

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenté par : **Mahdjoub Mohammed Omar**
Abi Mouloud Abderrahmane

Thème

Planification optimale des opérations de tournage
multi-passes minimisant les coûts de fabrication et
précisant le programme de remplacement de l'outil

Soutenu publiquement

Le: **13/10/2021**

Devant le jury :

Mr.	M.Abdelkrim	MCA	Président
Mr.	N.Bouhemame	MAA	Examineur
Mr.	T.Ameur	MCA	Encadreur

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicace

Avec joie et plaisir nous dédions cet humble travail
à nos chers parents pour leur patience et leurs encouragements envers nous
depuis l'enfance
et à nos amis pour les merveilleux moments que nous avons passés avec
eux.

Remerciements

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

Je tiens à remercier profondément mon encadreur : Monsieur **Toufik**

.Ameur

qui m'a encouragé à faire le maximum d'efforts dans ce travail, sans ces encouragements ce mémoire n'aurait sans doute pas abouti

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

Merci également à tous les amis qui nous ont aidés dans ce travail.

Tables des matière

Tables des matière

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

Chapitre I

Présentation générale du procédé de tournage

I.1 Introduction.....	2
I.2 Machine à tourner « Tour »	3
I.2.1 Organes d'un tour	3
I.2.2 Classification des machines de tournage	6
I.3 Procédé de tournage	8
I.3.1 Définition	8
I.3.2 Principe de tournage	8
I.3.3 Processus de coupe	9
I.3.4 Opérations de tournage et outils de coupe	10
I.4 Paramètres technologiques de coupe	13
I.4.1 Efforts de coupe	13
I.4.2 Puissance de coupe	13
I.4.3 Température d'interface	13
I.4.4 Usure des outils	14
I.4.5 Durée de vie des outils	15
I.4.6 Rugosité des surfaces usinées	17

Chapitre II

Notions de base sur l'optimisation

II.1 Historique	19
II.2 Définitions	19
II.2.1 Variables d'optimisation	19
II.2.2 Fonction-objectif	19

Tables des matières

II.2.3	Contraintes	19
II.3	Classification des problèmes d'optimisation	20
II.3.1	Problème d'optimisation mono-objectif et multi-objectif	20
II.3.2	Problèmes avec ou sans contraintes	20
II.3.3	Problèmes linéaires et problèmes non linéaires	20
II.3.4	Problèmes à variables continues ou à variables discrètes	21
II.4	Méthodes d'optimisation	21
II.4.1	Méthodes déterministes	21
1)	Les méthodes du gradient	21
2)	La méthode multi start	21
3)	Les méthodes Nelder Mead	22
4)	L'algorithme de séparation-évaluation	22
5)	La méthode de Tunneling	22
II.4.2	Les méthodes probabilistes « stochastiques »	23
1)	La méthode Monte Carlo	23
2)	Le recuit simulé	24
3)	Les algorithmes évolutionnaires	24
4)	Les algorithmes à essaim de particules.	25
5)	La méthode Tabou	25

Chapitre III

Planification optimisée d'une opération de chariotage

II.4	Introduction.....	26
III.2	Problème de planification des opérations de tournage.....	26
III.2.1	Répartition en passes	26
1)	Passe d'ébauche	26
2)	Passe de finition	26
III.2.2	Changement de l'outil	26
III.2.3	Respect des limites du système machine-outil-pièce	27

Tables des matière

a)	Limitation sur l'effort de coupe	27
b)	Limitation sur la puissance	27
c)	Limitation sur l'état de surface	27
III.2.4	Plan de travaille d'une opération de chariotage	27
III.3	Modélisation du problème d'optimisation	27
III.3.1	Variables d'optimisation	28
III.3.2	Critères d'optimisation	28
III.3.2.1	Temps de production	28
III.3.2.2	Consommation en outil	29
III.3.2.3	Coût de production	30
III.3.3	Contraintes d'optimisation	30
III.3.4	Problème d'optimisation retenu	32
III.4	Application	33
III.4.1	Exemple d'application	33
III.4.2	Résultats et discussion	34
	Conclusion générale.....	36
	Références bibliographiques	37

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Présentation générale du procédé de tournage

Figure I. 1: Tour antique	2
Figure I.2 : Machine à tourner « tour »	3
Figure I.3: Le mandarin	4
Figure I.4: Poupée mobile	4
Figure I.5: Boîte des vitesses	5
Figure I.6 : Outil de coupe	5
Figure I.7 : Support de outil	5
Figure I.8 : Tour parallèle	6
Figure I.9 : Tours à copier	7
Figure I.10 : Tour semi- automatiques	7
Figure I.11 : Tour à commande numérique	8
Figure I.12 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage	9
Figure I.13: vitesse de coupe	9
Figure I.14: Vitesse d'avance	10
Figure I.15 : Profondeur de passe	10
Figure I.16: Opération de Chariotage et des outils de coupe	11
Figure I.17: Opération de Dressage et outils de coupe	11

Liste des figures

Figure I.18: Opération d'alésage et outils de coupe	11
Figure I.19: Opération de Perçage et outil de coupe	11
Figure I.20: Opération de Rainurage et outil de coupe	12
Figure I.21: Opération de Chanfreinage et outil de coupe	12
Figure I.22: Opération de Tronçonnage et outil de coupe	12
Figure I.23: Opération de Filetage et outil de coupe	12
Figure I.24: Efforts de coupe	13
Figure I.25: Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil	14
Figure I.26: Evaluation du mécanisme d'usure en fonction de la température de coupe .	15
Figure I.27 : Paramètre de rugosité	17
Figure I.28: Rugosité totale de surface	18

Chapitre II

Notions de base sur l'optimisation

Figure II .1: Méthode du " Tunneling "	23
---	----

Liste des tableaux

Chapitre III

Planification optimisée d'une opération de chariotage

Tableau III.1 : Paramètres techno-économiques d'usinage33

Tableau III.2 : Résultats de la simulation numérique34

Nomenclature

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
V_c	Vitesse de coupe	m/min
N	Fréquence de rotation	tr/min
D	Diamètre de la pièce	mm
V_f	La vitesse d'avance	mm/min
f	Avance par tour	mm/tr
a_p	Profondeur de passe	mm
F_c	L'effort tangentiel de coupe	N
F_f	L'effort axial	N
F_a	L'effort radial	N
F_t	L'effort total	N
K_c	Effort spécifique de coupe.	N/mm^2
A	Section de coupe.	mm^2
P_c	Puissance de coupe	kW
T	Durée de vie de l'outil de coupe.	min/arrêt

Nomenclature

C_v	Constante dépend du couple outil-matière	
n	Exposant de Taylor	
C	dépend de la nuance de l'outil et du matériau usiné	
$\alpha \beta \gamma$	Exposants dépendants de la nuance de l'outil	
V_B	La largeur de l'usure	mm
R_a	Rugosité moyenne arithmétique	μm
R_q	Rugosité moyenne quadratique	μm
R_{max}	le maximum autorise de rugosité de surface.	μm
R_t	Rugosité totale	μm
λ_K	pas de déplacement à chaque itération.	
d_t	L'épaisseur du matériau à enlever	mm
n	nombre de passe par ébauche	
d_{r_i}	Profondeur de passe par ébauche	mm
V_{r_i}	Vitesse de coupe par ébauche	m/min
f_{r_i}	La vitesse d'avance par ébauche	mm/tr
d_s	Profondeur de passe par finition	mm

Nomenclature

V_s	Vitesse de coupe par finition	m/min
f_s	La vitesse d'avance par finition	mm/tr
C_u	Le coût d'usinage	\$/pièce
C_0	Coût machine	\$/min
C_t	Coût d'une arrête de coupe	\$/arrête
$N_{opé}$	Le nombre d'opérations pour un seul outil de coupe	
a_1, a_2, a_3	Constantes	

Introduction

Générale

Introduction Générale

Introduction générale

L'usinage consiste à façonner des différentes formes géométriques sur une pièce brute jusqu'à atteindre la forme finale à produire, ou comme nous l'appelons, la forme fonctionnelle, et c'est en enlevant la matière.

Pour y parvenir, un plan d'action complet doit être établi. Ce plan doit fournir aux opérateurs les données requises relatives à la machine, à l'outil et à la pièce. La détermination des données liées à la préparation de la machine (conditions de coupe) constitue, dans cette étape, l'objectif le plus important car la mesure du succès du processus d'usinage est évaluée sur la base des paramètres techno-économiques (productivité, coût, qualité des surfaces, etc.) produits et qui sont fortement affectés par ces données.

Pour les opérations de tournage à passes multiples sur lesquelles nous concentrons cette étude, la planification de l'action d'usinage est basée sur deux étapes : la détermination du nombre de passes nécessaire pour l'enlèvement de la surépaisseur d'usinage et par la suite la détermination des conditions de coupe liées à chaque passe.

L'objectif identifié, dans ce mémoire, est la planification optimale des opérations de tournage à passes multiples qui minimise le coût total de production et qui respecte les limites liées au système machine-outil-pièce. Le code de calcul recherché doit déterminer, à une seule exécution, le nombre optimal des passes et les conditions de coupe nécessaires pour chacune. En effet, le modèle d'optimisation développé, pour ce but, doit résumer en juste valeur toutes les particularités des opérations de tournage multi-passes.

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

Le chapitre I contient des explications détaillées sur le procédé de tournage et de ce qu'il y est en rapport.

Le chapitre II présente les principes et fondements de l'optimisation.

Le chapitre III est consacré à une étude application consistant à la planification d'une opération de chariotage.

Chapitre I

Présentation générale du procédé de tournage

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

I.1 Introduction:

En industrie, il existe de nombreuses méthodes d'obtention de pièces, y compris des méthodes qui reposent sur la déformation, et il existe des méthodes qui reposent sur l'enlèvement de matière, comme le retournement, car dans ce processus, cela dépend des outils de coupe, où la brute est transformée en la partie qui a une fonction (partie finale).

Le tournage est l'un des procédés les plus anciens. Il a été utilisé de manière simple pour réaliser des œuvres artistiques représentées dans les travaux de bois, des os et de l'ivoire (figure I.1).

Le tour est à l'origine de toutes les machines-outils. Il a grandement contribué au progrès industriel du siècle dernier, car il n'est pas possible d'imaginer un atelier mécanique sans le tour et c'est à cause de son importance dans la fabrication.

Parlant de l'histoire de cette machine. En 1794, un tour parallèle est apparu avec un chariot porte-outils à déplacement longitudinal. Même alors, la rotation des rouleaux était encore lente, mais avec l'invention du moteur électrique, il a connu une réelle accélération au cours du XIXe siècle. Le développement du tour a commencé progressivement pour être un tour à commande numérique car il est devenu des machines avancées, rapides et puissantes.

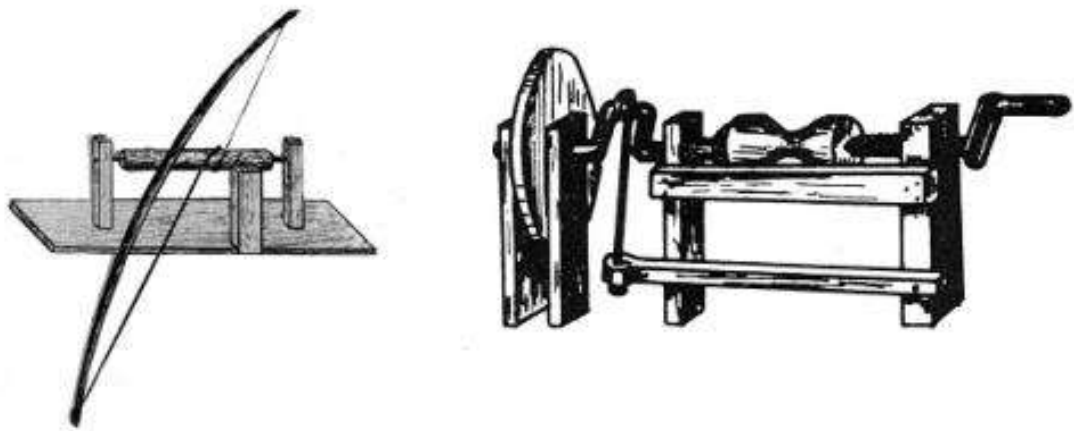


Figure I.1: Tour antique [3].

I.2 Machine à tourner « Tour »:

Cette machine produit des surfaces cylindriques et hélicoïdales (spirales externes et internes). Dans un tour, la pièce est portée par l'extrémité du mandrin où elle a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) qui est transmis à travers la broche. L'outil a deux mouvements dans deux directions différentes:

- **Premier mouvement :** l'outil de coupe peut déplacer en un mouvement de translation parallèlement à l'axe de la broche.
- **Deuxième mouvement :** l'outil de coupe peut se déplacer perpendiculairement à l'axe de la broche.



Figure I.2 : Machine à tourner « tour »

I.2.1 Organes d'un tour:

La machine de tour se compose de nombreuses pièces, mais il y a des éléments très importants dans le processus d'enlèvement de matière qui sont les suivants:

a) **Le mandrin :**

Un élément important de la machine de tour, en acier, est son rôle de serrage serré pour la pièce, et le mandrin qui contient trois mors dans la figure suivante:



Figure I.3 : Le mandarin [2].

b) Poupée mobile:

Cet élément important de la machine n'est pas amovible mais peut se glisser dans le tour et a les fonctions suivantes:

- Grâce à lui, nous pouvons faire un trou au centre de la pièce, avec l'outil de perçage que nous installons dessus.
- Nous pouvons installer de très longues pièces (montage mixte).
- Il peut faire un filetage intérieur (taraudage) et ce après avoir fait un trou sur la pièce.



Figure I.4 : Poupée mobile.

c) Boîte des vitesses :

Il est permis de changer la vitesse de rotation de la machine en déplaçant les leviers dans certaines directions.

La figure suivante concerne la boîte de vitesses de la machine de tour:

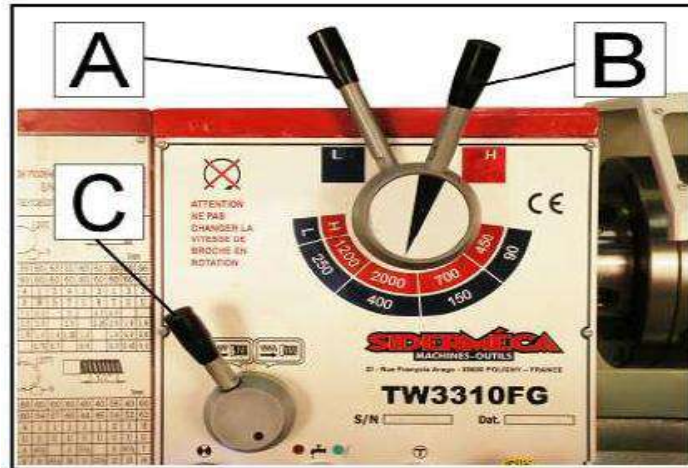


Figure I.5: Boîte des vitesses. [3]

d) Outil de coupe et support:

- **Outil de coupe:**

Composant essentiel de la machine de tournage, c'est un outil qui vise à faire fonctionner la matière en l'enlevant sous forme de copeaux, et ceci grâce à la tête d'outil tranchante.

Il existe plusieurs outils de coupe qui diffèrent selon chaque processus de tournage.



Figure I.6: Outil de coupe.

- **Support d'outil:**

La fonction du porte-outil de coupe est d'assurer la position de l'outil ainsi que sa fixation étanche, celle-ci doit être rapide et sûre:



Figure I.7: Support d'outil.

I.2.2 Classification des machines de tournage :

- **Les tours parallèles conventionnels :**

Ces machines traditionnelles sont utilisées dans la petite et moyenne chaîne de fabrication pour des pièces cylindriques très simples où ils ne sont pas très flexibles. On ne peut réaliser sur ces tours que des surfaces dont les générateurs sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche.

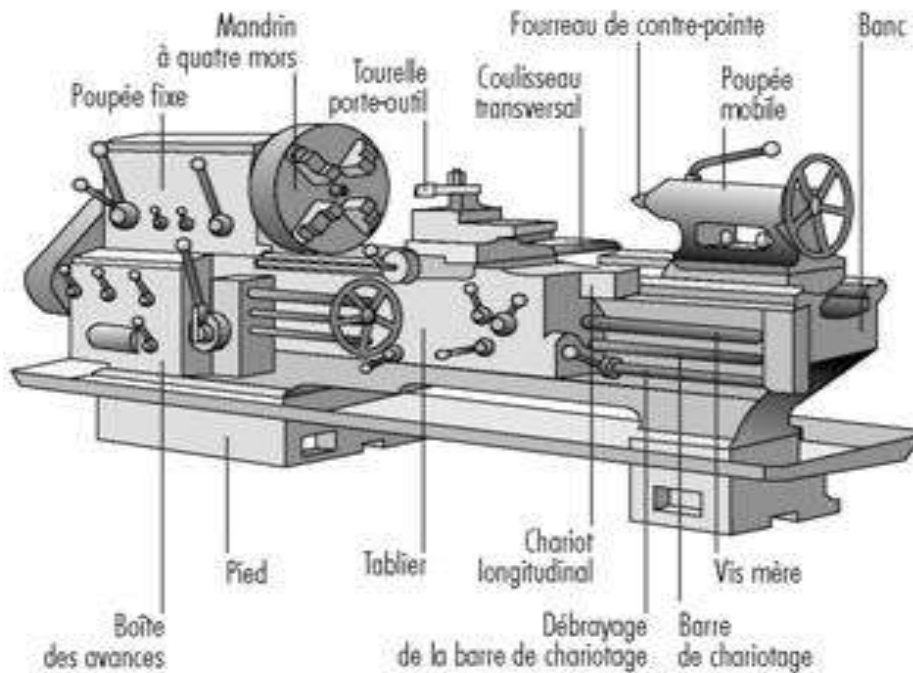


Figure I.8: Tour parallèle [1].

- **Les tours à copier :**

C'est une machine par laquelle on peut produire des pièces par copie (le modèle de la pièce à produire), grâce au système dans la machine, qui est le système de copie hydraulique qui contrôle le mouvement transversal.

Cette machine est flexible car elle peut convenir aux travaux des petites aux grandes chaînes



Figure I.9: Tour à copier [1].

- **Les tours semi-automatiques :**

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonal 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.



Figure I.10: Tour semi- automatiques [1].

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

- **Les tours à commande numérique :**

Le processus de production dans la machine CNC est similaire à celui de la copie de pièces ,La trajectoire de l'instrument est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont l'emplacement est successivement déterminé par un ordinateur à partir d'un dispositif spécial. Programme pour les pièces. De plus, ces tours sont équipés d'un stock d'outils de coupe.

Ces machines sont très flexibles et conviennent aux petites unités de travail répétitives ou aux chaînes.



Figure I.11: Tour à commande numérique [1].

I.3 Procédé de tournage:

I.3.1 Définition :

C'est l'un des procédés de fabrication par enlèvement de matière, dirigé vers la formation de pièces révolutionnaires, où les surfaces internes et externes sont générées en donnant un mouvement de rotation à la pièce qui est lié à l'arbre rotatif (la broche) et un mouvement rectiligne de l'outil monté sur le chariot.

I.3.2 Principe de tournage:

En tournage, on deux mouvements de base utilisés pour enlever la matière de la pièce (figure I.2):

- 1) Le mouvement de coupe affecté à la pièce,
- 2) Le mouvement d'avance affecté à l'outil de coupe.

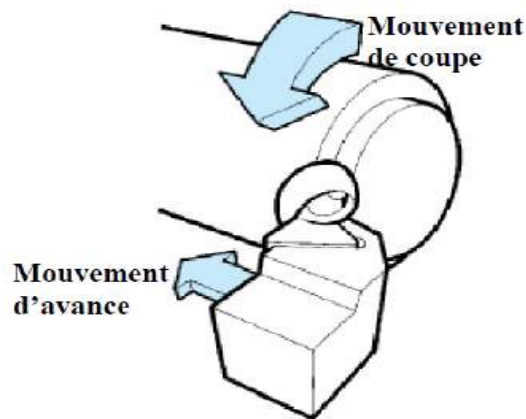


Figure I.12 : Mouvements de coupe et d'avance en tournage [2].

I.3.3 Processus de coupe:

Il s'agit d'un processus dans lequel l'arête tranchante de l'outil de coupe est en contact avec la pièce brute en rotation, est animée d'une profondeur de coupe et d'un mouvement d'avance. En effet, les conditions de coupe, liées à ce procédé, peuvent être résumées par: la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe.

1) Vitesse de coupe:

La vitesse de coupe est ajustée dans la machine de tour en fonction de l'opération effectuée ainsi que de l'outil de coupe. En pratique, cette vitesse est réglée par la vitesse de rotation de la pièce en se basant sur relation suivante:

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000}$$

I.1

D : diamètre de la pièce (mm)

N : vitesse de rotation de la pièce (tr/min)

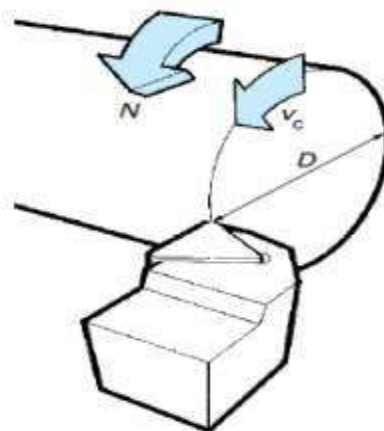


Figure I.13: vitesse de coupe [1].

2) Vitesse d'avance:

Il s'agit de la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal. Cette vitesse est exprimée en fonction de l'avance par tour qui présente la valeur du mouvement de l'outil:

$$V_f = f \times N$$

I.2

f : avance par tour (mm/tr)

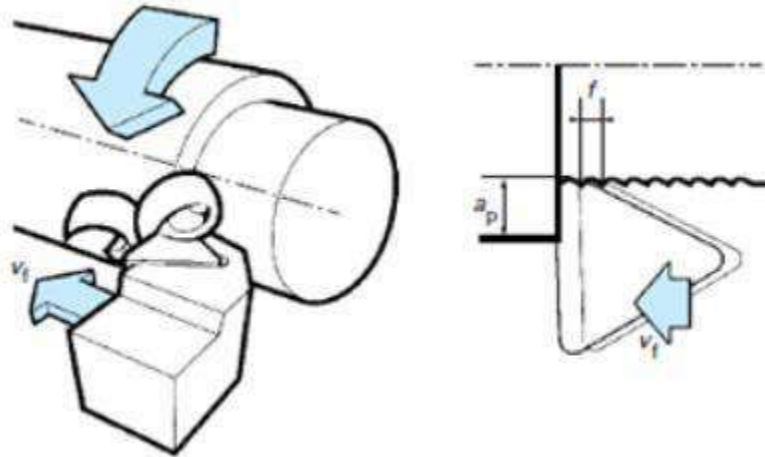


Figure I.14: Vitesse d'avance [1].

3) Profondeur de passe:

Il s'agit de l'épaisseur du matériau à enlever, en une seule passe. C'est aussi la différence entre le rayon avant et après le processus de coupe.

$$a_p = d_1 - d_2$$

I.3

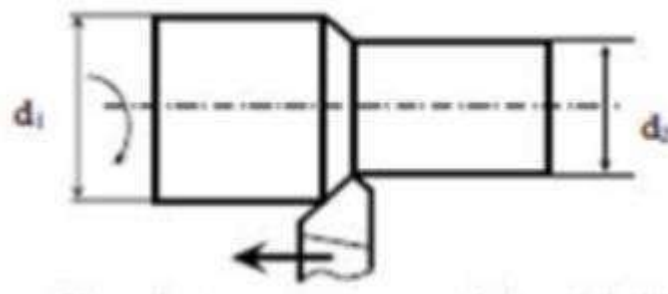


Figure I.15: Profondeur de passe [1]

I.3.4 Opérations de tournage et outils de coupe:

- **Chariotage:** Ce procédé nous permet de fabriquer un cylindre de plus petit diamètre car l'outil se déplace parallèlement à l'axe de rotation de la pièce.

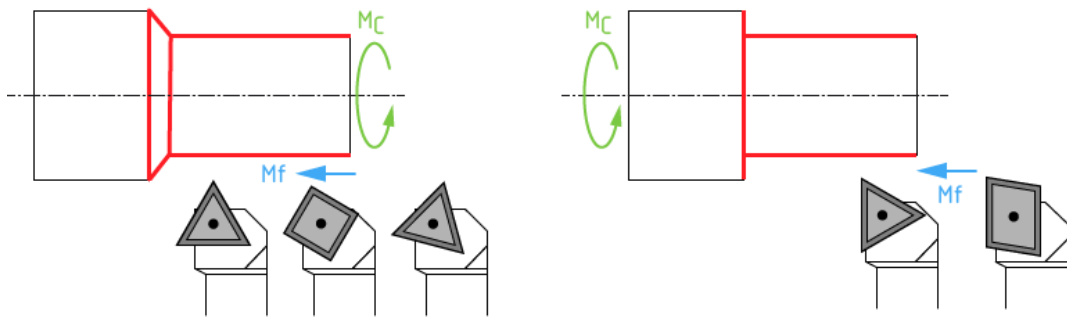


Figure I.16 : Opération de Chariotage et des outils de coupe [1].

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

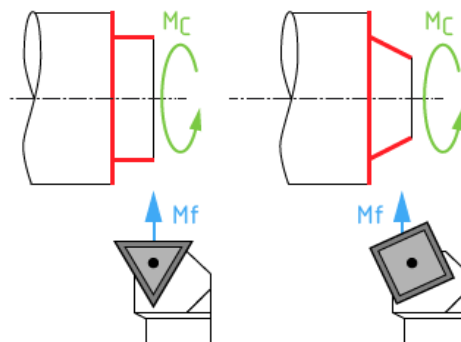


Figure I.17 : Opération de Dressage et outils de coupe [1].

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

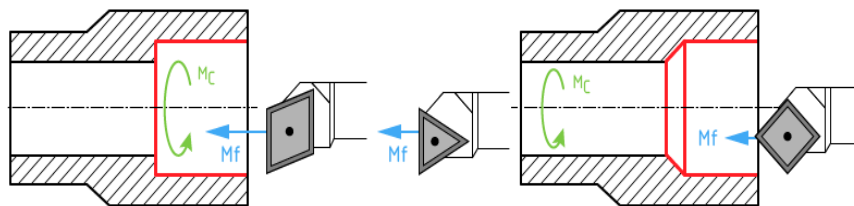


Figure I.18 : Opération d'alésage et outils de coupe [1].

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

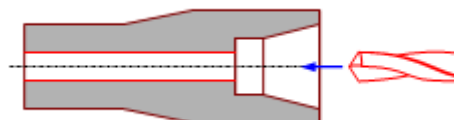


Figure I.19 : Opération de Perçage et outil de coupe [5].

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

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

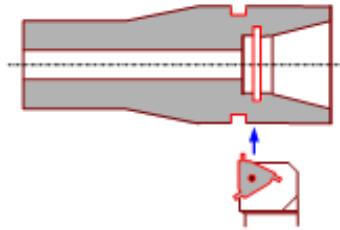


Figure I.20 : Opération de Rainurage et outil de coupe [5].

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

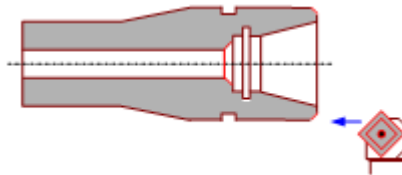


Figure I.21 : Opération de Chanfreinage et outil de coupe [5].

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

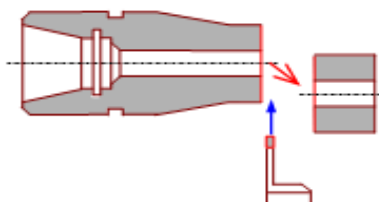


Figure I.22 : Opération de Tronçonnage et outil de coupe [5].

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

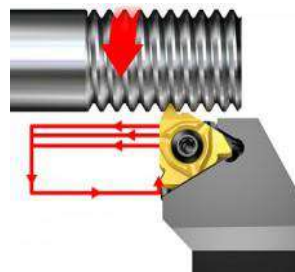


Figure I.23 : Opération de Filetage et outil de coupe.

I.4 Paramètres technologiques de coupe :

I.4.1 Efforts de coupe :

En terme simple, à partir du contact qui a lieu entre l'outil de coupe et la pièce, des efforts de coupe surviennent, et pour leur calcul nous dépendons principalement des conditions de coupe. Sa relation s'écrit sous la forme suivante:

$$F_c = K_c \times A \quad \text{I.4}$$

K_c : effort spécifique de coupe.

A : section de coupe.

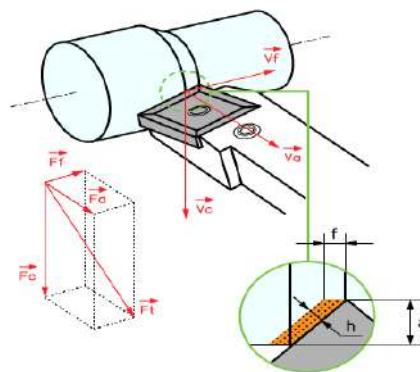


Figure I.24: Efforts de coupe [1].

L'effort total est formulé donc par l'équation de résultante suivante:

$$F_t = \sqrt{F_f^2 + F_a^2 + F_c^2} \quad \text{I.5}$$

Où

F_c, F_f, F_a, F_t : sont, respectivement, les efforts tangentiel, axial, radial et total.

I.4.2 Puissance de coupe :

On a définie la puissance dans le cas générale c'est le produit scalaire entre le vecteur d'effort et vitesse comme suivant :

$$P = \vec{F} \times \vec{V} = F_a \cdot V_a + F_f \cdot V_f + F_c \cdot V_c \quad \text{I.6}$$

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

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad \text{I.7}$$

I.4.3 Température d'interface:

La chaleur joue un rôle très important dans le processus d'élimination de la matière car à l'interface l'outil-pièce cette chaleur est produite à partir de deux sources:

1) déformation plastique qui se produite dans la zone de cisaillement primaire.

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

2) Le contact de l'interface de l'outil de coupe avec la surface de la pièce crée de la chaleur due au frottement.

Des études ont également montré que la température augmente et diminue avec le changement des conditions de coupe (V_c, f, a), par exemple, une augmentation de la profondeur de la passe augmente l'élévation de température et aussi la vitesse de coupe contrôle grandement le changement de température entre l'outil et la pièce.

I.4.4 Usure des outils:

L'outil est l'élément actif lors de toutes les opérations de tournage, car il est soumis à des pressions mécaniques et thermiques très sévères qui provoquent des dommages et détériorations dans un temps relativement court, et tout cela est causé par le frottement à l'interface outil-pièce où une chaleur très élevée se produit qui peut conduire à des effets physiques, chimiques et également aggraver l'usure de l'outil.

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

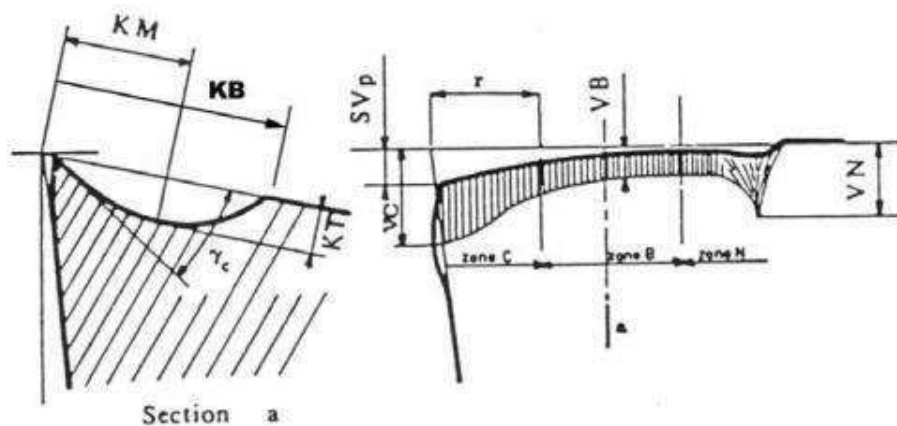


Figure I.25: Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil [1].

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

A. Effet mécanique :

✚ Par adhésion:

Sous l'effet de la pression, de véritables soudures se créent entre l'outil et le copeau par écrasement des aspérités ou par des phénomènes d'adsorption et de solubilité s'il existe une affinité chimique entre les atomes qui constituent les deux surfaces.

Lorsque les jonctions formées se rompent, des fragments de matière provenant du copeau restent accrochés sur la face de coupe de l'outil.

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

✚ Par abrasion:

Il est causé par des particules solides sous forme d'impuretés et de dépôts où elles se trouvent dans la pièce ou proviennent de l'outil lui-même par d'autres mécanismes de corrosion d'adhérence et ainsi les puces sont arrachées de l'outil par des éléments solides qui sont constamment renouvelés pendant les processus de tournage.

✚ Par déformation plastique:

Les déformations plastiques se produisent sous l'effet combiné des grandes pressions et des grandes températures générées pendant l'usinage. Elles apparaissent au niveau de la pointe de l'outil et sur la face de coupe de celui-ci.

B. phénomène physico-chimique :

✚ Par corrosion :

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

✚ Par diffusion:

Aux vitesses de coupe très élevées, les phénomènes de diffusion prédominent. Sous l'effet de la température et de la pression, les atomes diffusent de l'outil vers le copeau ou vice-versa.

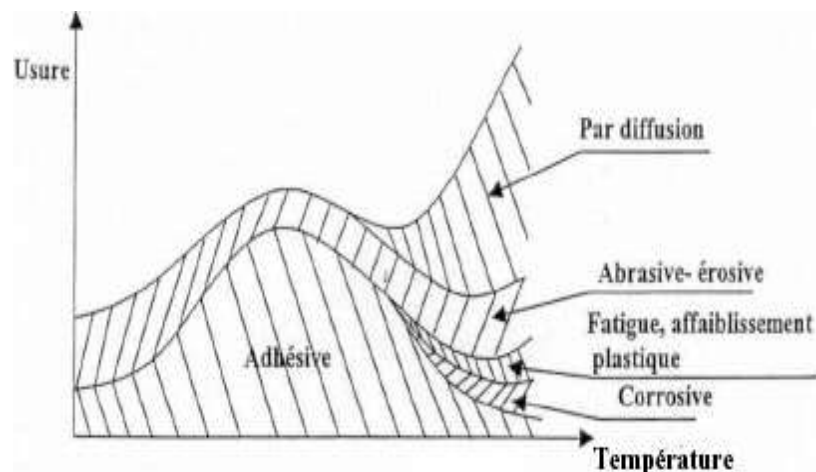


Figure I.26: Evaluation du mécanisme d'usure en fonction de la température de coupe.

I.4.5 Durée de vie des outils :

La durée de vie de l'outil est caractérisée par le temps pour atteindre la valeur limite du critère d'usure.

On choisit comme critère d'usure. On choisit comme critère d'usure l'un des trois critères suivants:

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

- **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 VBB max.
- **L'usure en cratère :** employé seulement pour les outils en carbure métallique, caractérisé par la profondeur du cratère.

Les conditions de coupe sont prises en compte après les lois d'usure, les outils spécifiques ainsi que les matériaux formés sont bien définis, sous certaines conditions de lubrification, et toutes ces lois que nous avons mentionnées sont liées à la durée de vie de l'outil et aux conditions de coupe.

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

$$T = C_v \cdot V_c^n \quad \text{I.8}$$

V_c : Vitesse de coupe.

C_v : Constante dépend du couple outil-matière.

n : Exposant de Taylor.

2) La loi de Gilbert :

C'est une généralisation de la loi de Taylor dans laquelle le scientifique Gilbert a pris en compte la profondeur de la passe a_p et l'avance f , sa relation s'écrit comme suit:

$$T_c = K \cdot V_c^K \cdot f^x \cdot a_p^y \quad \text{I.9}$$

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

x et y : Exposants dépendants de la nuance de l'outil

3) La loi de Kronenberg :

Kronenberg a cherché et proposé une loi en 1968 comme la loi de Taylor mais sans tenir compte de l'avance et de la profondeur de coupe, et a la particularité de donner une valeur limitée de la vitesse de coupe pour une durée de vie nulle.

La relation de Kronenberg s'écrit :

$$T + K = C \cdot V^n \quad \text{I.10}$$

4) La loi de Konig-Depiereux :

Le modèle Konig-Depiereux a été créé en 1969 qui considère l'avance et la profondeur de coupe dans ses taux exponentiels.

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

Il conduit à une représentation correcte de la loi d'usure et son type exponentiel correspond aux courbes empiriques qui déterminent l'usure des outils.

Son équation s'écrit comme suit :

$$T = e^{(-\alpha V^\gamma - \gamma a^\mu - \delta p^\tau)} \quad \text{I.11}$$

Sous la forme logarithmique on obtient :

$$\log T = -\alpha V^\gamma + \beta \quad \text{I.12}$$

Par approches successives, on détermine la valeur de β , ensuite le calcul de α et γ est immédiat.

I.4.6 Rugosité des surfaces usinées:

La création d'une surface usinée met en contact la forme interne et les traces laissées par l'arête de coupe avec la pièce lors de son déplacement relatif.

Cette coupe représente principaux critères de rugosité par rapport à ligne moyenne.

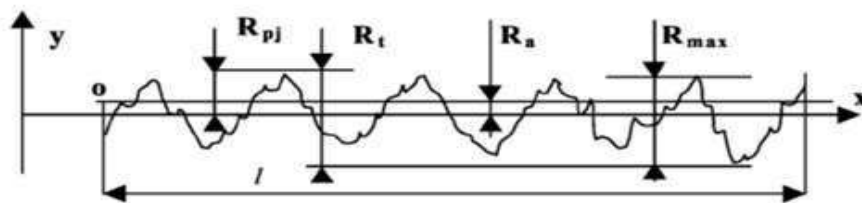


Figure I.27 : Paramètre de rugosité [1].

- **Rugosité moyenne arithmétique R_a :**

Représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad \text{I.13}$$

- **Rugosité moyenne quadratique R_q :**

Ce critère représente l'écart moyen quadratique par rapport à OX:

$$R_q = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{I.14}$$

- **Rugosité max R_{max} :**

Hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité.

- **Rugosité totale R_t :**

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

Chapitre I : Présentation générale du procédé de tournage

Nous pouvons exprimer la rugosité totale par la relation empirique suivant:

$$R_t = \frac{f^2}{8r} \quad \text{I.15}$$

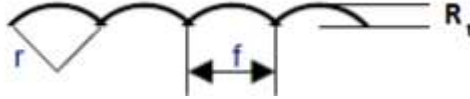


Figure I.28: Rugosité totale de surface [1].

I.5 Conclusion :

Dans le chapitre, nous avons étudié en général la machine de tour, où nous avons appris le principe de son fonctionnement avec mention de tous les types de machines qui existent jusqu'à nos jours, en plus de notre connaissance de toutes les opérations de tour et des outils de coupe, qui à leur tour sont affecté par des facteurs mécaniques et physico-chimiques, qui provoquent l'usure des outils de coupe, ce qui réduit la durée de vie des outils de coupe.

Chapitre II

Notions de base sur l'optimisation

Chapitre II : Notions de base sur l'optimisation

II.1 Historique:

Afin de résoudre les problèmes scientifiques, Newton et Leibnitz ont travaillé sur la mise en œuvre de méthodes qui améliorent le traitement des équations différentielles.

Cauchy a été le premier à appliquer une méthode d'optimisation (la méthode du pas de proportions) pour résoudre un problème sans contrainte. Après ces importantes contributions il n'y a pas eu beaucoup de progrès car à cette époque les mathématiciens et les ingénieurs ne calculaient qu'à la main jusqu'à ce qu'au milieu du XXe siècle avec l'avènement de l'informatique. Après la fin de la Seconde Guerre mondiale, afin de voir de grands développements en termes de techniques d'optimisation, il a été constaté que ces développements étaient en train d'émerger en Grande-Bretagne.

En 1947, l'Américain Danzig proposa un algorithme pour résoudre des problèmes linéaires avec contrainte et en 1957 Bellman a annoncé le principe de l'optimisation des problèmes de programmation dynamique. Puis après tout ce qui est apparu de nombreuses contributions dans les années 60, Zoutendijk et Rosen à la programmation non linéaire en plus de Carroll, Fiacco et Mc.Cormick, dans la même période Duffin, Zener et Paterson ont développé des méthodes de programmation d'ingénierie. Quant à Gomory, il a consacré son travail à développer un algorithme de programmation séparé et il est appelé le père d'optimisation combinatoire. Dantzig, Charnes et Cooper ont accompli la tâche difficile de développer des techniques de programmation aléatoire.

Dernièrement, de nombreuses études se sont tournées vers des techniques d'optimisation basées sur la théorie des jeux que Von Neumann a solidifiées en 1928.

II.2 Définitions:

L'optimisation cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction sur un ensemble.

II.2.1 Variables d'optimisation :

La solution souhaitée au problème doit être représentée par les valeurs des variables de problème pouvant être de nature différente (réelle, entière, booléenne, etc.) et exprimer des données qualitatives ou quantitatives.

II.2.2 Fonction-objectif:

La fonction-objectif dans le problème d'optimisation est la fonction à valeur réelle dont la valeur doit être soit minimisée, soit maximisée sur l'ensemble des alternatives possibles.

II.2.3 Contraintes:

Les fonctions de contraintes définissent le domaine acceptable des variables pour le processus de recherche. De telles contraintes, pouvant être de types égalité ou inégalité.

Chapitre II : Notions de base sur l'optimisation

II.3 Classification des problèmes d'optimisation:

Les problèmes d'optimisation sont classés de plusieurs manières:

1. Selon la nature des variables: si elles sont continues, nous parlons d'un problème continu ou séparé, nous parlons d'un problème combinatoire.
2. Selon la nature du modèle mathématique d'optimisation: il s'agit d'un problème linéaire ou non linéaire.
3. Par le nombre de critères d'optimisation : ou de fonction-objectif car il y a un problème mono-objectif et il y a un problème multi-objectif.
4. En cas de contraintes ou sans de contraintes.

II.3.1 Problème d'optimisation mono-objectif et multi-objectif:

Les problèmes mono-objectifs sont définis par une unique fonction-objectif. Les problèmes multi-objectifs existent quand un compromis est à rechercher entre plusieurs critères contradictoires. Il est éventuellement possible (mais pas nécessairement efficace) de reformuler un problème multi-objectif avec une seule fonction-objectif sous forme d'une combinaison des différents objectifs ou en transformant des objectifs sous forme de contraintes.

II.3.2 Problèmes avec ou sans contraintes:

Il est important de bien distinguer les problèmes où des contraintes existent sur les variables de décision. Ces contraintes peuvent être simplement des bornes et aller jusqu'à un ensemble d'équations de type égalité et de type inégalité. Il est parfois possible d'éliminer une contrainte d'égalité par substitution dans la fonction-objectif. Naturellement, les problèmes avec contraintes sont plus compliqués à résoudre et utilisent des algorithmes spécifiques.

II.3.3 Problèmes linéaires et problèmes non linéaires:

La programmation linéaire est une branche des mathématiques occupée de l'amélioration des fonctions linéaires qui incluent une ou plusieurs variables indépendantes (réelles) soumises à des contraintes (égalité ou inégalité) de la même nature. De plus, elle traite de la solution de problèmes d'optimisation pour lesquels la fonction-objectif et les contraintes sont présentées à l'aide des fonctions des mathématiques linéaires.

Afin de résoudre un problème d'optimisation non linéaire, les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode du gradient, la méthode de la pénalité interne ou externe et la méthode de Newton-Raphson.

Chapitre II : Notions de base sur l'optimisation

II.3.4 Problèmes à variables continues ou à variables discrètes :

Dans certains cas, les variables de décision sont discrètes, le plus souvent sous la forme d'entiers ou de binaires. Le problème d'optimisation est dit, dans ce cas, discret. Au contraire, dans les problèmes d'optimisation continue, les variables peuvent prendre n'importe quelle valeur, ce sont des réels. Les problèmes d'optimisation continue sont généralement plus simples à résoudre. Un problème d'optimisation mêlant de variables continues et variables discrètes est dit mixte.

II.4 Méthodes d'optimisation:

En optimisation, on trouve deux principales classes de méthodes :

II.4.1 Méthodes déterministes:

Il existe de nombreuses méthodes d'optimisation déterministes. Les méthodes locales qui assurent la convergence vers l'optimum de la fonction-objectif le plus proche de la solution courante en explorant son voisinage et les méthodes globales qui s'attachent à faire converger la solution vers l'optimum global de la fonction.

1) Les méthodes du gradient:

Les méthodes de gradient sont les plus anciennes de l'histoire. Elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires en se basant sur une hypothèse essentielle, la connaissance de la dérivée de la fonction-objectif en chacun des points de l'espace. Cette famille de méthodes procède de la façon suivante: On choisit un point de départ x_0 et on calcule le gradient $\nabla f(x_0)$ en ce point. Comme le gradient indique la direction de la plus grande augmentation de f , on se déplace d'une quantité λ_0 dans le sens opposé au gradient et on définit le point x_1 :

$$x_1 = x_0 - \lambda_0 \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|} \quad \text{II.1}$$

Cette procédure répétée engendre la suite des points x_0, x_1, \dots, x_k . Ainsi, pas à pas, la distance entre point d'indice k et l'optimum diminue.

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|} \text{ où } \forall k, \lambda_k > 0 \quad \text{II.2}$$

λ_k est le pas de déplacement à chaque itération.

2) La méthode multi-start :

La méthode multi-start effectue une recherche locale à partir de plusieurs points répartis dans l'espace de recherche. L'efficacité de cette méthode dépend de la bonne adéquation entre le maillage et la forme de la fonction-objectif. Si le maillage est trop grand, la probabilité de trouver l'optimum global sera faible car certaines vallées ne seront pas traitées. Si le maillage est trop petit, la recherche globale sera inefficace car plusieurs points vont être présents dans la même vallée et convergeront donc vers le même

Chapitre II : Notions de base sur l'optimisation

optimum. Pour éviter ce dernier inconvénient, la méthode a été améliorée en introduisant la notion de cluster. Le regroupement des points voisins permet de diminuer le nombre de calculs en évitant les recherches locales redondantes. Les points à partir desquels la recherche locale est relancée sont choisis plus minutieusement dans chaque cluster, l'efficacité de l'algorithme est ainsi augmentée.

3) Les méthodes Nelder Mead :

Elle est uniquement basée sur l'évaluation de la fonction-objectif. Cela rend utilisable pour des fonctions bruitées.

Cette méthode locale effectue une recherche multidirectionnelle dans l'espace d'état. Soit une fonction f à minimiser, on appelle simplexe de \mathbb{R}^n , tout ensemble (x_0, x_1, \dots, x_n) de points de R tel que :

$f(x_{i+1}) \geq f(x_i) \quad \forall i \in [1 \dots n]$ x_n est donc le plus meilleur élément.

Après la construction d'un simplexe initial, l'algorithme va modifier celui-ci en appliquant des calculs de réflexions, expansions et contractions jusqu'à la validation d'un critère d'arrêt.

4) L'algorithme de séparation-évaluation :

Les méthodes par séparation et évaluation sont des méthodes de résolution exacte de problèmes d'optimisation combinatoire introduite par Land et Doig. Une méthode de séparation et évaluation consiste à énumérer implicitement toutes les solutions dans S (l'espace de solutions) en examinant les sous-ensembles de S . L'énumération des solutions du problème consiste à construire un arbre Branch and Bound dont les nœuds sont des sous-ensembles de solutions du problème, et les branches sont les nouvelles contraintes à respecter. La taille de l'arbre dépend de la stratégie du parcours.

Le branch-bound est basé sur trois axes principaux :

- L'évaluation.
- La séparation.
- La stratégie de parcours.

5) La méthode de Tunneling :

Cette méthode recherche l'optimum global d'une fonction en effectuant des recherches successives d'optima locaux telles que la valeur de la fonction s'améliore. L'algorithme se décompose en deux phases : une phase de recherche d'un optimum local et une phase dite de tunneling (figure II.1).

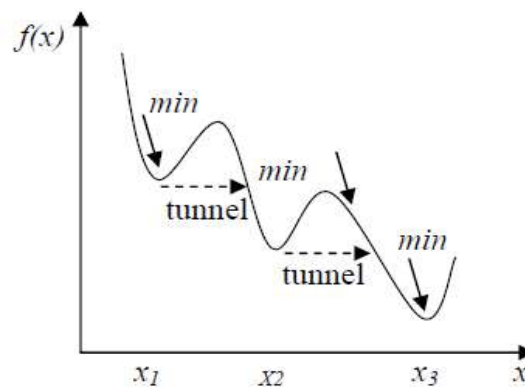


Figure II .1: Méthode du “ Tunneling “

Si on se place dans le cas d'une fonction f à minimiser, la première phase peut utiliser une méthode de gradient pour trouver le minimum local $f^* = f(x^*)$. La deuxième phase consiste à trouver un point x dans une autre vallée à l'aide d'une fonction T de tunneling du type : $T(x) = f(x) - f^* \leq 0$.

II.4.2 Les méthodes probabilistes « stochastiques » :

Les méthodes probabilistes se sont imposées dans plusieurs branches de la science. Le développement rapide de l'automatisme et de l'informatique a donné naissance à de nouvelles méthodes de la théorie des probabilités appliquées à partir des années 50. Il s'agit de la modélisation stochastique et des algorithmes stochastiques qui constituent un terrain où les problèmes ouverts restent nombreux et d'un grand intérêt.

Dans la pratique, les méthodes stochastiques qui connaissent le plus de succès sont : la méthode Monte Carlo, le recuit simulé, les algorithmes évolutionnaires, le branch-bound stochastique et la méthode tabou. Leurs atouts principaux sont les suivants :

- Facilité d'implantation.
- Flexibilité par rapport aux contraintes des problèmes.
- Qualité élevée des solutions.

1) La méthode Monte Carlo :

Les méthodes de Monte Carlo permettent d'estimer des quantités en utilisant la simulation de variables aléatoires. La simplicité, la flexibilité et l'efficacité pour les problèmes en grande dimension de la méthode en font un outil intéressant, pouvant servir d'alternative ou de référence pour d'autres méthodes numériques.

Cette méthode est simplement basée sur l'algorithme suivant :

- a) On génère un point initial x dans l'espace d'état, considéré comme solution courante.
- b) On génère aléatoirement un point x_j .

Chapitre II : Notions de base sur l'optimisation

- c) Si x_j est meilleur que x alors x_j devient la solution courante.
- d) Si le critère d'arrêt est satisfait alors fin sinon retour en b).

2) Le recuit simulé :

La méthode de "recuit simulé" tire son nom et son inspiration de pratiques issues de la métallurgie et plus particulièrement, de la façon dont les métaux sont chauffés puis refroidis. Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffage, maintien en température puis refroidissement contrôlé permettant de modifier les caractéristiques de ce métal. À l'origine, les atomes qui composent le métal sont pris dans une structure cristalline solide. Lorsque le métal est chauffé, l'énergie disponible permet aux molécules de briser leurs liaisons chimiques rendant aux atomes, leur mobilité. Si le métal est refroidi lentement, la mobilité thermique diminue et les atomes cherchent à former de nouvelles liaisons. Chose surprenante, ils se répartissent souvent de manière plus régulière vis-à-vis de leur configuration initiale. Du point de vue chimique, la stabilité du métal tient à l'agencement des atomes et au fait que leurs états respectifs atteignent alors un minimum global d'énergie. Si tout est fait dans les règles de l'art, le métal devient plus souple, plus flexible et présente moins d'irrégularités.

L'algorithme de cette méthode est présenté par :

A partir d'un point initial x_0 , on effectue un déplacement aléatoire (changement d'état).

Si le déplacement mène à x_1 tel que $f(x_1) < f(x_0)$ alors x_1 est accepté.

Sinon, il est accepté avec une probabilité.

$$p = \frac{\exp(-|\Delta(f)|)}{kT}$$

II.3

$\Delta(f)$ représente la distance de déplacement : $x_1 - x_2$

T : est assimilé à une température décroissante au cours du temps.

K: est un constant.

3) Les algorithmes évolutionnaires:

Les algorithmes évolutionnistes, sont une famille d'algorithmes dont le principe s'inspire de la théorie de l'évolution naturelle. L'idée est de faire évoluer un ensemble de solutions à un problème donné, dans l'optique de trouver les meilleurs résultats.

Les algorithmes évolutionnaires se caractérisent par :

- Une représentation spécifique des solutions potentielles du problème.
- Un ensemble d'individus formant une population permettant de mémoriser les résultats à chaque étape du processus de recherche.

Chapitre II : Notions de base sur l'optimisation

- Un processus de création aléatoire d'un individu. Cette caractéristique offre une capacité exploratoire importante à la méthode.
- Un ensemble d'opérateurs de modification permettant de créer de nouvelles solutions à partir des informations mémorisées. Ces opérateurs offrent une capacité de recherche locale à la méthode.
- Une heuristique de notation qui représente la sélection effectuée par l'environnement.
- Une heuristique de sélection.
- Un critère d'arrêt de l'algorithme.

On distingue plusieurs types d'algorithmes évolutionnaires.

Les algorithmes génétiques : sont inspirés des mécanismes de l'évolution naturelle.

La programmation génétique: est une extension des algorithmes génétiques dans laquelle les individus sont des programmes. Le génotype d'un individu est constitué d'un alphabet et se présente sous forme arborescente.

4) Les algorithmes à essaim de particules :

Les algorithmes à essaim de particules ont été introduits, par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995.

Cet algorithme s'inspire à l'origine du monde du vivant. Il s'appuie notamment sur un modèle développé par Craig Reynolds à la fin des années 1980, permettant de simuler le déplacement d'un groupe d'oiseaux.

Cette méthode d'optimisation se base sur la collaboration des individus entre eux. Elle a d'ailleurs des similarités avec les algorithmes de colonies de fourmis, qui s'appuient eux aussi sur le concept d'auto-organisation. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents peut posséder une organisation globale complexe.

5) Méthode Tabou :

Développée dans un cadre particulier par Glover en 1986, c'est une méthode heuristique de recherche locale utilisée pour résoudre des problèmes complexes et/ou de très grande taille.

Le principe de la méthode Tabou est de poursuivre la recherche de solutions même lorsqu'un optimum local est rencontré et ce,

Qu'en permettant des déplacements qui n'améliorent pas la solution

Qu'en utilisant le principe de mémoire pour éviter les retours en arrière.

Chapitre III

Planification optimisée d'une opération de chariotage

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

III.1 Introduction:

Une opération de chariotage (tournage) consiste à enlever un volume de matière de la pièce afin d'atteindre un nouveau diamètre inférieur au diamètre initiale.

Dans la plus parts des cas, cette quantité ne peut être coupée qu'en plusieurs passes, chacune de ces passes étant réalisée avec des profondeurs différentes, mais leur total ne doit pas dépasser la surépaisseur à enlever.

III.2 Problème de planification des opérations de tournage :

Le problème de planification de cette opération consistera à déterminer, les conditions de coupe pour les passes d'ébauche et les conditions de coupe pour la seule passe de finition [9].

III.2.1 Répartition en passes :

Ce sont les passes que l'opérateur effectue sur la pièce brute pour atteindre les dimensions finales. Nous aurons, dans ce cas, deux types de passes : les passes d'ébauche et celles de finition.

1) Passe d'ébauche :

C'est une passe réalisée pour enlever la plus grande quantité de matière dans un temps minimal. Elle peut être réalisée avec une grande profondeur de passe et une vitesse de coupe un peu lente, car dans ce stade, nous ne voulons pas obtenir une bonne surface.

2) Passe de finition :

C'est la dernière passe d'enlèvement de matière de la pièce brute. Elle se fait avec une faible profondeur et une vitesse de coupe, plus ou moins, élevée afin d'obtenir un bon état de surface (rugosité).

III.2.2 Changement de l'outil :

En tournage, l'outil de coupe est changé après avoir un indice de défaillance. Dans cette situation, l'outil doit être d'abord retiré de la pièce avant de procéder au remplacement car on ne peut pas démonter et remonter un outil engagé dans la pièce.

Pour une meilleure organisation de l'usinage, l'indice de défaillance peut être relié au nombre d'opérations réalisées. En effet, un outil ne doit être remplacé qu'après avoir réaliser le nombre exact prédéterminé des opérations.

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

III.2.3 Respect des limites du système machine-outil-pièce :

L'amélioration du travail est souvent requise en suivant un ensemble de recommandations qui consistent à ne pas dépasser les limites de coupe. Ainsi et pour la stabilité du processus de coupe et le respect des qualités requises de la pièce, ces limites peuvent être résumées en :

- a) **Limitation sur l'effort de coupe :** L'effort de coupe doit être inférieur à la force de coupe limite qui présente la capacité limite des systèmes de fixation.
- b) **Limitation sur la puissance :** La puissance nécessaire à la coupe doit être inférieure à une puissance limite admise par la machine.
- c) **Limitation sur l'état de surface:** L'état de surface résultante d'usinage doit être inférieur à une rugosité maximale imposée par le fabricant [9].

III.2.4 Plan de travail d'une opération de chariotage :

La planification des opérations de tournage consiste, généralement, à répartir le processus de coupe en nombre de passes dont la dernière est dédiée à la finition. Afin de passer à la mise en application du plan d'usinage, les conditions de coupe liées à chacune des passes d'ébauche et de la passe de finition doivent être déterminées préalablement.

La planification optimale du processus de tournage consiste à trouver le nombre optimal des passes d'ébauche et les conditions de coupe liées à chacune.

III.3 Modélisation du problème d'optimisation :

Les passes d'ébauches ont une probabilité d'être réalisées entre 0 et 100 %. On affecte alors, pour chaque passe d'ébauche ' i ', une variable combinatoire p_i d'une valeur réelle entre 0 et 1. Cette variable décide l'existence de la passe en question dans le programme d'usinage. Cette variable est donnée par :

$$\begin{cases} 0 \leq p_i \leq 0.5, & \text{la passe figure dans le programme} \\ 0.5 < p_i \leq 1, & \text{la passe ne figure pas dans le programme} \end{cases}$$

Dans cette étude, nous proposons de prendre en considération, dans le programme d'usinage, toutes les passes d'ébauche possibles. Par la suite, le processus d'optimisation déterminera les passes qui doivent être prises à partir de la valeur des variables combinatoire.

Le nombre maximal de passes d'ébauche peut être formulé par :

$$n = \frac{(d_t - d_{smin})}{d_{rmin}}$$

III.1

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

III.3.1 Variables d'optimisation :

Dans le processus de tournage, chaque passe est caractérisée par sa profondeur, sa vitesse de coupe et son avance. En effet, on affecte pour chaque passe d'ébauche 'i' quatre (04) variables : la variable combinatoire p_i , une profondeur d_{ri} , une vitesse de coupe V_{ri} et un avance f_{ri} . Pour l'unique passe de finition, on affecte trois (03) variables : une profondeur d_s , une vitesse de coupe V_s et un avance f_s .

III.3.2 Critères d'optimisation :

Afin d'améliorer les processus de tournage, les conditions de coupe doivent être choisis de manière à augmenter l'apporte économique, par exemple, en réduisant le coût de production et en augmentant la productivité et la durée de vie des outils de coupe.

III.3.2.1 Temps total de production :

Le temps total exigé pour la réalisation d'une passe est la somme des temps nécessaires pour la coupe, le changement de l'outil, le retour rapide de l'outil et le temps de montage et de démontage de la pièce.

Il s'exprime par la relation :

$$T_u = t_m + t_{cs} \left(\frac{t_m}{T} \right) + t_r \quad \text{III.2}$$

T : est la durée de vie d'une arrête de coupe.

t_m : est le temps machine.

t_{cs} : est le temps de changement d'outil.

t_r : est le temps de retour rapide de l'outil.

En chariotage, le temps machine est donnée par :

$$t_m = \frac{\pi.D.L}{1000.V_c.f} \quad \text{III.3}$$

Où :

D : est le diamètre de la pièce.

L : est la longueur de la partie de la pièce à usinée.

A partir de la loi de Taylor développée par la suite par Gilbert, la durée de vie d'une arrête de coupe est donnée par l'équation suivante :

$$T = C^{1/a_3} \cdot V_c^{-1/a_3} \cdot f^{-a_1/a_3} \cdot d^{-a_2/a_3} \quad \text{III.4}$$

Où :

a_1 , a_2 et a_3 sont des exposants, C est une constante.

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

Pour une opération entière, le temps de production est donné par la somme des temps nécessaires pour la préparation t_h , l'ébauche T_e et la finition T_f :

$$T_u = t_h + T_f + T_e \quad \text{III.5}$$

Le temps d'usinage en ébauche est donné par :

$$T_e = \sum_{i=0}^n p_i \left(t_{mr_i} + t_{cs} \left(\frac{t_{mr_i}}{T_{r_i}} \right) + t_r \right) \quad \text{III.6}$$

$$\text{Où} \quad t_{mr_i} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V_{r_i} \cdot f_{r_i}} \quad \text{et} \quad T_{r_i} = C^{1/a_3} \cdot V_{r_i}^{-1/a_3} \cdot f_{r_i}^{-a_1/a_3} \cdot d_r^{-a_2/a_3}$$

Le temps d'usinage de finition est donné par :

$$T_f = t_{ms} + t_{cs} \left(\frac{t_{ms}}{T_s} \right) + t_r \quad \text{III.7}$$

$$\text{Où} \quad t_{ms} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V_s \cdot f_s} \quad \text{et} \quad T_s = C^{1/a_3} \cdot V_s^{-1/a_3} \cdot f_s^{-a_1/a_3} \cdot d_s^{-a_2/a_3}$$

D'où on obtient la formule finale du temps total de production:

$$T_u = t_h + \left(t_{ms} + t_{cs} \left(\frac{t_{ms}}{T_s} \right) + t_r \right) + \sum_{i=0}^n p_i \left(t_{mr_i} + t_{cs} \left(\frac{t_{mr_i}}{T_{r_i}} \right) + t_r \right) \quad \text{III.8}$$

III.3.2.2 Consommation en outil :

L'enlèvement de matière provoque aussi la dégradation de l'outil. Sachant que ce dernier est caractérisé par une durée de vie bien déterminée, il doit être consommé avec le temps d'emploi. En effet, la consommation liée à chaque est calculée par la formule suivante [9]:

$$\varepsilon = \frac{t_m}{T} \quad \text{III.9}$$

Pour une opération entière de chariotage, cette consommation s'écrit comme suit :

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_e \quad \text{III.10}$$

Où ε_e est la consommation en ébauche. Elle est égale à:

$$\varepsilon_e = \sum_{i=0}^n p_i \left(\frac{t_{mr_i}}{T_{r_i}} \right) \quad \text{III.11}$$

Et ε_f est la consommation en finition. Elle est égale à :

$$\varepsilon_f = \frac{t_{ms}}{T_s} \quad \text{III.12}$$

D'où la relation finale devient :

$$\varepsilon = \frac{t_{ms}}{T_s} + \sum_{i=0}^n p_i \left(\frac{t_{mr_i}}{T_{r_i}} \right) \quad \text{III.13}$$

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

III.3.2.3 Coût total de production :

Le coût de production par pièce est donné sous la forme de la somme du coût nécessaire à l'usinage lié au temps de production et du coût de l'outil utilisé pour la coupe [8].

$$C_u = C_0 \cdot T_u + C_t \cdot \varepsilon \quad \text{III.14}$$

Où :

C_0 : est le coût machine en (\$/min).

C_t : est le coût d'une arrête de coupe en (\$/arrête).

En effet, le coût total d'une opération de chariotage peut être formulé par :

$$C_u = C_0 \left[t_h + \left(t_{m_s} \left(1 + \frac{t_{cs}}{T_s} \right) + t_r \right) + \sum_{i=1}^n p_i \left(t_{m_{ri}} \left(1 + \frac{t_{cs}}{T_{ri}} \right) + t_r \right) \right] + C_t \left[\frac{t_{m_s}}{T_s} + \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{t_{m_{ri}}}{T_{ri}} \right) \right] \quad \text{III.15}$$

III.3.3 Contraintes d'optimisation :

Ce sont des limitations que l'on peut formuler à travers des capacités du système Machine-outil-Pièce. Elles présentent les délimitations du domaine de recherche des solutions. Dans notre cas, les contraintes considérées sont les suivantes :

✚ Limitations sur la profondeur de passe :

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

$$d_{r_{i_{min}}} \leq d_{r_i} \leq d_{r_{i_{max}}} \quad \text{III.16}$$

$$d_{s_{min}} \leq d_s \leq d_{s_{max}} \quad \text{III.17}$$

✚ Limites de vitesse de coupe :

La vitesse de coupe doit être comprise dans les limites de validité du modèle de la loi de la durée de vie établie [8]:

$$V_{min} \leq V_{r_i} \leq V_{max} \quad \text{III.18}$$

$$V_{min} \leq V_s \leq V_{max} \quad \text{III.19}$$

✚ limitation sur l'intervalle des avances :

L'avance doit être comprise entre deux valeurs extrêmes programmables sur la machine-outil [8].

$$f_{r_{min}} \leq f_{r_i} \leq f_{r_{max}} \quad \text{III.20}$$

$$f_{s_{min}} \leq f_s \leq f_{s_{max}} \quad \text{III.21}$$

Les contraintes liées à la physique du processus de coupe doivent être prises en compte afin d'obtenir une optimisation globale du processus d'usinage.

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

✚ Limitation sur l'effort de coupe :

L'effort de coupe est limité par la valeur de force maximale F_{max} supportée par les systèmes de fixation :

$$F_c = k_1 f^u d^v \leq F_{max} \quad \text{III.22}$$

k_1 , u et v : sont, respectivement, le coefficient spécifique et les exposantes de la force de coupe.

En ébauche :

$$F_{ri} = k_1 f_{ri}^u d_{ri}^v \leq F_{max} \quad \text{III.23}$$

En finition :

$$F_s = k_1 f_s^u d_s^v \leq F_{max} \quad \text{III.24}$$

✚ Limitation sur la puissance maximale admis par la machine-outil :

La puissance absorbée par la coupe doit être inférieure à la puissance admise par la machine P_{max} :

$$P = \frac{F_c V_c}{60000 \eta} \leq P_{max} \quad \text{III.25}$$

En ébauche :

$$P_{ri} = \frac{F_{ri} V_{ri}}{60000 \eta} = \frac{k_1 f_{ri}^u d_{ri}^v V_{ri}}{60000 \eta} \leq P_{max} \quad \text{III.26}$$

En finition :

$$P_s = \frac{F_s V_s}{60000 \eta} = \frac{k_1 f_s^u d_s^v V_s}{60000 \eta} \leq P_{max} \quad \text{III.27}$$

✚ Limitation sur l'état de surface :

Elle est présentée par une limitation sur la rugosité de surface:

$$R_a = \frac{32.1 f^2}{r_e} \leq R_{amax} \quad \text{III.28}$$

En ébauche :

$$R_{ri} = \frac{32.1 f_{ri}^2}{r_e} \leq R_{rmax} \quad \text{III.29}$$

En finition :

$$R_s = \frac{32.1 f_s^2}{r_e} \leq R_{smax} \quad \text{III.30}$$

r_e : est le rayon de bec de l'outil.

R_{rmax} et R_{smax} sont, respectivement, les limites de rugosité en ébauche et en finition.

✚ Limitation sur la surépaisseur d'usinage :

La profondeur totale de coupe d_t doit être égale à la somme des profondeurs de passe en ébauche et la profondeur de passe en finition.

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

$$d_t = d_s + \sum_{i=0}^n p_i d_{r_i} \quad \text{III.31}$$

✚ Contrainte liée au changement de l'outil :

Afin d'assurer que l'outil que soit dégagé de la pièce lors de son changement, l'indice de sa défaillance est liée au nombre d'opérations réalisées par ce même outil (n_p). Ce nombre doit être entier. En effet et pour ce raison organisationnel, on introduit la contrainte suivante :

$$\sin(n_p \times \pi) = 0 \quad \text{III.32}$$

D'autre part, le nombre d'opérations réalisées par une seule arête de coupe (outil) peut calculer par l'inverse de la consommation totale en outil. Soit :

$$n_p = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{\frac{t_{m_s}}{T_s} + \sum_{i=0}^n p_i \left(\frac{t_{m_{r_i}}}{T_{r_i}} \right)} \quad \text{III.33}$$

Par conséquent, la contrainte liée au changement de l'outil est donnée par:

$$\sin \left(\frac{\pi}{\frac{t_{m_s}}{T_s} + \sum_{i=0}^n p_i \frac{t_{m_{r_i}}}{T_{r_i}}} \right) = 0 \quad \text{III.34}$$

III.3.4 Problème d'optimisation retenu :

Dans le but de réalisation d'une optimisation globale des conditions de coupe, le problème d'optimisation retenu, dans cette étude, est basé sur l'obtention d'un coût d'usinage minimal. Ce problème est présenté par le modèle mathématique suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } C_u = C_0 \left[t_h + \left(t_{m_s} \left(1 + \frac{t_{cs}}{T_s} \right) + t_r \right) + \sum_{i=1}^n p_i \left(t_{m_{r_i}} \left(1 + \frac{t_{cs}}{T_{r_i}} \right) + t_r \right) \right] + \\ \quad C_t \left[\frac{t_{m_s}}{T_s} + \sum_{i=1}^n p_i \left(\frac{t_{m_{r_i}}}{T_{r_i}} \right) \right] \\ \text{Où} \\ \quad t_{m_{r_i}} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V_{r_i} \cdot f_{r_i}}, \quad T_{r_i} = C^{1/a_3} \cdot V_{r_i}^{-1/a_3} \cdot f_{r_i}^{-a_1/a_3} \cdot d_{r_i}^{-a_2/a_3} \\ \quad t_{m_s} = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V_s \cdot f_s}, \quad T_s = C^{1/a_3} \cdot V_s^{-1/a_3} \cdot f_s^{-a_1/a_3} \cdot d_s^{-a_2/a_3} \\ \text{Sous} \\ \quad d_{r_{i_{\min}}} \leq d_{r_i} \leq d_{r_{i_{\max}}}, \quad d_{s_{\min}} \leq d_s \leq d_{s_{\max}} \\ \quad V_{\min} \leq V_{r_i} \leq V_{\max}, \quad V_{\min} \leq V_s \leq V_{\max} \\ \quad f_{\min} \leq f_{r_i} \leq f_{\max}, \quad f_{\min} \leq f_s \leq f_{\max} \\ \quad F_{r_i} = k_1 f_{r_i}^\mu d_{r_i}^\nu \leq F_{\max}, \quad F_s = k_1 f_s^\mu d_s^\nu \leq F_{\max} \\ \quad P_{r_i} = \frac{k_1 f_{r_i}^\mu d_{r_i}^\nu V_{r_i}}{60000\eta} \leq P_{\max}, \quad P_s = \frac{k_1 f_s^\mu d_s^\nu V_s}{60000\eta} \leq P_{\max} \\ \quad R_{r_i} = \frac{32.1 f_{r_i}^2}{r_e} \leq R_{r_{\max}}, \quad R_s = \frac{32.1 f_s^2}{r_e} \leq R_{s_{\max}} \\ \quad d_t = d_s + \sum_{i=0}^n p_i d_{r_i} \\ \quad \sin \left(\frac{\pi}{\frac{t_{m_s}}{T_s} + \sum_{i=1}^n p_i \frac{t_{m_{r_i}}}{T_{r_i}}} \right) = 0 \end{array} \right. \quad \text{III.35}$$

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

III.4 Application :

Dans notre application, nous définirons le programme pour une Planification optimisée d'une opération de chariotage.

III.4.1 Exemple d'application :

Nous proposons, dans cet exemple, d'étudier le problème de planification d'une opération de chariotage (tournage). Les données techno-économiques liées à cette opération sont présentées dans le tableau ci-dessous :

paramètre	valeur	paramètre	valeur	paramètre	valeur
L (mm)	303	V_{min} (m/min)	50	$R_{r\ max}$ (μm)	25
D (mm)	50	V_{max} (m/min)	500	$R_{s\ max}$ (μm)	2.5
r_e (mm)	1.2	f_{min} (mm/rev)	0.1	F_{max} (N)	1960
C	227	f_{max} (mm/rev)	0.9	P_{max} (kW)	5
a_1, a_2, a_3	0.2, 0.35, 0.15	$d_{r\ max}$ (mm)	4	η	0.85
k_1, μ, ν	1058, 0.75, 0.95	$d_{r\ min}$ (mm)	1	t_h (min/pièce)	0.75
C_0 (\$/min)	0.5	$d_{s\ max}$ (mm)	2	t_{cs} (min/edge)	1.5
C_t (\$/edge)	2.5	$d_{s\ min}$ (mm)	0.5	t_r min)	0.5

Tableau III.1 : Paramètres techno-économiques d'usinage.

Afin de garantir un certain niveau de robustesse, la planification se fait pour de différentes profondeurs de coupe d_t de 6 à 12 mm. Les plans d'usinage obtenus, à travers cette étude, doivent contenir le nombre des passes d'ébauche requises et les conditions de coupe optimales pour chacune ainsi que les conditions de coupe pour la passe de finition.

Nous utilisons, pour le traitement de ces problèmes issus, un code de calcul implanté sur **MATLAB** permettant d'obtenir, en une seule exécution, toutes les données requises pour la planification optimale de condition de coupe.

La résolution du problème d'optimisation se fait à l'aide de la fonction "**ga**" basée sur les algorithmes génétiques. Dans ce but, la fonction-objectif et les contraintes sont introduits à l'aide des fichiers d'extension **.m**. Cette présentation permet d'évaluer ces fonctions à chaque itération.

Partant de la notion de base des algorithmes génétiques qui repose sur l'exploration de l'espace de recherche en utilisant les relations probabilistes (stochastique), chaque exécution du code de calcul peut donner un résultat différent. Dans le but d'obtenir les meilleurs résultats, nous avons effectué pour chaque cas un nombre important d'exécutions allant jusqu'à dix (10) fois.

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

III.4.2 Résultats et discussion :

Les meilleurs résultats obtenus par les codes de calcul élaboré sont présentés dans le tableau suivant :

d_t [mm]	Ebauche				Finition			C_u [\$]	Nombre d'opérations par arête
	n	d_r [mm]	V_r [m/min]	f_r [mm/tr]	d_s [mm]	V_s [m/min]	f_s [mm/tr]		
6	1	4	173.44	0.251	1.99	186.02	0.292	2.19	8
7	2	2.65	89.21	0.633	1.37	159.53	0.281	2.42	19
		2.97	125.51	0.563					
8	2	3.64	111.82	0.419	1.75	213.18	0.266	2.56	10
		3.60	108.84	0.633					
9	3	2.48	106.48	0.716	1.9	122.3	0.295	2.89	13
		1.75	134.5	0.894					
		2.84	123.46	0.516					
10	3	2.23	88.34	0.726	1.46	181.2	0.298	3.03	8
		2.86	148.75	0.513					
		3.43	151.67	0.380					
12	4	2.78	127.28	0.492	1.22	145.46	0.276	3.58	7
		3.63	127.05	0.419					
		3.32	152.55	0.417					
		1.02	178.38	0.796					

Tableau III.2 : Résultats de la simulation numérique.

L'analyse des résultats obtenus conduit aux conclusions suivantes :

- L'augmentation du nombre de passes d'ébauche avec l'augmentation de la profondeur totale de coupe. Cela est justifier, d'un part, par la limite de la capacité de coupe de l'outil, et d'autre part, par la recherche de meilleur temps de coupe.
- L'augmentation du coût optimal de production avec l'augmentation de la profondeur totale de coupe. Celle-là est tout-à-fait normale, car l'enlèvement d'une quantité de matière plus importante nécessite un coût plus important.
- Le nombre d'opérations par arête est, plus au moins, dispersé. Par exemple, 8 par arête pour une profondeur de 6 mm, 19 pour 7 mm, 10 pour 8 mm et 13 pour 9 mm. Cette dispersion est due à la

Chapitre III : Planification optimisée d'une opération de chariotage

possibilité de minimisation du coût total de production par la minimisation du temps total de production qui conduit automatiquement à la maximisation de la consommation totale en outil et par conséquent à la diminution du nombre d'opérations par arête. De la même manière, la minimisation du coût total de production peut être réalisée à travers la minimisation de la consommation totale en outil qui produit un nombre d'opérations par arête réduit. Cette analyse est basée sur le fait que le coût total de production est donné par la combinaison du temps total de production et la consommation totale en outil.

D'une manière générale, l'utilisation de la méthode d'optimisation développée dans cette étude démontre la possibilité d'obtenir toutes les informations nécessaires pour la planification optimale des opérations de tournage en une seule étape et par un seul code de calcul. Cette caractéristique est testée pour plusieurs profondeurs de coupe.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent les capacités importantes des méthodes d'optimisation stochastiques (algorithmes génétiques) dans la résolution des problèmes non linéaires de grande taille car le nombre de variables utilisées pour la modélisation du problème étudié allant de 27 variables, pour une profondeur totale de coupe de 6 mm, à 51 variables pour une profondeur de 12 mm.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Il est toujours difficile de planifier de manière optimale les opérations de tournage à passe multiples. Les difficultés de ce processus résident dans la recherche simultanée du nombre optimal des passes et des conditions de coupe pour chacune.

Nous avons proposé, dans ce travail, une méthodologie complète pour l'optimisation des conditions de coupe pour les opérations de tournage multi-passes basée sur un modèle très réaliste qui prit en considération même l'instant exacte de remplacement d'outil. Ce modèle est construit sur la base de deux notions :

1. la considération du nombre maximal de passes possibles.
2. la réalité qu'un outil doit être remplacé que lorsqu'il est dégagé de la pièce.

Cela a conduit à un problème robuste qui contient un nombre important de variables et un ensemble plus ou moins complexe de contraintes. Les complexités du modèle utilisé a nécessité l'emploi d'une méthode stochastique, l'algorithme génétique, pour la résolution du problème.

Afin de garantir un certain niveau de robustesse, l'exemple d'application traité contient plusieurs situations, chacune est liée à une surépaisseur différente. Dans tous les cas, les résultats obtenus ont permis de présenter les intérêts de l'optimisation dans le domaine de planification des opérations d'usinage. Ils ont démontré l'efficacité de la méthodologie présentée dans cette étude.

Bibliographique

- [1] **Belahcene Issam** et **Hamel Ishak** «Intégration de l'optimisation Combinatoire dans la Planification des opération d'usinage » (Université Kasdi Merbah Ouargla) 2017/2018.
- [2] **MAAMRI Deyaeddine** et **NECIB Abderrahmane** «Optimisation des Paramètres de Coupe pour Minimiser la Consommation d'Energie Pendant le Tournage »(Université Kasdi Merbah Ouargla) 2015.
- [3] **Mazouzi Mouheiddine** et **Karkouri Mohammed** « Numérisation d'un tour conventionnel » (Université Kasdi Merbah Ouargla) 2015.
- [4] **Madani Mohammed Saïd** Et **Ghouini Rabah** «Amélioration des paramètres technologiques de coupe en tournage »(Université Kasdi Merbah Ouargla) 2011.
- [5] **Debbache Abdellatif** et **Benglia Mohammed Bakar** « Optimisation Multi-Passe des Régimes de Coupe en Chariotage »(Université Kasdi Merbah Ouargla) 2011.
- [6] **Mustapha Bouakba**«Cours de fabrication 2éme ST GM »(Université Kasdi Merbah Ouargla) 2010.
- [7] **Jean-Louis Dirion - Mines Albi** « Optimisation » novembre 2015
- [8] **Ameur Toufik**« Optimisation des Conditions de Coupe en utilisant le calcul evolutionnaire »2005.
- [9] **Benglia Moussa** « sélection optimale des conditions coupe pour une opération de tournage à passe multiple »(Université Kasdi Merbah Ouargla) 2014.

الملخص:

مما يراد الوصول إليه الإنتاج الميكانيكي هو كيفية التخطيط الأمثل في عمليات الخراطة التي تضمن أفضل الصفات بأقل التكاليف الممكنة مع وضع برنامج لتغيير أدوات القطع قبل تأثيرها بالسلب على حالة السطح. يعتبر استخدام أداة التحسين هو الحل لهذا النوع من المشاكل الغير خطية. الدراسة المقدمة في هذه المذكرة تقترح إستراتيجية للاختيار الأمثل لشروط القطع لعملية الخراطة متعددة التمريرات وأيضا معرفة عدد العمليات الممكنة لكل أداة قطع. تستند هذه الإستراتيجية على إدخال المتغيرات الاندماجية في نمذجة المشكلة المدروسة و استخدام الخوارزميات الجينية للقرار كل هذا في برنامج *Matlab* النتائج التي توصلنا إليها، في هذا العمل، توضح أهمية استخدام التحسين في مجال الإنتاجية. **الكلمات المفتاحية:** التحسين، الخراطة، تخطيط متعدد التمريرات، شروط القطع.

Abstract :

What mechanical production wants to achieve is how to optimally plan the turning operations that guarantee the best qualities at the lowest possible costs, with a program to change cutting tools before they negatively affect the surface quality. The use of the optimization tool is the solution to this type of non-linear problems.

The study presented in this study proposes a strategy for the optimal choice of cutting conditions for the multi-pass machining process as well as knowledge of the number of possible operations for each cutting tool. This strategy is based on the introduction of combinatorial variables in the modelling of the studied problem and the use of genetic algorithms for decision making, all in the *Matlab*. The results we have obtained in this work show the importance of using optimization in the field of productivity.

Keywords: optimization, Turning, Multi-pass planning, cutting conditions.

Résumé :

Ce que la production mécanique veut atteindre, c'est comment planifier de manière optimale les opérations de tournage qui garantissent les meilleures qualités aux coûts les plus bas possibles avec un programme pour changement de l'outil de coupe avant qu'il n'affecte négativement l'état de surface. L'utilisation de l'outil d'optimisation est la solution à ce type de problèmes non linéaires. L'étude présentée dans cette étude propose une stratégie pour le choix optimal des conditions de coupe pour le procédé d'usinage multi-passes. Ainsi, elle permet la connaissance préalable du nombre d'opérations effectuées par chaque outil de coupe. Cette stratégie repose sur l'introduction de variables combinatoires dans la modélisation du problème étudié et l'utilisation d'algorithmes génétiques pour la résolution du problème sur *Matlab*. Les résultats obtenus, dans ce travail, montrent l'importance d'utiliser d'optimisation dans le domaine de la productivité.

Mots clés : optimisation, Tournage, Planification multi-passe, conditions de coupe.