donnée par l'expression suivante :

$$a = \frac{D_i - D_f}{2} \quad \text{I.13}$$

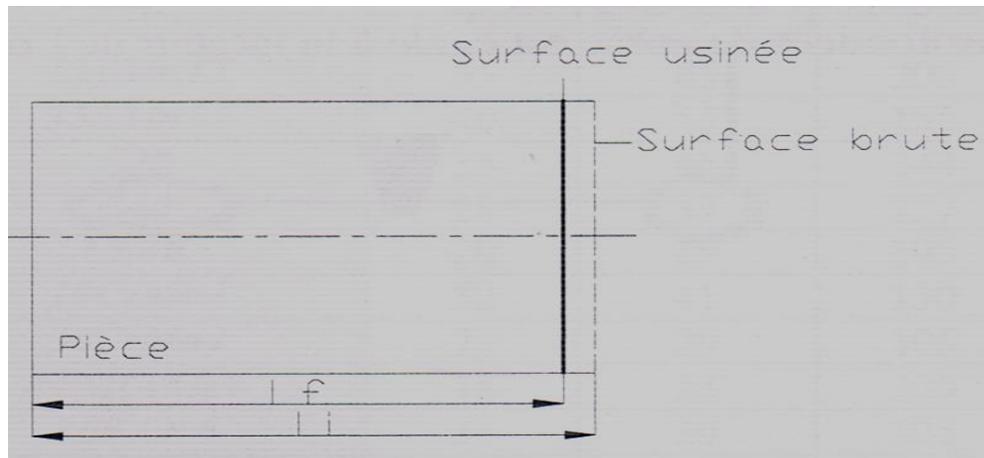


**Figure I.8** Opération de chariotage . [1].

$D_i$  désigne la diamètre initial avant l'opération et  $D_f$  le diamètre final après usinage.

Pour une opération de dressage, la profondeur de passe est donnée par l'expression suivante :

$$a = D_i - D_f \quad \text{I.14}$$

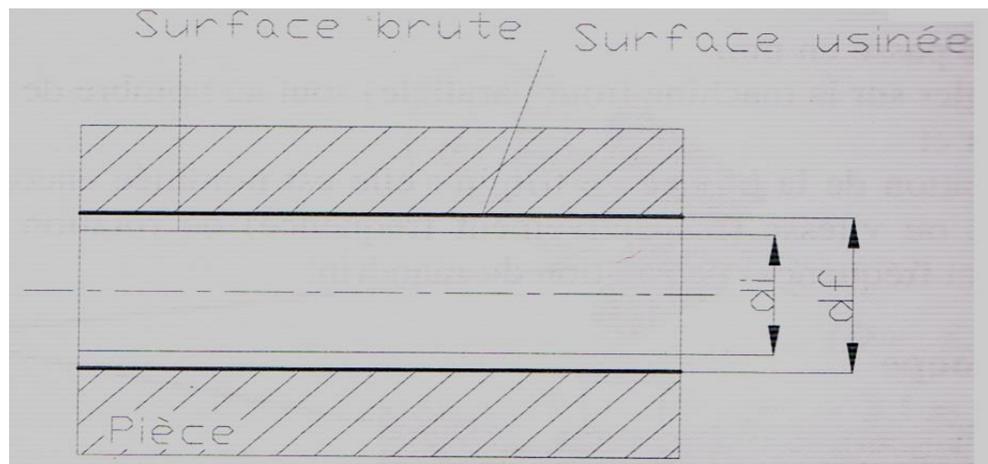


**Figure I.9** Opération de dressage. [1].

$D_i$  désigne le diamètre initial avant l'opération et  $D_f$  le diamètre final après usinage.

Pour une opération d'alésage, la profondeur de passe est donnée par l'expression suivante :

$$a = \frac{d_f - d_i}{2} \quad \text{I.15}$$

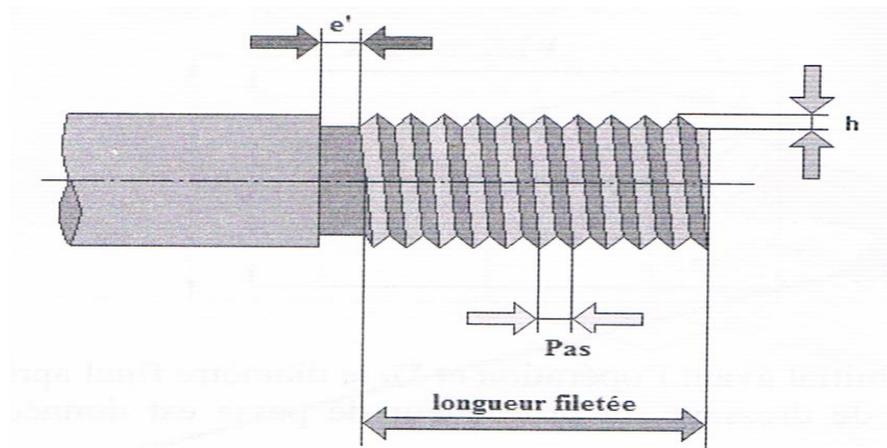


**Figure I.10** Opération d'alésage. [1].

$d_i$  désigne le diamètre initial avant l'opération et  $d_f$  le diamètre final après usinage.

Pour une opération de filetage, la surépaisseur totale à enlever  $h$  est définie dans le guide de dessinateur industriel. Elle est donnée, dans le cas d'un filetage métrique, par l'expression suivante :

$$h = 0,866 \text{ Pas}$$



**Figure I.11** Opération de filetage. [1].

pour une opération de plongée extérieure ou intérieure ou pour une opération de tronçonnage, la profondeur de passe est égale à la largeur de l'outil.



**Figure I.12** Outil de opération de tronçonnage. [1].

**I.5.1.2 Avance :**

Dans le cas d'une opération de chariotage, dressage ou alésage, l'avance est donnée par les équations :

- $f = \frac{p}{10}$  si l'outil est en ARS .
- $f = \frac{p}{8}$  si l'outil est à plaquettes en carbure.

Où  $p$  désigne la profondeur de passe.

Dans le cas d'une opération de filetage extérieur, l'avance est égale au pas.

L'avance est définie dans le paragraphe précédent. Pour le réglage sur la machine, il faut choisir la valeur la plus proche de celle calculée.

**I.5.1.3 Vitesse de rotation de la broche :**

La vitesse de rotation de la broche est réglée sur la boîte des vitesses en adoptant la valeur la plus proche de celle calculée selon la formule.

$$N = \frac{1000V_c}{\pi d} \quad \text{I.16.}$$

Où  $D$  désigne le plus grand diamètre de contact outil/pièce en mm. Le chiffre 1000 tient place comme facteur de conversion d'unité. [1].

## I.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, les types fondamentaux d'usinage mécanique dont dépend le propriétaire de l'atelier, et où il est basé sur la rotation et le progrès, expliquent le type de fabrication dans le mouvement de coupe  $V_c$  et le mouvement de progrès  $M_a$  donné à la machine ou à la pièce.

Le perçage  $V_c$  (ox) pour la machine.  $M_a$  (oz) pour la pièce.

Fraisage  $V_c$  (ox) pour la machine  $M_a$  (o, y, z) pour la pièce.

Rectification  $V_c$  pour la pièce.

Lattage  $V_c$  (ox) pour pièce  $M_a$  (oz) pour machine.

# **Chapitre 2 :**

# **Généralité sur le**

# **Tournage**

## **II.1 Introduction :**

L'usinage par enlèvement de matière consiste à réduire progressivement les dimensions de la pièce par enlèvement du métal à froid et sans déformation en utilisant un outil. 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.

Dans ce chapitre nous présentons généralité sur le tournage, qui contient des définitions, les conditions de coupe et la géométrie d'outil en plus les paramètres techno-économiques de production (temps, coût).

## **II.2 Définitions :**

### **II.2.1 Le tournage :**

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique. La pièce est animée d'un mouvement de rotation (mouvement de coupe), qui est le mouvement principal du procédé, l'outil est animé d'un mouvement complémentaire de translation (rectiligne ou non) appelé mouvement d'avance, permettant de définir le profil de la pièce.

La combinaison de ces deux mouvements, ainsi que la forme de la partie active de l'outil, permettent d'obtenir des usinages de formes de révolution (cylindres, plans, cônes ou formes de révolution complexes). [2]

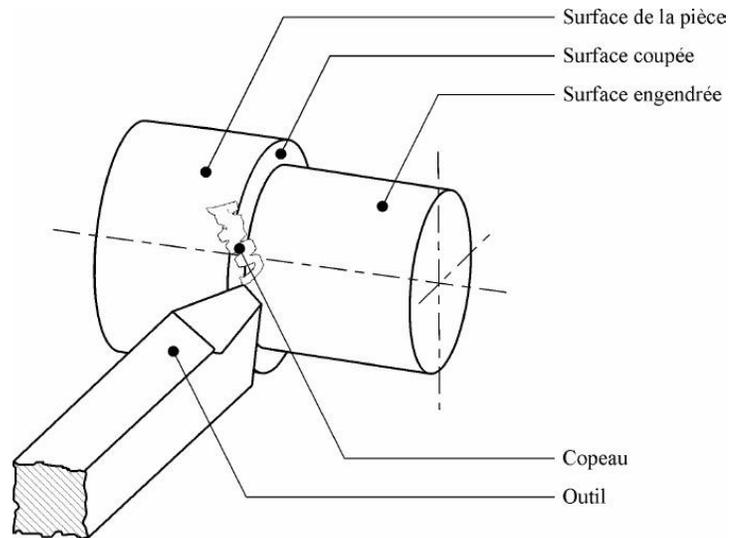


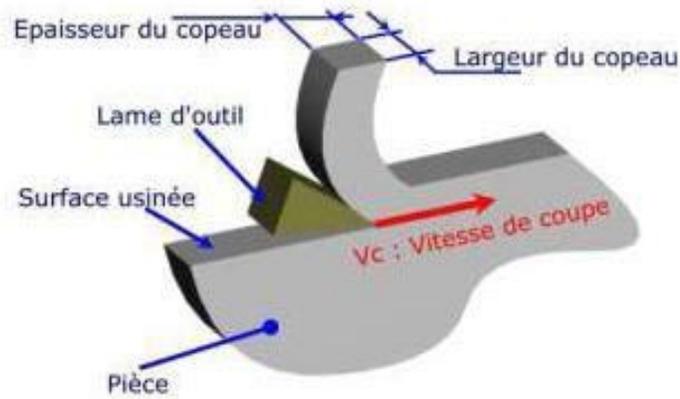
Figure II.1 Procédure de tournage [3]

## II.2.2 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  $Mf$ .

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

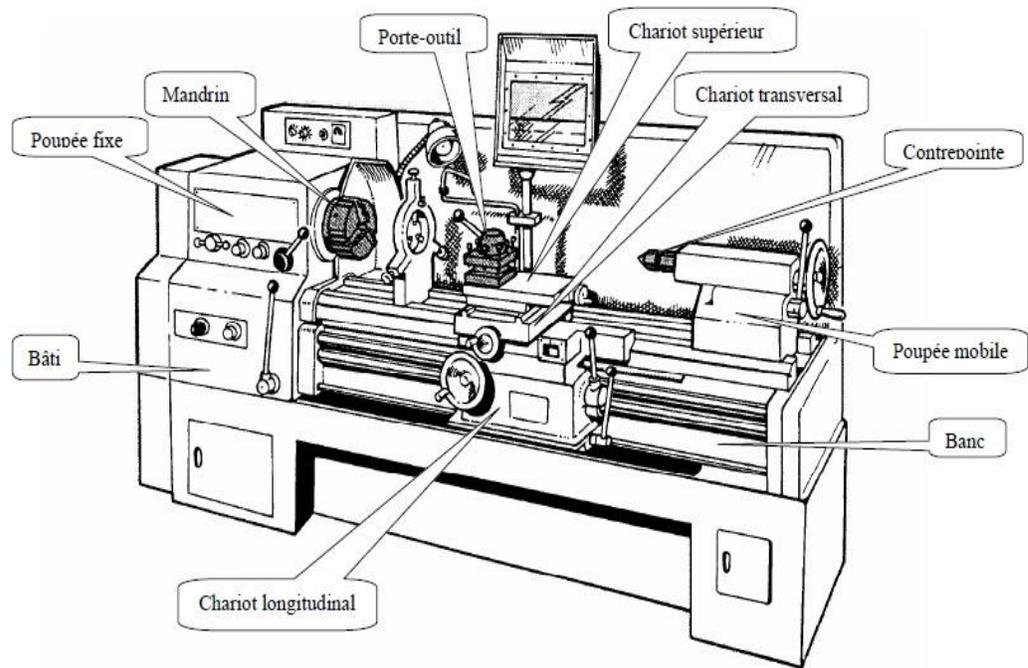
Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [4].



**Figure II.2** Principe de tournage [4]

### II.2.3 Les tours :

Les tours (voir Figure. II.3) permettent de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage) : cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche. [5].



**Figure II.3** Composantes de tour. [5]

## II.2.4 Classification des machines de tour :

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

### II.2.4.1 Les tours parallèles à charioter et à fileter :

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe. [6]

### II.2.4.2 Les tours à copier :

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal. C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries. La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque. [6].

### **II.2.4.3 Les tours semi-automatiques :**

Ce sont des tours équipés d'un trainard 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. [6]

### **II.2.4.4 Les tours automatiques :**

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries. [6]

### **II.2.4.5 Les tours automatiques multibroches :**

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches. [6]

### II.2.4.6 Les tours à commande numérique :

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un ordinateur 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. [6]

### II.2.5 Différentes opérations de tournage:

#### II.2.5.1 Chariotage :

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

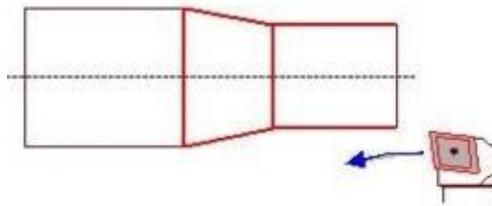


Figure II.4 Chariotage. [6]

#### II.2.5.2 Alésage :

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

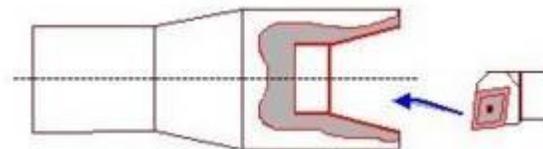


Figure II.5 Alésage. [6]

### II.2.5.3 Dressage :

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

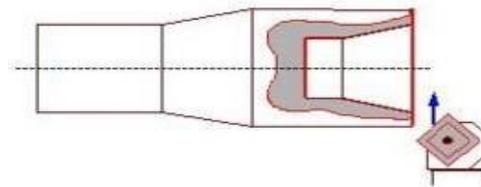


Figure II.6 Dressage. [6]

### II.2.5.4 Perçage :

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

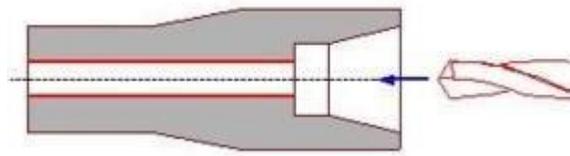


Figure II.7 Perçage. [6]

### II.2.5.5 Rainurage :

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

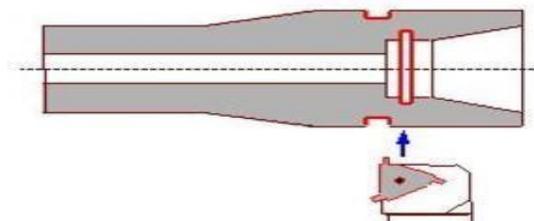


Figure II.8 Rainurage [6]

### II.2.5.6 Chanfreinage :

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

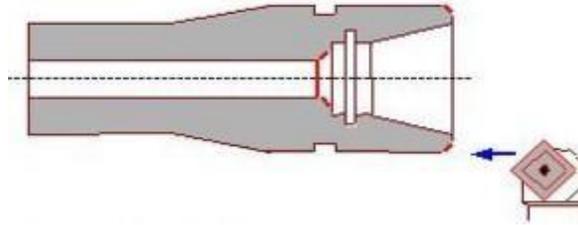


Figure II.9 Chanfreinage [6]

### II.2.5.7 Tronçonnage :

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

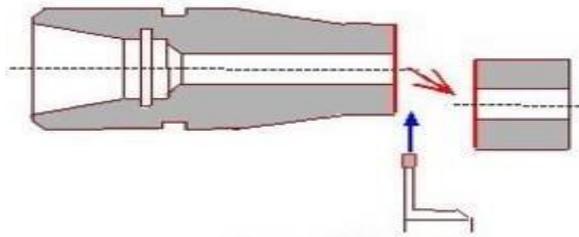


Figure II.10 Tronçonnage [6]

### II.2.5.8 Filetage :

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.

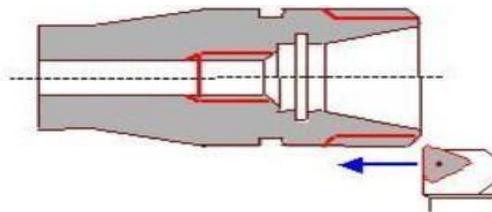


Figure II.11 Filetage [6]

### II.3 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.

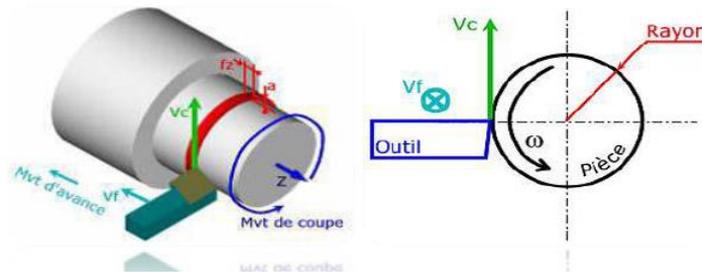


Figure II.12 Conditions de coupe. [2]

#### II.3.1 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 [2]

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

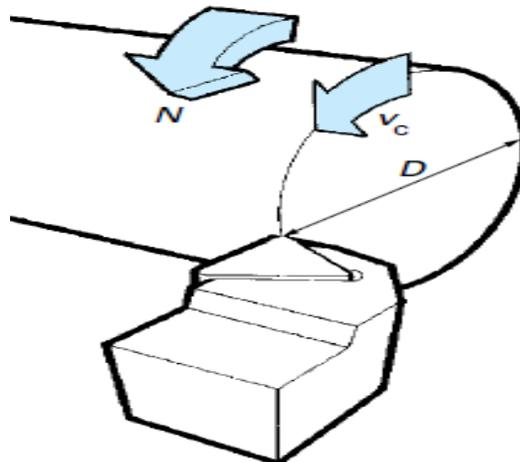


Figure II.13 Vitesse de coupe [2]

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. [2]

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.3.2 Vitesse d'avance $V_f$ , Avance par tour $f$ :

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

L'avance par tour  $f$  ( $mm/tr$ ) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. [2]

$$V_f = f \times N$$

II.2

- $V_f$ : vitesse d'avance ( $mm/min$ )
- $f$ : L'avance ( $mm$ )
- $N$ : Fréquence de rotation ( $tr/min$ )

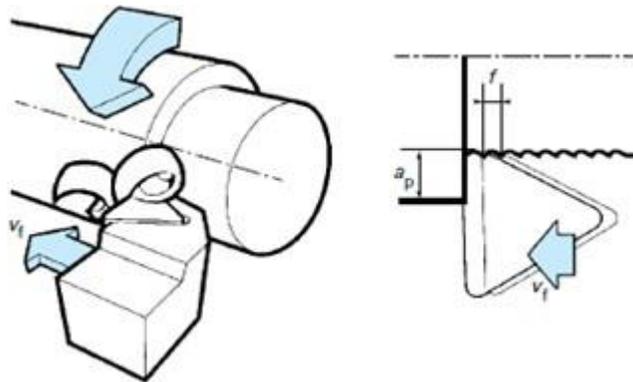


Figure II.14 Vitesse d'avance  $V_f$ , Avance par tour  $f$  [2]

#### II.3.2.1 Les types d'avances :

On distingue trois sortes d'avance :

##### a) Avance longitudinal :

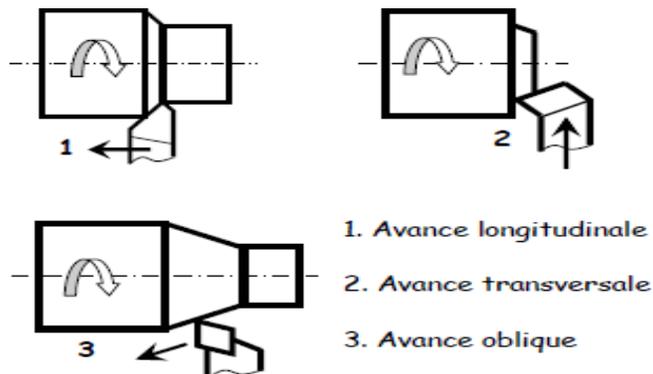
On appelle avance longitudinale si l'outil se déplace parallèlement à l'axe de l'ébauche.

## 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.



**Figure II.15** Différente types d'avance [8]

### II.3.3 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. [7,9]

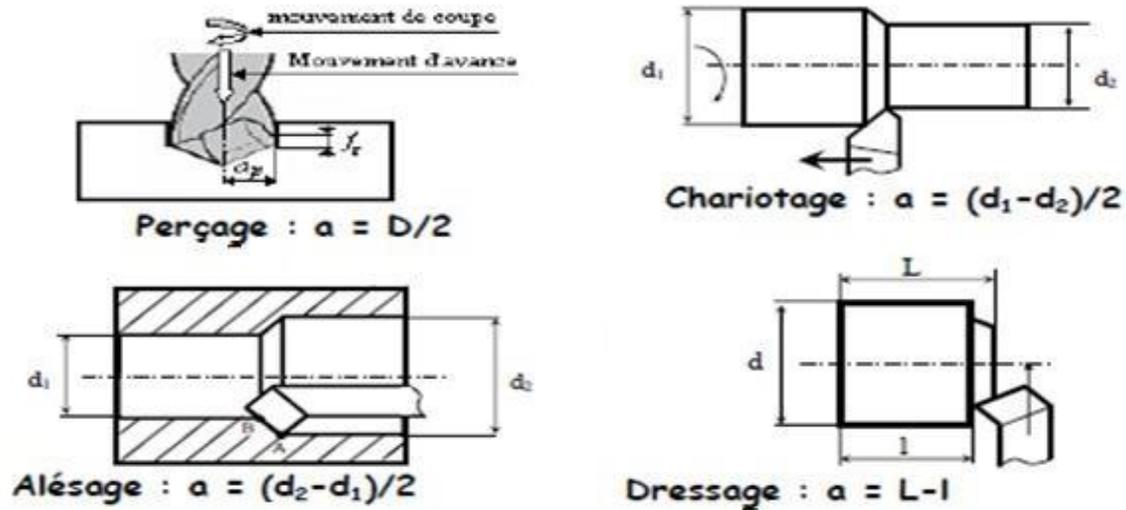
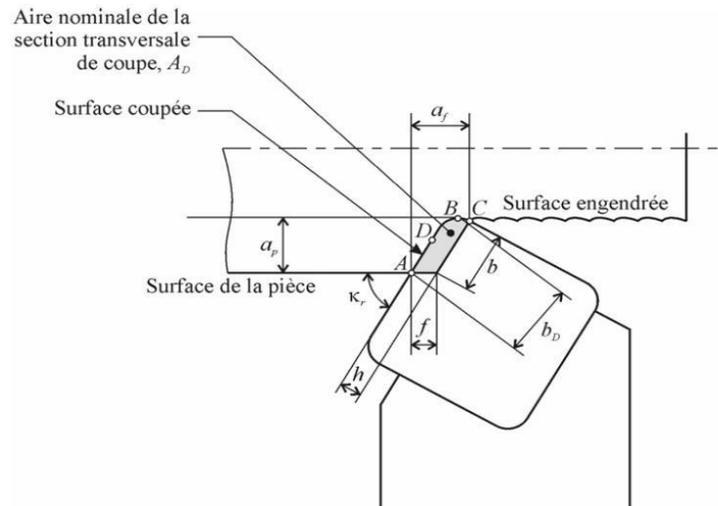


Figure II.16 Les profondeurs de passe. [6]

#### II.4 Paramètres géométriques de coupe :

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de passe  $a$ . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe la couche de matière qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés à la figure II.17 [10]



**Figure II.17** Paramètres géométriques de coupe. [10]

$a_p$  : Profondeur de coupe

$a_f$  : Engagement de l'arête.

$f$  : Avance.

$h$  : Épaisseur de coupe.

$b$  : Largeur de coupe.

$b_D$  : Largeur nominale de coupe.

$k_r$  : Angle de direction d'arête.

$D$  : Point principal de l'arête.

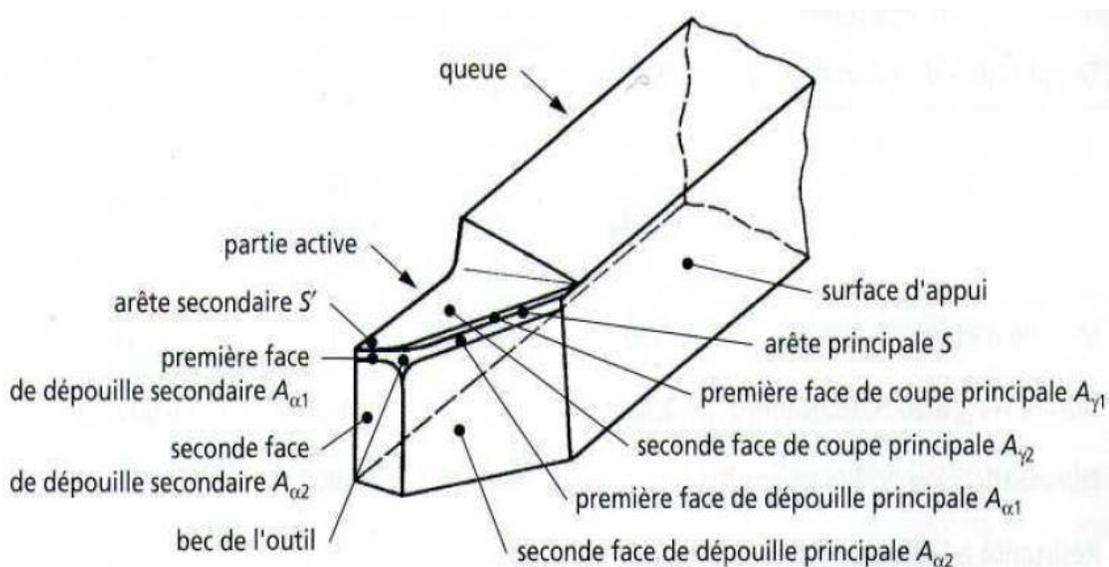
## II.5 Éléments d'outil :

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. [8]

### II.5.1 FACES ET ARETES DE L'OUTIL :

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil et peut comporter une ou plusieurs parties actives, intersection de deux surfaces ( $A_{\alpha 1}$ ,  $A_{\gamma 1}$  Figure II. 18). La partie active 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 poly cristallins de bore ou de diamant). La (figure II .18) précise le vocabulaire relatif aux différentes parties actives d'un outil de tournage.

En plus de cette description de la géométrie locale des outils, il existe une norme (ISO 1831) permettant de décrire les différentes parties constitutives des outils de tournage à plaquettes rapportées, systématiquement utilisés aujourd'hui. Cette description indique une large part des caractéristiques des outils, à l'exception de la géométrie locale des brise-copeaux frittés sur les faces de coupe, et à l'exception de la composition des plaquettes et de leurs revêtements. Ce sont en fait les deux points clés qui font la spécificité des fabricants d'outils (impossible à normaliser). [4]



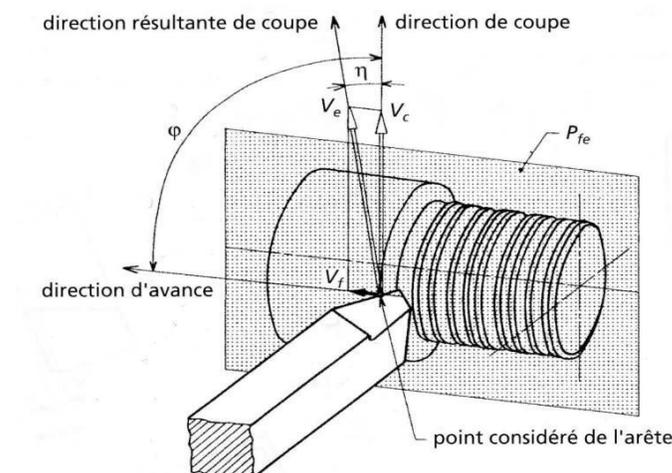
**Figure II.18** Arêtes et parties actives d'un outil de tournage. [ 4]

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. [8]

Généralement, un outil possède un mouvement de coupe et un mouvement d'avance. On en déduit des lors un vecteur résultant du mouvement relatif outil/ pièce exprime par le vecteur  $V_e$ .

A partir de la, on peut définir deux systèmes d'angles d'un outil de coupe. On définit soit les angles d'outil « en main » par rapport à la direction supposée de coupe  $V_e$  (nécessaire à la fabrication des outils), soit les angles d'outils « en travail » par rapport à la direction réelle de coupe  $V_c$  (repère nécessaire pour connaître les angles effectifs durant la coupe). A l'aide de ces repères, on établit une série de plans et d'angles normalisés permettant de décrire la géométrie locale des outils.



**Figure II.19** Mouvement relatif outil/ pièce en tournage. [3]

## II.5.2 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 les dits phénomènes. La (figure II.20) illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant, l'angle de dépouille , l'angle de taillant  $\beta$  et l'angle de coupe  $\gamma$ . [3]

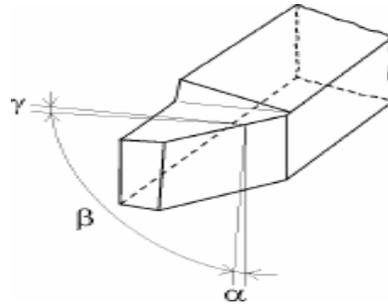
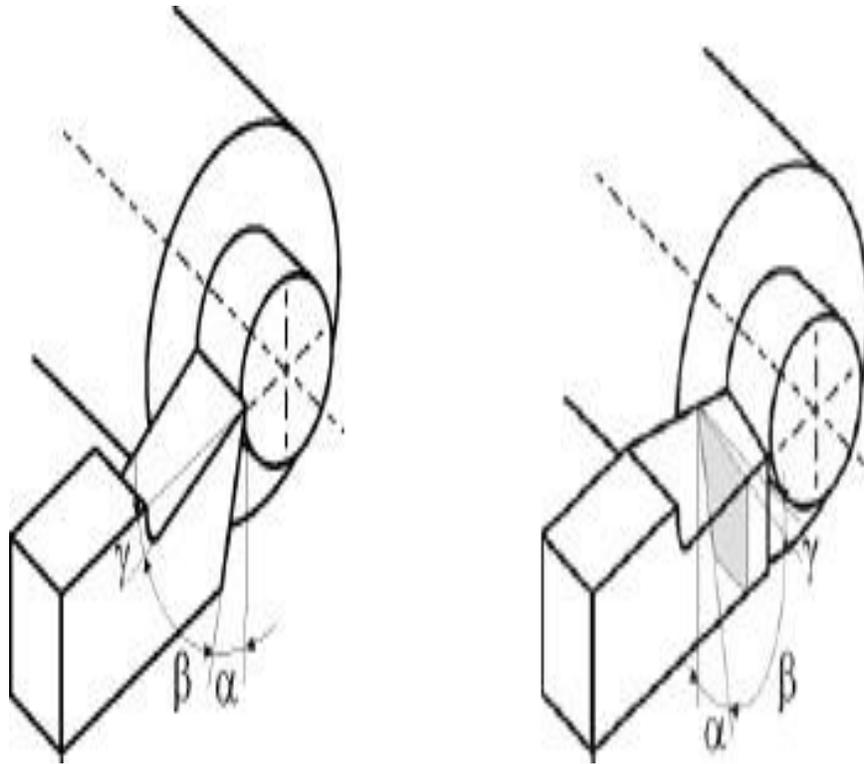


Figure II.20 Angles du taillant (outil en main). [3]

La (figure II 21) 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 II.21** Angles du taillant (outil en travail) [3]

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  $90^\circ$ .

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

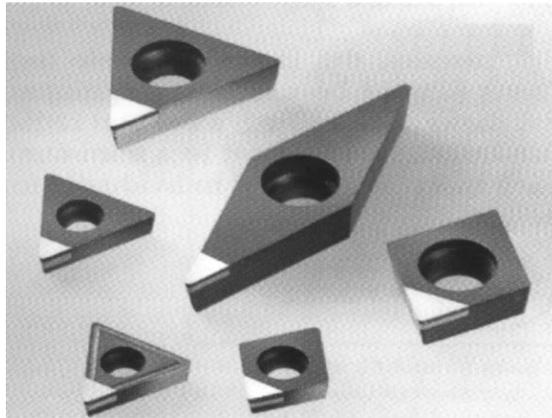
Dans le cas où la somme est supérieure à  $90^\circ$ , on parle de coupe négative ( $\gamma$  négatif). [3]

### II.5.3 Outil de coupe à plaquette rapportée :

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

Le changement d'arête de coupe intervient lorsque l'arête en service a atteint un degré d'usure qui l'empêche de respecter les tolérances des cotes à réaliser, ou la rugosité spécifiée, ou encore qui risque d'entraîner la rupture à plus ou moins brève échéance. Pour effectuer le choix d'un outil de tournage, les paramètres à prendre en compte sont les suivants : [2]

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



**Figure II.22** Plaquettes [2]

## II.6 MATERIAUX DE L'OUTIL

La partie active des outils de coupe et donc les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés:

- une bonne résistance mécanique au frottement - résistance à l'usure.
- une bonne résistance aux chocs - ténacité.
- une bonne résistance à la pénétration - dureté.
- une bonne résistance à la chaleur - garder ces propriétés à haute température (par exemple dureté à chaud).
- une bonne résistance à la pression.
- une grande stabilité chimique vis-à-vis du matériau usiné et de l'atmosphère environnante (air, liquide de coupe, etc.).
- une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température.
- un bas prix d'achat et de mise en forme, ainsi que l'abondance des éléments de composition.

[4]

Le diagramme (figure II. 23) est donné à titre indicatif pour situer les différents domaines des matériaux à outil. Il est représentatif des conditions normales d'utilisation de ces outils, en ébauche, pour les aciers et les fontes. Il ne peut être utilisé pour choisir les conditions de coupe.

[2]

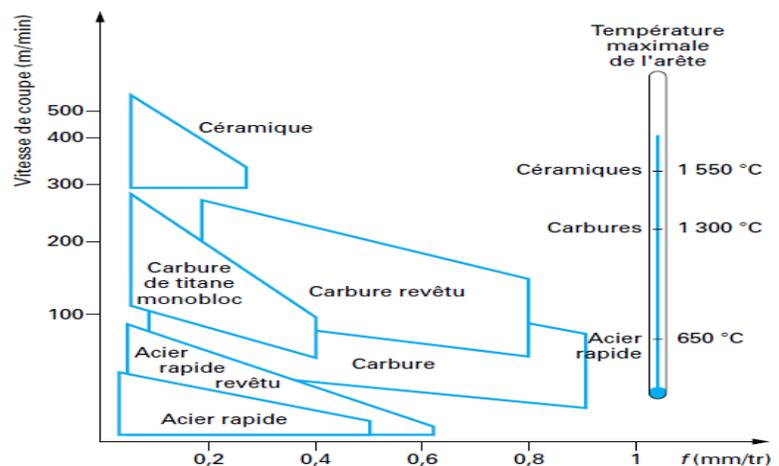


Figure II.23 Domaines d'emploi des divers matériaux à outil coupant. [2]

## II.7 Paramètres techno-économiques d'usinage

Le coût d'usinage et le temps d'usinage sont les paramètres techno-économiques d'usinage .

Ces les paramètres qui déterminent l'important économique des pièces usinées. [8]

### II.7.1 Temps d'usinage

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. Il s'exprime par la relation :

$$T_u = t_m + t_{cs} \left( \frac{t_m}{T} \right) + t_r + t_h \text{ (Min)} \quad \text{II.3}$$

$t_{cs}$  (Temps outil) : temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire,

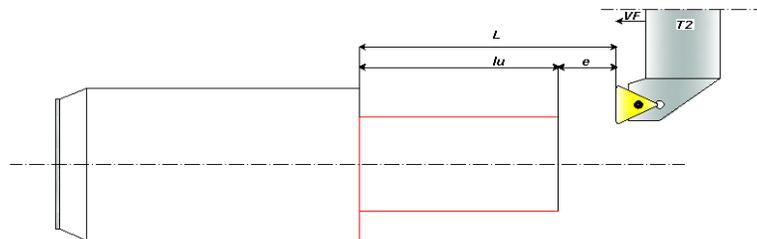
$T$  : Durée de vie de l'outil de coupe.

$t_r$  : Temps de retour.

$t_h$  : Temps de montage et démontage de la pièce.

$t_m$  (Temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une avance), puisque :

On déterminer le temps technologique comme suite :



**Figure II.24** Paramètres de temps technologique. [8]

$lu$  : Longueur usinée

$e$  : Distance de sécurité

$V_f$ : vitesse d'avance

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = lu + e$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce :

$$t_m = \frac{L}{V_f}$$

$$t_m = \frac{\pi + D + L}{1000 \times V_c \times f}$$

## II.7.2 Coût d'usinage

Généralement, la formule du coût d'usinage sous la forme :

$$\text{Coût total} = \text{frais fixes} + \text{coût machine} + \text{coût outil}$$

Le coût d'usinage unitaire est le coût nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce, il s'écrit comme suit:

$$C_u = (C_0 \times t_m) + (C_0 \times t_{cs}) + C_t \times \left(\frac{t_m}{T}\right) + C_0 \times (t_r + t_h) \quad \text{II.4}$$

$C_u$  : Coût d'usinage unitaire.

$C_0$  : Coût de machine en \$/ min.

$C_t$  : Coût d'une arrête de coupe en \$/ arrête.

### II.7.3 Durée de vie d'un outil de coupe

Compte tenu de la complexité du phénomène, il n'existe pas de loi mathématique simple permettant de calculer la "durée de vie" de l'outil.

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

Généralement on choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants :

- 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.
- Usure frontale, employé pour tous les outils, caractérisés soit par l'usure frontale moyenne soit par l'usure frontale maximale.
- Usure en cratère, employé seulement pour les outils en carbure métallique, caractérisé par la profondeur du cratère. [4]

La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille dans la zone b (figure II.25)  $VB$  en  $mm$ .

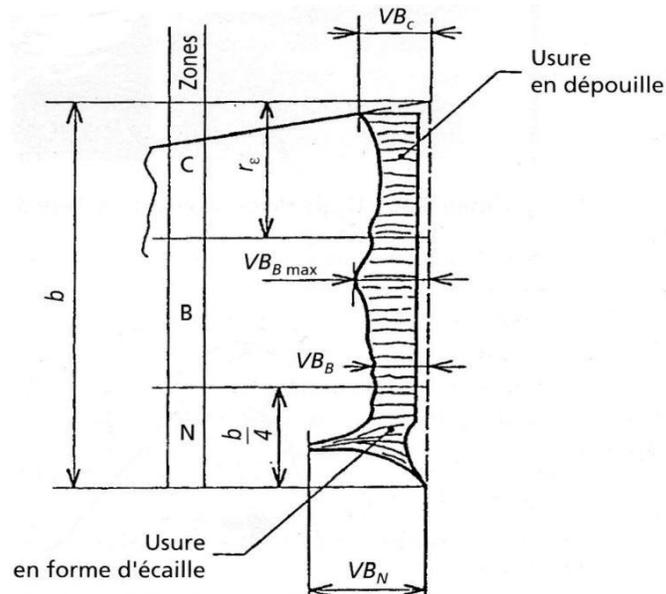


Figure II.25 Critère d'usure  $VB$ . [4]

En fait la durée de vie de l'outil est fonction des différents paramètres, soit:

- Les conditions de coupe
- Le matériau et la géométrie de l'outil
- Le matériau et l'état physique de la pièce
- La lubrification

Généralement seules les conditions de coupe sont prises en considération et on établit des lois d'usure pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées. [11]

On arrive donc des lois d'usure de la forme :

$$T = f(V_c, f, a_p)$$

Remarque : La vitesse de coupe étant en fait le paramètre le plus important on trouve aussi des lois d'usure sous la forme :

$$T = f(V_c) \quad \text{II.5}$$

### II.7.3.1 Principaux modèles mathématiques de l'usure

#### a) Loi de Taylor :

Ce modèle établi par TAYLOR en 1906 est caractérisé par l'équation :

$$T = C_V \times V^n \quad \text{II.6}$$

$T$  : Durée de vie d'outil.

$C_V$  : Constante dépendant du couple outil/pièce.

L'exposant  $n$ , souvent appelé coefficient de Taylor, il est influencé par le matériau de l'outil, le matériau usiné, ainsi que le type d'usinage.

$n$  : Exposant de TAYLOR.

On peut prendre les valeurs de  $n$  données par les tableaux suivants [11] Usinages effectués avec des outils en A.R.E.S (Tableau II.1).

**Tableau II.1** Valeurs approximative de  $n$  pour A.R.E.S [11]

	Aciers	Fontes grises	Fontes malleables	Alliages d'Aluminium
Tournage	-8,5	-10	-8,5	-2,5
Perçage	-8,5	-8,5	-8,5	-2,5

Usinages effectués avec des outils en carbure (Tableau II.2).

**Tableau II.2** Valeurs approximative de  $n$  pour carbure. [11]

	Aciers	Fontes grises	Fontes malleables	Alliages d'Aluminium
Tournage	- 4,5	-5	-5	-2,5
Perçage	-3,5	-2,5	-2,5	-2,5

Bien que l'influence de l'avance et de la profondeur de passe ne soient pas prises en considération ce modèle est toujours très employé.

Si l'on met l'équation  $T = C_v V_c^n$  sous la forme :

$$\log T = \log V_c + \log C_v \quad \text{II.7}$$

On obtient une loi linéaire dans un repère en coordonnées bi logarithmiques

#### b) Loi de Gilbert :

Ce modèle, qui date de 1950, est en fait une généralisation de la loi de Taylor pour prendre en considération l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation :

$$T = K V_c^K f^X a^Y \quad \text{II.8}$$

$K$  : dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné,

$k$ ,  $x$  et  $y$  : Exposants dépendants de la nuance de l'outil. [12]

**c) Loi de Kronenberg**

Ce modèle, qui date de 1968 ne prend pas en compte l'influence de l'avance et de la profondeur de passe, tout comme la loi de Taylor. Il est caractérisé par l'équation :

$$T + K = C_V V_c^n, \quad K : \text{est une constante.}$$

Il est à noter que la constante  $C$  et le coefficient  $n$ , n'ont pas les mêmes valeurs que dans la loi de Taylor. [4,11]

**d) Loi de König-Depiereux :**

Dans ce modèle, qui date de 1969, on tient compte de l'influence de l'avance et de la profondeur de passe. Il est caractérisé par l'équation :

$$T = \exp(\alpha V^v \cdot \gamma f^\mu \cdot \delta a^\lambda) \quad \text{II.9}$$

Ce modèle conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel est en accord avec les courbes expérimentales qui déterminent l'usure des outils.

Compte tenu des dispersions liées aux essais d'usure, le modèle simple de Taylor est suffisamment représentatif, il est couramment utilisé

Ces différents constants sont déterminés à l'aide d'essais de coupe où l'on pousse l'usure de l'outil jusqu'à l'obtention de la valeur maxi du critère d'usure considéré. [11]

## II.8 MECANIQUE DE COUPE EN TOURNAGE :

### I.8.2 FORMATION DU COPEAU :

La couche enlevée par l'action de l'outil subit une compression non libre s'accompagnant de déformation élastiques puis permanentes. Ces déformations aboutissent à la rupture par glissement de certaines couches par rapport à d'autres suivant des surfaces qui en général, se confondent avec la direction des contraintes de cisaillement maximales.

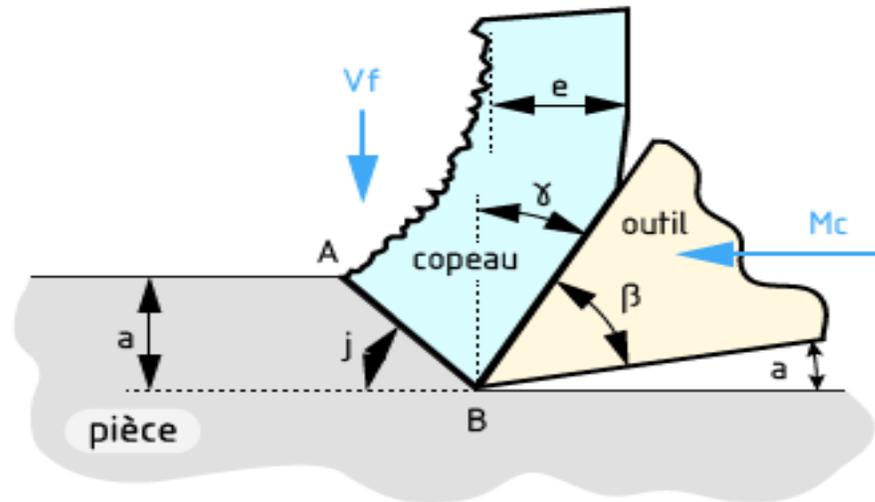


Figure II.26 Schéma générale de formation d'un copeau. [21]

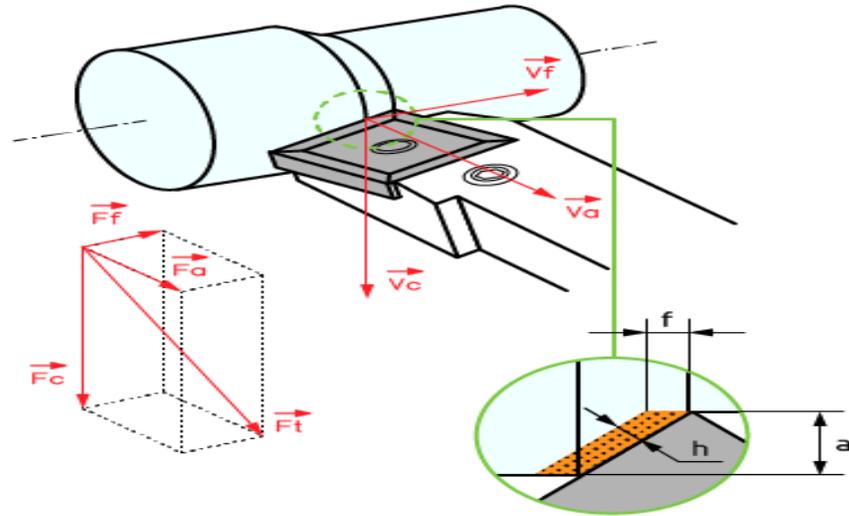
Le débit de coupe est la quantité de matière qui enlève de la pièce usinée, elle en fonction à les conditions de coupe et se présente sous formule suivante :

$$Q = a \cdot f \cdot V_c \quad [mm^3/s] \quad \text{II.10}$$

### II.8.2 Efforts de coupe :

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 l'effort de coupe dépend essentiellement de matière à usiner et des conditions de coupe.



**Figure II.27** présentation les composantes des efforts de coupe. [21]

L'effort de coupe  $F_t$  exercé par la pièce sur l'outil admet trois composantes :

$F_c$  : l'effort tangentiel de coupe

$F_f$  : l'effort axial d'avancement

$F_a$  : l'effort radial dû à la profondeur de coupe.

La relation entre ces trois efforts :

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_a^2} \quad \text{II.11}$$

### II.8.3 Puissance de coupe :

On a définie la puissance dans le cas générale comme un le produit scalaire du vecteur d'effort de vitesse :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{V} \quad \text{II.12}$$

$$P = \begin{vmatrix} F_a & V_a \\ F_f & V_f \\ F_c & V_c \end{vmatrix}$$

$$P = F_a \cdot V_a + F_f \cdot V_f + F_c \cdot V_c$$

En chariotage nous négligeons l'effort d'avancement et l'effort radial Donc :

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad \text{II.13}$$

#### II.8.4 Rugosité d'une surface usinée :

La génération d'une surface usinée prend autant la forme que les traces que laissées par le tranchant au contact de la pièce pendant leur mouvement relatif :

Considérons une coupe locale la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (II.28).

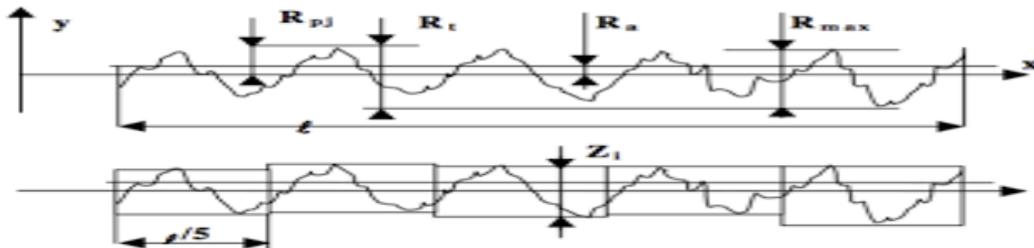


Figure II.28 paramètres de rugosité. [22]

Soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^l y \, dx = 0 \quad \text{II.14}$$

Ou  $l$  est la longueur de pal page

Les principaux critères de rugosité sont définis par à cette ligne moyenne

Soit :

a) **Rugosité moyenne arithmétique  $R_a$  :**

Dite C.L.A (center line Average )  $R_a$  représente la moyenne arithmétique des écarts ( en valeur absolue ) par rapport à OX :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad \text{II.15}$$

**b) Rugosité moyenne quadratique  $R_q$  :**

Dite R.M.S (root mean square ) ce critère représente l'écart moyenne quadratique par rapport à OX :

$$R_q = \left[ \frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{1/2} \quad \text{II.16}$$

**c) Rugosité max  $R_{max}$  :**

Elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité.

**d) Rugosité max  $R_t$  :**

Représente l'écart totale entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil relevé sur toute la longueur de planage l.

Le critères  $R_a$  reste encore le plus répandu dans l'industrie car sa sensibilité permet de faire la distinction entre des surfaces de qualité différentes

## II.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre de notre étude le procédé de tournage ainsi que les paramètres techno-économiques, pour pouvoir réaliser une modélisation multi-passe du problème d'optimisation des conditions de coupe.

# **Chapitre 3 : Modélisation Multi-Passe et optimisation des Conditions de Coupe en Tournage**

### III.1 Introduction :

Dans les opérations de tournage, le processus de coupe peut éventuellement être complété par une passe unique ou par plusieurs passes. Une opération de coupe passe multiple implique plusieurs d'ébauche et de finition. Les paramètres d'usinage peuvent être déterminées en fonction de l'expérience de l'opérateur ou en suivant le guide de coupe Fournies par le fabricant de l'équipement. Ces données ne sont pas généralement garanties pour être optimales. Par conséquent, le développement de modèles mathématique pour les opérations de tournage est devenu un outil utile pour déterminer les conditions de coupe [15].

Dans notre étude, on suppose que l'opération de tournage est répartie en plusieurs passes, et on cherche par la suite les conditions de coupe optimales pour chaque passe.

Chaque entreprise de fabrication inspire à améliorer la qualité de ses produits avec un souci de coût et nous avons choisi de traiter la réduction des valeurs de certains paramètres (la durée de production et le coût de production et de consommation dans les outils de coupe).

Une solution appropriée était la solution optimale pour les conditions de coupes qui relie la relation entre la machine, la pièce et l'outil de coupe.

### III.2 FORMULATION MATHEMATIQUE D'UN PROBLEME D'OPTIMISATION NON LINEAIRE

Un programme mathématique est un problème d'optimisation d'une fonction objectif de  $n$  variables, en présence de  $m$  contraintes. Si au moins une contrainte ou la fonction objective est non linéaire. On a un programme non linéaire.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) \quad f \in R \\ \text{Sous les contraintes :} \\ g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, n \\ h_j(x) = 1 \quad j = 1, \dots, m \\ x \in S \subset R^n \end{array} \right. \quad \text{III.1}$$

$x \in R^n$ : Vecteur de composantes  $(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  qui sont les inconnues du problème.

$f(x)$  La fonction objectif ou critère économique.

$g_i(x) \leq 0 \quad i = (1, \dots, n)$ : L'ensemble des contraintes d'égalité du problème.

$h_j(x) = 0 \quad j = (1, \dots, m)$ : L'ensemble des contraintes d'inégalité du problème. [19,20].

Dans cette équation  $f(x)$  est l'expression mathématique de la fonction-objectif ( critère d'optimisation ou la fonction ) avec le vecteur  $x \in R^n$  pour composantes  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  qui sont les variables ( ou inconnues) du problème .

### III.3 PROBLEME DE MODELISATION D'UNE OPERATION DE TOURNAGE :

Une opération de chariotage consiste à réduire le rayon externe d'une pièce d'une valeur  $S$  (surépaisseur d'usinage). Afin d'obtenir un état de surface acceptable, la dernière passe doit être réservée à la finition. Cette passe aura une limite spécifique liée à la rugosité. Les autres les même limitations. Par conséquent, nous voyons que cette opération peut être répartie en un nombre de passes d'ébauche identiques  $n$  et une seule passe de finition.

De cette manière, le problème de d'optimisation de cette opération consistera à déterminer, les conditions de coupe pour une seule passe d'ébauche et une de finition.

De plus, la surépaisseur d'usinage  $S$  doit être égale à la somme des profondeurs de coupe de toute les passes. Ce qui donne :

$$S = n \cdot a_e + a_f \quad \text{(III.2)}$$

Où  $n$  : nombre des passes d'ébauche

$a_e$  : Profondeur du passe d'ébauche

$a_f$  : Profondeur du passe de finition

Cette relation permet de réduire le nombre des inconnues du problème d'une inconnue en remplaçant la profondeur du passé de finition par l'expression :

$$a_f = S - n a_e \quad \text{(III.3)}$$

après la détermination du nombre de passe d'ébauche  $n$  , notre problème réside dans la sélection optimale des paramètres suivantes :

Profondeur de passe en ébauche :  $a_e$

Avance par tour en ébauche :  $f_e$

Vitesse de coupe en ébauche :  $V_{ce}$

Avance par tour en finition :  $f_f$

Vitesse de coupe en finition :  $V_{cf}$

La détermination du nombre de passe d'ébauche consiste à supposer, initialement, que la surépaisseur d'usinage  $S$ , est répartie uniquement sur les passes d'ébauche. Des ce fait, le nombre de passe d'ébauche  $n$  est donné par le rapport :  $\frac{S}{a_e}$ , c'est un nombre réel.

Puisqu'un nombre de passes est un nombre naturel, ce rapport doit être arrondi vers la valeur minimale. D'où :

$$n, a_e < S$$

L'écart présenté par cette inégalité sera considéré comme une profondeur de passe de finition.

D'où :

$$a_f = S - n.a_e$$

### **III.4 FORMULATION MATHÉMATIQUE D'UN PROBLÈME D'OPTIMISATION :**

Un problème d'optimisation est exprimé comme une fonction objectif à une ou plusieurs variables, pour être maximisée ou minimisée sous un certain nombre de contraintes indiquées. Les fonctions de contraintes définissent le domaine acceptable des variables pour le processus d'optimisation. Les telles contraintes, pouvant être de types égalité ou inégalité, permettent la limitation des domaines sur les variables, dans la recherche de la (ou les) solution(s) optimale(s). [18]

### III.4.1 Critères d'optimisation :

Les critères d'optimisation peuvent être selon les objectifs de production recherchés. Dans cette étude, nous considérons a priori les critères suivant :

#### III.4.1.1 Temps de production :

La production maximale sera atteinte lorsque le temps de fabrication est minimal. Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe. C'est la somme des temps machine  $t_m$ , le temps de changement de l'arrête  $t_{cs}$ , le temps de retour rapide de l'outil  $t_r$  et le temps de montage et démontage de la pièce  $t_n$ . Il s'exprime par le relation :

$$T_u = t_m + t_{cs} \left( \frac{t_m}{T} \right) + t_r + t_n \quad (\text{III.4})$$

$t_m$  (temps technologique) : c'est le temps de coupe avec une avance, exprimé par :

$$t_m = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V_c \cdot f} \quad (\text{III.5})$$

Où  $D$  est  $L$  sont respectivement le diamètre extérieur et la longueur de la partie de la pièce à usinée.

$T$  : la durée de vie de l'outil de coupe .Suivant le modèle de Gilbert . Elle est donnée sous la forme :

$$K = V \cdot f^{a1} \cdot a^{a2} \cdot T^{a3} \quad (\text{III.6})$$

D'où :

$$T = K^{1/a3} \cdot V_c^{(-1/a3)} \cdot f^{(-a1/a3)} \cdot a^{-a2/a3} \quad (\text{III.7})$$

$K, a_1, a_2, a_3$  Sont des constantes empirique, et le pas de la profondeur de coupe pour une passe donnée. [16]

En remplaçant  $t_m$  et  $T$  par leurs expressions respectivement dans l'équation de temps d'usinage précédent, On obtient le temps de production sous la forme suivant :

$$T_u = A.V_c^{-1}.f^{-1} + t_{cs}.A.V_c^{\frac{1-a_3}{a_3}}.f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}}.k^{\frac{-1}{a_3}}.a_2^{\frac{a_2}{a_3}} + t_h + t_R \quad (III.8)$$

$$\text{Avec : } A = \frac{\pi..D.L}{1000}$$

Le temps de production pour une opération entière est donné par la somme des temps nécessaires pour l'ébauche et la finition :

$$T_u = T_e + T_f + T_h \quad (III.9)$$

$T_e$  : Le temps d'usinage des  $n$  passes d'ébauche.

$T_f$  : Les temps d'usinage de finition.

Le temps d'usinage en ébauche est la somme des d'usinage de toutes les passes d'ébauche.

Il est donné par :

$$T_e = \sum_{i=1}^n (t_{mei} + t_{cs} \cdot \left(\frac{t_{mei}}{T}\right) + t_r) \quad (III.10)$$

$i$  : indique le numéro de passe

$$t_{mei} = \frac{\pi.D_{i-1}.L}{1000.V_c.f} \quad (III.11)$$

Où :  $D_i = D_{i-1} - 2.a_e$

$$\sum_{i=1}^n t_{mei} = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot (1 - 1) a_e \cdot L)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} + \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot (2 - 1) a_e \cdot L)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} + \dots + \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot (n - 1) a_e \cdot L)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e}$$

$$= \frac{\pi \cdot L}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} \cdot (D + (D - 2 \cdot a_e) + (D - 4 \cdot a_e) + \dots + (D - (n - 1) \cdot a_e))$$

On a :

$$(D + (D - 2 \cdot a_e) + (D - 4 \cdot a_e) + \dots + (D - 2 \cdot (n - 1) \cdot a_e)) = n \cdot (D - (n - 1) \cdot a_e) \quad (\text{III.12})$$

D'où :

$$\sum_1^n t_{mei} = \frac{\pi \cdot L \cdot n \cdot (D - (n - 1) a_e)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} \quad (\text{III.13})$$

$$T_e = \frac{\pi \cdot L \cdot n \cdot (D - (n - 1) a_e)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} + t_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot L \cdot n \cdot (D - (n - 1) a_e)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e \cdot T} + n t_r \quad (\text{III.14})$$

Le temps d'usinage pour une passé de finition est:

$$T_f = t_{mf} + t_{cs} \cdot \left( \frac{t_{mf}}{T} \right) + t_r \quad (\text{III.15})$$

$$t_{mf} = \frac{\pi \cdot L \cdot (D - 2 \cdot n \cdot a_e)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} \quad (\text{III.16})$$

Donc :

$$T_f = \frac{\pi \cdot L \cdot (D - 2 \cdot n \cdot a_e)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} + t_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot L \cdot (D - 2 \cdot n \cdot a_e)}{1000 \cdot V_{ce} \cdot f_e} + t_r \quad (\text{III.17})$$

En remplaçant l'expression de T et Te et Tf par leur expressions dans l'équation (III.8), on obtenu l'expression suivante :

$$\begin{aligned}
 T_u = & \frac{\pi.L}{1000} \cdot n \cdot (D - (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^{-1} \cdot f_e^{-1} + t_{cs} \cdot \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot n \cdot (D - (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_e^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_e^{\frac{a_2}{a_3}} + \\
 & \frac{\pi.L}{1000} \cdot (D - 2n \cdot a_e) \cdot V_{cf}^{-1} \cdot f_f^{-1} + t_{cs} \cdot \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot (D - 2n \cdot a_e) \cdot V_{cf}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_f^{\frac{a_2}{a_3}} + (n + 1)t_r + t_h
 \end{aligned}
 \tag{III.18}$$

### III.4.1.2 Consommation en outil :

L'enlèvement de matière provoque une consommation de l'outil. Elle est calculée la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{t_m}{T}
 \tag{III.19}$$

Pour une opération entière, ce paramètre est donné par :

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_f
 \tag{III.20}$$

Où :  $\varepsilon_e$  est la consommation en ébauche. elle est égale à :

$$\varepsilon_e = \frac{t_{me}}{T} = \sum_{i=1}^n \frac{t_{mei}}{T} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^n t_{mei} = \frac{\pi.L.N.(D-(n-1).a_e)}{1000.V_{ce}.f_e.T}
 \tag{III.21}$$

Et :  $\varepsilon_f$  est la consommation en finition. Elle est égale à :

$$\varepsilon_f = \frac{t_{mf}}{T} = \frac{\pi.L.N.(D-2(n).a_e)}{1000.V_{ce}.f_e.T}
 \tag{III.22}$$

On obtient alors :

$$\varepsilon = \frac{\pi.L.N.(D-(n-1).a_e)}{1000.V_{ce}.f_e.T} + \frac{\pi.L.N.(D-2(n).a_e)}{1000.V_{ce}.f_e.T}
 \tag{III.23}$$

D'où :

$$\varepsilon = \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot n \cdot (D - (n - 1)a_e) \cdot V_{ce}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_e^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot a_e^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} + \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot (D - 2.na_e) \cdot V_{cf}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_f^{\frac{a_2}{a_3}}
 \tag{III.24}$$

### III.4.1.3 Coût de production :

Le coût totale de production est présenté par les temps d'utilisation de la machine et l'outil.

Il est formulé par :

$$C_u = C_o \cdot T_u + C_t \cdot \varepsilon \quad (\text{III.25})$$

$C_o$  : coût machine

$C_t$  : coût outil

A partir de (III.17) et (III.23) on peut déduire la formule du coût de production d'une opération à passe multiple :

$$\begin{aligned} C_u = & C_o \cdot \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot n \cdot (D - (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^{-1} \cdot f_e^{-1} + (C_o \cdot t_{cs} + C_t) \cdot \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot n \cdot (D - \\ & (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_e^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_e^{\frac{a_2}{a_3}} + \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot (D - 2n \cdot a_e) \cdot V_{cf}^{-1} \cdot f_f^{-1} + (C_o t_{cs} + \\ & C_t) \cdot \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot (D - 2 \cdot n a_e) \cdot V_{cf}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_f^{\frac{a_2}{a_3}} + C_o((n + 1)t_r + t_h \end{aligned} \quad (\text{III.26})$$

### III.4.2 Contraintes :

L'optimisation de la fonction-objectif nécessite souvent des limitations pratiques des variables d'optimisation [14,15].

De plus des limitations additionnelles sont nécessaires pour la stabilité du processus de coupe et le respect de la qualité de la pièce à usiner [13,15].

Les contraintes physique suivantes sont considérées pour la formulation du problème :

#### a) Limitation sur l'intervalle des vitesses de coupe :

La vitesse de coupe doit être comprise dans les limites de validité du modèle établi pour le couple outil-matière [13,15]

$$V_{C \min} \leq V_c \leq V_{C \max} \quad (\text{III.27})$$

**b) Limitation sur l'intervalle des avances :**

L'avance par tour  $f$  doit être comprise entre deux valeurs extrêmes programmables sur la machine-outil, soit : [13,15]

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (\text{III.28})$$

**c) Limitation sur la profondeur de passe :**

La profondeur de passe doit être comprise entre deux valeurs extrêmes maximale et minimale.

$$a_{\min} \leq a_e \leq a_{\max} \quad (\text{III.29})$$

$$a_{\min} \leq a_f \leq a_{\max} \quad (\text{III.30})$$

**d) Limitation sur la puissance de coupe :**

La puissance nécessaire à la coupe doit être inférieure à une puissance limite admis par machine  $P_{max}$ , soit [13].

$$C_p \cdot V_c^b \cdot f^c \cdot a^d \leq P_{\max} \quad (\text{III.31})$$

$C_p, b, c, d$  : coefficients spécifique et exposantes de la puissance de machine.

**e) Limitation sur l'effort de coupe :**

L'effort de coupe doit être inférieur à une force de coupe limite  $F_{max}$  [18].

$$C_f \cdot V_c^x \cdot f^y \cdot a^z \leq F_{\max} \quad (\text{III.32})$$

$C_f, x, y, z$  : coefficients spécifique et exposantes de la force de coupe.

**f) Limitation sur l'état de surface :**

L'état de surface résultante d'usinage doit être inférieur à une rugosité maximale imposée [18].

$$C_s.V_c^e.f^g.a^i \leq R_{\max} \quad (\text{III.33})$$

Toutes les équations mentionnées ci-dessus déterminant les contraintes ont été développées par les données expérimentales collectées pour les études de l'usinage des aciers ordinaires [13].

**III.4.3 Expressions des problèmes d'optimisation :**

Un problème d'optimisation des conditions de coupe peut être, suivant les intérêts de fabricant, sous plusieurs formes.

Dans cette partie, nous essayons découvrir toutes les préférences possibles. En effet, nous allons formuler le problème sous trois formes ; le premier est lié à la minimisation du temps de production, la deuxième à la minimisation de la consommation en outil et la troisième à la minimisation du coût de production.

## A. Minimisation du temps de production :

Ce problème d'optimisation vise à minimiser le temps d'usinage en faisant intervenir le temps de préparation de l'opération, le temps d'affûtage et de changement de l'outil, ainsi que le temps d'exécution.

En utilisant les relations précédents, le problème d'optimisation des conditions de coupe visant un temps d'usinage minimal peut être formulé comme suit :

$$\text{Minimiser: } T_u = \frac{\pi.L}{1000} \cdot n \cdot (D - (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^{-1} \cdot f_e^{-1} + t_{cs} \cdot \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot n \cdot (D - (n - 1) \cdot a_e) \cdot f_e^{\frac{a_1 - a_3}{a_3}} \cdot a_e^{\frac{a_2}{a_3}} + \frac{\pi.L}{1000} \cdot (D - 2n \cdot a_e) \cdot V_{cf}^{-1} \cdot f_f^{-1} + t_{cs} \cdot \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot (D - 2 \cdot a_e) \cdot V_{cf}^{\frac{1 - a_3}{a_3}} \cdot f_f^{\frac{a_1 - a_3}{a_3}} \cdot a_f^{\frac{a_2}{a_3}} + (n + 1)t_r + t_h$$

Avec les contraintes:

$$V_{c \min} \leq V_{Ce} \leq V_{C \max}$$

$$V_{c \min} \leq V_{cf} \leq V_{C \max}$$

$$f_{\min} \leq f_e \leq f_{\max}$$

$$f_{\min} \leq f_f \leq f_{\max}$$

$$a_{\min} \leq a_e \leq a_{\max}$$

$$C_p \cdot V_{Ce}^b \cdot f_e^c \cdot a_e^d \leq P_{\max}$$

$$C_p \cdot V_{cf}^b \cdot f_f^c \cdot (S - n \cdot a_e)^d \leq P_{\max}$$

$$C_f \cdot V_{cf}^b \cdot f_e^y \cdot a_e^z \leq F_{\max}$$

$$C_f \cdot V_{cf}^x \cdot f_f^y \cdot (S - n \cdot a_e)^z \leq F_{\max}$$

$$C_s \cdot V_{Ce}^e \cdot f_e^g \cdot a_e^i \geq R_{e \max}$$

$$C_s \cdot V_{cf}^e \cdot f_f^g \cdot (S - n \cdot a_e)^i \leq R_{F \max}$$

## B. Minimisation de la consommation en outil:

Le problème lié à la recherche d'une consommation minimale en outil peut être présenté sous la forme :

$$\text{Minimiser } \varepsilon = \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot n \cdot (D - (n-1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_e^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_e^{\frac{a_2}{a_3}} + \frac{\pi.L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot (D - 2 \cdot n a_e) \cdot V_{cf}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_f^{\frac{a_2}{a_3}}$$

Avec les contraintes :

$$V_{C \min} \leq V_{Ce} \leq V_{C \max}$$

$$V_{C \min} \leq V_{Cf} \leq V_{C \max}$$

$$f_{\min} \leq f_e \leq f_{\max}$$

$$f_{\min} \leq f_f \leq f_{\max}$$

$$a_{\min} \leq a_e \leq a_{\max}$$

$$a_{\min} \leq S - n \cdot a_e \leq a_{\max}$$

$$C_p \cdot V_{Ce}^b \cdot f_e^c \cdot a_e^c \leq P_{\max}$$

$$C_p \cdot V_{cf}^b \cdot f_f^c \cdot (S - n \cdot a_e)^d \leq P_{\max}$$

$$C_f \cdot V_{Ce}^x \cdot f_e^y \cdot a_e^z \leq F_{\max}$$

$$C_f \cdot V_{cf}^x \cdot f_f^y \cdot (S - n \cdot a_e)^z \leq F_{\max}$$

$$C_s \cdot V_{Ce}^e \cdot f_e^g \cdot a_e^i \leq R_{e \max}$$

$$C_s \cdot V_{cf}^e \cdot f_f^g \cdot (S - n \cdot a_e)^i \leq R_{f \max}$$

### C. Minimisation de coût de production :

Ce problème est considéré comme un problème global car le coût de production est une combinaison du temps d'usinage et de la consommation en outil. En effet, on cherche à travers la minimisation de ce paramètre un temps et une consommation minimale. Ce problème peut être présenté par

$$\text{Minimiser } C_u = C_0 \cdot \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot n \cdot (D - (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^{-1} \cdot f_e^{-1} + (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) \cdot \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot n \cdot (D - (n - 1) a_e) \cdot V_{cf}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_e^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_e^{\frac{a_2}{a_3}} + \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot (D - 2n \cdot a_e) \cdot V_{cf}^{-1} \cdot f_f^{-1} + (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) \cdot \frac{\pi \cdot L}{1000} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot (D - 2 \cdot n a_e) \cdot V_{cf}^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f_f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot a_f^{\frac{a_2}{a_3}} + 0.1((n + 1)t_r + t_h$$

Avec les contraintes :

$$V_{C \min} \leq V_{Ce} \leq V_{C \max}$$

$$V_{C \min} \leq V_{Cf} \leq V_{C \max}$$

$$f_{\min} \leq f_e \leq f_{\max}$$

$$f_{\min} \leq f_f \leq f_{\max}$$

$$a_{\min} \leq a_e \leq a_{\max}$$

$$a_{\min} \leq S - n \cdot a_e \leq a_{\max}$$

$$C_p \cdot V_{ce}^b \cdot f_e^c \cdot a_e^d \leq P_{\max}$$

$$C_p \cdot V_{cf}^b \cdot f_f^c \cdot (S - n \cdot a_e)^d \leq P_{\max}$$

$$C_f \cdot V_{ce}^x \cdot f_e^y \cdot a_e^z \leq F_{\max}$$

$$C_f \cdot V_{cf}^x \cdot f_f^y \cdot (S - n \cdot a_e)^z \leq F_{\max}$$

$$C_s \cdot V_{ce}^e \cdot f_e^g \cdot a_e^i \leq R_{e \max}$$

$$C_s \cdot V_{cf}^e \cdot f_f^g \cdot (S - n \cdot a_e)^i \leq R_{f \max}$$

### III.5 Exemple d'application :

Nous proposons d'étudier une opération de chariotage sur une pièce brute a longueur  $L=203$  mm et diamètre  $D=152$ mm avec les paramètres d'usinage illustré dans le tableau si dessous :

**Tableau III.1** des donnes [15].

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
$L$	203 mm	$t_r$	0.13 min/ passe
$D$	152 mm	$t_h$	1.5 min/ passe
$V_{\min}$	30 m /min	$S$	12.7 mm
$V_{\max}$	200 m /min	$a_1$	0.29
$f_{\min}$	0.254 mm /tr	$a_2$	0.35
$f_{\max}$	0.762 mm /tr	$a_3$	0.25
$R_{\max}$	2 $\mu m$	$K$	193.3
$R_{\max}$	8 $\mu m$	$t_{cs}$	0.5 min/ arrête
$P_{\max}$	5 KW	$C_0$	0.1 \$ / min
$F_{\max}$	1100 N	$C_t$	0.5 \$ /arrête

Considérons ces données et en utilisant les modèles A, B, C, la sélection optimale des conditions de coupe peut être traitée à travers les trois problèmes suivants :

**A. Minimisation de temps de production :**

Minimiser :  $T_u = 0.637.n.(152 - (n - 1).a_e).V_{ce}^{-1}.f_e^{-1} + 2,281.10^{-10}.n.(152 - (n - 1).a_e).V_{ce}^3.f_e^{0,16}.a_e^{1,4} + 0,637.(152 - 2n.a_e).V_{cf}^{-1}.f_f^{-1} + 2,281.10^{-10}.(152 - 2.n.a_e).V_{cf}^3.f_f^{0,16}.a_f^{1,4} + (n + 1)0,13 + 1,5$

Avec les contraintes :

$$0,254 \leq f_f \leq 0,762$$

$$0,254 \leq f_e \leq 0,762$$

$$30 \leq V_f \leq 200$$

$$30 \leq V_e \leq 200$$

$$1 \leq a_e \leq 5$$

$$1 \leq S - n.a_e \leq 5$$

$$0,0373.V_{cf}^{0,91}.f_f^{0,78}.(S - n.a_e)^{0,75} \leq 5$$

$$0.0373.V_{ce}^{0,91}.f_e^{0,78}.a_e^{0,75} \leq 5$$

$$844.V_{cf}^{-0,01013}.f_f^{0,725}.(S - n.a_e)^{0,75} \leq 1100$$

$$844.V_{ce}^{-0,01013}.f_e^{0,725}.a_e^{0,75} \leq 1100$$

$$14,785.V_{cf}^{-1,25}.f_f^1.(S - n.a_e)^{0,25} \leq 2$$

$$14,785.V_{ce}^{-1,25}.f_e^1.a_e^{0,25} \leq 8$$

## B. Minimisation de consommation de l'outil :

$$\text{Minimiser : } \varepsilon = 4,56 \cdot 10^{-10} \cdot n(152 - (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^3 \cdot f_e^{0,16} \cdot a_e^{1,4} + 4,56 \cdot 10^{-10} \cdot (152 - 2 \cdot n a_e) \cdot V_{cf}^3 \cdot f_f^{0,16} \cdot a_f^{1,4}$$

Avec les contraintes :

$$0,254 \leq f_f \leq 0,762$$

$$0,254 \leq f_e \leq 0,762$$

$$30 \leq V_{cf} \leq 200$$

$$30 \leq V_{ce} \leq 200$$

$$1 \leq a_e \leq 5$$

$$1 \leq S - n \cdot a_e \leq 5$$

$$0,0373 \cdot V_{cf}^{0,91} \cdot f_f^{0,78} \cdot (S - n \cdot a_e)^{0,75} \leq 5$$

$$0,0373 \cdot V_{cf}^{0,91} \cdot f_e^{0,78} \cdot a_e^{0,75} \leq 5$$

$$844 \cdot V_{cf}^{-0,01013} \cdot f_f^{0,725} \cdot (S - n \cdot a_e)^{0,75} \leq 1100$$

$$844 \cdot V_{cf}^{-0,01013} \cdot f_f^{0,725} \cdot a_e^{0,75}$$

$$14,785 \cdot V_{cf}^{-1,25} \cdot f_f^1 \cdot (S - n \cdot a_e)^{0,25} \leq 2$$

$$14,785 \cdot V_{ce}^{-1,25} \cdot f_e^1 \cdot a_e^{0,25} \leq 8$$

**C. MINIMISATION DE COUT DE PRODUCTION :**

$$\text{Minimiser : } C_u = 4,56 \cdot 10^{-10} \cdot n(152 - (n - 1) \cdot a_e) \cdot V_{ce}^3 \cdot f_e^{0,16} \cdot a_e^{1,4} + 4,56 \cdot 10^{-10} \cdot (152 - 2 \cdot n a_e) \cdot V_{cf}^3 \cdot f_e^{0,16} \cdot a_f^{1,4} + 0,0637 \cdot (152 - 2n \cdot a_e) \cdot V_{cf}^{-1} \cdot f_f^{-1} + 2,508 \cdot 10^{-10} \cdot (152 - 2 \cdot n a_e) \cdot V_{cf}^3 \cdot f_f^{0,16} \cdot a_f^{1,4} + (n + 1)0,013 + 0,15$$

Avec les contrainte :

$$0,254 \leq f_f \leq 0,762$$

$$0,254 \leq f_e \leq 0,762$$

$$30 \leq V_{cf} \leq 200$$

$$30 \leq V_{ce} \leq 200$$

$$1 \leq a_e \leq 5$$

$$1 \leq S - n \cdot a_e \leq 5$$

$$0,0373 \cdot V_{cf}^{0,91} \cdot f_f^{0,78} \cdot (S - n \cdot a_e)^{0,75} \leq 5$$

$$0,0373 \cdot V_{cf}^{0,91} \cdot f_f^{0,78} \cdot a_e^{0,75} \leq 5$$

$$844 \cdot V_{cf}^{-0,01013} \cdot f_f^{0,725} \cdot a_e^{0,75} \leq 1100$$

$$14,785 \cdot V_{cf}^{-1,25} \cdot f_f^1 \cdot (S - n \cdot a_e)^{0,25} \leq 2$$

$$14,785 \cdot V_{ce}^{-1,25} \cdot f_e^1 \cdot a_e^{0,25} \leq 8$$

Afin de résoudre les trois problèmes, on utilise des codes de calcul implantés sur Matlab. Ces codes utilisent la fonction *fmincon*, qui permet la résolution des problèmes d'optimisation non linéaires avec contraintes. Cette fonction recherche la valeur optimale  $X(x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5)$  minimisant la fonction-objectif et satisfaisant les contraintes.

L'utilisation de fonction « *fmincon* » exige la déclaration de la fonction-objectif et les contraintes représentant le problème. Dans notre situation de chaîne de caractères devient trop pénible et il faut s'en remettre aux fichiers, (m).en autre, cela permet de représenter l'expression de chaque critère d'optimisation dans un fichier séparé. Les fonctions contraintes seront présentées de la même manière. Cette présentation donne la possibilité d'appeler les critères et les contraintes à chaque application dans la syntaxe de la fonction *fmincon*.

Les variables du problème seront présentées par le vecteur X où :

$$X_1 : a_e = x_2 : f_e x_3 : V_{Ce} x_4 : f_f x_5 : V_{cf}$$

En utilisant cette codification, les critères d'optimisation considérés seront écrits :

$$\begin{aligned} T_u = & 0,637 \cdot n(152 - (n - 1) \cdot x_1) \cdot x_3^{-1} \cdot x_2^{-1} \\ & + 2,281 \cdot 10^{-10} \cdot n \cdot (152 - (n - 1) \cdot a_e) x_3^3 \cdot x_2^{0,16} \cdot x_1^{1,4} \\ & + 0,637 \cdot (152 - 2n \cdot x_1) \cdot x_5^{-1} \cdot x_4^{-1} \\ & + 2,281 \cdot 10^{-10} \cdot (152 - 2 \cdot n \cdot x_1) \cdot x_5^3 \cdot x_4^{0,16} \cdot (12,7 - n \cdot x_1)^{1,4} + (n + 1)0,13 \\ & + 1,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 4,56 \cdot 10^{-10} \cdot n \cdot (152 - (n - 1) \cdot x_1) \cdot x_3^3 \cdot x_2^{0,16} \cdot x_1^{1,4} + 4,56 \cdot 10^{-10} \cdot (152 - \\ & 2 \cdot n \cdot x_1) \cdot x_5^3 \cdot x_4^{0,16} \cdot (12,7 - n \cdot x_1)^{1,4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_u = & 0,0637 \cdot n \cdot (152 - (n - 1) \cdot x_1) \cdot x_3^{-1} \cdot x_2^{-1} \\ & + 2,281 \cdot 10^{-10} \cdot n \cdot (152 - (n - 1) \cdot a_e) x_3^3 \cdot x_2^{0,16} \cdot x_1^{1,4} \\ & + 0,0637 \cdot (152 - 2n \cdot x_1) \cdot x_5^{-1} \cdot x_4^{-1} \\ & + 2,281 \cdot 10^{-10} \cdot (152 - 2 \cdot n \cdot x_1) \cdot x_5^3 \cdot x_4^{0,16} \cdot (12,7 - n \cdot x_1)^{1,4} + (n + 1)0,13 + 1,5 \end{aligned}$$

Dans les trois problèmes considérés. Les contraintes sont présentées par les mêmes inégalités :

$$0,0373x_5^{0,91} \cdot x_4^{0,78} \cdot (12,7 - n \cdot x_1)^{0,75} \leq 5$$

$$844 \cdot x_5^{-0,01013} \cdot x_4^{0,725} \cdot (12,7 - n \cdot x_1)^{0,75} \leq 1100$$

$$14,785 \cdot x_5^{-1,25} \cdot x_4^1 \cdot (12,7 - n \cdot x_1)^{0,25} \leq 2$$

$$844 \cdot x_3^{-0,01013} \cdot x_2^{0,725} \cdot x_1^{0,75} \leq 1100$$

$$0,0373 \cdot x_3^{0,91} \cdot x_2^{0,78} \cdot x_1^{0,75} \leq 5$$

$$14,785 \cdot x_3^{-1,25} \cdot x_2^1 \cdot x_1^{0,25} \leq 8$$

$$12,7 - n \cdot x_1 \leq 5$$

$$n \cdot x_1 - 12,7 \leq -1$$

Ces inégalités seront transformées en égalités qui présentent l'écart entre la valeur du paramètre et la valeur limite, soient :

$$con(1) = 0,0373x_5^{0,91} \cdot x_4^{0,78} (12,7 - nx_1)^{0,75} - 5$$

$$con(2) = 844 \cdot x_5^{-0,01013} \cdot x_4^{0,725} \cdot (12,7 - n \cdot x_1)^{0,75} - 1100$$

$$con(3) = 14,785 \cdot x_5^{-1,25} \cdot x_4^1 \cdot (12,7 - nx_1)^{0,25} - 2$$

$$con(4) = 844 \cdot x_3^{-0,01013} \cdot x_2^{0,725} \cdot x_1^{0,75} - 1100$$

$$con(5) = 0,0373 \cdot x_3^{0,91} \cdot x_2^{0,78} \cdot x_1^{0,75} - 5$$

$$con(6) = 14,785 \cdot x_3^{-1,25} \cdot x_2^1 \cdot x_1^{0,25} - 8$$

$$con(7) = 7,7 - n \cdot x_1$$

$$con(8) = n \cdot x_1 - 11,7$$

En fin, la résolution des problèmes A, B, C est réalisé successivement à l'aide de trois programmes utilisent les données suivantes :

Une limitation inférieure sur x :  $Lb = [1 ; 0.254 ; 30 ; 0.254 ; 30]$

Une limitation supérieure x :  $Ub = [5 ; 0.762 ; 200 ; 0.762 ; 200]$

Un point de départ :  $X_o = [3 ; 0.562 ; 120 ; 0.360 ; 150]$

Pour les trois problèmes, on trouve que la solution optimale consiste à réaliser quatre passes d'ébauche. Les conditions de coupe et les paramètres d'usinage des passes d'ébauche et de finition, pour chacun des problèmes (A, B, C), ainsi que les critères considérés dans cette étude sont donnés dans les tableaux III.2, III.3, III.4.

**Tableau III.2** Résultats de minimisation de temps de production.

	$a$ [mm]	$f \left[ \frac{mm}{tr} \right]$	$V_c \left[ \frac{mm}{min} \right]$	F [N]	P [KW]	R [ $\mu$ m]	$T_u$ [min]	$\epsilon$ [%]	$C_u$ [\$]
Ebauche	2,925	0,661	128,03	855,78	5	8	8,77	271,63	2,23
Finition	1	0,426	200	266,18	2,383	2			

**Tableau III.3** Résultats de minimisation de la consommation de l'outil.

	$a$ [mm]	$f \left[ \frac{mm}{tr} \right]$	$V_c \left[ \frac{mm}{min} \right]$	F [N]	P [KW]	R [ $\mu$ m]	$T_u$ [min]	$\epsilon$ [%]	$C_u$ [\$ ]
Ebauche	2,925	0,254	68,03	455,81	1,33	8	25,75	43,17	2,79
Finition	1	0,254	141,95	189,16	1,16	2			

**Tableau III.4** Résultats de minimisation de la coût de production

	$a$ [mm]	$f \left[ \frac{mm}{tr} \right]$	$V_c \left[ \frac{mm}{min} \right]$	F [N]	P [KW]	R [ $\mu$ m]	$T_u$ [min]	$\epsilon$ [%]	$C_u$ [\$]
Ebauche	2,925	0,465	101,54	697,32	3,07	8	12,07	130,74	1,86
Finition	1	0,318	164,99	219,74	1,59	2			

Dans les trois solutions, les profondeurs de passe sont inchangeables. C'est l'effet de la détermination de la solution initial. Cette solution doit être déterminée séparément pour chaque problème et d'une manière plus rationnelle. Mais pour des raisons évidentes, le même point de départ est utilisé dans la résolution des trois problèmes.

Cette constatations démontre l'effet de la solution initial sur la recherche mais ne pas sur l'optimalité des solutions trouvées car la notion optimalité est relative.

### **III.6 DISCUSSION :**

La sélection optimale des conditions de coupe doit être justifie d'une manière économique quel que soit les critères considérés. Par conséquent, chaque solution optimale doit représenter un intérêt particulier lié au critère d'optimisation considéré.

Dans notre cas d'application, nous avons traité le problème de modélisation d'une opération de chariotage de trois manières. Les deux premières sont liée à l'exploitation du matériel en réduisent le temps de production et la consommation en outil. La troisième manière est liée à la réduction de coût de production qui représente un intérêt économique global traduit par la combinaison du tempe de production et de la consommation en outil.

D'après les résultats obtenus, on voie que le temps minimal de production est celui présenté par la solution du premier problème qui présente aussi le maximum de consommation en outil. Par contre, la consommation minimale est celle de la solution du deuxième problème et qui présente le temps de production maximale (figure III.1). dans ces deux solutions, le coût de production est presque inchangeable. Cette contradiction est due à l'influence inversée des conditions de coupe sur ces deux paramètres techno-économiques, car la réduction du temps de production est réalisé par l'utilisation des régimes de coupe élevés ce qui augmente considérablement la consommation en outil à cause l'usure rapide des outils. Ainsi, l'utilisation des régimes bas afin de démineur l'usure conduit au ralentissement la de coupe et par conséquent l'augmentation du temps de production. La solution du troisième, lié à la minimisation du coût de production, présente un coût relativement minimal avec un temps de production et consommation intermédiaires.

Pour le fabricant c'est un intérêt global de la production sans savoir les spécifiques liées à la machine ou à l'outil.

D'autre part, on trouve que les résultats des trois problèmes représentent les préférences probables d'un fabricant. Suivant l'intérêt recherché par la réalisation d'une opération d'usinage, le décideur doit adopter l'une des solutions obtenues.

D'une autre manière, il doit traiter le problème selon leurs préférences. A la fin, on peut dire que la méthodologie proposé dans cette application a permet non seulement la sélection optimale des conditions de coupe, une opération de tournage a passe multiple, mais aussi la prédiction des paramètres d'usinage et la compréhension des interactions entre eux.

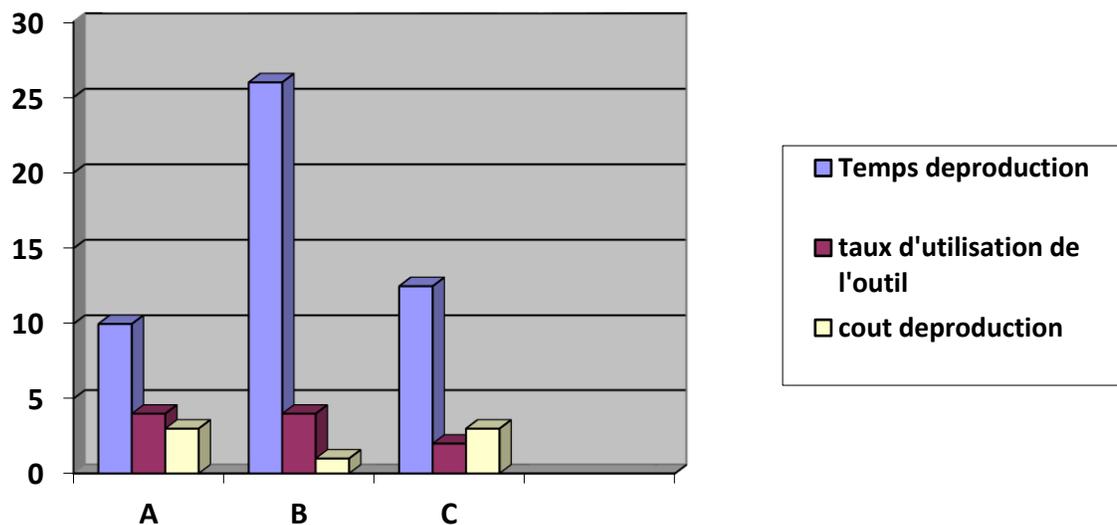


Figure III.1 Comparaison des résultats.

### III.7 Conclusion

Nous avons trouvé la meilleure solution pour les conditions de coupe pour l'opération de chariotage , pour réduire le coût et accélérer la production, en tenant compte de la qualité et guidée par la simulation à l'aide de l'outil Matlab.

# **Chapitre 4 : optimisation réelle**

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

Dans ce chapitre, nous voulons obtenir des solutions d'optimisation avec une expérience réelle et les analyser et les comparer aux résultats obtenus par les simulations dans le chapitre précédent.

L'expérience était sur trois pièces et nous avons calculé les valeurs moyennes des paramètres  $(T_u, \varepsilon, C_u)$ .

#### **IV.2 Définition d'atelier :**

Cette atelier est situe dand le quartier HASSI MESSOUD Cité Saadoudi 135 Logt ( Cité 1850 Logts ) HASSI MESSOUD ALGERIE Affilie de MAPROD Equipements, Sarl.

Créé en 2003, il contient diverses machines d'usinage mécanique et comprend 17 travailleurs.

#### **IV.3 Définition de machine :**

La machine utilisée dans l'expérience était la machine horizontale du type de socomo star 300 d'une fabrication française.

#### **IV.4 Les Pièce à usiné :**

Nous proposons d'étudier une opération de chariotage sur une pièce brute C45 ( acier non allié comportant un taux de 0,45 % de carbone ) , a longueur  $L=203$  mm et diamètre  $D=152$ mm avec les paramètres d'usinage .

## IV.5 Résultats obtenus :

Ces résultats résument les expériences passées dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.1** Minimisation du temps de production :

Paramètre Pièce	$T_u$ [min]
Pièce 1	11,48
Pièce 2	10,32
Pièce 3	11,47

## IV.6 La moyenne des résultats obtenus :

**Tableau IV.2** La moyenne Minimisation du temps de production

	$a$ [mm]	$f$ [ $\frac{mm}{tr}$ ]	$V_c = [\frac{m}{min}]$	F[N]	P[KW]	R[ $\mu$ m]	$T_u$ [min]
ébauche	2.925	0,661	128,03	855,78	6,54	8	10,99
finition	1	0,426	200	266,18	3,11	2	

## IV.7 Discussion :

### IV.7.1 Observation :

Pour minimiser les paramètres, nous devons tenir compte de plusieurs facteurs tels que le coût de la machine et le coût de l'outillage dans l'atelier et la durée de vie de l'outil. Le projet était la seule façon dont nous sommes satisfaits dans ce chapitre avec une discussion.

#### IV.7.2 Comparaison entre le résultat de simulation et le résultat de réalité

Comme nous observons dans les résultats étaient légèrement différents avec les résultats de la méthode de simulation comme indiqué dans les tableaux suivants :

**Tableau IV.3** différents résultats que représentent le temps de production .

Résultat de simulation		Résultat de réel	
$T_u(\text{min})$	8,77	$T_u(\text{min})$	10,99

#### IV.7.3 Les causes de l'inégalité sont résumées dans les points suivants :

- Les étapes de la simulation sont séquentiellement ininterrompues contrairement au travail en fait il y a une perte de temps entre les étapes (l'installation de la pièce et de l'outil ).
- L'efficacité du travailleur et l'état de l'outil et de la machine.

### IV.8 Conclusion

Les solutions d'optimisation dans l'approche outil réel étaient proches des solutions dans un outil de simulation Comme nous l'avons dit, cette discordance réside dans les causes accumulées: elle peut être supprimée en développant le processus de production par le Bureau des Etudes et Méthodes et la réinsertion de la main-d'œuvre les avantages de ces développements sont dus à l'établissement de fabrication.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à modéliser une opération de tournage .

L'intérêt c'était d'améliorer le rendement du processus d'usinage en tenant compte des limitations liées au système machine-outil-pièce

D'une manière générale, une opération d'usinage est réalisée dans plusieurs passes . La question principale est liée à détermination du nombre nécessaire de passes ainsi que les conditions de coupe pour chacune. Dans ce but, nous avons proposé une méthodologie d'optimisation des conditions de coupe une opération à passe multiple en minimisent le temps de production, la consommation en outil ou le coût de production, et en satisfaisant un ensemble de contraintes qui représente les limites de capacité de la machine, de l'outil, des tolérances de la pièce et les conditions générales de sécurité, Les résultats obtenus ont démontré l'influence des conditions de coupe sur les paramètres d'usinage ainsi que les interactions entre ces paramètres . D'autre part, la méthodologie proposée à permet d'étudier les préférences possibles d'un fabricant.

D'une manière générale, on trouve que cette étude a démontré l'utilité de l'outil informatique dans la programmation des opérations d'usinage afin d'augmenter le rendement de ce processus .

D'autre part, nous avons essayé la réalité pour optimiser les conditions de coupe et les comparer avec la solution de l'outil informatique , nous avons constaté que les résultats variaient dans des proportions raisonnables et expliquent les raisons de cet écart de points de compréhension et de développement du processus de production.

## Référence bibliographique

- [1] **Sohir GARA** , « Procédé d'usinage » ELLIPSES Edition Marketing. S.A 2014.
- [2] **Alain Passeron**, «Tournage», Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997.
- [3] **A. Belloufi**, « Cours Procédés de Fabrication », Master Maintenance Industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla.2010.
- [4] **Jean-Pierre cordebois et coll**, « Fabrication Par Usinage », DUNOD, Paris 2003.
- [5] **A. TOUMINE**, « Usinage », INSA de LYON, Groupe conception - productique, 2007 .
- [6] **Rocdacier**, « Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie », 2011.
  
- [7] **Alexandre Toumine**, «Cours D'Usinage », Groupe Conception Production, INSA de Lyon, France.
  
- [8] **J. Vergnas**, « Usinage : Technologie et Pratique », Génie Mécanique DUNOD, ISBN 2-04- 011186-7, BORDAS, Paris 1982
  
- [9] **J. L. Fanchon**« Guide des Sciences et Technologie Industrielle » Edition Nathan Paris France,1994
  
- [10] **R. Laheurte**, « Application de la Théorie du Second Gradient a la Coupe des Matériaux », Thèse de doctorat N° 2935, Université Bordeaux 1, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur, Décembre 2004
  
- [11] **Denis Gelin, Michel Vincent**, « Eléments de Fabrication », Les Editions Foucher, 1995.
  
- [12] **R. butin, M. pinot**, « Fabrication Mécanique, Technologie Tome 3 »
  
- [13] **A. Belloufi , M Assas ,B Barkat** « Utilisation de la programmation Non Linière pour L'optimisation des conditions de coup en tournage » JENM07 , Université de Batna 2007.

- [14] **M.A.YALLESE1** thème magister « 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
- [15] **J. S. Agapiou** , « The Optimisation of Machining Opération Based on a Combined Criterion »
- M. Djenane**, « Optimisation Non Linière des Conditions de coupe en Tournage » Mémoire Magistère . Université de Batna 2001.
- [16] **M. Djenane**, « Optimisation Non Linière des Conditions de coupe en Tournage » Mémoire Magistère . Université de Batna 2001.
- Bettayeb Chouaib, Guerrah Ayoub**, « Optimisation Non Linière des Conditions de coupe » Mémoire de fin d'Etude . Université d'Ouargla 2009.
- [17] **Bettayeb Chouaib, Guerrah Ayoub**, « Optimisation Non Linière des Conditions de coupe » Mémoire de fin d'Etude . Université d'Ouargla 2009.
- [18] **Alain Berro**, « Optimisation Multi Objectif et Stratégies d'Evolution enEnvironnement Dynamique », Université des Sciences Sociales, Toulouse France, 2001.
- [19] **S. Mottel RO04/T107**, « Optimisation Non Linéaire », Université de Technologie de Compiègne , 2003.
- [20] **A. Belloufi, M. Assas, B Barkat**, « Utilisation de la Programmation Non Linéaire pour l'Optimisation des Conditions de Coup en Tournage », JENM07, Université de Batna, 2007
- [21] **M.richard** : « efforts de coupe »,lycée P. Duez cambria , juin 2007.
- [22] **B.HAMADI** : « étude des revêtements durs et applications sur outil de coupe », thèse de magister en mécanique , Université Mentouri Constantine .

## Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons traité le problème d'optimisation des conditions de coupe pour une opération de tournage à passe multiple. Notre but s'était l'amélioration de la qualité économique des produits fabriqués. Celle-là est traduite par la minimisation des coûts d'utilisation de la machine et de l'outil en tenant compte des limitations liées au système machine-outil-pièce. Pour un exemple de chariotage, l'organisation de l'opération est supposée réalisée en un nombre défini des passes identiques d'ébauche et une seule passe de finition. La mission de la phase d'optimisation s'était alors de déterminer les conditions de coupe des passes d'ébauche et de finition, ainsi que le nombre de passes. En utilisant l'outil informatique, la résolution du problème à permet de démontrer l'efficacité de la méthodologie présentée .

**Mots clé :** tournage, opérations à passe multiple , optimisation, conditions de coupe , simulations, Réalité.

**Abstract :** In this thesis, we have dealt with the problem of optimization of the cutting conditions for a multi-pass turning operation. Our goal was to improve the economic quality of the products manufactured. This one is translated by the minimization of the costs of use of the machine and the tool taking into account the limitations related to the machine-tool-room system. For an example of turning, the organization of the operation is assumed to be performed in a defined number of identical roughing passes and a single finishing pass. The mission of the optimization phase was then to determine the cutting conditions of the roughing and finishing passes, as well as the number of passes. Using the computer tool, solving the problem can demonstrate the effectiveness of the methodology presented.

**Key words:** turning, multiple pass operations, optimization, cutting conditions, simulations, Reality.

ملخص:

في هذه المذكرة نعالج مشكل امثلة شروط القطع لعملية الخراطة متعددة التمرير . وهدفنا هو تحسين النوعية الاقتصادية للمنتجات المصنعة. ويترجم ذلك التخفيض في سعر استعمال الالة واداة التصنيع مع مراعاة القيود المتعلقة بنظام الة والقطعة المصنعة . وكمثال لعملية لتسطين التنظيم المقترح هو ان نحقق العملية بعدد معروف من التمريرات المتماثلة الاولية وتمريرة واحدة إتماميه . مهمة طور الامثلة سيكون حينئذ في تحديد شروط القطع لمختلف التمريرات , وكذلك عدد التمريرات , نستعمل اداة الاعلام الالي , ان حل المشكل يسمح ببرهنة بفعالة المنهجية المقدمة .  
**الكلمات المفتاحية :** الخراطة , عملية متعددة التمريرات , الامثلة , شروط القطع , المحاكاة , الحقيقة .