

UNIVERSITE KASDI MARBAH OUARGLA

Faculté des Sciences et de la Technologie et Science de la matière

Département de Génie mécanique



MASTER PROFESSIONNELLE

Domaine Sciences et Technologie

Filière Génie mécanique

Spécialité Maintenance Industrielle

Présenté Par :

KHEDIM CHOUAIB

MAHDADI ABDELMALEK

Thème

**Optimisation Multi-Objectif des conditions
de coupe en rectification cylindrique**

Soutenue le : 26 /06/2013

Devant le jury composé de :

Mr Abdelkarim	Président	UMK Ouargla
Mr Achouri	Examineur	UMK Ouargla
Mr T. Ameer	Rapporteur	UMK Ouargla

Année Universitaire : 2012 /2013

Remerciement

Nous présentons tous nos remerciements et toute nos gratitude à notre encadreur Mr Ameer Toufik , qui n'a épargné aucun effort afin de nous aider et de nous mettre sur la bonne voie pour mieux accomplir ce travail.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants du département de génie mécanique sans exception, et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

Table des matières

Introduction générale.....	01
CHAPITRE I : Généralité sur la rectification	
I.1-Définition de la rectification	02
I.2- Mode d'action de l'outil meule	02
I.3-Etude de l'outil meule	02
I.3.1 Formes des meules	03
I.3.2 Dimensions des meules	03
I.4- Caractéristique d'abrasif	04
I.4. 1. Propriétés mécaniques	04
I.4- 2. Stabilité physico-chimique	05
I.4- 3. Forme	05
I.4- 4. Dimensions	05
I.5.caractéristique d'une meule	06
I.5-1. La grosseur du grain	06
I.5- 2. Grade	06
I.5-3. La structure	06
I.5-4. L'agglomérant	07
I.6. Type de rectification	09
I.6.1. Rectification cylindrique extérieure	09
I.6.2. Rectification sans centre dite centerless	09
I.6.3. Rectification intérieure	09
I.7. Choix des meules	10
I.7. 1. Choix de l'abrasif.....	10
I.7. 2. Choix de la grosseur du grain	11
I.7. 3. Choix du grade.....	11
I.7. 4. Choix de la structure	11
I.7. 5. Choix de l'agglomérant	11
I.8 .L'affutage de la meule	11
I.8 .1. Principe de l'affutage de la meule diamant	11
I.8 .2. L'outil de l'affutage.....	12
I.9.Conclusion	12

CHAPITRE II :	Analyse du procédé de rectification cylindrique	
II-1- Introduction		13
II-2- Paramètres d'opérations du procédé		13
II-2-1- La vitesse de meule (m/min)		13
II-2-2- La vitesse de pièce (m/min)		13
II-2-3- La profondeur de passe a (mm).....		13
II-2-4- La profondeur de l'affutage c (mm)		14
II-2-5- Avance du dresseur par tour de meule L(mm/tour)		14
II-3- Paramètres technologique		14
II-3-1 Paramètre d'enlèvement de matière de la pièce		14
II-3-2 Le paramètre d'enlèvement de matière de la meule		15
II-3-3-L'effort de rectification		15
II-3-4- L'énergie spécifique		16
II-3.5.Etat de surface		16
II-4- Conditionnement du procédé		18
II-4-1-Usure des meules		18
II-4-2- L'influence de la chaleur sur la rectification		19
II-5- Conclusion		20
CHAPITRE III :	Optimisation des conditions de coupe en rectification	
III.1- Introduction.....		21
III.2- Optimisation		21
III.2.1-Problème d'optimisation.....		21
III.2.2-Classification de problème d'optimisation.....		22
III.3-Formulation mathématique du problème de rectification cylindrique		25
III.3.1- Les variables d'optimisation.....		25
III.3.2-Critère d'optimisation		25
III.3.3-Les contraintes.....		26
III .3.4- Modélisation du l'application		27
III .4- Cas d'application.....		27
III .4.1- Résolution		28
III .5-Discussion		33
Conclusion générale		34
Bibliographique		35

Nomenclature

Symbole	unité	désignation
v_w	m/s	La vitesse de la pièce
v_s	m/s	La vitesse de la meule
N_s	tr/min	Nombre de tour de la meule
d_s	mm	Le diamètre de la meule
N_w	tr/min	Nombre de tour de la pièce
d_w	mm	Le diamètre de la pièce
v_f	tr/min	Avance par tour de la meule
c	mm	Profondeur de dressage
L	mm/tr	Avance par tour de l'outil d'affutage
λ_w	mm^3/min	Le paramètre d'enlèvement de matière de la pièce
λ_s	mm^3/min	Le paramètre d'enlèvement de matière de la meule
d_g	mm	Taille de grain
R	-	Dureté de la meule
A_1	-	Constante dépendant de λ_w
A_2	-	Constante dépendant de λ_s
VOL	%	Facture de corrélation de la meule
ST	-	Nombre de structure de la meule
a_p	mm	Profondeur de passe
K_a	-	Constante dépendante du coulant de la meule
R_a	μm	Rugosité moyenne arithmétique
R_{max}	μm	Rugosité max
$F_{n,c}$	N	L'effort normale de coupe
$F_{n,st}$	N	L'effort normale de déformation plastique
\bar{p}	bar	La pression moyenne de contact
A	-	La friction de la meule surface
μ	-	Coefficient de frottement
d_e	mm	Diamètre équivalente
a_w	mm	Surépaisseur usinage
L_w	mm	Longueur
K_U	mm^{-1}	Constante de vêtements

Liste des figures

Figure I .1 : Mode d'action de l'outil meule	2
Figure I. 2 : Quelques formes de meule	3
Figure I. 3 : Dimensions de meule.....	3
Figure I.4 : Structure de la meule.....	7
Figure I. 5 : exemple de rectification.....	9
Figure I. 6 : Les Dresseurs à diamants.....	12
Figure II. 1 : Transfert de chaleur durant le meulage de matériaux métallique.....	16
Figure II.2: Relevé d'un profil d'état de surface.....	17
Figure II. 3: La rugosité de surface	17
Figure II- 4. Relations entre les types d'usures et le ratio de meulage G.....	19
Figure II. 5 : Effets mécaniques et thermiques en rectification.....	19
Figure III.1- Méthodologie de résolution.....	29
Figure III.2-démonstration graphique des solutions.....	31
Figure III.3-démonstration graphique de (G-ratio-N).....	31

Liste des tableaux

Tableau I.1 : quelques duretés comparées suivants les Echelle de Mohs et Knoop.....	4
Tableau I.2 : La classification des grains.....	6
Tableau I.3 : Le grade.....	6
Tableau I.4 : choix de la structure de la meule.....	7
Tableau I.5 : choix de la meule.....	10
Tableau. III .1-paramètres d'usinage.....	27
Tableau. III .2- les résultats de problème agrégée.....	30
Tableau. III .3-les résultats de problèmes compromis	33

Introduction générale :

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

La rectification est l'un des plus important procédé d'usinage, ses opérations forment une matière très riche de recherche à cause du besoin industriel croissant. La satisfaction de ce besoin ne sera réalisée qu'à l'aide d'un choix judicieux des paramètres de coupe. Toutefois, les techniciens ou opérateurs ont choisi ces paramètres à partir des abaques et tableaux réalisés par l'expérimentation, ce qui conduit dans la plupart des cas à des résultats plus ou moins faibles. Afin d'améliorer ces résultats, il faut s'en remettre à un outil mathématique plus performant.

Notre travail se situe dans ce cadre et porté plus particulièrement sur l'aspect d'industrialisation des produits de haute qualité en s'appuyant sur l'optimisation multi-objectif des conceptions de coupe.

Cette étude est articulée sur deux axes de recherche. Le plus important est la modélisation d'une opération de rectification cylindrique car cette tâche est très difficile à cause de la complexité du procédé.

Le deuxième est la sélection optimale des conditions de coupe satisfaisant plusieurs critères.

Le présent document est articulé en trois chapitres :

Chapitre I : consacré à l'étude du processus de rectification et s'intéresse plus particulièrement des outils meules.

Chapitre II : fait objet de la modélisation d'une opération de rectification cylindrique.

Chapitre III : consacré à la résolution d'un problème d'optimisation multi-objectif des conditions de coupe pour une opération de rectification cylindrique.

I.1-Définition de la rectification:

La rectification est un procédé d'usinage sur machines-outils qui consiste à enlever la matière, sous forme de petits copeaux, au moyen d'un outil particulier appelé meule.

On fait appel à ce procédé pour des raisons de précision qui tiennent à la fois aux dimensions, aux états de surfaces et aux conditions de dureté des pièces.

I.2- Mode d'action de l'outil meule :

La rectification d'une surface s'opère comme suit :

La meule constituée d'une multitude de grains d'abrasifs, reliés ensemble par un matériau dit agglomérant, est animée d'un mouvement de rotation et placée en contact avec la pièce à usiner. Ces petits grains enlèvent la matière sous forme de minuscules copeaux.

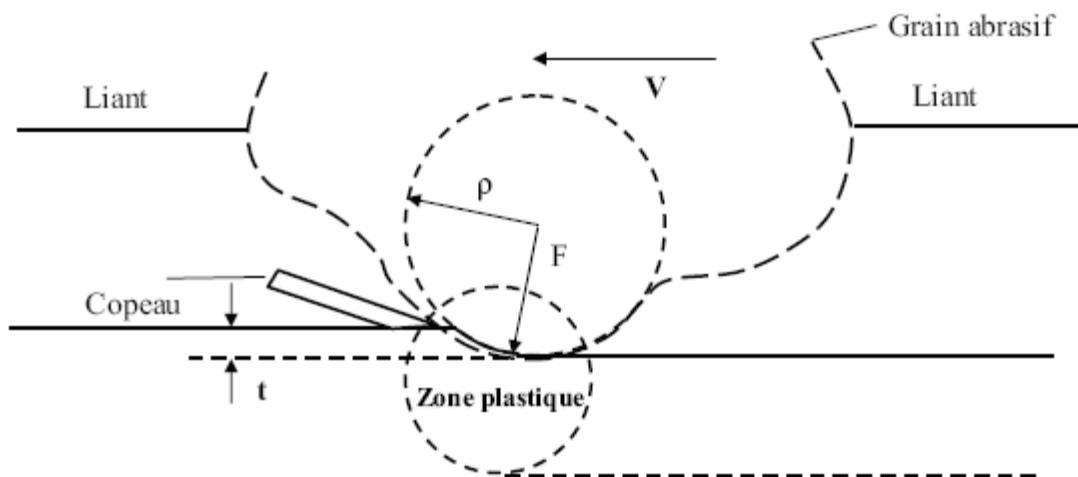


Figure I.1 : Mode d'action de l'outil meule [1].

I.3-Etude de l'outil meule :

Les principales caractéristiques qui différencient les meules sont :

- la forme.
- les dimensions.
- la spécification.

I.3.1 Formes des meules :

La forme d'une meule dépend des travaux auxquels elle est destinée (rectification extérieure, intérieure, plane,...) et la forme de la pièce.

Les meules les plus courantes sont :

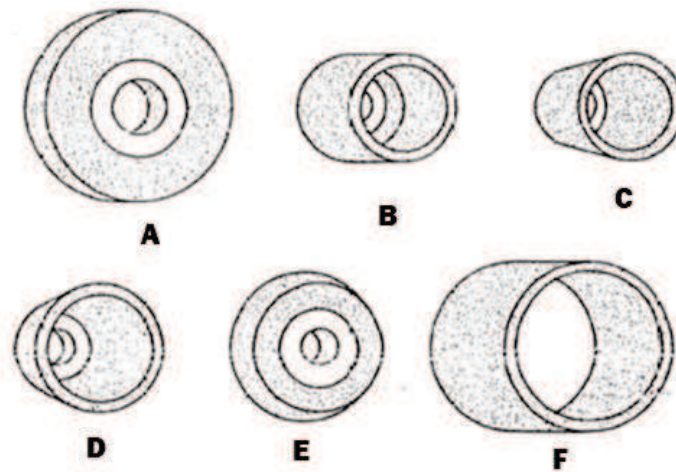


Figure I. 2 : Quelques formes de meule.

A : meule plate

B : meule tambour ou à boisseau droit

C : meule à boisseau conique

D : meule assiette

E : meule conique ou à biseau

F : meule cylindrique ou couronne.

I.3.2 Dimensions des meules :

Les dimensions caractéristiques d'une meule, exprimées en mm, sont :

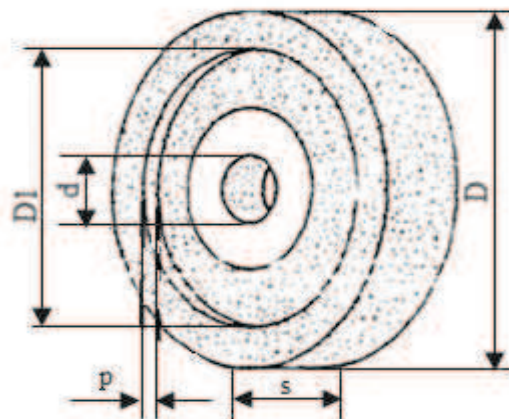


Figure I. 3 : Dimensions de meule.

- Le diamètre extérieur D.
- La largeur S.
- Le diamètre de l'alésage d.

À ces dimensions principales peuvent s'ajouter d'autres :

- Le diamètre de l'entaille D1.
- Sa profondeur P [1].

I.4- Caractéristique d'un abrasif :

Un abrasif est un corps dur cristallisé susceptible, par une action mécanique, de découper des copeaux dans un corps moins dur que lui. Il est caractérisé par ses propriétés mécaniques, sa stabilité physico-chimique, sa forme et ses dimensions.

I.4- 1. Propriétés mécaniques :

Dans le cadre du travail par abrasion, les propriétés les plus intéressantes sont la dureté et la résistance à la fracture.

Dureté :

Cette notion est caractérisée par la capacité d'un corps à en rayer un autre. Deux échelles sont utilisées pour classer les abrasifs selon leur dureté dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Quelques duretés comparées suivants les Echelle de Mohs et Knoop [2].

Minéraux et abrasifs	Echelle de Mohs prolongée	Echelle de Knoop	Matériaux usuels
Talc	1		
Gypse	2		
Calcite	3		
Fluorine	4	300 à	}
Apatite	5	500	
Orthoclase	6		Verres
Silice pure	7	740 à	
Quartz	8	800	
Topaze	9		Aciers trempés
Grenat	10	1400 à	
Zircone fondue	11	1800	
Alumine fondue	12	2000	Carbure métallique
Carbure de silicium	13	2500	
Carbure de bore	14	2800	
Diamant	15	> 7000	

L'échelle de Mohs prolongée classe dans une suite numérique allant de 1 à 15 différents minéraux et abrasifs naturels ou fabriqués, du plus tendre, le talc, affecté du nombre 1, au plus dur, le diamant, auquel on attribue le nombre 15. Cette échelle respecte la notion de dureté mais ne s'appuie sur aucune donnée mesurable. Et l'échelle de Knoop basée sur la pénétration

d'une pointe de diamant au moyen d'un appareil type Rockwell, permet d'établir une échelle dont les nombres sont proportionnels aux résultats des mesures effectuées.

Résistance à la fracture :

Lorsqu'il pénètre dans la pièce qu'il usine, le grain d'abrasif subit certaines contraintes mécaniques (choc, effort) et physiques (choc thermique) qui tendent à provoquer sa rupture.

Si, pour une application donnée, la résistance à la fracture de l'abrasif est trop élevée, le grain s'use, ses arêtes s'émoussent, son pouvoir de coupe diminue et la chaleur produite augmente [2].

I.4- 2. Stabilité physico-chimique :

Dans tout travail d'usinage, une partie de l'énergie fournie est transformée en chaleur. Dans le cas d'usinage par abrasion, les températures mesurées dans la zone de pénétration d'un grain peuvent atteindre 700 à 800 °C.

Pour être efficace, un abrasif porté à ces températures devra conserver sa stabilité chimique et ses propriétés physiques en présence du matériau à usiner et des éventuels agents de refroidissement et de lubrification [3].

I.4- 3. Forme :

Certains abrasifs sont susceptibles de cristalliser dans plusieurs systèmes différents, et de présenter des plans de fracture qui engendrent des arêtes plus ou moins vives. Cette notion est à prendre en considération dans le choix d'un abrasif en fonction du matériau à usiner et de l'opération à réaliser.

I.4-4. Dimensions :

Les abrasifs sont utilisés sous la forme de grains dont la grosseur est définie suivant des normes. Les plus employées dans l'industrie sont :

- les normes MESH (américaine) et FEPA (européenne) pour les abrasifs conventionnels agglomérés.
- les normes CAMI (américaine) et FEPA (européenne) pour les abrasifs appliqués conventionnels.

I.5. Caractéristique d'une meule :

Une meule est un ensemble de grains liés entre elles l'aide d'un agglomérant dans une forme bien déterminée. Ses caractéristique sont en effet tirées des caractéristiques des éléments qu'ils la composant.

I.5- 1. La grosseur du grain :

La dimension d'un grain d'abrasif peut être déduite de son numéro de référence. Un grain d'abrasif référence X s'inscrit dans un cercle moyen de diamètre égale $25.4/X$.

Par exemple pour un grain N°60, on obtient : $25.4/60 = 0.42\text{mm}$.

La classification des grains normalement adoptée est la suivante:

Tableau I.2 : La classification des grains.

Très gros	6 à 11	Ebauche
Gros	12 à 24	Ebauche
Moyen	30 à 90	Finition
Fin	100 à 190	Finition
Très fin	200 à 400	Superfinition
En poudre	500 à 1200	Superfinition

I.5- 2. Grade :

Le grade est le coefficient de retenue des grains ou la force de cohésion avec laquelle l'agglomérant retient les grains. Il est désigné par des lettres de D à Z [1].

Tableau I.3 : Le grade.

Dénomination	grade
Très tendre	D, E, F,
Tendre	G, H, I, J,
Moyen	K, L, M, N, O
Dur	P, Q, R, S
Très dur	T, U, W, Z

I.5- 3. La structure :

Entre deux grains consécutifs d'abrasif G, on y trouve l'agglomérant A (matière qui relie les grains) et des petits vides ou pores P.

La dimension de ces derniers détermine la porosité de la meule.

Lorsque la distance moyenne entre 2 grains d'abrasif est petite, la structure est dite fermée (b).

Lorsque cette distance est grande, la structure est dite ouverte (a).

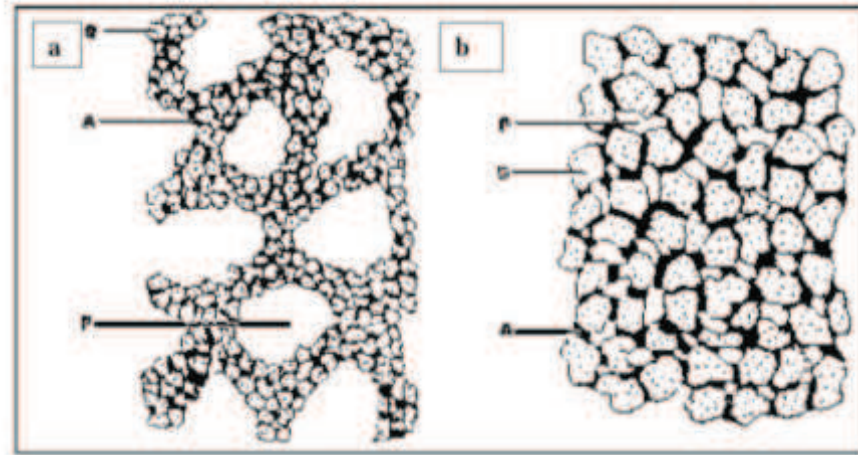


Figure I.4 : Structure de la meule [3].

Le pourcentage élevé de vide évite un échauffement excessif et facilite le dégagement des copeaux [3].

Tableau I.4 : choix de la structure de la meule.

Structure	Désignation
Fermée	1-2-3-4
Moyenne	5-6-7-8
Ouverte	9-10-11-12
Très ouverte	13-14-15-16

I.5-4. L'agglomérant :

L'agglomérant est la matière liante qui maintient ensemble des grains d'abrasif de la meule.

On distingue deux groupes principaux d'agglomérant :

- Minéraux : (vitrifié ou céramique : V, silicate : S, magnésie : O).
- Organiques : (résinoïdes : B, caoutchouc : R, gomme laque : E).

1/ Agglomérant minéraux :

- Vitrifiés :

De même nature que la porcelaine, ils sont constitués, en proportion variable, de feldspaths, d'argiles et de silice. À partir de ces constituants de base, les fabricants ont élaboré une grande variété d'agglomérant en fonction des opérations à réaliser (affûtage d'outils, rectification cylindrique ou plane, rodage) et des contraintes liées à ces opérations : échauffement, tenue de profil, débit matière, etc.

Chimiquement stables, ils ne sont attaqués ni par l'eau, ni par les agents de lubrification et de refroidissement.

- Magnésiens :

Issus de la réaction du chlorure de magnésium sur la magnésie, ils se présentent sous la forme d'un ciment faisant pris à froid.

Leur principal avantage est une meilleure évacuation de la chaleur produite (coupe froide) et on les réserve à des opérations de taillanderie, d'affûtage de tranchants d'outils et de surfaçage de la pierre et du marbre.

2/ Agglomérant organiques :**- Résinoïdes :**

Ce sont des résines de synthèse, généralement à base de phénol et de formol. Polymérisées, elles constituent des agglomérant très résistants à la force centrifuge, avec des modules d'élasticité et conductivités thermiques supérieurs à ceux des agglomérants vitrifiés.

Ils sont utilisés soit dans des opérations brutales avec gros enlèvement de matière : ébarbage, décriquage en aciérie, tronçonnage, rectification centerless à grande vitesse, soit dans des opérations avec tenue d'angle :

(rectification en plongée de cames, de filetages, de gorges étroites).

- Caoutchouc :

Ces agglomérant sont obtenus soit à partir de caoutchouc naturel (latex), soit à partir de caoutchouc synthétique.

Les agglomérant à base de caoutchouc naturel sont employés surtout pour la fabrication de meules de contrôle centerless et de rectification de gorges de roulement. Ceux à base de caoutchouc synthétique sont réservés à la fabrication de meules de tronçonnage sous arrosage ou de roues flexibles pour le satinage de tôles, le morfilage d'outils ou le pré-polissage du verre après usinage à la meule diamant ou à la bande abrasive.

- Shellac :

Le Shellac est un produit naturel que l'on trouve aux Indes ou dans les îles de la Sonde et qui est constitué par les excréments d'un insecte.

Travaillé à chaud, il permet la réalisation de meules de tronçonnage très minces. On l'utilise également pour la fabrication de meules destinées à obtenir un poli miroir en rectification [2].

I.6. Type de rectification cylindrique :

Dans ce procédé de rectification on peut distinguer trois types principaux :

I.6.1. Rectification cylindrique extérieure :

Les opérations de rectification cylindrique extérieur des opérations portées sont sur les surfaces externes d'une pièce cylindrique les meules utilisées dans ces opérations ont les spécifications suivantes :

— Formes et dimensions : ce sont en général des meules plates, comportant fréquemment un ou deux embrèvements, parfois un profil. Les dimensions courantes s'échelonnent de 250 à 760 mm pour le diamètre, avec un rapport diamètre/épaisseur de 8 à 12.

— Spécification moyenne : abrasif alumineux, grains moyens, grade moyen, agglomérant vitrifié.

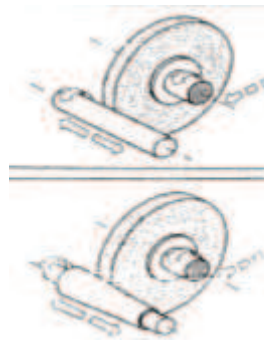


Figure I. 5 : exemple de rectification extérieur.

I.6.2. Rectification sans centre dite centerless :

C'est une opération de rectification cylindrique dans laquelle la pièce n'est pas tenue entre pointes mais est posée sur une réglette et tourne entre deux meules dont la position reste fixe.

Les meules utilisées sont de deux sortes d'une part, la meule dite de contrôle (ou, à tort, d'entraînement), dont le rôle est de contrôler la vitesse de rotation de la pièce, éventuellement, de la faire avancer axialement, cette meule est en abrasif alumineux, grains fins et agglomérant organique (le plus souvent caoutchouc).

D'autre part, la meule dite de travail, qui effectue l'opération de rectification et dont la spécification est proche de celle d'une meule de rectification cylindrique extérieure adaptée au même travail.

La rectification sans centre est dite en enfilade lorsque la pièce se déplace axialement entre les deux meules et en plongée lorsqu'il n'y a pas déplacement axial.

I.6.3. Rectification intérieure :

C'est également une opération de rectification cylindrique dans laquelle la meule usine l'intérieur de la pièce. Dans ce type on utilise des meules dont les spécifications sont :

— Formes et dimensions : les meules utilisées, plates ou à embrèvement, ont un diamètre généralement compris entre 1/2 et 4/ 5 du diamètre intérieur de la pièce à rectifier. Elles sont parfois profilées :

Rectification intérieure en plongée des chemins de bagues de roulement, par exemple.

— Spécification moyenne : abrasif alumineux à 98 % ou monocristallin, grains moyens, grade moyen, agglomérant vitrifié.

I.7. Choix des meules :

Les critères de choix d'une meule donnée, tiennent compte de plusieurs facteurs : genre de travail exigé, matière à usiner, degré de finition, etc.

I.7. 1. Choix de l'abrasif :

Le choix de l'abrasif dépend principalement de la matière à usiner, Il est conseillé d'utiliser des meules :

- En alumine pour des matériaux de résistance élevée tels que : aciers au carbone, aciers rapides, aciers alliés....etc.
- En carbure de silicium pour des matériaux de faible résistance tels que :
Fonte douce, laiton, bronze, aluminium.
- Au diamant pour les carbures métalliques et pour des pièces exigeant un haut degré de finition [1].

Tableau I.5 : choix de l'abrasif [2].

Abrasif	Propriété	Domaines d'emploi
Alumine 95%	Compact, solide, peu friable	Rectification extérieure centerless d'aciers doux et mi-durs non traités
Alumine 99%	Très coupant friable	Rectification extérieure tout aciers alliés ou traités Rectification centerless pièces chromées Rectification plane tous aciers et fontes
Mélange Alumine (95%Et99%)	Compromis entre résistance et pouvoir de coupe	Rectification en plongée d'aciers mi-durs trempés Rectification centerless tous aciers durs (traités, alliés, inox sauf 18/8)
Alumine monocristal line	Très coupant, peu friable, prix plus élevé	Rectification intérieure tous aciers sauf acier nitruré Surfaçage avec cylindres ou segments tous acier sur machine puissante
Alumine microcristal line	Très coupant, peu résistant, prix plus élevé	Rectification de précision avec recherche de débits et rendement élevés
Carbure de silicium noir	Dureté \rangle Al_2O_3 , très coupant, très friable	Toutes rectifications bronzes, laiton, fonte ordinaire, aluminium, inox 18/8, matériaux non métalliques
Carbure de silicium vert	Encore plus coupant et friable	Rectification extérieure, plane, intérieure de carbures métalliques et de pièces rechangées par métallisation

I.7. 2. Choix de la grosseur du grain :

Ce choix dépend des propriétés physiques des matériaux à travailler, de l'épaisseur de métal à enlever et du degré de finition demandé :

- Gros grain : pour usiner un matériau ductile et peu dur.
- grain plus fin : pour obtenir un état de surface soigné.

I.7. 3. Choix du grade :

Le grade est choisi en se basant sur les propriétés physiques du matériau, sur la grandeur de la surface de contact meule-pièce et sur les vitesses de la meule et de la pièce :

- Grain dur : pour les matériaux ductiles, surface de contact faible
- Grain tendre : pour les matériaux durs, surface de contact meule-pièce étendue grande vitesse de travail.

I.7. 4. Choix de la structure :

- Structure ouvert ou poreuse : pour matériaux tendre, degré de finition élevé, surface de contact meule-pièce étendu.
- Structure fermée : pour matériaux dur, opération d'ébauche.

I.7. 5. Choix de l'agglomérant :

Pour des vitesses inférieures à 33m/s, les meules les plus adéquats sont celles à agglomérant vitrifié.

Pour les vitesses supérieures à 33m/s, les meules doivent être à agglomérant résinoïde.

I.8 .L'affutage de la meule :

L'affutage permet d'obtenir une forme géométrique spécifique et une bonne circularité; il influence fortement le pouvoir de coupe de la meule et donc l'état de surface obtenu sur la pièce. On doit prendre en compte la spécification, la dimension de la meule ainsi que le type de machine pour déterminer le bon dresseur.

I.8 .1.Principe de l'affutage de la meule diamant :

Les meules à grain de diamant est gros se majorité des meules à liant résinoïde les grains utilisés sont très fins, l'épaisseur de la couche de grain est très limitée compte tenu du cout abrasif. La profondeur de dressage utilisée seront très faible afin d'économiser la couche active de la meule .le dressage à l'outil diamanté de ces meule à liant résinoïde permet d'obtenir le profil de la meule, mais laisse une surface lisse absolument inapte à réaliser en usinage par abrasion. Il est donc nécessaire de faire suivre l'opération de profilage permettant de dégager l'arête du grain abrasif de leur enrobage de résine[4].

I.8 .2.L'outils de l'affutage :

Ils sont des outils similaire à l'outil de tournage a composition de la partie action des ces outilles est de diamant :

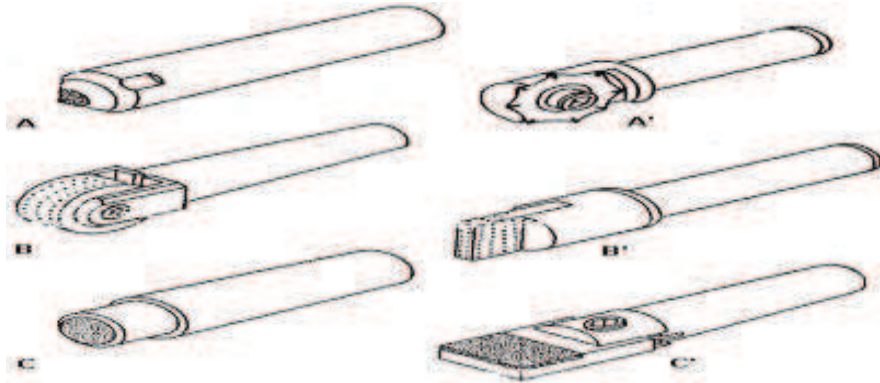


Figure I. 6 : Les Dresseurs à diamants.

A-A' : Dresseurs à diamant unique (0.05 à 0.06 gramme) encastré dans la tête de l'outil.

B-B' : Dresseurs de diamants multiples à molettes ou à embout solide du corps. Ils présentent une série de petits diamants alignés, choisis soigneusement de la même taille et placés sur différentes couches.

C-C' : Dresseurs à poudre de diamant : diamants sous forme de poudre, répartis d'une façon plus au moins uniforme dans la partie active [1].

I.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un procédé d'usinage spécifique, utilisé le plus souvent pour les opérations de super finition. Sa spécification essentielle repose sur la manière dont l'outil enlève la matière de la pièce. En utilisant des outils meules, la matière est enlevée par abrasion.

Afin de bien comprendre ce procédé, nous avons alloué une importance particulière à l'action des outils meules ainsi qu'à leurs propriétés. Cette compréhension sera très utilisée dans la modélisation de ce procédé.

II-1- Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons intéresser uniquement aux opérations de rectification cylindrique. L'analyse de ces opérations va, sans doute, aider de trouver des modèles mathématiques déterminant les conditions de déroulement de travail, et ainsi que les résultats des opérations.

II-2 -Paramètres opérationnelles du procédé :

L'enlèvement de matière, lors d'une opération de rectification cylindrique, est réalisé à l'aide d'un mouvement relatif de la pièce et la meule. La rotation de la meule permet cependant le passage d'un nombre important de grains sur la surface usinée permettant, ainsi, l'arrachement de matière. Ce phénomène résulte, ainsi, l'usure de meule pendant les opérations d'affutage au cours de l'opération.

De ce fait, on trouve que les conditions les plus importantes lors d'usinage sont.

II-2-1- La vitesse de meule (m/s) :

Elle est exprimée en unités de distance par unité de temps.

$$v_s = \frac{\pi d_s N_s}{60} \quad (1)$$

N_s : La vitesse de rotation de la meule [tr/min].

d_s : Le diamètre de la meule [mm].

II-2-2- La vitesse de la pièce (m/s) :

C'est la vitesse instantané un point de périphérique de la meule, exprimée en unités de distance par unité de temps.

$$v_w = \frac{\pi d_w N_w}{60} \quad (2)$$

N_w : La vitesse de rotation de la pièce [tr/min].

d_w : Le diamètre de la pièce [mm].

II-2-3- La profondeur de passe a (mm) :

La profondeur de passe déterminée par combinaison de deux vitesses, vitesse d'avance de la meule et la vitesse de rotation de la pièce, exprimée en unités de distance.

$$a = \frac{v_f}{N_w} \quad (3)$$

v_f : La vitesse d'avance de la meule [m/s].

II-2-4- La profondeur de l'affutage c (mm) :

La profondeur d'affutage est déterminée par la pénétration de dresseur dans la meule, exprimée en unités de distance. Il conditionne directement l'efficacité de l'opération d'affutage et par conséquent d'opération de rectification.

II-2-5- Avance du dresseur par tour L(mm/tr) :

C'est la distance parcourue par le dresseur pendant un tour de la meule.

$$L = \frac{\pi d_s v_d}{v_s} \quad (4)$$

v_d : La vitesse de dressage. (m/s) [3].

II-3- Paramètres technologiques :

Une opération de rectification cylindrique est caractérisée par l'efficacité du procédé. Cette efficacité est représentée par le rapport de la quantité enlevée de matière de la pièce par rapport à celle enlevée de la meule.

De plus d'autres paramètres peuvent être pris en considération tel que les efforts de coupe et l'énergie spécifique car la machine (rectifieuse) n'admet que des valeurs limitées d'énergie. Ainsi, les montages de la pièce et la meule n'ont que des valeurs limites de résistance.

II-3-1 Paramètre d'enlèvement de matière de la pièce :

Le débit d'enlèvement de matière de la pièce est déterminé par la profondeur de passe, la vitesse de la pièce et largeur active. Exprimée en unités de volume par unité de temps il s'exprime par la relation : [3]

$$\lambda_w = A_1 \frac{\left(\frac{v_w}{v_s}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{2c}{3L}\right) L^{11/19}}{d_s^{43/304} VOL^{0.47} d_g^{5/38} R^{27/19}} \quad (5)$$

d_s : Diamètre de la meule [mm]

d_g : Taille de grain [mm]

R : Dureté de la meule

A_1 : Constante

VOL : Facteur de corrélation de la meule.

II-3-2 Paramètre d'enlèvement de matière de la meule :

Le débit d'enlèvement de matière de la meule est déterminé par la variation du rayon de la meule et largeur active, exprimée en unités de volume par unité de temps il s'exprime par la relation:[3]

$$\lambda_s = A_2 \frac{\left(\frac{v_s}{v_w}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{c}{L}\right) L^{27/19} v_w}{\left(1 + \frac{2c}{3L}\right)} \quad (6)$$

A_2 : Constante

$$A_2 = \frac{K_a a_p d_g^{5/38} R^{27/19}}{d_s^{1.2} VOL^{-43/304}} \quad (7)$$

a_p : Profondeur de passe (mm).

K_a :Constant dépendant du coulant de la meule.

II-3-3-L'effort de rectification :

L'effort de coupe globale résultant de l'action d'une meule est la somme des efforts élémentaires exercés sur la pièce cylindrique par les grains de la meule en action.

L'effort de coupe est décomposé suivant deux directions principales: la direction normale au profil de la meule passant par le point de contact meule pièce, cette composante est appelée effort normal de rectification F_n il s'exprime par la relation.

$$F_n = F_{n,c} + F_{n,sl} \quad (8)$$

$$F_n = F_{n,c} + \bar{p}(d_e a)^{1/2} A \quad (9)$$

$F_{n,c}$: L'effort normal de copeau (N).

$F_{n,sl}$: L'effort normal déformation plastique (N).

La direction tangente au profil de la meule, cette composante est appelée effort tangentiel de rectification F_t il s'exprime par la relation.

$$F_t = F_{t,c} + F_{t,sl} \quad (10)$$

$F_{t,c}$: L'effort tangentiel de copeau

$F_{t,sl}$: L'effort tangentiel déformation plastique

Donc :

$$F_t = F_{t,c} + \mu \bar{p}(d_e a)^{1/2} A \quad (11)$$

\bar{p} : Le Moyen de contact pression (bar).

A : La fraction de la meule surface.

Le rapport entre tangentiel F_t et l'effort normal peut être assimilé au coefficient de frottement de la meule sur la pièce cylindrique [4].

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \tag{12}$$

II-3-4- L'énergie spécifique :

Durant le meulage, l'énergie cinétique de la meule est transférée principalement sous la forme de flux de chaleur. L'augmentation de la température est due à la friction générée par le contact entre l'outil et la pièce. La schématisation du transfert d'énergie est illustrée ci dessous.

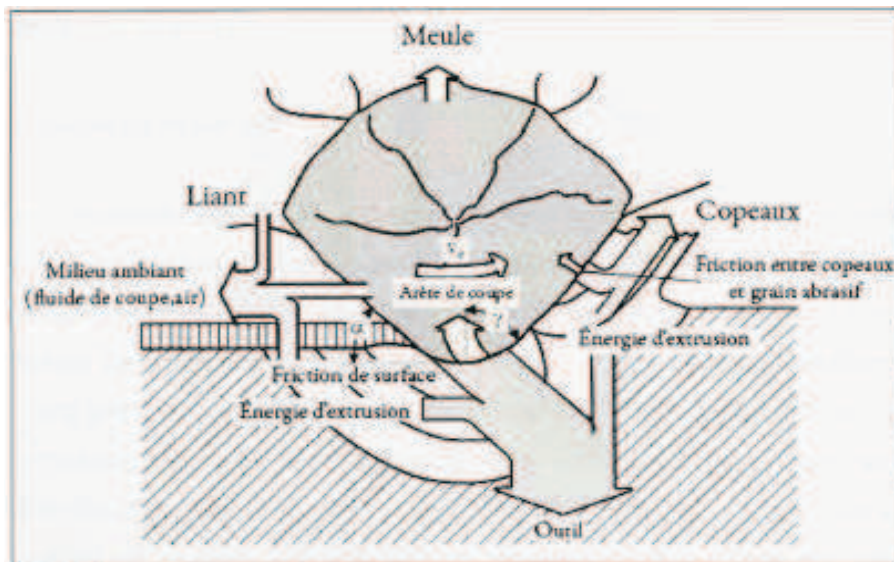


Figure II. 1 : Transfert de chaleur durant le meulage de matériaux métallique [3].

La formation d'un copeau est composée de trois phénomènes : la coupe, la friction et la déformation plastique. L'énergie spécifique est donc constituée de ces trois quantités :

$$U = U_{coupe} + U_{friction} + U_{déformation\ plastique} \tag{13}$$

L'énergie spécifique de rectification est la quantité d'énergie nécessaire pour enlever une unité de volume de matériaux. Elle est donc donnée par la formule :

$$U = 13.8 + \frac{9.64 \cdot 10^{-4} v_s}{a_p v_w} + \left(6.9 \cdot 10^{-3} \frac{2102.4 \cdot v_w}{d_s v_s} \right) \left(A_0 + \frac{k_u v_s L_w a_w}{v_w d_s^{1/2} a_p^{1/2}} \right) \frac{v_s d_s^{1/2}}{v_w a_p^{1/2}} \tag{14}$$

En connaissant cette relation il est possible de s'assurer, lors du meulage, que l'énergie spécifique dégagée est inférieure à l'énergie spécifique critique [4].

$$U^* = 6.2 + 1.76 \left(\frac{d_s^{1/4}}{a_p^{3/4} v_w^{1/2}} \right) \quad (15)$$

II-3-5. Etat de surface :

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

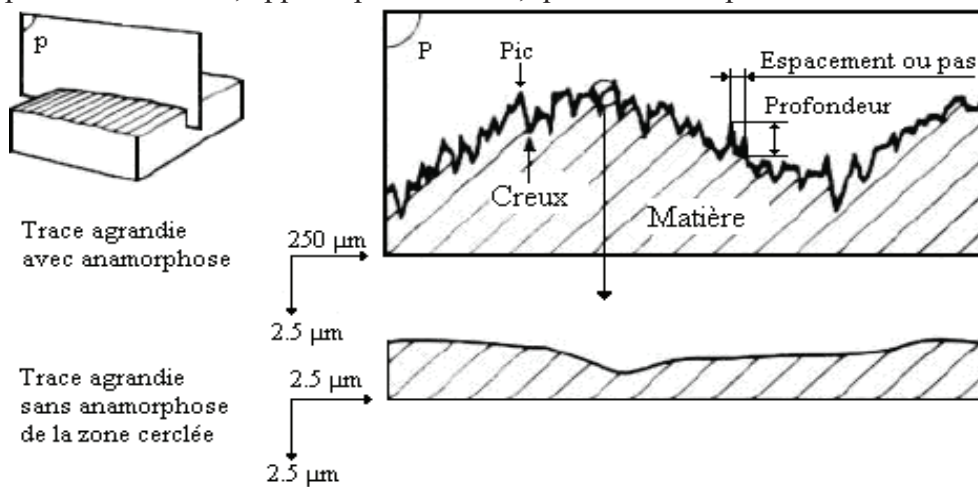


Figure II. 2: Relevé d'un profil d'état de surface [7].

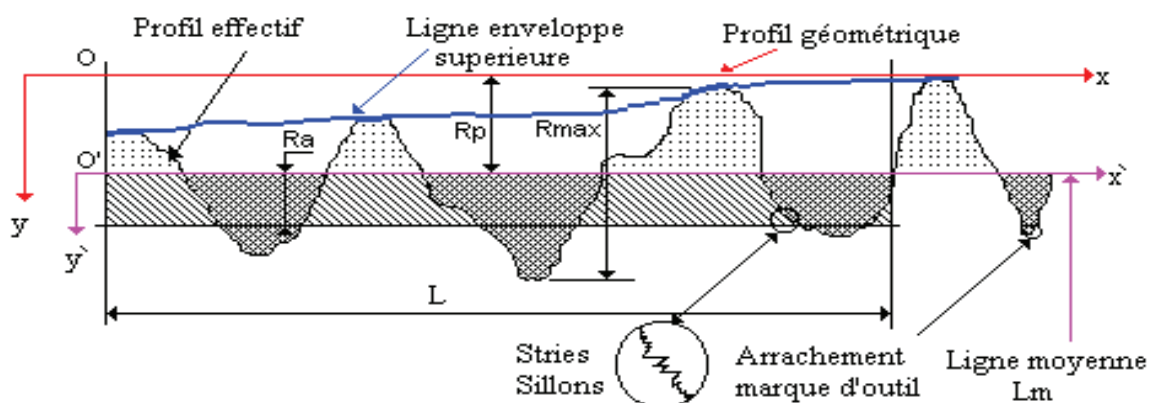


Figure II. 3: La rugosité de surface [7].

Soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^L y \, dx = 0$$

Où L est la longueur de palpage

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, Soit :

- **Rugosité moyenne arithmétique** : R_a représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à ox :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx$$

- **Rugosité moyenne quadratique** R_q : Ce critère (non normalisé en France) représente l'écart moyen quadratique par rapport à ox :

$$R_q = \left[\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

- **Rugosité max. R_{max}** : elle représente la 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 palpement l .

- **Rugosité R_z** : représente la rugosité totale moyenne

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_i$$

D'une manière empirique, la rugosité de surface peut être formulée comme suit [7]:

$$R_a = 7.7732 \frac{d_g^{0.854}}{d_s^{0.694}} \left(1 + \frac{c}{L}\right)^{0.3} L^{0.854} \left(\frac{v_w}{v_s}\right)^{0.854} \quad (16)$$

II-4-Conditionnement de procédé :

II-4-1-Usure des meules :

Le mode de travail des grains est relatif à l'usure du liant. Pour ce faire, le liant doit s'user pour que les arêtes des grains soient bien en contact avec la surface meulée. L'usure du liant permet ainsi aux grains de s'auto réaffûter. Le choix d'un liant compatible aux grains et à l'application est donc un autre facteur important à considérer afin d'avoir une rectification efficace et optimale.

De façon générale, la dégradation des meules est provoquée par l'usure mécanique et thermique. Le mode d'usure est déterminé par les paramètres de coupe, la méthode de refroidissement et de lubrification, ainsi que par la cinématique du procédé. La porosité du liant joue aussi un rôle important [5].

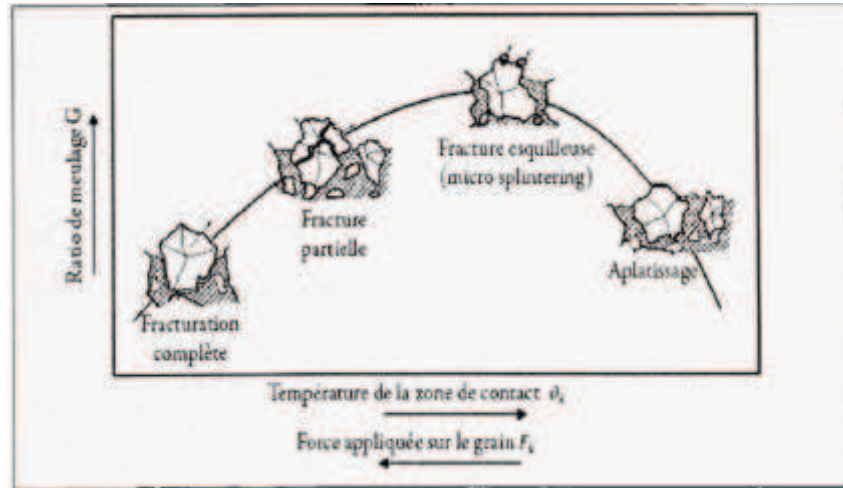


Figure II- 4. Relations entre les types d'usures et le ratio de meulage G [5].

II-4-2- L'influence de la chaleur sur la rectification :

Les phénomènes de friction et de déformation sont très importants et engendrent une quantité de chaleur importante. La vitesse de coupe de la meule étant élevée, cette quantité de chaleur se dégage pendant un temps très court, le flux thermique dirigé vers la pièce peut affecter la qualité de surface usinée.

Une petite partie de cette énergie est retenue pour la génération de la surface, en tant qu'énergie potentielle résidant dans la pièce sous la forme d'efforts résiduels. La figure II-5 des effets mécaniques et thermiques en rectification [6].

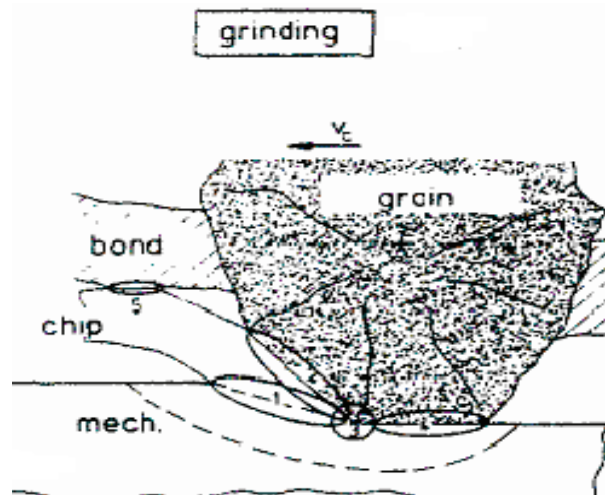


Figure II. 5 : Effets mécaniques et thermiques en rectification [6].

II-5- Conclusion :

La manipulation du procédé de rectification cylindrique ne peut être réalisée correctement, qu'à partir d'une bonne compréhension du procédé. Ainsi la formulation précise des phénomènes inclus dans le phénomène principal de coupe contribue à la modélisation des opérations, et par conséquent, dans la prédiction des différents paramètres liés à l'usinage.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une formulation mathématique des paramètres technologiques du procédé de rectification cylindrique. Ce support mathématique est destiné à la représentation des interactions entre les différents paramètres d'usinage. Cet acquis sera utilisé dans la modélisation des opérations de rectification contenue dans le troisième chapitre.

III.1- Introduction :

Les méthodes d'optimisation des équations différentielles ont été réalisées par les contributions de Newton et Leibnitz Cauchy fut le premier à mettre en œuvre une méthode d'optimisation méthode du pas de descente, pour la résolution de problème sans contraintes, depuis ces considérable contribution, il y peu d'avance .Il faut dire qu'à l'époque les mathématiciens et les ingénieurs calculaient à la main.

Il faut attendre le milieu du vingtième siècle, avec l'émergence des calculateurs et surtout à la fin de la seconde guerre mondiale pour voir paraître des avances spectaculaires en termes de technique d'optimisation. En mille neuf cent quarante sept, l'américain Dantzig propose un algorithme pour résoudre des problèmes linéaire avec contraintes .En mille neuf cent cinquante sept, Bellman dit le prince d'optimisation des problèmes de programmation dynamique.

Dans ce chapitre, nous allons présenté un modèle d'optimisation multi-critère pour une opération de rectification cylindrique.

III.2- Optimisation :

L'optimisation est exprimée comme une fonction-objectif à une ou plusieurs variables, pour être maximisée ou minimisée sous un certain nombre de contraintes.

III.2.1-Problème d'optimisation:

Un problème d'optimisation est défini par un espace d'état (espace de recherche des solutions), une ou plusieurs fonction-objectif(s) et un ensemble des contraintes.

-Les variables :

Les variables du problème peuvent être de natures diverses (réelle, entière,.. etc.) et expriment des données qualitatives ou quantitatives.

-Une fonction-objectif :

Une fonction-objectif représente le but à atteindre pour le décideur. Elle définit un espace de solutions potentielles au problème.

-L'ensemble de contraintes :

L'ensemble de contraintes définit des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent satisfaire. Ces contraintes sont souvent des équations d'inégalité ou d'égalité et permettent en général de limiter l'espace de recherche.

La séparation entre la fonction-objectif et les contraintes peut paraître artificielles car nous considérer qu'une contrainte est un objectif à atteindre. Mais elle se justifie de deux manières différentes : d'une part, les contraintes sont appliquées sur l'espace de recherche alors que les

objectifs définissent l'espace des solutions. D'autre part, dans de nombreuses méthodes les contraintes et les objectifs sont traités par des procédures différentes.

-L'espace de recherche :

L'espace de recherche est le domaine limité des variables d'optimisation défini à partir des données technologiques de référence. Cette limitation n'est pas la seule problématique car lorsqu'un problème est posé, les décideurs précisent un domaine de valeur envisageable à chacun des variables. De plus, pour des raisons opératoires et de temps de calcul, il est préférable de travailler sur des domaines finis [8].

- Formulation mathématique:

Un problème d'optimisation est exprimé comme une fonction-objectif à une ou plusieurs variables, pour être maximisée ou minimisée sous un certain nombre des contraintes. Les fonctions des contraintes définissent le domaine acceptable des variables pour le processus d'optimisation, de telles contraintes, permettent la limitation des domaines de variables dans la recherche de la solution optimale.

Le système suivant exprime la forme mathématique générale d'un problème d'optimisation. Dans cette équation $f(x)$ est l'expression mathématique de la fonction-objectif (ou critère d'optimisation ou fonction économique) avec le vecteur $X \in R^n$ a pour composantes (x_1, x_2, \dots, x_n) qui sont les variables de problème.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } f(x) \text{ tel que } X \in R^n \\ \text{sous les fonctions des contraintes} \\ X_{pmin} \leq X_p \leq X_{pmax} \text{ pour } p = 1, \dots, n \\ h_i(x) = 0 \text{ pour } i = 1, \dots, l \\ c_j(x) \leq 0 \text{ pour } j = 1, \dots, m \end{array} \right. \quad (17)$$

Nous supposons ici que l'ensemble des contraintes $C_j(X)$ sont de type inégalité et l'ensemble des contraintes $h_i(X)$ sont de type égalité [9].

III.2.2- Classification de problème d'optimisation:

L'optimisation est basée sur trois paramètres principaux : la nature du problème, l'existence des contraintes et le nombre des critères d'optimisation. De ce fait, on peut classer les problèmes d'optimisations suivant ces trois paramètres.

Problème linéaire ou non linéaire:

Un problème d'optimisation linéaire est considéré comme un problème de résolution d'un système d'équations linéaires.

Dans ce cas, toutes les équations soit la fonction-objectif ou les contraintes sont linéaires.

La modélisation de problème est telle que :

$$\left\{ \begin{array}{l} f(\vec{x}) \quad \text{fonction objectif} \\ A \cdot \vec{x} - b^* \leq 0 \quad (1) \\ A \cdot \vec{x} - b^* = 0 \quad (2) \\ \vec{x}_{min} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{max} \end{array} \right. \quad (18)$$

(1) Contrainte linéaire (inégalité)

(2) Contrainte linéaire (égalité)

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

La forme générale d'un problème d'optimisation est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimisation } f(\vec{x}) \\ x \in R^n \\ \text{sous des contraintes} \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

Où les fonctions f, g et h sont typiquement non-linéaires.

Problème avec ou sans contraintes :

Il est fréquent que l'on puisse parfois proposer un modèle mathématique exacte d'un phénomène physique et que les données expérimentales se révèlent insuffisant rendant la détermination des variables par les méthodes classique impossible. De ce fait, nous avons souvent recours à des méthodes d'approximation de donnée numérique par des fonctions analytiques dans le cas de système linéaire.

Nous recherchons la résolution du système pour la détermination de la matrice A d'un système de type : $A.x = B$ nous recherchons des solutions approchées pour des systèmes impossibles en résolvant un problème d'approximation des moindres carrés.

L'existence des contraintes crée une difficulté additionnelle à des problèmes d'optimisation car elle impose des limitations sur le domaine recherche. Le traitement de cette difficulté, se faire généralement d'une manière séparé.

Problème mono ou multi-objectif :

Le problème d'optimisation mono-objectif comporte un seul critère d'optimisation sous l'ensemble des contraintes.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser ou Maximiser } f(\vec{x}) \\ \vec{C}(\vec{x}) \leq 0 \Leftrightarrow \vec{C}(\vec{x}) = C_j(\vec{x}) \\ \vec{h}(\vec{x}) = 0 \Leftrightarrow \vec{h}(\vec{x}) = h_i(\vec{x}) \\ x_{pmin} \leq \vec{x}_p \leq x_{pmax} \text{ avec } \vec{x} = x_p \\ \text{ansi que } x \in R^p, C(x) \in R^j, h(x) \in R^i \end{array} \right. \quad (20)$$

$f(\vec{x})$: Fonction objectif ou critère d'optimisation.

$C_j(\vec{x})$: Contrainte d'inégalité, (j) : c'est le nombre d'inégalité.

$h_i(\vec{x})$: Contrainte d'égalité (i): c'est le nombre d'égalité.

\vec{x} : La valeur de variable (p): c'est le nombre de variable.

Tous les énoncés et définitions seront donnés dans le cadre de problèmes de minimisation [3].

En effet un problème de maximisation peut être aisément transformé en problèmes, minimisation en considérant l'équivalence suivante:

$$\text{Maximiser } f(x) \Leftrightarrow \text{Minimiser } -f(x) \quad (21)$$

Un problème multi-objectif ou multicritère peut être défini comme un problème dont on recherche l'action qui satisfait un ensemble de contraintes et optimise un vecteur de fonction-objectif.

Par la suite, nous allons voir que les problèmes d'optimisation multi-objectifs ont en général plusieurs solutions car la définition d'un optimum ne peut pas être établie dans ces problèmes De la manière classique.

Une action (ou un vecteur de décisions) sera notée :

$$X = (x_1, x_2, x_3 \dots \dots x_n) \quad (22)$$

Avec xi les variables du problèmes et n le nombre de variables.

Le vecteur de fonctions objectif sera noté F :

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), f_3(X), \dots \dots f_k(X)) \quad (23)$$

Avec f_i les objectifs ou critères de décision et k le nombre d'objectifs. Nous considérons que les objectifs sont des fonctions de minimisation (dans le cas de la fonction F de minimisation, il suffit de minimiser $-F$).

Les Contraintes (Contraintes d'égalité ou d'inégalité) seront notées :

$$h_j(X) = 0 \text{ avec } j = (1, \dots, l), \text{ et } C_i(X) \leq 0 \text{ avec } i = 1, \dots, m \quad (24)$$

Ce type de problème est donné sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser } F(X) = (f_1(X), f_2(X), f_3(X), \dots, f_k(X)) \\ \text{avec} \\ X_{p\min} \leq X_p \leq X_{p\max} \text{ pour } p = 1, \dots, n \\ h_i(X) = 0 \text{ pour } i = 1, \dots, l \\ C_j(X) \leq 0 \text{ pour } j = 1, \dots, m \end{array} \right. \quad (25)$$

III.3-Formulation mathématique du problème de rectification cylindrique :

Le problème d'optimisation du procédé de rectification cylindrique est basé sur la minimisation du paramètre d'enlèvement de matière de la meule, et la maximisation de celui de la pièce. La formulation mathématique du problème est basée sur l'écriture de ces critères en fonction des variables de problème permettant ainsi la sélection des conditions satisfaisants les préférences du décideur.

III.3.1- Les variables d'optimisation:

D'une manière générale, la détermination des paramètres de coupe par abrasion nécessite une bonne connaissance des facteurs d'incidence relatifs au couple outil-matière, à l'opération d'usinage et à l'environnement.

Les variables définissant les conditions de coupe en rectification sont des grandeurs géométriques et cinématiques intervenant dans la dynamique de coupe et la nature du milieu dans lequel est effectuée (lubrification). Les variables retenues pour une opération de rectification cylindrique sont :

Pour les grandeurs géométriques :

La profondeur de dressage c (mm).

Pour la grandeur cinématiques

Avance du dresseur par tour de meule L (mm/tr).

La vitesse de la pièce v_w (m/s). v_w (m/s)

La vitesse de la meule v_s (m/s).

III.3.2-critères d'optimisation :

Les deux paramètres technologiques liés à l'enlèvement de matière de la pièce et de l'outil constituent les objectifs (critères) d'optimisation.

Le paramètre d'enlèvement de matière de la pièce donné par l'équation (5) doit être maximisé et le paramètre d'enlèvement de matière de la meule donné par l'équation (6) doit être minimisé.

III.3.3-Les contraintes:

Le processus d'optimisation est souvent limité par l'espace de recherche.

$$v_{wmin} \leq v_w \leq v_{wmax} \quad (26)$$

$$v_{smin} \leq v_s \leq v_{smax} \quad (27)$$

$$c_{min} \leq c \leq c_{max} \quad (28)$$

$$L_{min} \leq L \leq L_{max} \quad (29)$$

Des limitations additionnelles sont nécessaires pour la stabilité et la sécurité du processus de coupe.

L'énergie spécifique doit être inférieure ou égale à l'énergie spécifique critique

$$U \leq U^* \quad (30)$$

$$7.6 + \frac{9.64 \times 10^{-4} v_s}{a_p v_w} + \left(\frac{14.5 v_w}{d_s v_s} \right) \left(A_0 + \frac{k_u v_s L_w a_w}{v_w d_s^{1/2} a_p^{1/2}} \right) \frac{v_s d_s^{1/2}}{v_w a_p^{1/2}} - \left(1.76 \frac{d_s^{1/4}}{a_p^{3/4}} \right) v_w^{-1/2} \leq 0 \quad (31)$$

La rugosité de surface doit être inférieure ou égale à la rugosité imposée par le constructeur :

$$R_a \leq R_a^* \quad (32)$$

$$7.7732 \frac{d_g^{0.854}}{d_e^{0.694}} \left(1 + \frac{c}{L} \right)^{0.3} L^{0.854} \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^{0.854} \leq R_a^* \quad (33)$$

III .3.4- Modèle d'optimisation retenu:

Notre problème peut être résumé dans le modèle d'optimisation suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimisation } \lambda_s \text{ et } -\lambda_w \\ \text{tel que} \\ v_w \min \leq v_w \leq v_w \max \\ c \min \leq c \leq c \max \\ L \min \leq L \leq L \max \\ v_s \min \leq v_s \leq v_s \max \\ \text{sous les contraintes} \\ 7.6 + \frac{9.64 \times 10^{-4} v_s}{a_p v_w} + \left(\frac{14.5 \times v_w}{d_s v_s} \right) \left(A_0 + \frac{k_u v_s L_w a_w}{v_w d_s^{1/2} a_p^{1/2}} \right) \frac{v_s d_s^{1/2}}{v_w a_p^{1/2}} - \left(1.76 \frac{d_s^{1/4}}{a_p^{3/4}} \right) v_w^{-1/2} \leq 0 \\ 7.7732 \frac{d_g^{0.854}}{d_e^{0.694}} \left(1 + \frac{c}{L} \right)^{0.3} L^{0.854} \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^{0.854} \leq R_a^* \end{array} \right. \quad (34)$$

III .4- Cas d'application:

Dans ce cas d'application, nous avons comme tâche la détermination des conditions de coupe pour une opération de rectification cylindrique, dont les paramètres sont donnés sur le tableau III .1

Tableau. III .1-paramètres d'usinage

Paramètre	valeur	paramètre	Valeur
$V_s \min$ (m/s)	1000	A_0	0
$V_s \max$ (m/s)	2023	A_1	94.4
$V_w \min$ (m/s)	10	d_s (mm)	355
$V_w \max$ (m/s)	22.7	R	58
c_{\min} (mm)	0.01	vol	6.99
c_{\max} (mm)	0.137	d_g (mm)	0.3
L_{\min} (mm)	0.01	K_a	0.0869
L_{\max} (mm)	0.137	a_p (mm)	0.01
a_w (mm)	0.01	R_a^* (μm)	0.8
L_w (mm)	300	K_a (mm^{-1})	3.937×10^{-7}

En posant :

$$x_1 = v_s, x_2 = v_w, x_3 = c, x_4 = L$$

Et en remplaçant les différents paramètres du modèle par leurs valeurs du tableau III.1, le problème s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \min \quad f_1(x) = -0.060 \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{2x_3}{3x_4}\right) x_4^{11/19} \\
 \min \quad f_2(x) = 2.71 \times 10^{-4} \frac{\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{x_3}{x_4}\right) x_4^{27/19} x_2}{\left(1 + \frac{2x_3}{3x_4}\right)} \\
 \text{sous les contraintes} \\
 \quad 1000 \leq x_1 \leq 2023 \\
 \quad 10 \leq x_2 \leq 22.7 \\
 \quad 0.01 \leq x_3 \leq 0.137 \\
 \quad 0.01 \leq x_4 \leq 0.137 \\
 \\
 \quad 0.0964x_2^{-1}x_1 - 241.58x_2^{-0.5} + 7.6 \leq 0 \\
 \\
 \quad 0.4587(131.25 \left(1 + \frac{x_3}{x_4}\right) x_4^{0.592} \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{0.592})^{0.3} - 0.8 \leq 0
 \end{array} \right. \quad (35)$$

III .4.1- Résolution :

Un problème d'optimisation multi-objectif est souvent résolu de deux manières : la première consiste à le transformer en un problème mono-objectif en agrégeant les objectifs dans une seule fonction. Ce type de méthodes est appelé « méthode agrégée ». La deuxième traite les objectifs de problème séparément en cherchant le meilleur compromis. Cette dernière est appelée « méthode compromis ».

Dans notre situation, nous avons choisi, pour la méthode agrégée, d'utiliser la somme pondérée. Cette méthode nécessite la détermination du poids de chaque critère en pose la fonction-objectif sous la forme :

On suppose : $f_1(x) = \lambda_s$, $f_2(x) = \lambda_w$

$$f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) \quad (36)$$

$$\text{Avec } w_1 + w_2 = 1 \quad \text{et} \quad \begin{cases} 0 \leq w_1 \leq 1 \\ 0 \leq w_2 \leq 1 \end{cases} \quad (37)$$

De cette manière, nous pouvons obtenir plusieurs solutions optimales en variant les poids des objectifs.

En deuxième lieu, nous utilisons la méthode compromis, Min-Max. Cette méthode consiste à minimiser, à chaque itération, le critère ayant la valeur maximale.

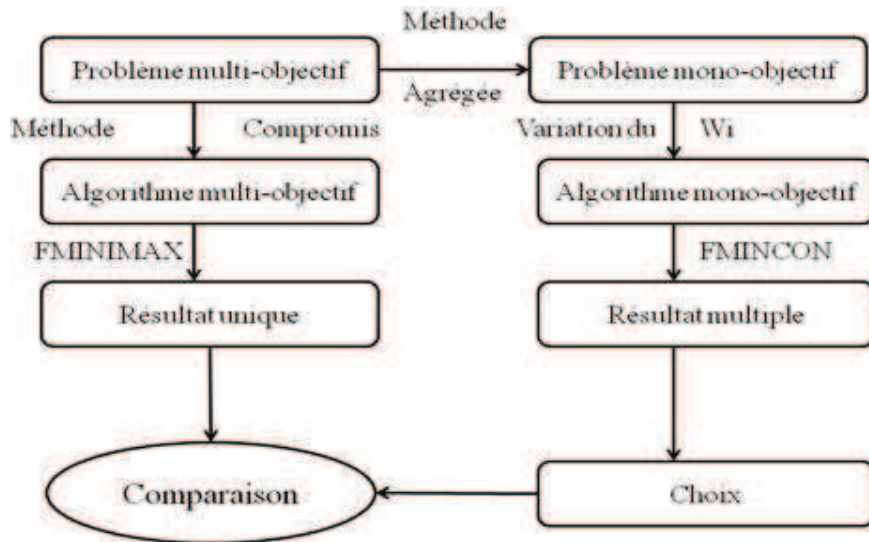


Figure III.1- Méthodologie de résolution.

La figure représente la procédure de comparaison des deux méthodes.

1. Méthode agrégée :

Pour l’optimisation mono-objectif, on a utilisé la fonction nécessite la déclaration de la fonction objectif ainsi que la fonction contrainte.

Dans notre situation, l'utilisation des chaînes de caractères devenue une tâche trop pénible et il faut s'en remettre aux fichiers « m ». En autre celle ci permet de présenter l'expression de la fonction-objectif dans un fichier séparé. Les fonctions contraintes seront présentées de la même manière. Cette présentation donne la possibilité d'appelle des critères et contraintes à chaque application dans la syntaxe de la fonction.

Fonction objectif .m:

$$f_1(x) = -0.060 \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{2x_3}{3x_4}\right) x_4^{11/19} \tag{38}$$

$$f_2(x) = 2.71 \times 10^{-4} \frac{\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{x_3}{x_4}\right) x_4^{27/19} x_2}{\left(1 + \frac{2x_3}{3x_4}\right)} \tag{39}$$

$$f(x) = w_1 2.71 \times 10^{-4} \frac{\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{x_3}{x_4}\right) x_4^{27/19} x_2}{\left(1 + \frac{2x_3}{3x_4}\right)} + w_2 0.060 \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{2x_3}{3x_4}\right) x_4^{11/19} \tag{40}$$

Contraintes .m :

Dans ce fichier, le vecteur contrainte est données par :

$$cont_1(x) = 0.0964x_2^{-1}x_1 - 241.58x_2^{-0.5} + 7.6 \quad (41)$$

$$cont_2(x) = 0.4587(131.25 \left(1 + \frac{x_3}{x_4}\right) x_4^{0.592} \left(\frac{x_2}{x_1}\right)^{0.592})^{0.3} - 0.8 \quad (42)$$

La résolution du problème est réaliser à l'aide d'un programme implémenté sur Matlab en utilisant les données suivantes :

Une limitation supérieur sur x : $Ub = [2023, 22.7, 0.137, 0.137]$

Une limitation inférieur sur x : $Lb = [1000, 10, 0.01, 0.01]$

Un solution de départ : $x_0 = [1500, 10, 0.05, 0.05]$

Le programme utilisé est exécuté 11 fois en faisant varier les valeurs du poids (w_1) de 0 jusqu'à 1. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau III.2.

Tableau. III .2- Résultats de la méthode agrégée

N^0	W_1	W_2	V_s (m/s)	V_w (m/s)	c (mm)	L (mm/tr)	$\lambda_s \times 10^{-5}$ (mm ³ /min)	$\lambda_w \times 10^{-5}$ (mm ³ /min)	N^{br} d'itérations
01	0	1	1499.91	22.70	0.137	0.137	728.22	997.30	16
02	0.1	0.9	1499.89	22.70	0.010	0.137	393.59	985.88	16
03	0.2	0.8	1499.89	22.70	0.010	0.137	393.59	985.88	15
04	0.3	0.7	1499.89	22.70	0.010	0.137	393.59	985.88	17
05	0.4	0.6	1000.00	16.06	0.010	0.137	276.04	995.16	33
06	0.5	0.5	1499.99	10.00	0.010	0.137	196.23	866.81	4
07	0.6	0.4	1499.99	10.00	0.010	0.137	196.23	866.81	4
08	0.7	0.3	1499.99	10.00	0.010	0.137	196.23	866.81	5
09	0.8	0.2	1499.99	10.00	0.010	0.137	196.23	866.81	6
10	0.9	0.1	1499.99	10.00	0.010	0.015	85.36	244.94	13
11	1	0	1499.99	10.00	0.010	0.010	80.64	190.78	5

D'après ces résultats, on peut voir l'influence des poids sur la solution obtenue. Par exemple, la variation du w_1 de 0.1 à 0.3 ne change rien dans le problème ainsi que dans l'intervalle de 0.5 à 0.8. De ce fait, on obtient réellement six solutions optimales différentes.

La figure III.2 illustre la position des solutions obtenues dans l'espace de solutions. Il est clair que ces positions sont équivalentes car l'amélioration d'un critère résulte la détermination de l'autre. Ce qui montre la contradiction des critères utilisés.

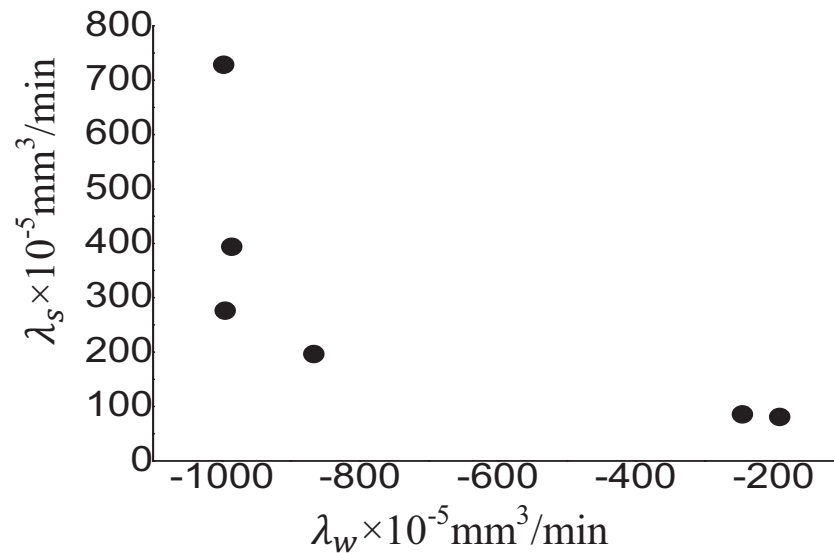


Figure III.2 : démonstration graphique des solutions

Dans cette situation, on peut considérer un critère de jugement supplémentaire. En introduisant le G-ratio. C'est le rapport du critère d'enlèvement de matière de la pièce sur celui de la meule. Il est formulé comme suit :

$$G = \frac{\lambda_w}{\lambda_s} \quad (43)$$

En utilisant cette relation, l'histogramme de G-ratio des solutions obtenues est donnée dans la figure III.3.

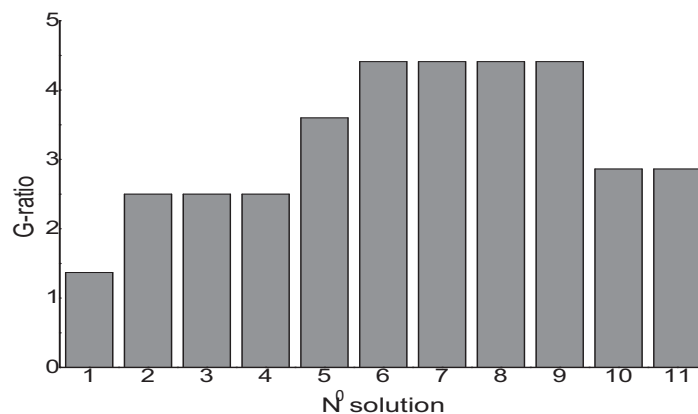


Figure III.3- Histogramme de (G-ratio-N⁰)

Afin d'améliorer le procédé de rectification cylindrique, le G-ratio doit être maximisé. Cette tâche est réalisée soit par la maximisation du λ_w ou par la minimisation de λ_s . Pour les solutions obtenues (figure III.3), ce paramètre a presque une valeur stable. La différence entre les valeurs maximale et minimale est de 3.04.

Supposons que nous devons choisir une solution à adapter.

Si nous n'avons pas intérêt à l'économisation de la meule ni à la productivité du procédé, la solution convenable est celle qui a la valeur maximale du G-ratio. C'est la solution qui donne $866.81 \text{ mm}^3 / \text{min}$ à λ_w , et $196.23 \text{ mm}^3 / \text{min}$ à λ_s .

Si nous sommes intéressés à la meule, nous devons adapter la solution qui assure une perte minimale de la meule. C'est la solution minimisant uniquement la perte en matière de la meule. C'est la solution basée sur les combinaisons de (w_1, w_2) : (0.5, 0.5), (0.6, 0.4), (0.7, 0.3), (0.8, 0.2). Pratiquement, on voit que cette solution résulte d'un débit de copeau de la pièce très faible. Tandis que la solution basée sur la combinaison des poids (0.9, 0.1) assure une perte de meule plus ou moins minimale avec un débit de copeau acceptable. Cette solution peut être la solution adaptée pour la réalisation.

D'autre part, et si nous visons la productivité, nous devons adapter le paramètre solution car elle assure le maximum de débit de copeau possible. Mais nous trouvons que la deuxième assure un débit moins du premier seulement $9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / \text{min}$ avec une diminution de la moitié de la matière perdue de la meule. Par conséquent, cette solution est la plus convenable.

On trouve ainsi que les solutions ayant un poids nul pour l'un des critères d'optimisation sont défavorables.

D'après cette analyse, nous pouvons dire que l'optimisation multi-objectif est favorable à celle mono-objectif.

2. Méthode compromis :

La fonction « fminimax » de Matlab représente un algorithme multi-objectif basé sur la méthode Min-Max.

Pour cette fonction, la déclaration de la fonction-objectif est plus simple dans un fichier .m, la fonction-objectif est représentée par ces composantes.

Fonction-objectif .m

$$f_1(x) = \lambda_s(x_1, x_2, x_3, x_4) = 2.71 \times 10^{-4} \frac{\left(\frac{x_1}{x_2}\right)^{3/19} \left(1 + \frac{x_3}{x_4}\right) x_4^{27/19} x_2}{\left(1 + \frac{2x_3}{3x_4}\right)} \quad (44)$$

$$f_2(x) = \lambda_w(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0.060 \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^{3/19} \left(1 + \frac{2x_3}{3x_4} \right) x_4^{11/19} \quad (45)$$

Les contraintes, sont déclarées par le même fichier utilisé dans la première méthode.

Les résultats de la méthode Min-Max sont présentés dans le tableau. III.3.

Tableau. III .3-les résultats de la méthode compromis :

v_w mm ³ /tr	v_s mm ³ /tr	c mm	L mm/tr	$\lambda_s \times 10^{-5}$ mm ³ /min	$\lambda_w \times 10^{-5}$ mm ³ /min	G	N^0 d'itérations
1000	10	0.01	0.01	75.85	203.32	2.68	12

On trouve que le G-ration a une valeur intermédiaire par rapport à celles de la première méthode. Ainsi, cette solution assure une perte minimale en meule avec un débit acceptable.

On peut dire, à la fin, que cette solution représente le meilleur compromis.

III .5-Discussion :

Cette application a démontré l'intérêt de l'optimisation multi-objectif. L'utilisation d'une méthode agrégée a permis de respecter les préférences du décideur dans la résolution du problème. Malgré sa complexité relative, cette méthode est préférable pour le concepteur. La deuxième méthode a démontré une simplicité particulière. Elle peut trouver le meilleur compromis pour le problème multi-objectif. Elle est donc convenable pour l'utilisateur.

Conclusion générale :

A travers ce mémoire, nous avons vu l'intérêt d'optimisation multicritère pour les problèmes de génie mécanique. Nous sommes intéressés dans ce travail particulièrement à l'optimisation multicritère de la rectification cylindrique.

Nous avons essayé d'apporter notre contribution en adaptant un modèle basé sur un critère multiple et un ensemble de contraintes spécifique à la rectification.

Pour la résolution du problème, nous avons élaboré deux programmes implémentés en MATLAB, permettant de trouver les conditions de coupe minimisant le débit d'enlèvement de matière de la meule et maximisant le débit d'enlèvement de matière de la pièce pour deux différents méthodes :

La première liée à l'utilisation de la méthode de la somme pondérée qui est l'une des méthodes agrégées. La deuxième utilisant la méthode Min-Max de la famille des méthodes compromis.

Nous trouvons ainsi que la première méthode présente l'avantage de trouver une solution optimale à partir des préférences du décideur. Cet acquis au prix d'une reformulation du problème à l'aide d'une somme pondérée.

La deuxième méthode présente une modélisation plus au moins simple car elle traite les critères séparément. Cette méthode est considérée comme une méthode compromis. Elle résulte une seule solution optimale présentant le meilleur compromis possible.

Bibliographique :

- [1] **Florea Florian.** Réalisation d'opérations de rectification.1998.
- [2] **Jean Louis Douzet.** Abrasif Technique de l'ingénieur. Traité Génie Mécanique. b7050.
- [3] **Farourou Zakaria.** Thème, Modélisation et Optimisation d'une Opération de Rectification, 2011/2012.
- [4] **R.Saravanan,P.Asokan,M.Sachidanandam.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 42(2002) 1327-1334 (A multi-objective genetic algorithm (GA) approach for optimisation of surface grinding operations.2001.
- [5] **Erik Felder .**procédé d'usinage –présentation bm 7000.
- [6] **Mamadou Dieye** comportement dynamique de système pièce/outil/machine (POM) en rectification plan passe profonde.
- [7] **Hamdi Bilal.Thème.** Etude de revêtement dur est application de coupe.2006
- [8] **Azzaoui Ahmed** thème, optimisation multicritaire des condition de coupe en fraisage, 2011/2012.
- [9] **Khalfaoui Houcin. Gohmes Abderrazek.** Thème. Optimization multi-objectif des conduction de coupe en fraisage.2010/2011.

Résumé

Dans cette étude, on s'intéresse à la résolution du problème d'optimisation des conditions de coupe de rectification cylindrique par la proposition d'un modèle multicritère. Pour les opérations à passe simple, ce modèle permet la minimisation d'enlèvement de matière de la meule et maximisation d'enlèvement de matière de la pièce en tenue compte des limitations de la machine, l'outil et l'opération. L'utilisation de l'outil informatique MATLAB permet à résoudre le problème par de différentes méthodes l'une agrégée et l'autre compromise.

A partir des résultats obtenus pour l'exemple d'application, nous avons présenté une comparaison des deux méthodes, ainsi, l'intérêt de l'optimisation multicritère on usinage est démontré à l'aide d'une étude analytique des résultats.

ملخص:

في هذه الدراسة نهتم بحل المشاكل مثل شروط القطع للتحسين بواسطة اقتراح نموذج متعدد المعايير لعملية ذات تمريرة بسيطة واحدة وهذا النموذج يسمح بتقليل كمية المادة المنزوعة من حجر الطاحون مع الزيادة في كمية القطع المنزوعة من القطعة في آن واحد بحيث يتم احترام القيود الموضوعية على الدوال والمفروضة على الأداة والعمليات باستخدام برنامج (الماتلاب) الذي يسمح بحل المشكلة بطريقتين مختلفتين الأولى التجميع والثانية بحل تفريقي.

انطلاقاً من النتائج المحصل عليها نقدم مقارنة بين هاتين الطريقتين مع زيادة المعايير المتعددة التي تسمح لنا بتوضيح الدراسة التحليلية للنتائج.