

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION MECANIQUE

PAR :

CHERIFI LAMINE

CHOUALI AHMED

Thème

**Optimisation des paramètres de coupe en tournage d'un acier
ordinaire en chariotage**

Soutenu le 02/07/2019 devant le jury composé de:

| | |
|--------------------------------|------------|
| Mr. BELAMRI <i>Abdelatif</i> | Président |
| Mr. SAHALI M ^d Akli | Rapporteur |
| Mr. YOUNES RACIM | Examineur |

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019

REMERCIEMENTS

En premier lieu, le grand merci s'adresse au bon Dieu, notre créateur de nos avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

*En second, tout le plaisir est à nous de venir, présenter nos remerciements les plus sincères à nos parents et à notre encadreur Mr. **SAHALI Md Akli** pour nous avoir proposé ce sujet et accepté d'encadrer ce travail, et de m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce travail, dans un domaine qui m'a toujours passionné, les algorithmes génétiques, appliqués au génie mécanique. Je le remercie également pour les observations pertinentes et les lectures attentives lors aux différentes étapes de la réalisation de ce travail*

*Nous voulons également remercier Mr. **BELAMRI Abdelatif** pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury de notre mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à Mr. **YOUNES RACIM** et au membre du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'examiner notre travail.*

Par ailleurs, nous ne manquerons pas, d'afficher nos remerciements, notre respect à l'ensemble des enseignants du département Génie Mécanique de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia, pour leurs efforts et orientations, ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

À Mes très chers parents qui m'ont aidé financièrement et moralement et qui m'ont soutenu tout au long de mes études.

À mon chers frère hakim et mes sœurs qui m'ont toujours souhaité la réussite.

À Toute ma famille paternelle et maternelle.

À Tous mes amis et mes copains.

À tous mes collègues de promotion.

Et tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Chouali ahmed

ABRÉVIATIONS

| | |
|--------------|---|
| ARS | Acier Rapide Supérieur |
| HSS | High Speed Steel |
| POM | Pièce-Outil-Machine |
| MOP | Multi-Objectif Problème |
| MRR | Le Taux D'enlèvement De Matière |
| ANOVA | Analyse de la Variance |
| TGV | Tournage à Grande Vitesse |
| NSGA | Nondominated Sorting Genetic Algorithm |
| NSGAI | Non Sorting Genetic Algorithm |
| PESA | Pareto Envelope Based Selection Algorithm |
| NPGA | Niched Pareto Genetic Algorithms |
| RSM | Méthodologie de surface de réponse |
| TM | Taguchi Method |

NOMENCLATEUR

| Symbole | Désignation | Unité |
|-----------------|---|-----------------------|
| D | Diamètre de la pièce | mm |
| L | Longueur de la pièce | mm |
| a_p | Profondeur de passe | mm |
| f | Avance | mm |
| V_c | Vitesse de coup | $mm \cdot min^{-1}$ |
| N | Vitesse de rotation | $t_r \cdot min^{-1}$ |
| α | L'angle de dépouille | Degré° |
| β | Angle tranchant | Degré° |
| γ | Angle de coupe | Degré° |
| V_f | Vitesse d'avance | $mm \cdot min^{-1}$ |
| e | Distance de sécurité | mm |
| Lu | longueur usinée | mm |
| F_c | Effort de coupe | N |
| K | Constante de Gilbert | |
| S | Section de copeau | mm^2 |
| R_r | La résistance spécifique a la rupture par compression | |
| k | Coefficient de l'usinabilité de la matière | |
| ω | Vitesse angulaire | tr/min |
| P | puissance de coupe | W |
| ε | Erreur de mesure expérimentale | |
| VB | L'usure en dépouille | mm |
| T | Duré de vie de l'outil | min |
| T_{cs} | Temps de changement de l'outil | min |
| T_r | Temps de retour | min |
| T_h | Temps de montage et démontage de la pièce | min |
| T_m | Temps de coupe avec une avance | min |
| C_u | Cout d'usinage unitaire | € |
| C_0 | Cout de la machine | €/min |
| C_t | Cout d'une arrêt de coupe | €/arrêt |
| n | Exposant de Taylor | |
| a_1, a_2, a_3 | Exposants dépendants la nuance de l'outil | |
| Ra | rugosité arithmétique | μm |
| MRR | Taux d'enlèvement de la matière | $mm^3 \cdot min^{-1}$ |
| C_p, b, c, d | Coefficient spécifique et exposants de la puissance de la machine | |
| C_s, e, g, i | Coefficient spécifique et exposants de la rugosité de surface | |
| C_m, m, p, q | Coefficient spécifique et exposants de la température de coupe | |
| C_f, x, y, z | Coefficient spécifique et exposants de la force de coupe | |

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction générale..... | 01 |
| Chapitre I Généralités sur le Tournage | |
| Introduction..... | 03 |
| I.1 Procédé de tournage..... | 03 |
| I.2.1 Surfaces de la pièce..... | 05 |
| I.3 Les tours..... | 06 |
| I.3.1 Classification des machines de tournage..... | 06 |
| a les tours paralleles a charioter et a fileter | 06 |
| b tour à commande numérique | 07 |
| c- tour a commande avec convoyeur de copeaux..... | 08 |
| d les tours automatiques multibroches..... | 08 |
| e les tours a commande numerique..... | 09 |
| I.3.2 Régimes de coupe..... | 10 |
| a ébauche..... | 10 |
| b semi-finition..... | 10 |
| C Finition..... | 10 |
| I.4 Support et entraînement des pièces sur un tour..... | 10 |
| I.4.1 Montage en l'air..... | 10 |
| I.4.2 Montage mixte..... | 11 |
| I.4.3 Montage entre-pointes..... | 11 |
| I.5 Opérations de tournage..... | 12 |
| I.5.1 Chariotage..... | 12 |
| I.5.2 Alésage..... | 12 |
| I.5.3 Dressage..... | 13 |
| I.5.4 Perçage..... | 14 |
| I.5.5 Rainurage..... | 14 |
| I.5.6 Chan-freinage..... | 15 |
| I.5.7 Tronçonnage..... | 15 |
| I.5.8 Filetage..... | 16 |
| I.6 Surfaces usiné de la pièce..... | 16 |
| I.7 Les outils..... | 17 |
| I.7.1 Paramètres géométriques de coupe..... | 17 |
| I.7.2 Éléments d'outil..... | 18 |
| I.7.3 Faces et arêtes de l'outil..... | 18 |
| I.7.4 Angles de l'outil..... | 20 |
| I.7.5 Les principales propriétés d'un outil coupant..... | 21 |
| I.7.6 Déférent types des outils..... | 22 |
| I.7.7 Matériaux des outils coupants..... | 22 |
| I.7.7.1 Outils en Aciers Rapides (AR)..... | 22 |
| I.7.7.2 Outils en Aciers Rapides Supérieur (ARS) | 23 |
| I.7.7.3 Outils en carbure métalliques..... | 23 |
| I.7.7.4 Outils en céramique..... | 23 |
| I.7.7.5 Outils en diamant..... | 23 |
| I.8 Conditions de coupe..... | 24 |
| I.8.1 Vitesse de coupe V_c | 25 |
| I.8.2 Vitesse d'avance V_f et avance par tour f | 27 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| I.8.3 Profondeur de passe « a »..... | 27 |
| I.9 Paramètres techno-économiques d'usinage..... | 28 |
| I.9.1 Temps d'usinage..... | 28 |
| I.9.2 Coût d'usinage..... | 29 |
| I.9.3 Durée de vie d'un outil de coupe | 30 |
| I.10 Efforts de coupe en tournage | 32 |
| I.10.1 Composantes de l'effort de coupe | 32 |
| I.10.2 Puissance de coupe..... | 33 |
| Conclusion..... | 34 |

Chapitre II :Les défauts d'usinage

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 35 |
| II.1. Analyse générale des sources d'erreurs..... | 35 |
| II.2. Erreurs quasi-statiques..... | 36 |
| II.3. Erreurs géométriques..... | 36 |
| II.4. L'erreur volumétrique | 38 |
| II.4.1. Les écarts de membrure..... | 38 |
| II.4.2. Erreurs cinématiques..... | 38 |
| II.5. Erreurs causées par les charges de coupe..... | 39 |
| II.5.1. Erreurs dues aux chargements statiques | 40 |
| II.5.2. Erreurs dynamiques..... | 41 |
| II.5.2.1. Erreurs dynamiques dues à la machine-outil..... | 42 |
| II.5.2.2. Erreurs dynamiques dues au procédé..... | 42 |
| II.6. La déflexion de l'outil..... | 42 |
| II.7. L'usure de l'outil | 43 |
| II.8. Les défauts de mise en position de la pièce | 44 |
| II.9. Erreurs causée par le dispositif du serrage..... | 45 |
| II.10. La dilatation thermique..... | 45 |
| II.11. Déformations sous l'effet des forces de coupe..... | 46 |
| II.12 Erreur de mesure sur machine-outil | 46 |
| II.13. Vibrations..... | 47 |
| II.13.1 Les vibrations libres..... | 47 |
| II.13.2 Les vibrations forces..... | 47 |
| II.13.3 Les vibrations auto-entretenues..... | 47 |
| II.13.4 Les vibrations d'usinage..... | 48 |
| II.14. Techniques de Réduction et de compensation des effets d'erreurs | 48 |
| II.14.1. Techniques de Réduction des effets d'erreurs..... | 49 |
| II.14.1.1. Évitement d'erreur..... | 49 |
| II.14.1.2 Compensation des erreurs par étalonnage..... | 50 |
| II.14.1.3 Compensation active..... | 51 |
| II.14.2. Limitations des techniques de compensation..... | 51 |
| Conclusions..... | 53 |

CHAPITRE III : TECHNIQUES D'OPTIMISATION

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 54 |
| III-1 Définitions..... | 54 |
| III-2 Stratégies d'optimisation mono-objective..... | 55 |
| III-2-1 Les critères économiques..... | 56 |

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| III-2-1-1 Le temps de production..... | 56 |
| III-2-1-2 Le coût de production | 56 |
| III-2-1-3 Le taux d'enlèvement de la matière..... | 57 |
| III-2-2 Les critères technologiques..... | 57 |
| III-2-2-1 La durée de vie de l'outil..... | 57 |
| III 2-2-2- La qualité de la pièce usinée : la rugosité..... | 58 |
| III-2-2-3 L'effort de coupe | 59 |
| III-2-2-4 L'énergie et la puissance de coupe consommées..... | 59 |
| III-3- Stratégies d'optimisation multi-objective..... | 60 |
| III-3-1 Optimisation bi-objectifs | 61 |
| III-3-2 Optimisation Tri-objectif | 62 |
| III-4-1 Optimisation des systèmes non linéaires | 62 |
| III-4-2 Optimisation des systèmes linéaire..... | 63 |
| III-5 techniques d'optimisation..... | 65 |
| III-5-1 Techniques d'optimisation conventionnelles et non Conventionnelles... | 65 |
| III-5-2 Méthode agrégées | 65 |
| III-5-3 Méthodes Pareto | 69 |
| III-5-4 Les techniques d'optimisation hybrides..... | 69 |
| Conclusion..... | 74 |
| CHAPITRE IV : étude de cas pratique | |
| Introduction..... | 75 |
| IV-1 Optimisation des conditions de coupe..... | 75 |
| IV-1-1 Fonctions objectifs..... | 75 |
| IV-2 Contraintes de problème..... | 78 |
| IV-3 Modèle d'optimisation retenu | 80 |
| IV-4-1 Formulation de problème (algorithme)..... | 81 |
| IV-4-2 Résolution pour le cas d'ébauche | 81 |
| IV-4-3 Constantes et variables d'usinage..... | 82 |
| IV-5 Simulation | 83 |
| IV-6 Résultats | 85 |
| IV-7 Résolution pour le cas de finition | 85 |
| IV-8 simulation (finition)..... | 88 |
| Conclusion | 90 |
| Conclusion générale..... | 91 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure .I.1 mouvement de coupe et d'avance en tournage | 2 |
| Figure .I.2 Principe de tournage | 3 |
| Figure .I.3 Surface de la pièce | 4 |
| Figure .I.4 - Composant d'un tour | 5 |
| Figure. I.5 - tour semi-automatiques | 5 |
| Figure. I.6 - tour automatiques | 6 |
| Figure. I.7 - tour automatique multibroches | 6 |
| Figure. I.8 - tour à commande numérique | 7 |
| Figure. I.9 - montage en l'aire | 8 |
| Figure. I.10 - montage mixte | 8 |
| Figure. I.11 - montage entre-pointe | 9 |
| Figure. I .12: Chariotage | 9 |
| Figure. I.13: Alésage | 10 |
| Figure. I 14: Dressage | 10 |
| Figure. I 15: Perçage | 11 |
| Figure. I 16: Rainurage | 11 |
| Figure. I 17: Chan-freinage | 12 |
| Figure. I 18: Tronçonnage | 12 |
| Figure. I.19: Filetage | 13 |
| Figure I. 20 surfaces de la pièce | 13 |
| Figure. I.21 Configuration de coupe | 14 |
| Figure. I.22 : Arêtes et parties actives d'un outil de tournage | 15 |
| Figure. I.23 : Mouvement relatif outil/ pièce en tournage | 16 |
| Figure. I.24: Angles du taillant (outil en main) | 17 |
| Figure. I.25 : Angles du taillant (outil en travail) | 17 |
| Figure I. 26 Types d'outils porte-plaquettes | 19 |
| Figure I. 27 Les matériaux des outils | 20 |
| Figure. I.28 : Les choix des paramètres de coupe | 21 |
| Figure I. 29 Vitesse de coupe V_c | 22 |
| Figure I. 30 les profondeurs de passe | 23 |
| Figure. I.31: Paramètres du temps technologique | 24 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I.32: Critère d'usure VB | 26 |
| Figure. I.33 : efforts de coupe en tournage | 28 |
| Figure II .1 : Exemple de gravité induite par erreur | 31 |
| Figure II .2 : Liaison linéaire typique d'une machine-outil | 31 |
| Figure II.3 : Exemple d'erreur Cinématique du mouvement de translation | 32 |
| Figure II.4 : Exemple d'erreurs cinématiques pour mouvement Rotatif | 33 |
| Figure II.5 : serrage face aux appuis | 34 |
| Figure II.6 : serrage par bridage | 34 |
| Figure II.7 : Erreur insensible (à gauche) et sensible (à droite), causée respectivement par la déflexion radiale et tangentielle de l'outil | 36 |
| Figure II.8 Incertitude de l'avance de l'outil induite par l'usure en dépouille de l'outil. | 37 |
| Figure II.9 Défaut de mise en position de la pièce | 38 |
| Figure II.10 Sources d'incertitudes affectant les paramètres de coupe | 40 |
| Figure II.11 : Stratégies de réduction des erreurs | 42 |
| Figure II.12 : Concept d'évitement des erreurs | 42 |
| Figure II.13 : Technique de compensation par étalonnage | 43 |
| Figure II.14: Concept de la compensation active des erreurs | 45 |
| Figure III-1- Fréquence d'apparition des performances d'usinage dans des travaux d'optimisation multi-objectifs en tournage. | 52 |
| Figure III-2- Critères d'optimisation multi-objectifs les plus utilisés en tournage. | 52 |
| Figure III-3- Front de Pareto | 58 |
| Figure III-4- Algorithme (NSGA II) | 59 |
| Figure III-5- fonctionnement d'un Algorithme génétique. | 61 |
| Figure IV.1 - l'évolution de temps et de cout en fonction V_c | 65 |
| Figure IV.2 - Espace de recherche faisable (ébauche) | 70 |
| Figure IV.3 - agrandissement d'espace de recherche Faisable. | 71 |
| Figure IV.4 - les solutions non dominée de front de pareto. | 71 |
| Figure IV.5 - Espace de recherche faisable (finition) | 74 |
| Figure IV.6 - agrandissement d'espace de recherche Faisable (finition) | 74 |
| Figure IV.7 - la solution non dominée de front de Pareto (finition) | 75 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau III-1- Valeurs approximative de n pour carbure. | 54 |
| Tableau. IV.1 paramètres d'usinage..... | 69 |
| Tableau IV.2 les paramètres de coupe optimaux..... | 72 |

Introduction générale

La manufacturée et ses différentes branches occupent une place centrale dans l'industrie. L'usinage par enlèvement de matière occupe un espace présumé dans la fabrication, c'est la méthode qui permet de produire des formes complexes et très précises sans changement des caractéristiques de la matière usinée.

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés, ses résultats dépendent initialement du choix des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour ou vitesse d'avance et la profondeur de passe). La réussite d'une opération de tournage est jugée à travers des performances technologiques et économiques résultants (productivité, coût, état de surface ...etc.). Des études expérimentales menées, ont permis de modéliser le processus de coupe. Les modèles trouvés sont en générale des relations empiriques reliant les performances d'usinage aux conditions de coupe.

De très nombreux problèmes d'optimisation impliquent le plus souvent l'optimisation simultanée d'objectifs, généralement contradictoires. Pour ce genre de problèmes, la notion de solution optimale unique disparaît au profit de la notion de compromis devant satisfaire les objectifs imposés. L'étude de compromis a donné lieu à la définition de solutions optimales et de dominance au sens de Pareto. D'autre part, les méthodes d'optimisation multi-objectif, bio et socio inspirés, sont reconnues comme des techniques particulièrement adaptées à la recherche de surface de Pareto, à la différence de la plupart des méthodes traditionnelles, qui manipulent en général un point unique de l'espace de recherche

L'optimisation est une science qui consiste à trouver une meilleure solution pour un problème mathématique. Dans notre cas d'application, la sélection optimale des conditions de coupe est basée sur l'amélioration de certaines performances d'usinage dit objectif (temps d'usinage, coût d'usinage). Les conditions sélectionnées doivent respecter les limites au triplet pièce-outil-machine. Ces limites sont traduites par des équations d'inégalité dites contraintes, devant être satisfaites.

En réalité, le problème d'usinage est souvent présenté à l'aide de critères multiples. Les performances incluses dans ces critères sont dans la plupart des cas contradictoire ce qui nous conduit à un recours à l'optimisation multi-objectif.

Dans ce travail, nous allons tenter de modéliser et résoudre un problème d'optimisation du procédé d'usinage. Cette tâche nécessite en premier lieu de choisir des

Introduction générale

modèles mathématiques cohérents, qui présentent à juste valeur la réalité. En deuxième lieu, l'utilisation d'une méthode d'optimisation facile à mettre en œuvre, rapide, fiable ou assure la reproductibilité des résultats et précise.

Pour se faire, notre document s'articule sur quatre chapitres :

- Chapitre I : Généralités sur le tournage ;
- Chapitre II : Les défauts d'usinage ;
- Chapitre III : Techniques d'optimisation ;
- Chapitre IV : Simulation et discussions.

Chapitre I

Généralités sur le Tournage

Introduction

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

Le tournage est l'un des procédés d'usinage. Il occupe une place très importante dans la fabrication mécanique grâce à sa simplicité et la possibilité de produire par lequel un grand nombre de forme géométrique.

Malgré l'apparition de nouvelles techniques de fabrication au cours des dernières années, la fabrication par enlèvement de matière reste à l'heure actuelle l'un des procédés les plus largement utilisés [1].

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

I.1 Procédé de tournage

Le tournage est un procédé d'usinage par coupe (enlèvement de matière) qui consiste à l'obtention des pièces de forme cylindrique ou/et conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tour. La pièce à usiner est fixée par des mors, dans un mandrin, ou entre pointes. Il est également possible de percer sur un tour, même si ce n'est pas sa fonction première) [2].

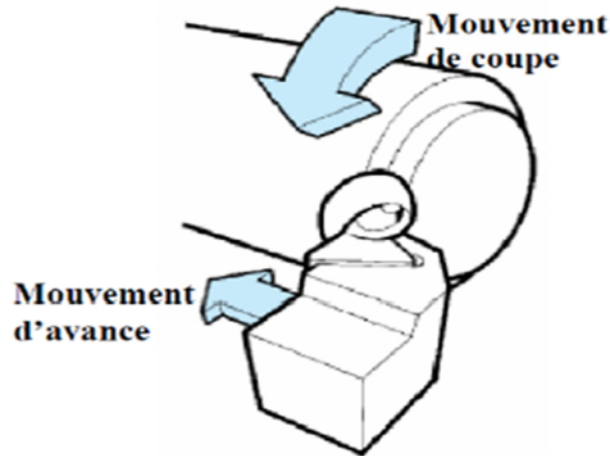


Figure .I.1 Mouvement de coupe et d'avance en tournage [2]

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

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

Dans son mouvement, la pointe de l'outil décrit une ligne appelée génératrice qui transforme la pièce en un solide de révolution, en faisant varier le déplacement de l'outil il sera possible d'obtenir tous les solides de révolution de plusieurs forme (cylindre, cône, sphère, etc.). Le tournage permet également le façonnage des formes intérieures par perçage, alésage, taraudage [3].

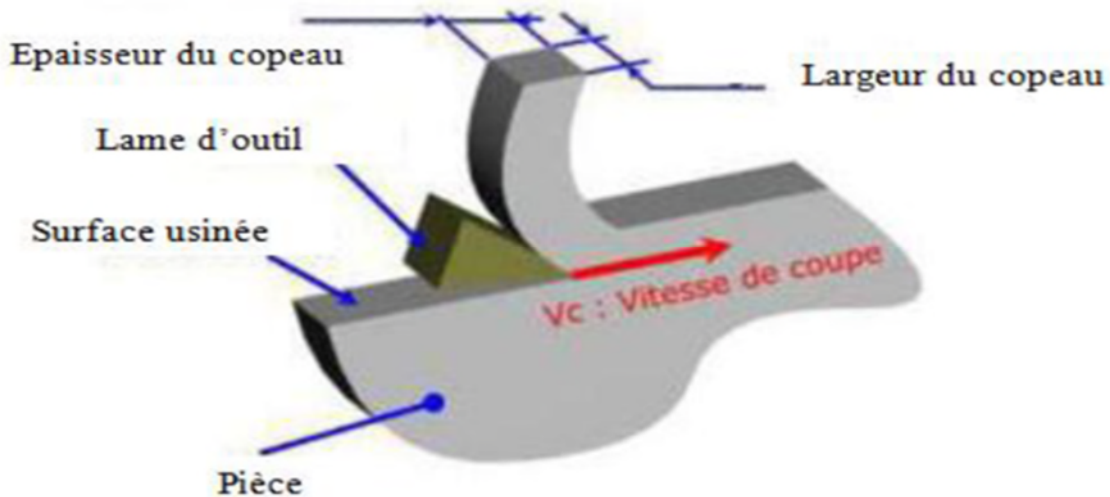


Figure .I.2 Principe de tournage [4]

I.2.1 Surfaces de la pièce

Les principaux éléments d'une pièce à usiner, la surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée surface de la pièce. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc..) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes [2].

La surface engendrée (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée surface coupée (figure I.3).

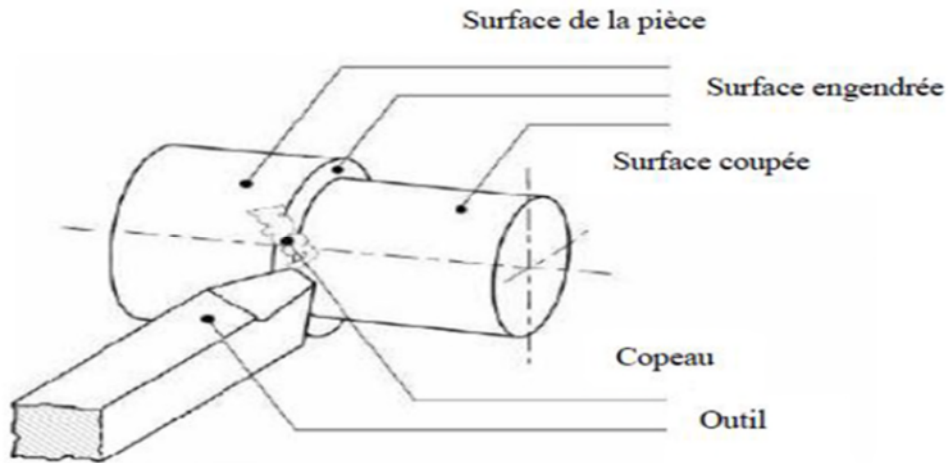


Figure .I.3 Surface de la pièce [2]

I.3 Les tours

Les tours (voir Figure I.4) permettent de réaliser des surfaces de révolution et hélicoïdales (filetage), cylindres, cônes et plans (génératrice perpendiculaire à l'axe de révolution). L'utilisation principale de ces machines est l'usinage des arbres. La pièce, généralement tenue par le mandrin, a un mouvement de rotation (mouvement de coupe) transmis par la broche. L'outil peut se déplacer en translation suivant deux directions. Ces deux directions, perpendiculaires entre elles, appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche [6].

I.3.1 Classification des machines de tournage

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

a. Les tours parallèles à charioter et à fileter

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples. Ces tours sont peu flexibles. Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe [8].

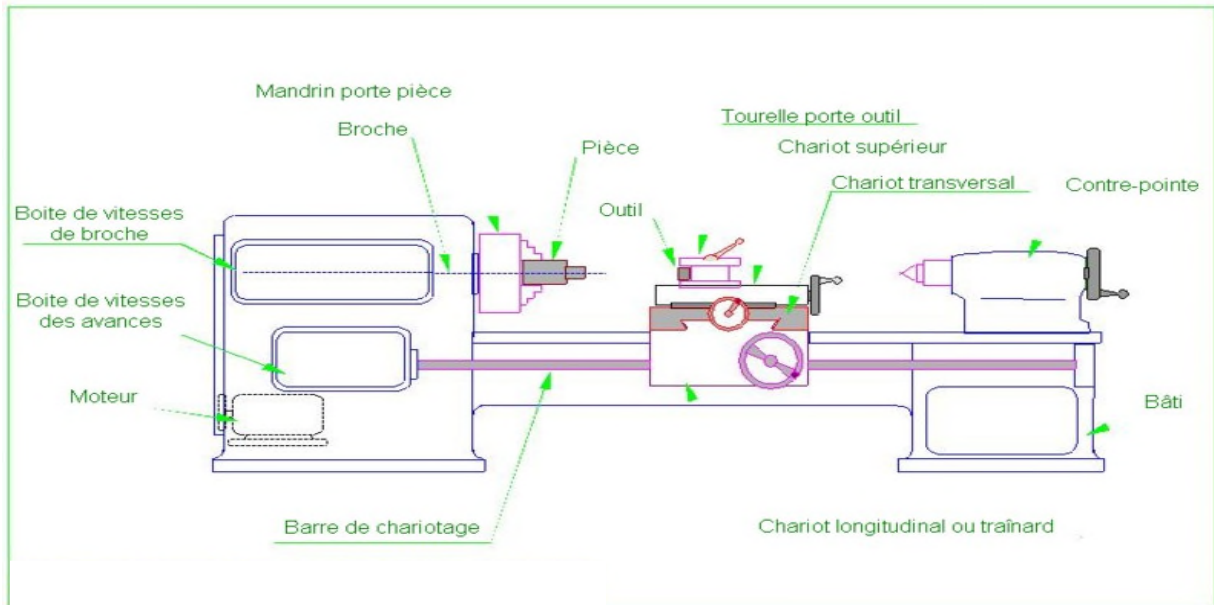


Figure I.4 Composants d'un tour [7]

b. Tour à commande numérique

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale index able 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 [8].



Figure. I.5 Tour à Commande Numérique [8]

c. tour a commandé avec convoyeur de copeaux

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques. Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries [8].



Figure. I.6 - Tour a commande numérique avec convoyeur copeaux [8]

d. Les tours automatiques multibroches

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée. Il est possible de travailler dans la barre. Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera est réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches [8].



Figure. I.7 Tour commande numérique [8]

e. Les tours à commande numérique

Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces. La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives [8].



Figure. I.8 - tour à commande numérique [8]

I.3.2 type d'opération de coupe

a. Ebauche

C'est l'opération qui consiste à enlever le maximum de copeaux en un minimum de temps sans s'intéresser à l'état de surface. Il faut donc choisir de grandes profondeurs de passe et de grandes avances [9].

b. Semi-finition

C'est l'opération qui permet d'obtenir une finition partielle de la pièce (position géométrique) [14].

c. Finition

C'est l'opération qui consiste à finir la pièce aux cotes prescrites. Il faut donc choisir des grandes vitesses de coupe et de petites avances pour obtenir des surfaces de bonne qualité [9].

I.4 Support et entraînement des pièces sur un tour

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

I.4.1 Montage en l'air

C'est un montage sur mandrin effectué pour les pièces courtes ($L < 4D$). Une des Extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre reste libre [9].

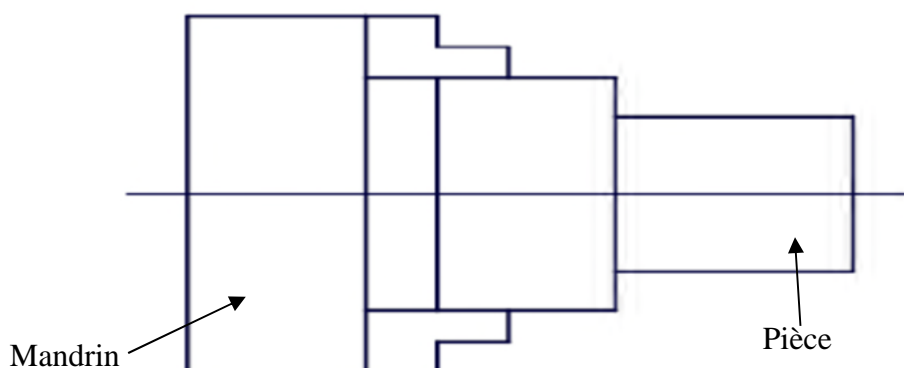


Figure. I.9 - Montage en l'air [9].

I.4.2 Montage mixte

Il est utilisé pour des pièces relativement longues ($4D < L < 8D$). Une des deux Extrémités est fixée sur le mandrin alors que l'autre extrémité est soutenue par de la Poupée mobiles [9].

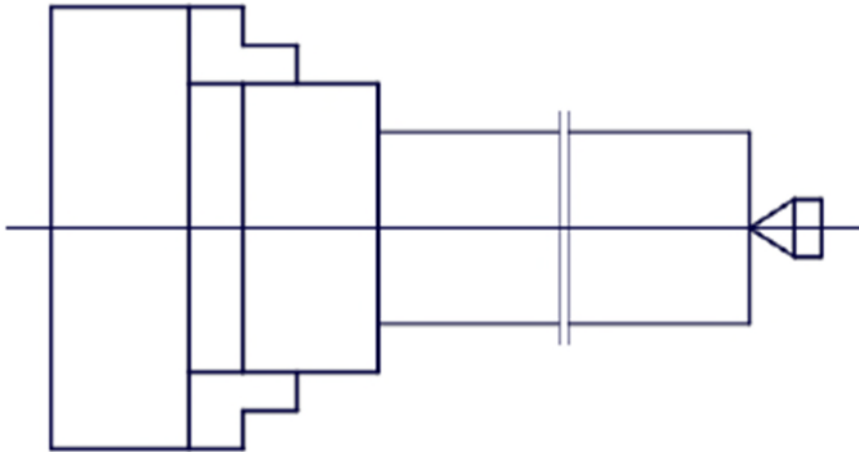


Figure. I.10 - montage mixte [9].

I.4.3 Montage entre-pointes

Pour l'usinage des pièces longues ($L > 8D$), on utilise le montage entre pointes. La Pièce est soutenue par ses deux extrémités par deux pointes plus lunette [9].

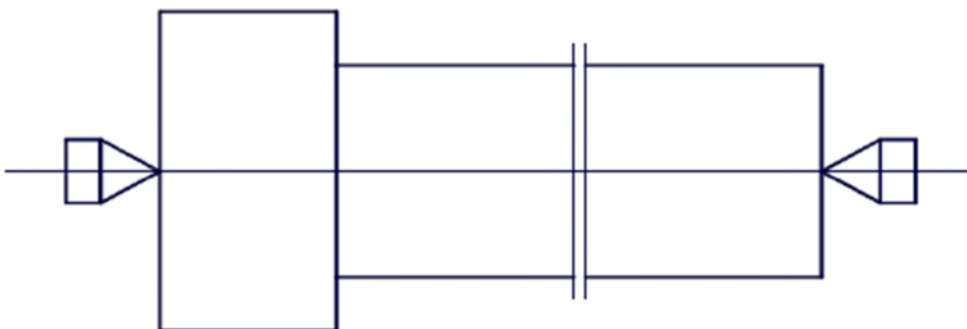


Figure. I.11 Montage entre-pointe [9].

I.5 Opérations de tournage

Dans le tournage, on peut classer, selon le profil de la pièce demandée les opérations en deux classes principales [9] :

- Tournage intérieur
- Tournage extérieur

Pour les deux classes, on peut distinguer suivant les formes obtenues, les opérations suivantes :

I.5.1 Chariotage

Le chariotage est une opération consistant à usiner sur un tour un cylindre d'un certain diamètre. Le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce [8].

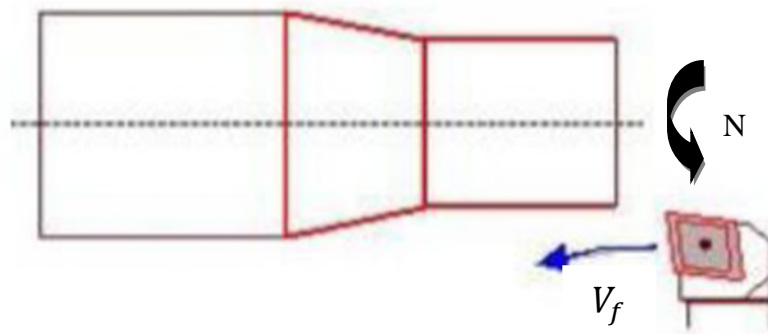


Figure. I .12 Opération de chariotage [8].

I.5.2 Alésage

L'alésage est l'opération qui consiste à usiner avec soin la surface intérieure d'un cylindre ou de toute autre pièce creuse. C'est aussi le résultat de cette opération. L'alésage est également, dans un moteur à pistons, le diamètre intérieur d'un cylindre, exprimé en millimètres ou en pouces. Plus généralement, c'est la régularisation très précise de l'intérieur d'un tube, d'un trou [8].

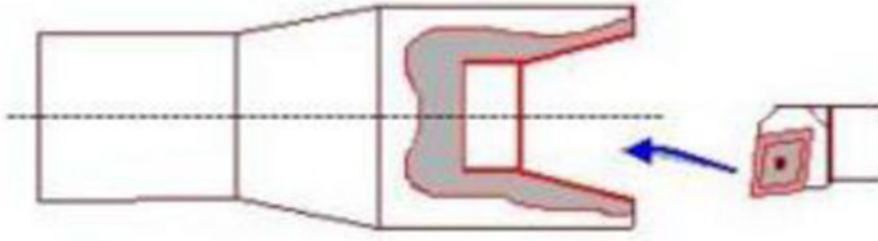


Figure. I.13 Alésage [8].

I.5.3 Dressage

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche Extérieure ou intérieure telle indiqué sur la (Figure I 14.) [8]

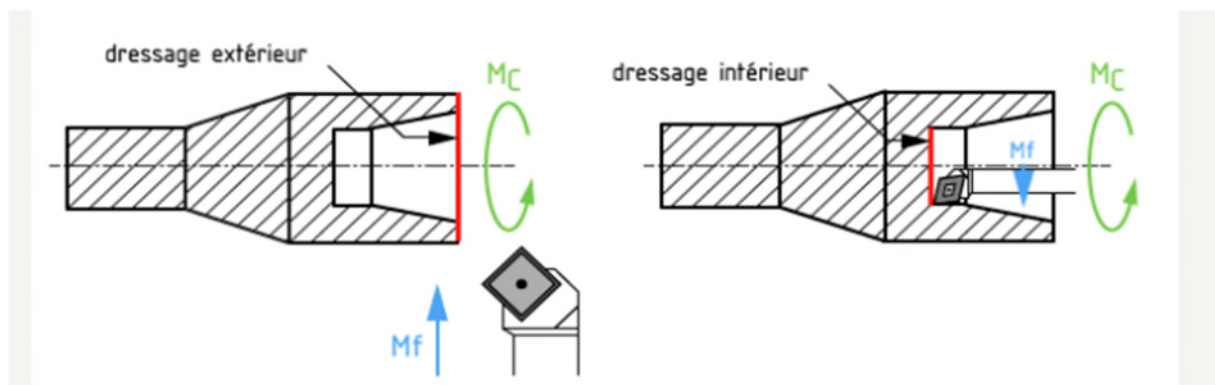


Figure. I.14 Dressage [8].

I.5.4 Perçage

Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'un foret comme montre la (Figure I. 15) [8].

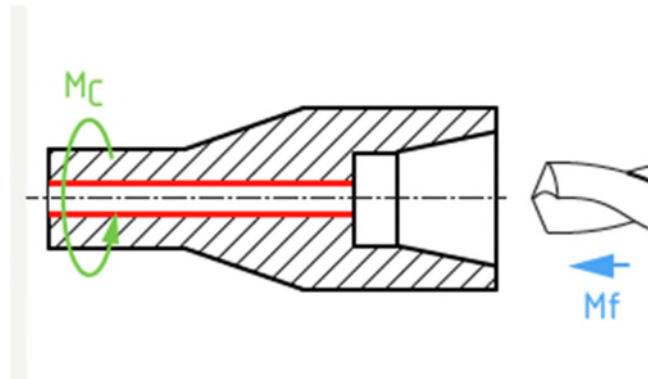


Figure. I.15 Perçage [8]

I.5.5 Rainurage

Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un Circlips ou d'un joint torique par exemple telle indiqué sur la (Figure I. 16) [8].

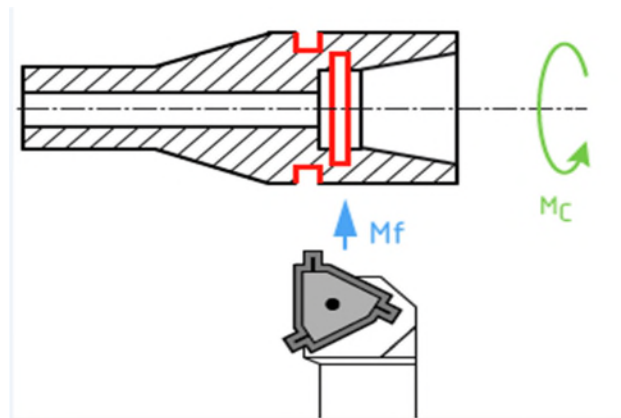


Figure. I.16 Rainurage [8].

I.5.6 Chan-freinage

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif, comme montre la (Figure I. 17) [8].

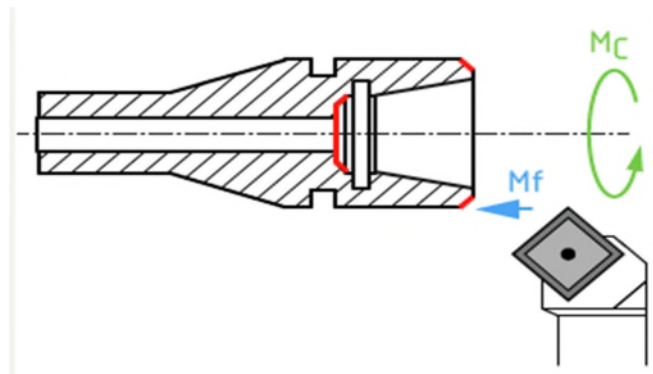


Figure. I.17 Chan-freinage [8].

I.5.7 Tronçonnage

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un Tronçon. (Figure I. 18) [8].

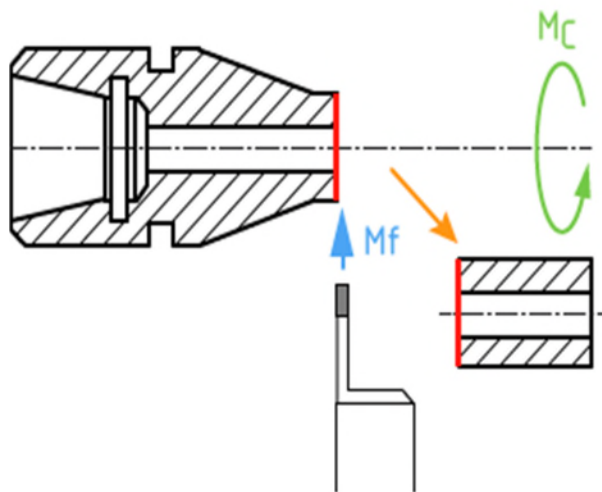


Figure. I.18 Tronçonnage [8].

I.5.8 Filetage

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieure ou intérieure, le moment Mouvement d'avance est combine avec le mouvement de coupe [8].

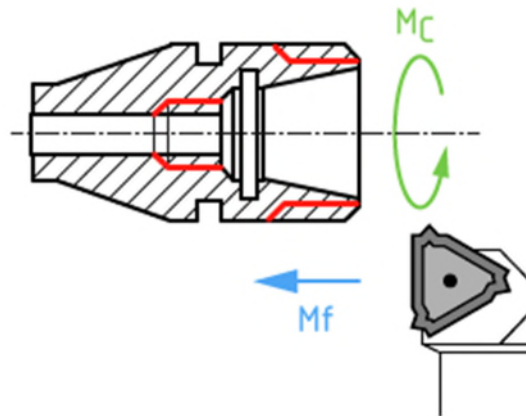


Figure. I.19 Filetage [8].

I.6 Surfaces usiné de la pièce

Les principaux éléments d'une pièce à usiner, la surface de la pièce sujette à l'usinage est Appelée **surface de la pièce**. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, Forgeage, laminage, etc...) Ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes **La surface Engendrée** (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée **surface coupée** (Figure I. 20) [2]

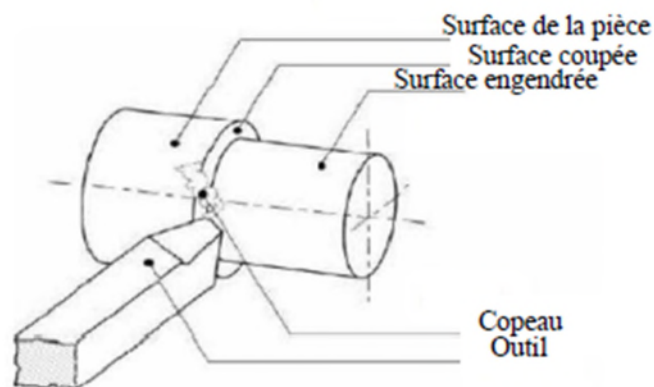


Figure. I.20 surfaces de la pièce [2].

I.7 Les outils

I.7.1 Paramètres géométriques de coupe

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée profondeur de coupe a_p . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée surépaisseur d'usinage. On appelle la coupe, la couche de matière qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés à la figure (I.21).

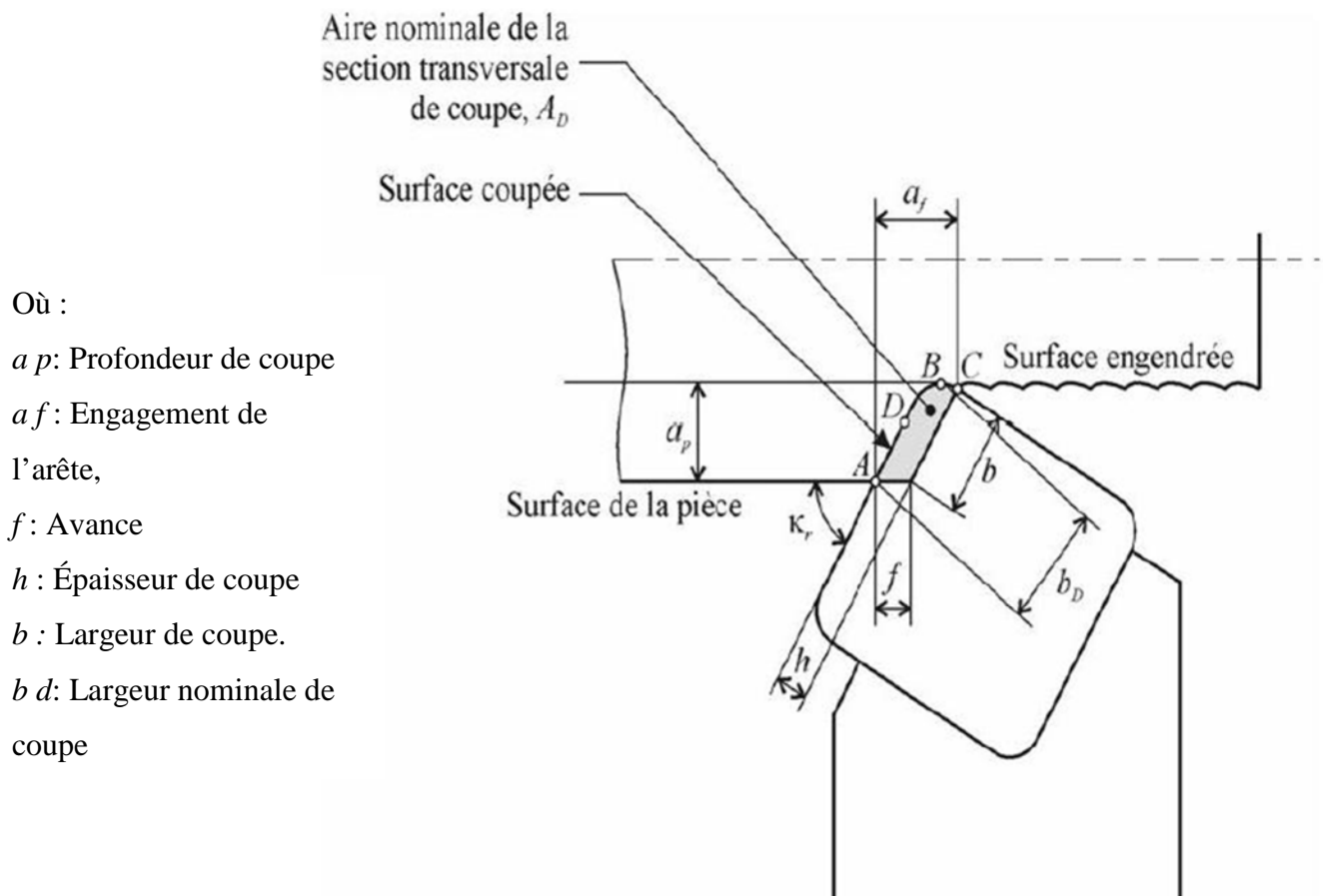


Figure. I.21 Configuration de coupe [13].

I.7.2 Éléments d'outil

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables.

Ainsi, afin de simplifier la compréhension de différents éléments définissant un outil quelconque, nous nous baserons sur un outil de coupe en tournage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil [13].

I.7.3 Faces et arêtes de l'outil

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil et peut comporter une ou plusieurs parties actives, intersection de deux surfaces (Figure I. 22). La partie active peut être constituée du même matériau que le corps, on parle alors d'outils monoblocs (carbures et aciers rapides) ou d'un matériau différent (inserts rapportés ou plaquettes pour les carbures, les cermets, les céramiques, les poly cristallins de bore ou de diamant). La (figure I. 20) précise le vocabulaire relatif aux différentes parties actives d'un outil de tournage. En plus de cette description de la géométrie locale des outils, il existe une norme (ISO 1831) permettant de décrire les différentes parties constitutives des outils de tournage à plaquettes rapportées, systématiquement utilisés aujourd'hui. Cette description indique une large part des caractéristiques des outils, à l'exception de la géométrie locale des brise-copeaux frittés sur les faces de coupe, et à l'exception de la composition des plaquettes et de leurs revêtements. Ce sont en fait les deux points clés qui font la spécificité des fabricants d'outils (impossible à normaliser) [3].

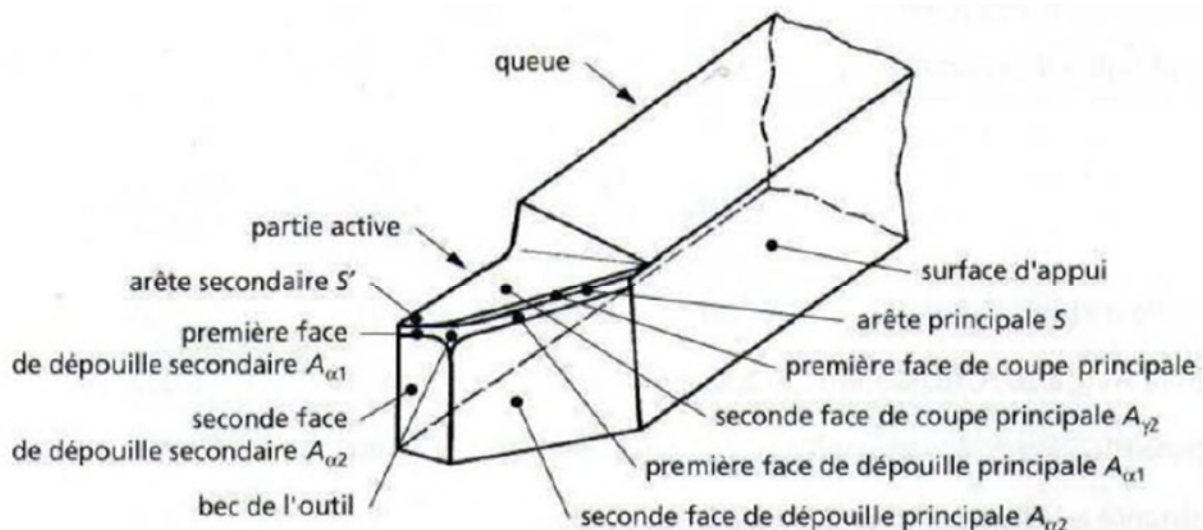


Figure. I.22 Arêtes et parties actives d'un outil de tournage [3].

La partie de l'outil impliquée directement dans la coupe est appelée taillant. Elle est limitée par trois faces, la face de coupe le long de laquelle glisse le copeau et les deux faces de dépouille (principale et secondaire) le long desquelles passent les surfaces coupée et engendrée [3].

On appelle une arête un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Dans un outil de tournage simple, on peut distinguer une arête principale, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille principale, et une arête secondaire, intersection entre la face de coupe et la face de dépouille secondaire. La jonction des arêtes principale et secondaire forme le bec de l'outil. Il peut être droit, arrondi ou représenter l'intersection vive des deux arêtes [3].

Généralement, un outil possède un mouvement de coupe et un mouvement d'avance.

On en déduit dès lors un vecteur résultant du mouvement relatif outil/ pièce exprime par le vecteur V_e . A partir de la, on peut définir deux systèmes d'angles d'un outil de coupe. On définit soit les angles d'outil « en main » par rapport à la direction supposée de coupe V_e (repère nécessaire à la fabrication des outils), soit les angles d'outils « en travail » par rapport à la direction réelle de coupe v_c (repère nécessaire pour connaître les angles effectifs durant la coupe). A l'aide de ces repères, on établit une série de plans et d'angles normalisés permettant de décrire la géométrie locale des outils [3].

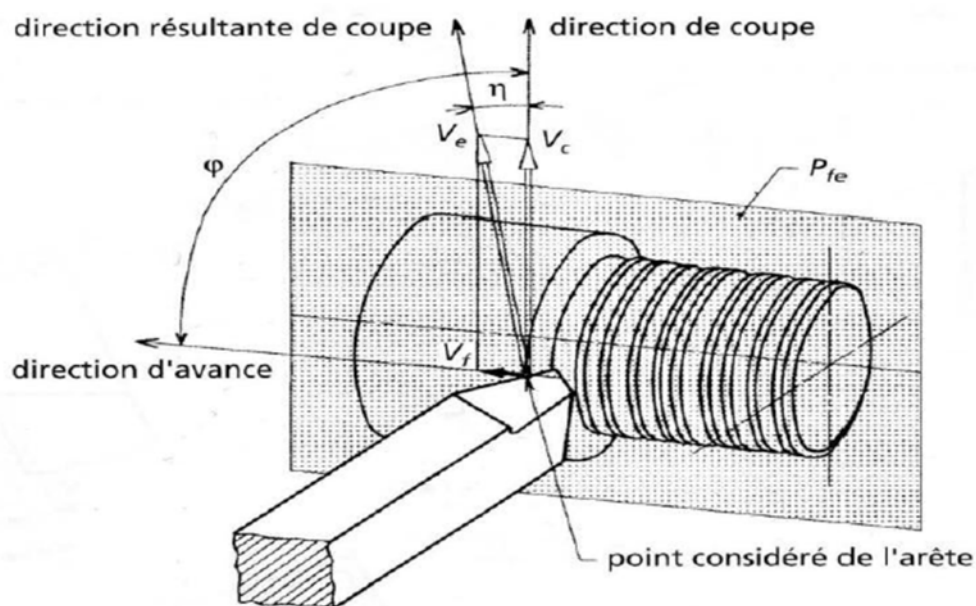


Figure. I.23 : Mouvement relatif outil/ pièce en tournage [7].

I.7.4 Angles de l'outil

Pour faciliter l'explication des phénomènes de la coupe il est nécessaire de Définir les angles ayant la plus grande influence sur les dits phénomènes.

La (figure I.24) illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ [7].

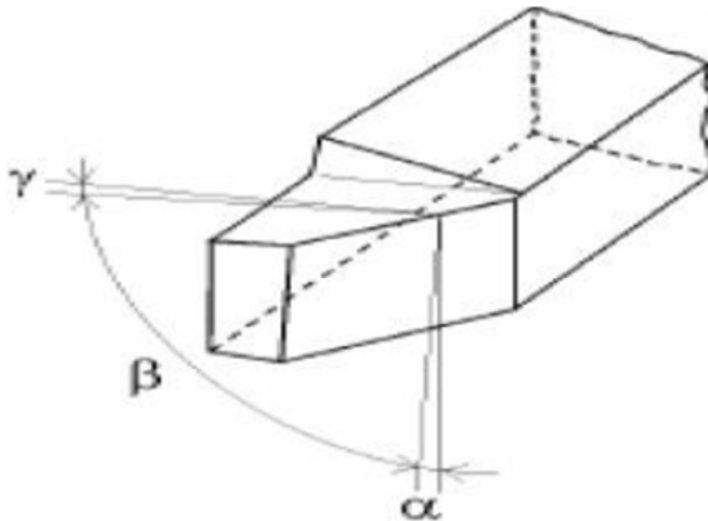


Figure. I.24 Angles du taillant (outil en main) [7].

La (figure I.23) illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en Travail : outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

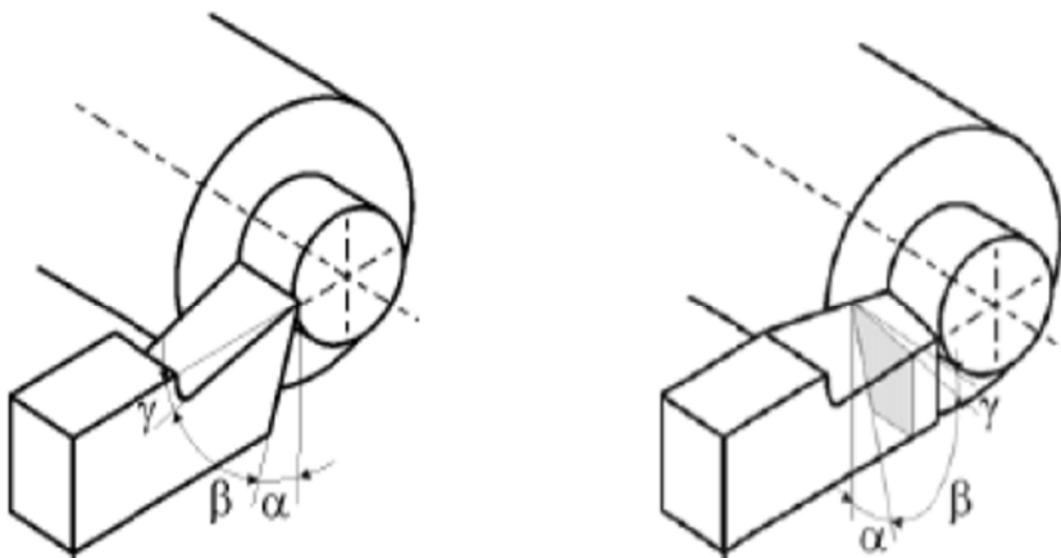


Figure. I.25 Angles du taillant (outil en travail) [7].

(γ) Angle de coupe

C'est l'angle entre la face de coupe et un plan de référence. La valeur de γ est déterminante dans le processus de formation du copeau. Les matériaux tendres ont besoin des angles de coupe élevés (20° à 25°). Les matériaux durs sont usinés avec des angles de coupe faibles, ou même négatifs.

(α) Angle de dépouille

Cet angle est nécessaire pour éviter le frottement de la face en dépouille de l'outil sur la surface de la pièce usinée (engendrée). Sa valeur nécessairement positive, oscille généralement entre (2° et 10°).

(β) Angle tranchant (ou angle de taillant)

C'est l'angle entre la face de coupe et la face de dépouille.

Globalement, l'angle de dépouille α influe sur le frottement entre l'outil et la pièce et donc la durée utile de l'outil. L'angle de coupe γ a une influence sur la manière dont s'écoule le copeau sur la face de coupe et ainsi les efforts de coupe, la puissance consommée, les dégagements de chaleur etc. L'angle de taillant β affecte la résistance à la rupture du taillant. La somme de ces trois angles est toujours égale à 90° [7].

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

Dans le cas où la somme est supérieure à 90° , on parle de coupe négative (γ négatif).

I.7.5 Les principales propriétés d'un outil coupant

La partie active des outils de coupe et donc les matériaux servant à leur constitution doivent posséder certaines propriétés [16] :

- Une bonne résistance mécanique au frottement
- Une bonne résistance aux chocs
- Une bonne résistance à la pénétration
- Une bonne résistance à la chaleur
- Une bonne résistance à la pression
- Une grande stabilité chimique

- Une faible adhésion avec le matériau usiné sous haute pression et haute température
- Un bas prix d'achat et de mise en forme, ainsi que l'abondance des éléments de Composition

I.7.6 Différent types des outils

Les outils de coupe en tournage classés selon la forme à trois types, ils sont :

- Les forets pour l'alésage
- Les outils monoblocs : le corps et la partie active sont de même matériau
- Les outils à plaquette

Les outils de tournage actuels sont constitués dans la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe, la (Figure I. 26) illustre les divers types d'outil porte plaquette.

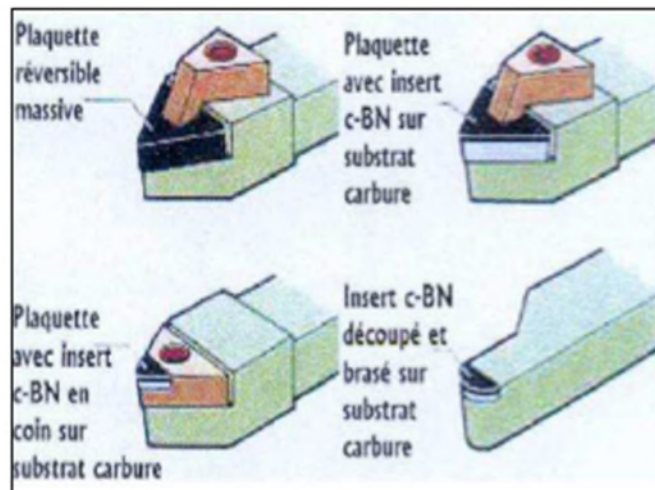


Figure .I. 26Types d'outils porte-plaquettes [5].

I.7.7 Matériaux des outils coupants

I.7.7.1 Outils en Aciers Rapides (AR)

Les aciers rapides ordinaires sont des alliages contenant du carbone (autour de 0,6%), mais Aussi du chrome (Cr), du Tungstène (W) ou du vanadium (V).
Leurs vitesses de coupe sont de l'ordre de 20 m/min pour l'usinage des aciers.

I.7.7.2 Outils en Aciers Rapides Supérieur (ARS)

Anglais: High Speed Steels (HSS)

Il s'agit d'aciers rapides qui contiennent 0.7% de carbone au minimum, en plus d'éléments D'addition: molybdène, titane, cobalt.

Ils ne permettent pas une vitesse de coupe élevée car un échauffement trop important Élimine la trempe de l'outil, et crée donc un effondrement rapide de l'arête de coupe.

Leur dureté est de l'ordre de 63 à 68 HRC, elle est conservée jusqu'à 550 C.

Leurs vitesses de coupe sont de l'ordre de 40 m/min pour l'usinage des aciers.

I.7.7.3 Outils en carbure métalliques

Anglais : carbides

La partie coupante est réalisée avec du carbure de tungstène (WC), additionnée de carbure De titane (TIC), ou de tantale (TAC).

La dureté des outils en carbure est de l'ordre de 80 à 90 HRC, elle est conservée jusqu'à 1000 C, ce qui rend la lubrification facultative

Leurs vitesses de coupe sont de l'ordre de 100 m/min pour l'usinage des aciers, ils permettent de bien meilleures performances que les outils en AR ou ARS.

I.7.7.4 Outils en céramique

Ils sont formés par un aggloméré à base d'aluminium (oxyde d'aluminium Al_2O_3), d'oxyde de chrome (Cr_2O_3), ou de nitrure de silicium (Si_3N_4).

Les céramiques ont une grande dureté et une grande stabilité à haute température et aucune réaction avec la matière usinée, Très bonne résistance à l'usure, Obtention d'un excellent état de surface.

Leurs vitesses de coupe sont de l'ordre de 500 m/mn pour l'usinage des aciers.

I.7.7.5 Outils en diamant

Anglais : diamond

Le diamant est le matériau le plus dur qui soit. Il est rarement utilisé en usinage par coupe

Le diamant est généralement utilisé pour l'usinage de métaux légers par abrasion : cuivre, laiton, résines...

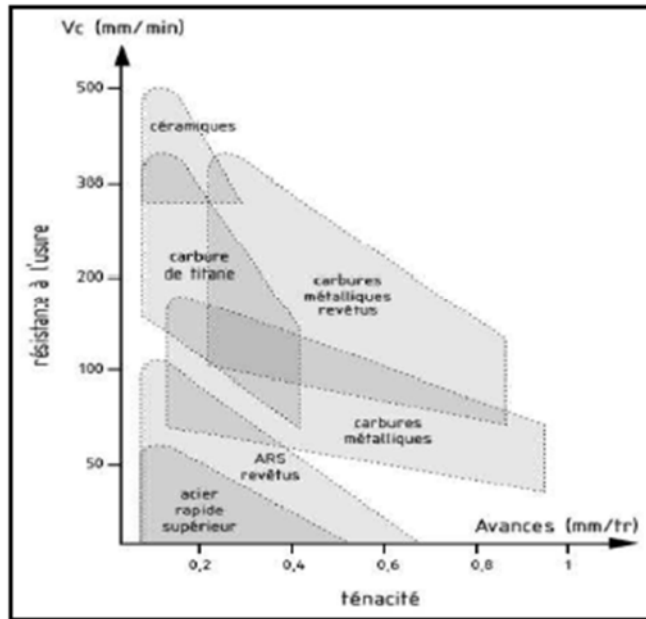


Figure I. 25 Les matériaux des outils [17].

I.8 Conditions de coupe

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...) :

Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...)
- La puissance de la machine
- La matière de l'outil (ARS, carbure...)
- La matière usinée (acier, aluminium...)
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfacage...)
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement) [10].

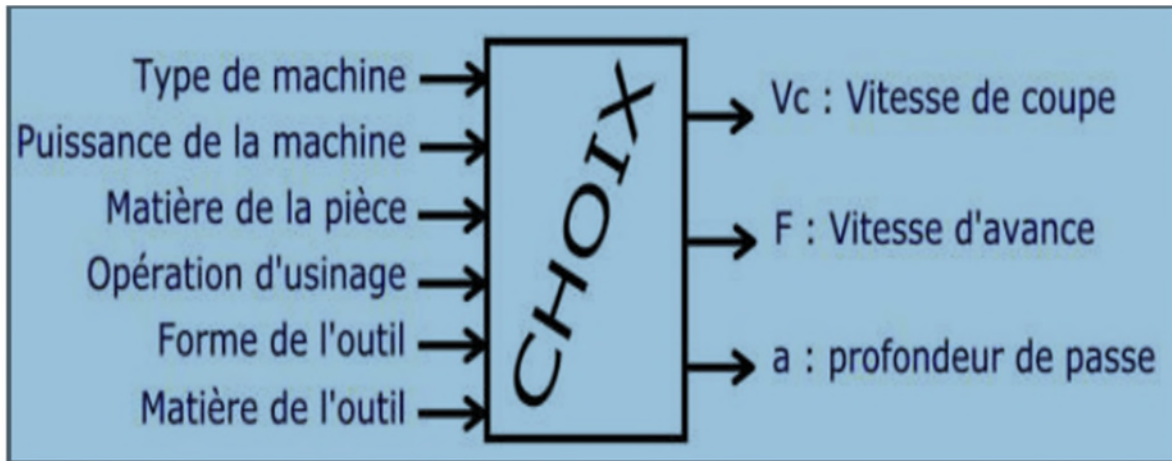


Figure. I.26 Les choix des paramètres de coupe [11].

I.8.1 Vitesse de coupe V_c :

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse angulaire ω , cette vitesse étant communiquée par la broche de la machine vers la porte pièce.

La vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil est donnée par la formule suivante :

$$V_c(\text{m/min}) = \frac{D}{2}(\text{m}) \times \omega(\text{red/min}) \quad (\text{I-1})$$

Ou bien par la formule suivante :

$$V_c(\text{m/min}) = \frac{\pi \times D(\text{mm}) \times N}{1000} \quad (\text{I-2})$$

Cette vitesse est appelée vitesse de coupe ; soit avec les unités traditionnelles de la fabrication Mécanique :

V_c : vitesse de coupe (m / min).

D : Diamètre de la pièce (mm).

N : Fréquence de rotation (tr / min).

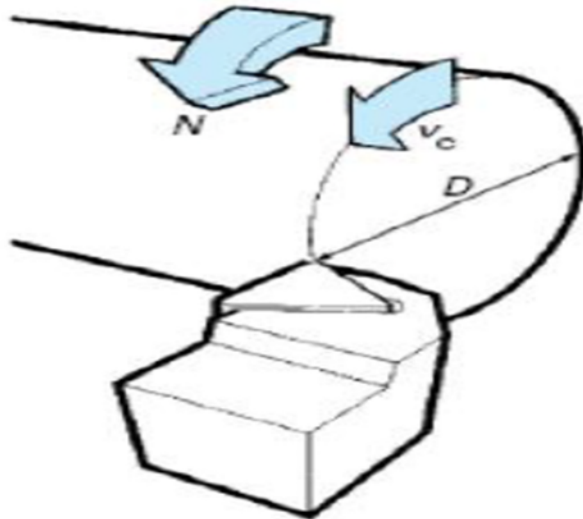


Figure .I.27 Vitesse de coupe V_c [18].

La vitesse de coupe varie continuellement si la rotation de la pièce s'effectue à une vitesse de broche constante. Or, pour une productivité maximale et une meilleure qualité des surfaces obtenues, il est souhaitable de maintenir la vitesse de coupe constante. Sur un grand nombre de tours modernes, la vitesse de broche augmente au fur et à mesure que l'outil approche de l'axe, afin de compenser ainsi la diminution de diamètre. Mais dans le cas de très petits diamètres, cette compensation se révèle impossible du fait de la plage de vitesse limitée qu'autorisent les machines. De même, lorsqu'une pièce, comme cela est souvent le cas, présente des diamètres différents ou est de forme conique ou courbe, la fréquence de rotation doit être corrigée en fonction du diamètre, pour maintenir la vitesse de coupe constante [19]. Le préparateur choisit cette vitesse de coupe en fonction, notamment :

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

La vitesse de la broche est donnée par l'expression suivante :

$$N(\text{tr}/\text{min}) = \frac{1000 \times V_c(\text{m}/\text{min})}{\pi \times D(\text{mm})}$$

I.8.2 Vitesse d’avance Vf et avance par tour f

La vitesse d’avance $V(mm/min)$, que la figure (I. 18) montre, est la vitesse à laquelle la machine déplace l’outil par rapport au bâti. L’avance par tour ($mmtr$) est la valeur du déplacement de l’outil, lorsque la pièce a effectué une révolution.

C’est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L’avance influe non seulement sur l’épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d’avance Vf est donnée par la formule suivante [12]:

- $Vf = f \times N \times Z$ (I.4)

I.8.3 Profondeur de passe « a »

La profondeur de passe notée a en (mm), correspond à la longueur de l’arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas de la coupe orthogonale, et à la différence entre le rayon de la pièce avant et après usinage, dans le cas du tournage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l’avance et non pas suivant l’arête de l’outil [8].

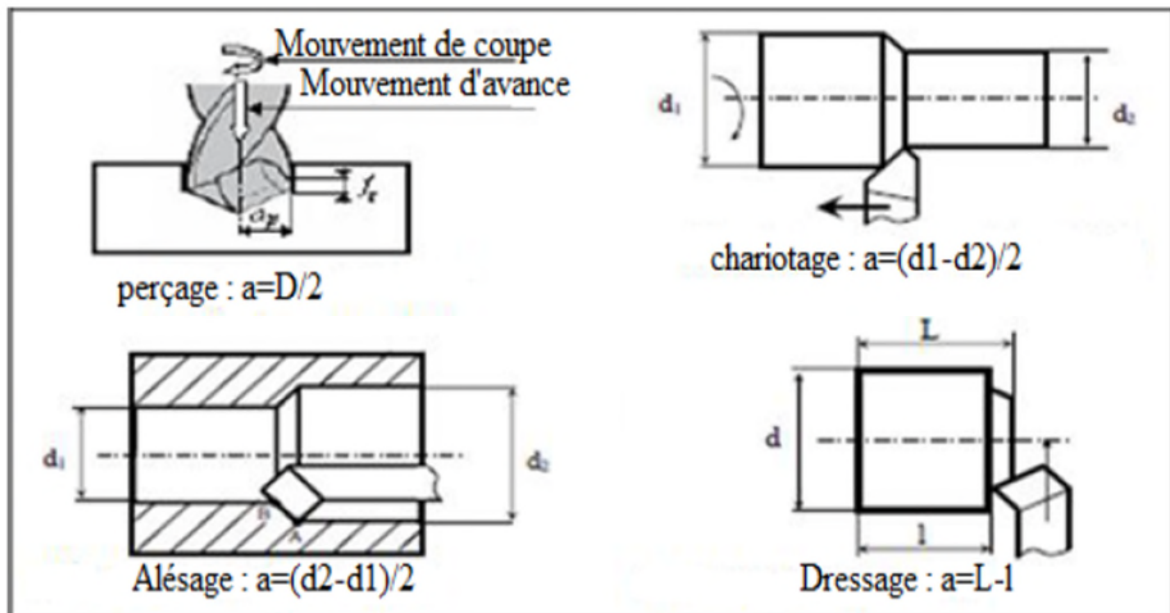


Figure .I.28 Les profondeurs de passe [8].

I.9 Paramètres techno-économiques d'usinage

Le coût d'usinage et le temps d'usinage sont les paramètres technico-économiques d'usinage. Ces les paramètres qui déterminent L'importance économique des pièces usinées [13].

I.9.1 Temps d'usinage

Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce.

Il s'exprime par la relation [15]:

$$Tu = Tm + T_{cs} \left(\frac{Tm}{T} \right) + Tr + Th \tag{I.5}$$

T_{cs} (Temps outil) : temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire.

T : Durée de vie de l'outil de coupe.

Tr : Temps de retour.

Tm :(Temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une avance), puis que : On déterminer le temps technologique comme suite :

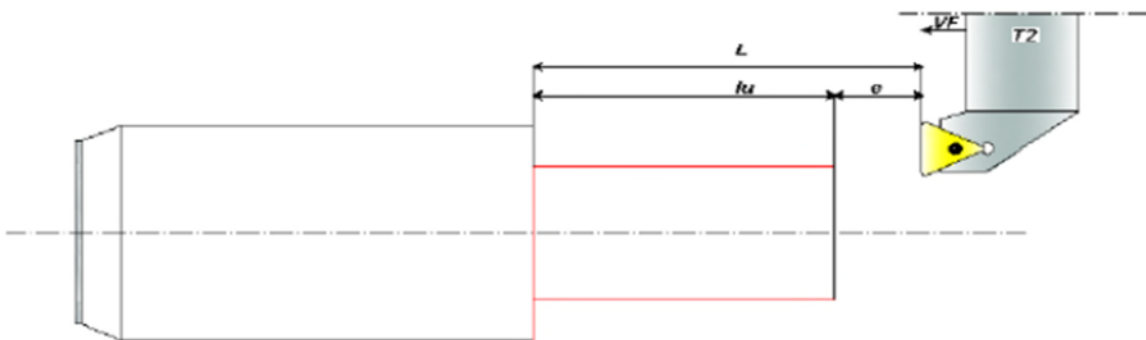


Figure. I.29 Paramètres du temps technologique [15].

Th : temps de montage et démontage de la pièce

Lu : Longueur usinée.

e : Distance de sécurité

V_f : vitesse d'avance

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = l_u + e \quad (I-6)$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce est:

$$T_m = \frac{L}{V_f} \quad (I.7)$$

$$T_m = \frac{\pi \times D \times N}{1000 \times V_c \times f} \quad (I.8)$$

I.9.2 Coût d'usinage

Généralement, la formule du coût d'usinage Est donnée par :

Coût total = frais fixes + coût machine + coût outil (I-9)

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

$$C_u = C_0 \cdot t_m + \left(\frac{t_m}{T}\right) \cdot C_0 \cdot (t_{cs} + C_t) + C_0(T_h + t_R) \quad (I.10)$$

C_u : Coût d'usinage unitaire.

C_0 : Coût de machine en \$/ min.

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

T_m (temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une avance).

t_{cs} : temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire.

T : durée de vie de l'outil de coupe.

t_r : temps de retour pour la dernière passe.

t_h : temps de montage et démontage de la pièce.

Paramètres à maîtriser :

- Durée de vie économique de l'outil T_e •
- Vitesse de coupe économique V_e .

Le calcul du coût d'usinage se heurte à des problèmes difficiles à résoudre. En effet, les conditions d'usinage ne sont pratiquement jamais identiques d'une opération à l'autre (surépaisseurs diverses, limite d'usure acceptable variable, etc.). On ramènera donc le calcul à une pièce pour une opération d'usinage avec un seul outil (dressage d'une face, chariotage). Il s'agit de minimiser le coût d'usinage par pièce.

I.9.3 Durée de vie d'un outil de coupe :

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

La durée de vie d'un outil est caractérisée par le temps mis pour atteindre la valeur limite du critère d'usure considérée dans des conditions de coupe données [2].

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

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

La durée de vie est mesurée sur l'usure en dépouille dans la zone b (figure I.30) V_B en *mm*.

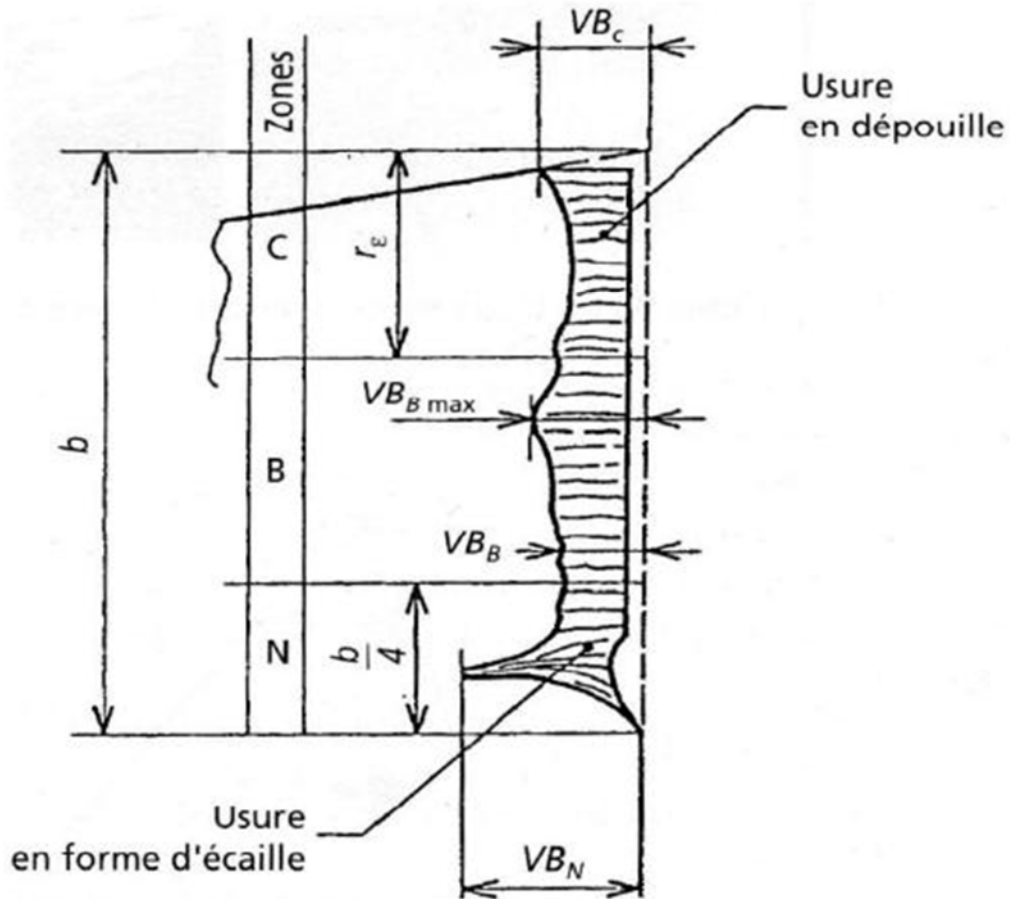


Figure I.30 Critère d'usure VB [8].

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

- Les conditions de coupe.
- Le matériau et la géométrie de l'outil.
- Le matériau et l'état physique de la pièce.
- La lubrification.
- Généralement seules les conditions de coupe sont prises en considération et on établit des lois d'usure pour des outils parfaitement définis pour un matériau usiné donné et dans des conditions de lubrification déterminées.

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

- $T = f(V_c \cdot f \cdot a_p)$ (I.11)

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

- $T = f(V_c \cdot f \cdot a_p)$ (I.12)

I.10 Efforts de coupe en tournage

L'effort de coupe dépend de la résistance spécifique à la rupture par Compression de la matière travaillée et de son usinabilité, des dimensions du copeau, de l'outil utilisé ainsi que du mode de travail (Fig. I.31). Généralement, l'effort de coupe est calculé par la relation suivante [19]

- $F_c = K \times S \times R_r$ (I.13)

Avec :

R_r : La Résistance spécifique à la rupture par compression.

S : Section du copeau définie par l'avance f et la profondeur de passe a_p , soit

- $S = a_p \times f$ (I.14)

K : Coefficient qui tient compte de l'usinabilité de la matière, de l'épaisseur du Copeau, (il est plus fort en finition qu'en ébauche) et de la géométrie de l'outil de coupe.

On adopte généralement les valeurs suivantes :

$K = 2,5$ à 4 pour les aciers et $K = 4$ à 5 pour les fontes [19].

I.10.1 Composantes de l'effort de coupe

Les composantes de l'effort de coupe (figure I.31), l'effort d'avance et l'effort De pénétration sont donnés par les relations suivantes [19].

- $F_f = (0.2 \alpha 0.3)F_c$ (I.15)

- $F_{a_p} = (0.4 \alpha 0.5)F_c$ (I.16)

Etant donné que les trois efforts forment un trièdre trirectangle alors :

- $F = \sqrt{(0.25 \times F_c)^2 + (0.45 \times F_c)^2} + F_c \cong 1.12F_c$ (I.17)

Généralement il est admis que : $F \approx F_c$

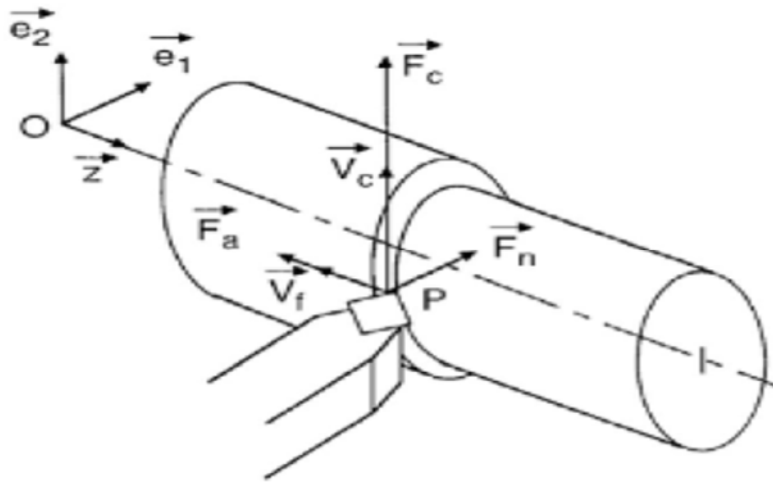


Figure. I.31 Efforts de coupe en tournage [19].

I.10.2 Puissance de coupe

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

- $P = \vec{F} \cdot \vec{V}$
- $P = \begin{vmatrix} F_a & V_a \\ F_f & V_f \\ F_c & V_c \end{vmatrix}$ (I.18)
- $P = F_a \cdot V_a + F_f \cdot V_f + F_c \cdot V_c$

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

- $P_c = F_c \times V_c$ (I.19)

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre de notre étude le procédé de tournage ainsi que les opérations de tournage (Chariotage, Dressage...), ainsi les conditions de coupe est la paramètres techno-économiques d'usinage (le coût, le temps d'usinage et la rugosité), ensuite puissance et efforts de coupe en tournage.

Chapitre II

Les défauts d'usinage

Introduction

Ce chapitre présente une revue générale de littérature concernant les catégories et le comportement des erreurs et défauts affectant la précision d'usinage. Les dimensions finales des pièces usinées sur machines-outils doivent répondre aux critères de conformité exigés par la conception. D'un côté l'évolution technologique de la conception nécessite de plus en plus des tolérances assez sévères pour des raisons de montage et de rôle des pièces durant leurs cycles de vies. De l'autre côté, la modernisation des machines-outils, pour répondre aux exigences du produit fini, reste insuffisante. Pour ces raisons, de multiples recherches sont menées pour étudier les erreurs affectant la précision d'usinage ainsi que les méthodes d'élimination de leurs effets. La précision des pièces fabriquées sur machines-outils se trouve affectée par une variété d'erreurs.

II.1. Analyse générale des sources d'erreurs

Les dimensions finales des pièces usinées sur machines-outils doivent répondre aux critères de conformité exigés par la conception. D'un côté l'évolution technologique de la conception nécessite de plus en plus des tolérances assez sévères pour des raisons de montage et de rôle des pièces durant leurs cycles de vie. De l'autre côté, la modernisation des machines-outils, pour répondre aux exigences du produit fini, reste insuffisante. Pour ces raisons, de multiples recherches sont menées pour étudier les erreurs affectant la précision d'usinage ainsi que les méthodes d'élimination de leurs effets.

La précision des pièces fabriquées sur machines-outils se trouve affectée par une variété d'erreurs qui entraîne des défauts d'usinage que l'on peut classer grossièrement comme suit [20]

- Les écarts de membrure.
- Erreurs quasi-statiques.
- Erreurs géométriques.
- Erreurs cinématiques.
- Erreurs dues aux chargements statiques.
- Erreurs causées par les charges de coupe.
- Déflexion de l'outil.
- Erreurs dynamiques.
- Erreurs dynamiques dues à la machine-outil.
- Erreurs dynamiques dues au procédé.

- Erreurs thermiques.
- L'erreur volumétrique.
- L'usure de l'outil.
- Les défauts de mise en position de la pièce.
- Erreurs causée par le dispositif du serrage.
- Déformations sous l'effet des forces de coupe.
- Vibrations.
- Erreur de mesure sur machine-outil.

II.2. Erreurs quasi-statiques

Les erreurs quasi-statiques constituent 70 % des erreurs attribuables aux machines-outils. Ces erreurs sont définies comme les erreurs sur la position relative entre l'outil et la pièce à usiner et varient lentement en fonction du temps. Elles dépendent de la structure de la machine et elles comportent principalement les erreurs géométriques, les erreurs cinématiques et les erreurs sous des contraintes statiques et thermiques. Pour illustrer le comportement des erreurs géométriques dans une machine-outil multiaxiales, un exemple d'évaluation de ces erreurs est présenté dans les sections suivantes en utilisant l'approche cinématique [21].

II.3. Erreurs géométriques

Les erreurs géométriques sont associées aux composantes structurelles de la machine et affectent directement les déplacements des éléments mobiles par rapport au système de référence. Le déplacement de la table d'une machine-outil par rapport à son bâti selon un axe entraîne des erreurs géométriques selon les trois axes principaux [21]. Par exemple, si la machine n'a pas été correctement stable ou prise en charge. Les glissières de la machine peuvent être pliées, conduisant à des erreurs géométriques excessives.

Les erreurs géométriques peuvent également résulter de la déviation des composants structuraux sous le poids de la partie ou en raison de la force de serrage agissant par la table de la machine. Toutefois, Le changement du poids de la pièce brute et le changement de position d'un chariot peut générer une composante d'erreur qui varie avec la position et l'utilisation.

Un simple cas de variation d'erreur géométrique est présenté sur la figure II.1, la déformation de la colonne Z change avec la position du bras de support de broche pour un mouvement

dans la direction Z. Ceci est dû à la variation du point de couple généré par le poids du bras de support de broche sur la colonne Z. Dans la figure II.2, il est possible de mettre en relief au moins six termes d'erreurs, dont chaque terme représente un degré de liberté. Trois erreurs linéiques et trois erreurs angulaires. Ces erreurs dépendent de la position de l'élément mobile sur son axe de déplacement principal.

La première erreur de translation est obtenue à partir de la différence entre la position réelle de l'élément mobile sur son axe de mouvement et la position mesurée par le capteur de position. Il s'agit de l'erreur de position linéaire.

Les deux autres erreurs sont mesurées le long des deux autres axes. Ces erreurs sont appelées "erreurs de rectitude horizontale et verticale". Les erreurs de rotation sont des déviations angulaires du chariot par rapport à la position de référence par des rotations autour des trois axes du système de référence. Elles sont usuellement appelées "lacet, tangage et roulis" [22].

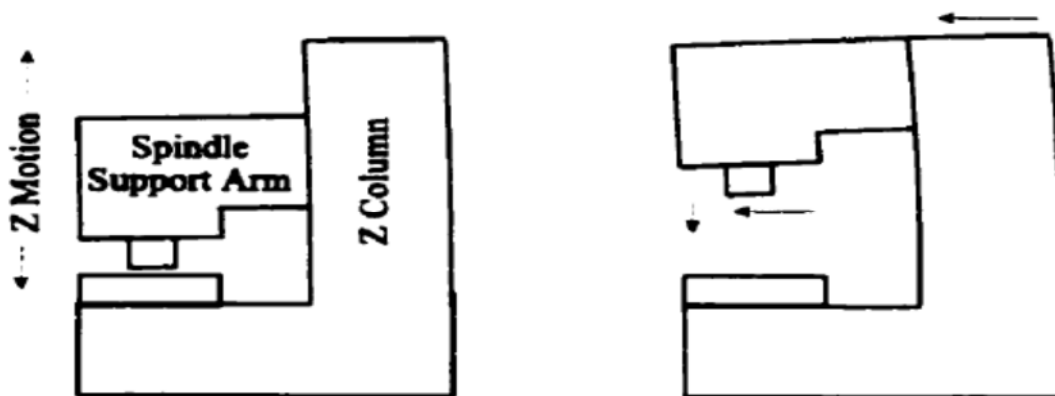


Figure II.1 : Exemple de gravité induite par erreur [22].

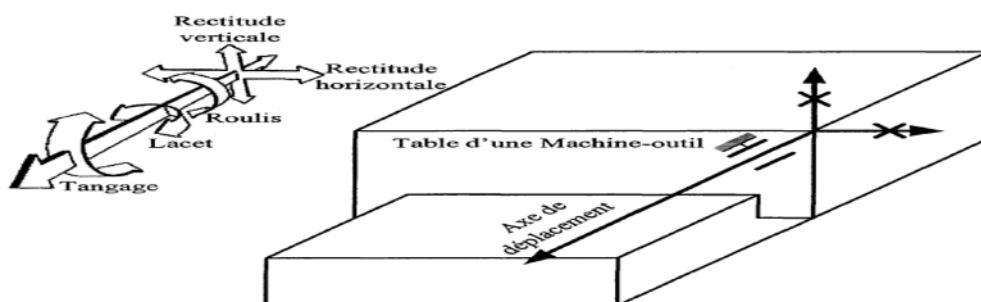


Figure II.2 : Liaison linéaire typique d'une machine-outil [21].

.4. L'erreur volumétrique

L'erreur volumétrique d'une machine-outil se définit comme l'erreur entre la position déviée de l'outil et la position désirée ce qui a pour conséquence de faire varier aussi la profondeur. L'erreur volumétrique est principalement engendrée par les écarts de membrure et les erreurs cinématiques.

II.4.1. Les écarts de membrure

Sont des défauts géométriques entre les différents éléments mobiles d'une machine. Ils sont dus par un désalignement des éléments de liaison en perpendicularité. C'est également le cas d'un axe de rotation présentant des défauts angulaires d'orientation ou d'un décalage entre deux axes de rotation qui devraient normalement se croiser. Ces écarts géométriques indépendants de la position sont propagés à travers la chaîne cinématique. Ils constituent généralement la plus grande contribution à l'erreur volumétrique totale [23].

II.4.2. Erreurs cinématiques

Les erreurs cinématiques sont des variations de position dans le comportement fonctionnel des éléments d'une machine-outil. Ce type d'erreur est souvent rencontré dans le cas d'applications nécessitant la combinaison d'axes ou de mouvements. Pour éviter ces erreurs, une coordination précise entre les mouvements n'est non pas seulement utile mais obligatoire. Dans les machines-outils conventionnelles, cette coordination est réalisée à l'aide de trains d'engrenages. Au niveau des machines-outils à commande numérique, la coordination ou plus spécifiquement l'interpolation est obtenue par commande électronique [21]. D'une manière générale, les erreurs cinématiques sont définies par l'interaction géométrique sous mouvement. Ils sont fonction de la position des glissières de machines-outils, vis à billes, engrenages, coupleurs, moteurs, capteurs et de leur interaction à travers du contrôleur de mouvement. Ces erreurs sont très dépendantes des géométries des composants impliqués, comme la forme des surfaces de glissement, emplacement de vis à billes, et l'espacement des dents d'engrenage. Les Erreurs cinématiques se manifestent également en raison de l'hystérésis ou le jeu dans les vis à billes. Engrenages, et les coupleurs, et par conséquent. Sont fonction de la direction du mouvement [22].

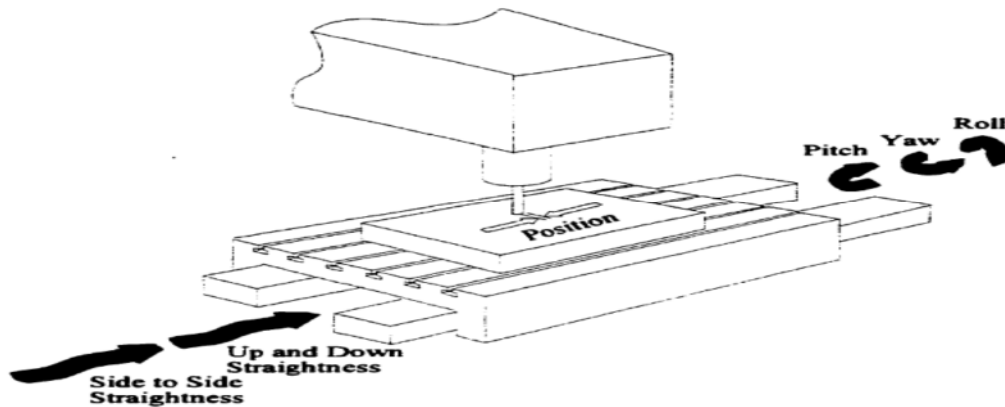


Figure II.3 : Exemple d'erreur Cinématique du mouvement de translation [22].

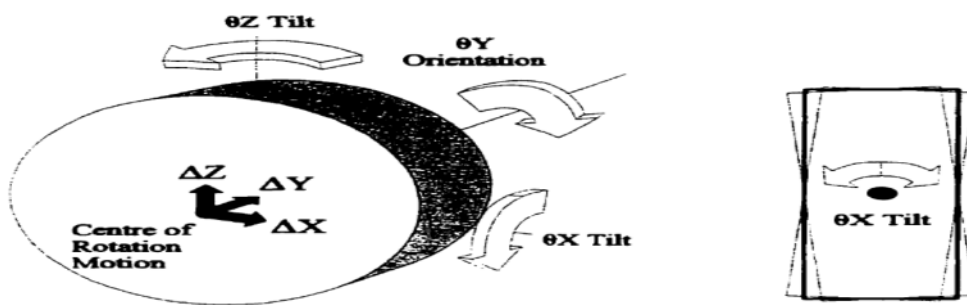


Figure II.4 : Exemple d'erreurs cinématiques pour mouvement Rotatif [22].

II.5. Erreurs causées par les charges de coupe

Les charges de coupe sont une source d'erreurs causant une déviation de l'outil par rapport à la pièce affectant la géométrie désirée de la surface usinée. Elles provoquent des déformations élastiques de la pièce, de l'outil et de la machine. La géométrie de l'outil et le processus de coupe (enlèvement de matière et vitesse de coupe) provoquent un comportement vibratoire par l'excitation périodique de la structure (machine-outil-pièce) [24].

Le processus de l'enlèvement de la matière par un outil de coupe, nécessite des efforts de coupe. Ce procédé provoque des déformations élastiques pour l'ensemble (outil, pièce et

Machine). La déviation résultante affecte la précision des surfaces usinées où la déviation de chaque élément dépend de sa rigidité. La prédiction avec précision du défaut d'usinage, résultant de ces déformations, est une opération compliquée, discrétisent l'outil de coupe en plusieurs outils élémentaires, Généralement, pour pouvoir modéliser ces erreurs, les chercheurs les traitent séparément :

II.5.1. Erreurs dues aux chargements statiques :

Les machines-outils sont affectées par une variété de charges statiques qui entraînent des déflexions des éléments structurels de la machine-outil. Ces déformations affectent la position relative de l'outil par rapport à la pièce à usiner et entraînent une dégradation de la précision des machines-outils [21].

Au cours de la phase d'installation d'une machine-outil, il est nécessaire de prendre les Précautions nécessaires afin d'éviter ce type de distorsion.

En effet, pour éviter la perte de précision, la machine-outil doit être mise en position en portant une attention particulière à la distribution des contacts. Plusieurs machines-outils en service sont installées sur des fondations flottantes ou en utilisant des supports hydrostatiques pour des applications de précision [21].

D'autres déformations résultent des déplacements des éléments mobiles. Le poids de Certains éléments est tellement important que la rigidité des supports devient insuffisante pour maintenir les déformations à des niveaux admissibles. Généralement, les constructeurs des machines-outils appliquent un certain nombre de solutions permettant de corriger les effets des déformations dues à ce type de sollicitations mécaniques par le renforcement de la structure de la machine et en prévoyant des contrepoids [21].

Actuellement, la plupart des approches de mesure des erreurs géométriques ne tiennent pas systématiquement compte des effets des contraintes générées par le procédé et par le poids de la pièce. Le poids des éléments mobiles de la machine et le poids additionnel de la pièce peuvent causer des déformations statiques considérables surtout quand il s'agit d'un montage de pièce avec porte-à-faux [21].

Durant certaines opérations, divers éléments mobiles de la machine (contre-pointe, broche, porte-outil...etc.) doivent rester immobiles. Ils sont bloqués par serrage à leurs guides respectifs. Les mécanismes de serrage (voir la figure I-5 et la figure I-6) sont parfois mal conçus, l'action du serrage provoque également des déformations indésirables et peut affecter la précision globale de la machine-outil [21].

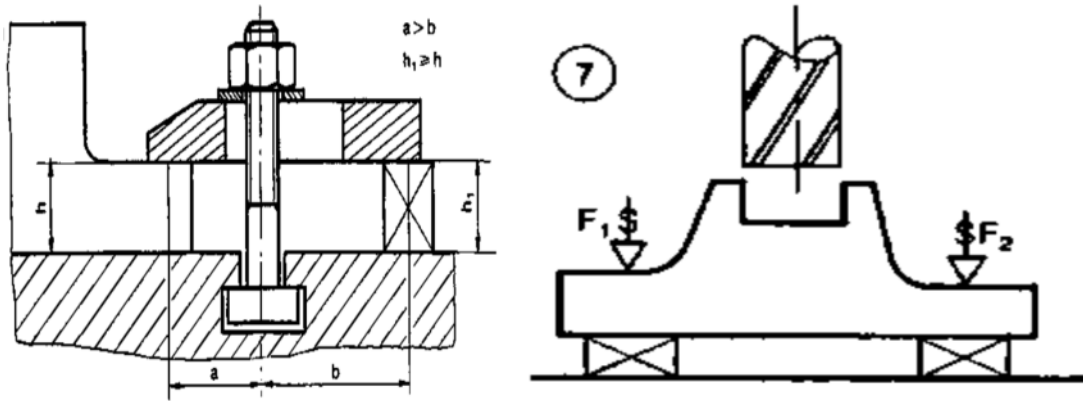


Figure II.6 serrage par bridage [25]. Figure II.5 serrage face aux appuis [25].

II.5.2. Erreurs dynamiques

Dans une machine-outil, les erreurs dynamiques représentent les variations rapides dans le comportement dynamique du système MOP. Les principales sources qui causent ces variations sont : le mouvement de rotation de la broche, les vibrations induites et forcées dans la structure de la machine, les erreurs du contrôleur et les déflexions sous des forces d'inertie. Contrairement aux erreurs quasi-statiques, les erreurs dynamiques varient rapidement dans le temps et elles affectent les caractéristiques locales de la pièce à usiner.

En termes de précision dimensionnelles, géométrique et de finition de surface, La précision d'usinage des machines-outils est fréquemment réduite par les vibrations et limitée par les caractéristiques dynamiques de la machine-outil [21].

La précision de mesure la plus élevée et la vitesse de la machine à mesurer sont des coordonnées nécessaires pour le temps de cycle le plus court pour l'industrie de fabrication moderne. Toutefois, les augmentations de la mesure de la précision et de la vitesse d'application du CMM sont limitées par les composants de faible raideur qui provoquent la déformation compliquée et les erreurs dynamiques, Il faut considérer les efforts de coupe et les vibrations dues à la rotation de la broche et les vibrations induites dans la structure. De façon générale, ces erreurs peuvent être divisées en deux catégories majeures :

- 1- les erreurs dynamiques dues à la machine-outil
- 2- les erreurs dues au procédé.

Il est important de noter que dans le cas des machines à mesurer tridimensionnelles, les effets dynamiques sont négligeables, cependant, la vitesse d'approche, la vitesse de mesure et la

nature de contact entre le palpeur et la surface à mesurer sont des contraintes à considérer dans l'analyse dynamique [21].

II.5.2.1. Erreurs dynamiques dues à la machine-outil

La rotation d'un outil de coupe ou de la pièce à usiner autour d'un axe précis est fondamentale pour l'obtention de la qualité de toute opération d'usinage. Ces erreurs sont principalement causées par les défauts dans les roulements, les déformations causées par la distribution des charges, la variation des contacts entre les différentes composantes ou encore au comportement de la structure en fonction des modes d'excitations [21].

II.5.2.2. Erreurs dynamiques dues au procédé

La coupe des métaux est un processus dynamique dans lequel la fonction d'enlèvement du métal génère des sollicitations qui affectent la précision de la machine-outil. Ces sollicitations ont des effets sur la variation des erreurs quasi-statiques et peuvent donner naissance à d'autres types d'erreurs. L'influence du procédé sur la précision peut être caractérisée par la coexistence des trois phénomènes suivants : les déformations sous l'effet des forces de coupe, la température générée par la coupe et les vibrations [21].

II.6. La déflexion de l'outil

Au cours de l'usinage, les efforts de coupe statiques produisent une distorsion de l'ensemble pièce-outil-machines, se traduisant par une erreur dans la position relative de l'outil par rapport à la pièce, autrement dit par une erreur de profondeur de passe. La déflexion de l'outil à elle seule cause d'importants défauts dimensionnels. Le taux d'erreur engendré par la déviation de l'outil en usinage conventionnel, représente environ 44% de l'erreur totale estimée comprenant le positionnement de la machine, l'allongement thermique, la trajectoire des pièces et outils et l'alignement de la pièce. Les incertitudes dans ce contexte peuvent dépasser en finition les 40 μm [26], et la dégradation de la qualité de la surface usinée est d'autant plus importante lors des opérations de finition nécessitant l'utilisation des outils de coupe élancés et minces de bonne manœuvrabilité.

Le taux de déviation est fonction des conditions de coupe et de la rigidité du système POM. Des modèles d'efforts de coupe, largement documentés dans la littérature, sont utilisés pour prédéterminer la déviation de l'outil par rapport à la pièce ainsi que l'erreur de forme et de la profondeur de passe. En se basant sur la théorie des poutres en porte à faux

4.1) on peut estimer analytiquement la déflexion de l'outil en opération de tournage. La quantification d'erreur servira de support pour le choix du type de la modélisation d'incertitude. On écrit :

$$\varepsilon = Fc/k \quad (\text{II-1})$$

Où (Fc) est l'effort de coupe, (k) est la rigidité équivalente du système et (ε) est la déflexion de l'outil.

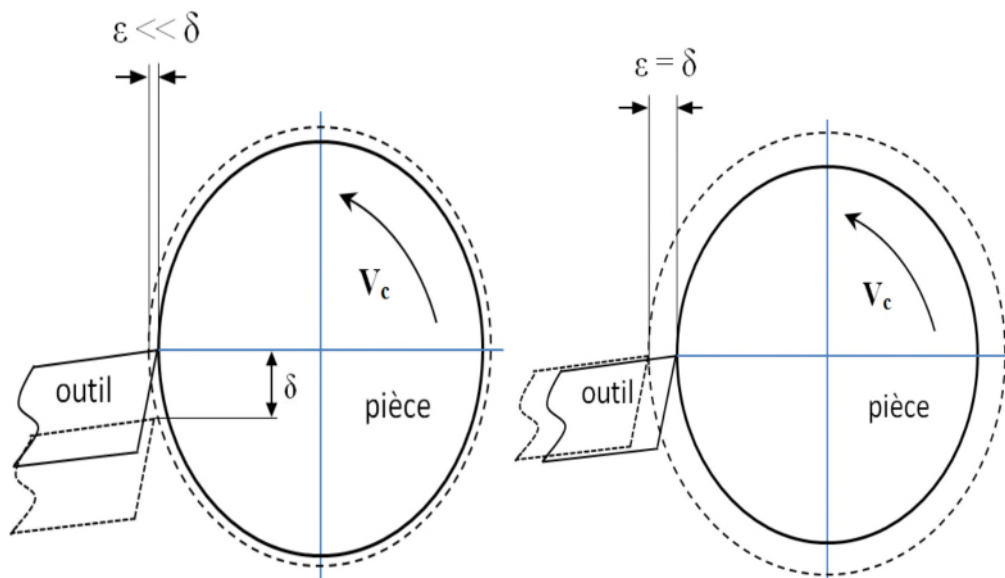


Figure II.7 Erreur insensible (à gauche) et sensible (à droite), causée respectivement par la déflexion radiale et tangentielle de l'outil.

II.7. L'usure de l'outil

L'usure en dépouille est une erreur systématique qui a un impact non négligeable sur la qualité de la surface usinée (Figure II.8), notamment lors de l'usinage à très grande vitesse avec un outil en acier rapide. Vu la nature stochastique de l'usure en dépouille, des chercheurs ont eu recours à la modélisation probabiliste pour estimer la durée de vie de l'outil. Ainsi, la quantité d'erreurs (ε) sur l'avance ne doit pas être déterministe et peut-être quantifiée par la relation suivante :

$$\varepsilon = VB \max \tan \alpha \quad (\text{II-2})$$

α : c'est l'angle entre la surface réelle et la surface désirée.

VB : la surface due à l'arrachement de copeau par l'outil.

ε : la quantité d'erreurs.

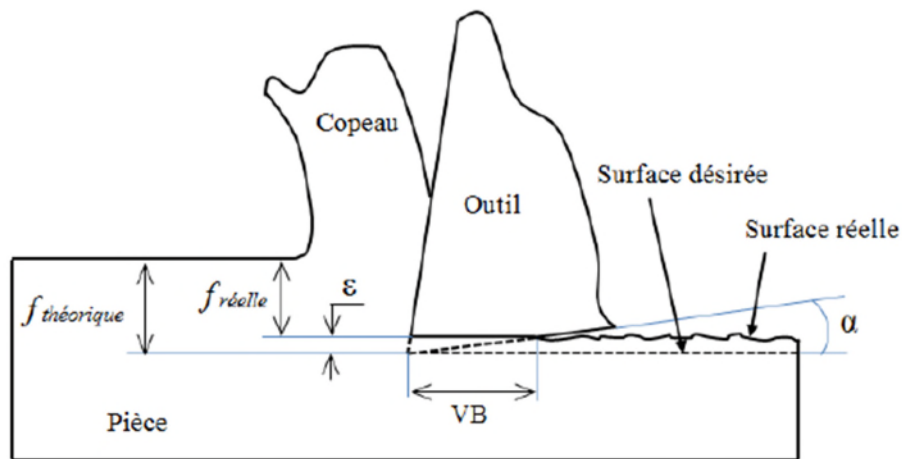


Figure II.8 Incertitude de l'avance de l'outil induite par l'usure en dépouille de l'outil.

II.8. Les défauts de mise en position de la pièce

En opération de tournage, la pièce doit être fixée dans le mandrin d'une manière à satisfaire une position stable et un équilibre dynamique. Au même titre que les défauts géométriques de la pièce, Les défauts de mise en position provoquent une oscillation de la valeur de la profondeur de passe autour de la valeur nominale et entraîne des fluctuations périodiques des efforts de coupe (vibrations forcées). Les défauts de mise en position des pièces sont caractérisés par deux rotations (Figure II.9) autour des axes (Z, Y) et une translation suivant l'axe de rotation (X) [27]. Les facteurs à l'origine de ce type de défauts sont ; (1) faible effort de serrage (2) les déformations de la pièce ou des éléments de fixation (3) la friction au niveau des surfaces de contact de la pièce et du dispositif de fixation (4) les efforts de coupe importants sur la pièce pendant l'usinage.

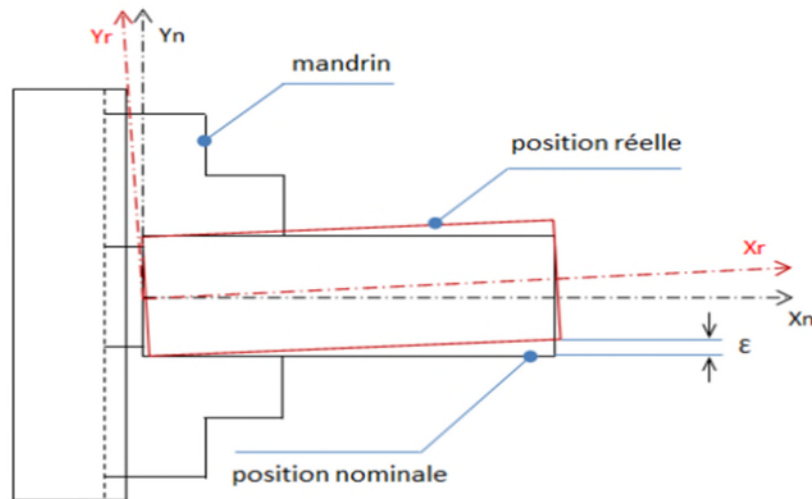


Figure II.9 Défaut de mise en position de la pièce [27].

II.9. Erreurs causée par le dispositif du serrage

L'efficacité du serrage dépend à la fois de la conception de dispositifs de serrage et de la conformité de la pièce (défauts géométriques). Que peut engendrer un mandrin magnétique ou mécanique à 6 et à 3 mors, lors du tournage d'une pièce en acier.

II.10. La dilatation thermique

La variation de la température des éléments de la machine-outil provoque des déformations qui affectent la précision de positionnement de l'outil par rapport à la pièce. Plusieurs sources de chaleur peuvent être citées [28] :

- a) roulements.
- b) huile hydraulique.
- c) pompes et moteurs.
- d) glissières.
- e) action de coupe et de copeaux.
- f) autres sources de chaleur (environnement extérieur).

En plus des sources d'erreurs de type géométriques et mécaniques, la dilatation thermique opère dans tout le système Pièce-Outil-Machine et affecte la précision de l'usinage et induit une incertitude dans la profondeur de passe.

Les effets thermiques peuvent avoir diverses origines, telles que l'élévation de la température du moteur, la friction interne dans les paliers et des disques d'embrayage, la chaleur générée au cours du processus de coupe à l'interface outil-copeau et d'éventuelles

sources extérieures à la machine. La dilatation thermique dans les machines-outils conventionnelles peut atteindre (12 μm) pour la pièce et presque (9 μm) pour l'outil de coupe [29]. L'équation ci-dessous sert de première estimation de l'erreur thermique :

$$L_{T_1} = L_{T_0}(1 + \alpha(T_1 - T_0)) \text{ (II-3)}$$

Où (α) est le coefficient de dilatation thermique qui varie en fonction du matériau. (T_0) et (T_1) sont, respectivement les températures initiales et finales et (L_{T_0} , L_{T_1}) sont les longueurs correspondantes à chaque température.

II.11. Déformations sous l'effet des forces de coupe

Au cours d'une opération d'usinage, les forces de coupe provoquent des efforts sur l'outil et sur la pièce. Ces sollicitations sont propagées dans les autres composantes de la machine et elles provoquent par conséquent des déformations qui se répercutent sur la qualité dimensionnelle et géométrique de la pièce finie. Ces erreurs sont une conséquence de la variation des forces de coupe due aux défauts de forme de la pièce brute, de la variation de la rigidité du système de mise en position ou de la structure et de la variation des conditions de coupe (profondeur de passe, vitesse de coupe et vitesse d'avance) [21].

II.12 Erreur de mesure sur machine-outil

La comparaison des données d'inspection obtenues par mesure sur machine-outil avec les données prévues nominalement ne donne pas seulement les défauts de fabrication de la pièce, qui se résume suivant les sources d'incertitudes qui affectant les paramètres de coupe comme le montre la (Figure II.10) Mais se trouve aussi affectée par une erreur de mesure qui fait l'objet de plusieurs recherches [33].

Les principaux facteurs de l'erreur sont [33] :

1. l'environnement (température).
2. la structure du palpeur : rigidité et longueur du stylet et le rayon de la touche du stylet.
3. le mouvement de palpation : vitesse et direction d'approche et l'impact de l'effort de contact.
4. la pièce à palper incluant la forme et le matériau.
5. le nombre et la répartition des points de mesures.

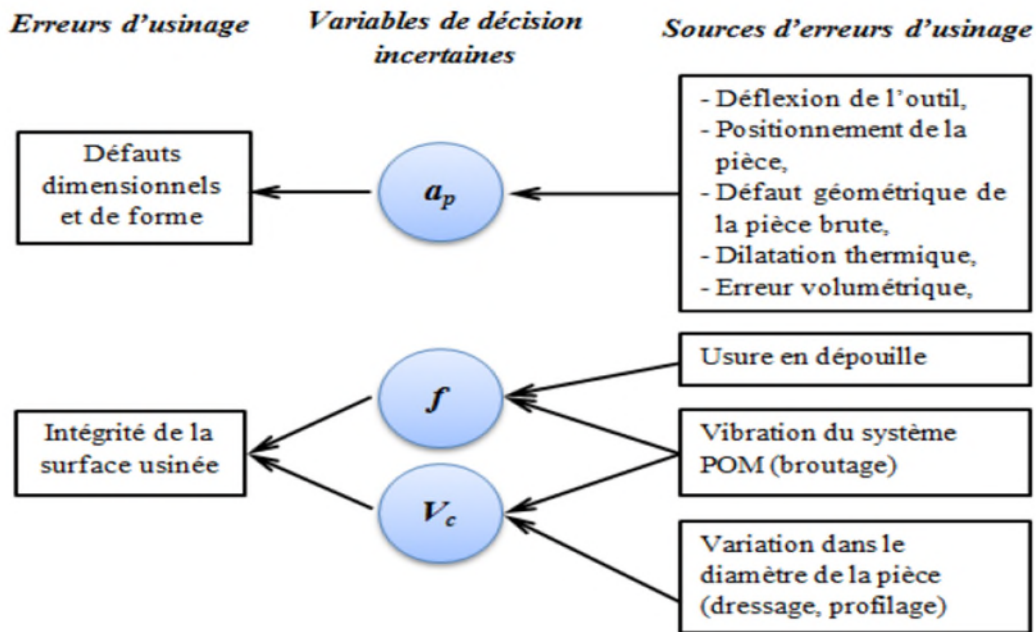


Figure II.10 Sources d'incertitudes affectant les paramètres de coupe.

II.13. Vibrations

Les problèmes de vibrations en usinage, sont apparus dès le début du XXe siècle. Au cours du XXe siècle, il a été constaté que trois types de vibrations sont présents dans le cas d'une opération d'usinage, les vibrations libres, les vibrations forcées, et les vibrations auto-entretenues :

II.13.1 Les vibrations libres

Ce sont des vibrations résultant des impulsions transférées à la structure de la machine-outil par le biais de sa fondation, ou de l'engagement initial des outils dans la matière ou bien d'un défaut dans la structure des matériaux usinés.

II.13.2 Les vibrations forces

Les vibrations forcées sont la réponse vibratoire d'un système mécanique à une excitation périodique [30]. Elles résultent des forces appliquées au système ; et selon la source de ces forces on peut les classer en deux grandes familles [31] :

II.13.2.1 Sources externes

Comme dans le cas des vibrations sismiques transmises à la machine par le biais de sa fondation. Les sources de ses vibrations peuvent être dues à des machines situées à proximité de celle-ci. On peut remédier à sa par une bonne isolation des fondations de la machine [31].

II.13.2.2 Sources internes

Qui sont dus à des forces d'inertie créées par des masses en rotation.

II.13.3 Les vibrations auto-entretenues

Contrairement aux vibrations forcées, les vibrations auto-entretenues sont propres aux opérations d'usinage par enlèvement de la matière. Ces vibrations entre l'outil et la pièce sont la cause du broutement "chatter en anglais". Ce phénomène est très néfaste car il entraîne généralement [31] :

- Un très mauvais état de surface de la pièce finie [30].
- Une baisse de la durée de vie de l'outil en accélérant l'usure ou dans des cas extrêmes en entraînant la casse de l'outil [30].
- Un bruit très désagréable lors de l'usinage. Même si ce point n'a pas de conséquence sur la qualité de la pièce finie, il est à prendre en compte par rapport à l'environnement de travail des opérateurs [30].
- Une usure prématurée de la broche de la machine [30].

II.13.4 Les vibrations d'usinage

Les vibrations auto régénérées en usinage : est un phénomène qui affecte d'une manière négative l'état de surface des pièces usinées. Ce phénomène connu sous le nom de broutage ou chatter en Anglais, a été largement approché par ces diverses méthodes linéaires et non linéaires. Bien que la théorie de la régénération de surface et des modèles linéaires avec un temps de retard représente l'explication la plus répondeur concernant l'origine de ces excitations sans tenir compte des effets non linéaires [32].

Le comportement non linéaire de ce phénomène est caractérisé par des périodes cycliques où l'outil sort de la matière des pièces et d'autres périodes où l'outil s'enfonce dans la matière avec un léger retard de temps [32].

II.14. Techniques de Réduction et de compensation des effets d'erreurs

Nous allons examiner et de parler des différentes techniques de réduction des effets d'erreurs et leur limitation :

- Techniques de réduction des effets d'erreurs.
- Limitations des techniques de compensation

II.14.1. Techniques de Réduction des effets d'erreurs

La compensation est la procédure d'élimination de l'effet de l'erreur systématique dont le but est d'éliminer le défaut résultant sur pièce usinée. Les principales sources d'erreurs visées par l'étude et la compensation sont les erreurs géométrique, thermique et l'erreur produite durant le processus de coupe. La présente étude traite la compensation des erreurs produites durant le processus d'usinage. Avant de mettre en œuvre une procédure de compensation, l'élimination des erreurs est considérée. Cette procédure améliore l'outil de fabrication pour supprimer l'erreur depuis la source [24], en choisissant deux approches majeures. La première consiste à éviter les erreurs par l'amélioration du design des machines-outils et par séparation des sources d'erreurs induites dans la structure des machines-outils. La deuxième approche comporte à corriger les erreurs en utilisant les différentes techniques d'étalonnage et de compensation [21].

Les moyens classiques de perfectionnement de la précision dans les machines-outils sont présentés à la Figure II.11

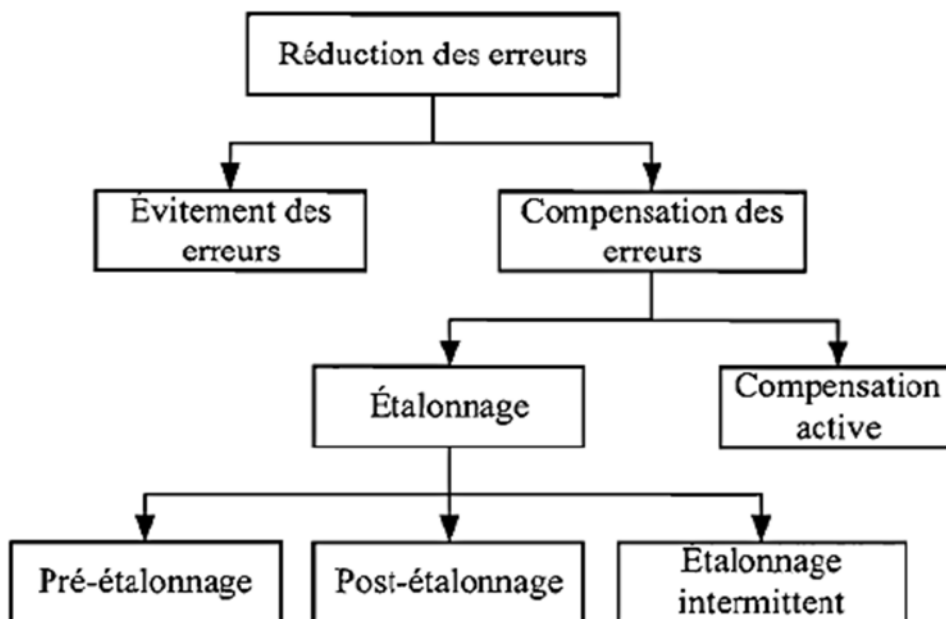


Figure II.11 Stratégies de réduction des erreurs [21].

II.14.1.1.Évitement d'erreur

Le concept d'évitement des erreurs, présenté à la (figure II.12), consiste à éliminer x partiellement ou totalement les sources d'erreurs. Cette solution, utilisée dans des machines-outils spécialisées, consiste à augmenter la qualité du design ainsi qu'à développer des solutions susceptibles d'isoler les sources d'erreurs et d'atténuer leurs effets. Le coût associé à

cette solution ainsi que les limitations technologiques sont deux éléments majeurs qui limitent la mise en place de cette stratégie [21].

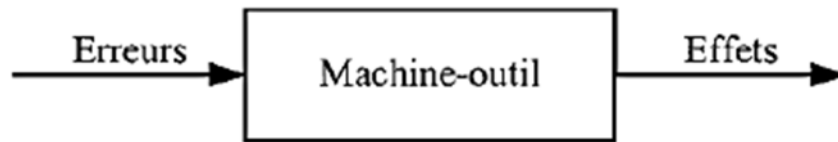


Figure II.12 : Concept d'évitement des erreurs [21].

II.14.1.2 Compensation des erreurs par étalonnage

Les techniques de compensation impliquent la nécessité de mesurer, dans des conditions opératoires et environnementales typiques, l'ensemble des composantes de l'erreur, de les combiner à travers des modèles mathématiques basés sur la structure de la machine pour ensuite générer les données nécessaires à la correction des erreurs. Le but de la compensation est de maintenir la qualité dimensionnelle et géométrique conforme aux spécifications tout en éliminant les effets des sources d'erreurs. La figure II.13 illustre le concept de la compensation des erreurs. Il consiste à déterminer une entrée additionnelle de correction afin d'atténuer les effets des erreurs et ainsi fournir une sortie compensée [21].

. Exemple

Je sais que tu as confiance en ton matériel, mais l'étalonnage nous indique clairement que ton instrument dit faux.

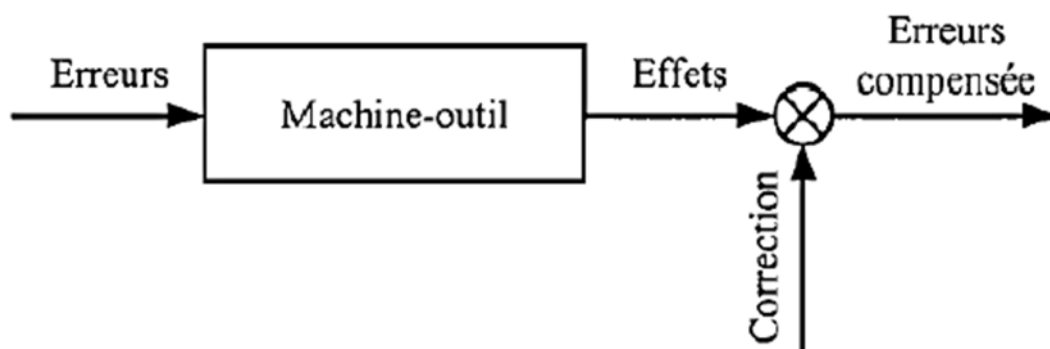


Figure II.13 Technique de compensation par étalonnage [21].

La compensation par étalonnage peut se faire au niveau matériel en optimisant le montage et en rendant les différents éléments plus compacts afin de réduire les erreurs systématiques qui

peuvent influencer les mesures. Elle peut également se faire au niveau logiciel en établissant un modèle mathématique résumant le comportement des erreurs et en appliquant, par la suite, une correction à l'aide d'un contrôleur avec rétroaction. Ce type de compensation peut être confronté à des limitations dont l'espace de la matrice des qui peut être difficile à déterminer avec une grande précision et le grand effort à déployer afin de mettre en place une correction efficace [21].

La compensation d'erreurs par étalonnage se divisé par trois types d'étalonnage peuvent être envisagés : le pré-étalonnage, le post-étalonnage et l'étalonnage intermittent.

II.14.1.3 Compensation active

Le concept de la compensation active vient remédier aux limitations des techniques de compensation classiques. Généralement, elle existe deux catégories d'approches de compensation active. La première consiste à effectuer des mesures hors ligne et à adapter les résultats sous forme d'un modèle mathématique capable de corriger les erreurs pendant que la machine-outil est en opération. La deuxième catégorie consiste à mesurer les erreurs en ligne et à injecter la correction en temps réel [21].

Deux méthodes de compensation en temps réel sont possibles. La première méthode consiste à injecter les signaux directement au servomoteur de la machine-outil sous forme d'un signal analogique. Cette méthode est difficile à implanter vu les problèmes technologiques reliés à cette approche. La deuxième méthode consiste à injecter le signal de compensation dans le contrôleur de la machine. Cette méthode ne demande pas une interface additionnelle pour sa mise au point et n'exige aucune modification de la partie électronique du contrôleur [21].

II.14.2. Limitations des techniques de compensation

Les techniques de compensation par étalonnage, bien qu'elles rendent possible la correction d'une proportion importante de l'erreur systématique, ne permettent pas de réduire complètement toutes les composantes de l'erreur. Elles sont limitées par plusieurs contraintes :

- 1- la mesure des erreurs géométriques en différé sur une machine-outil multiaxiale demande un temps de laboratoire assez important, car les moyens de mesure ne permettent d'évaluer qu'une seule composante de l'erreur à la fois. De plus, pour étudier la variation de cette erreur dans des conditions opératoires et environnementales différentes, il est nécessaire de créer un plan d'expérience et pouvoir contrôler et maintenir ces conditions stables tout au long de la durée des mesures.

2- l'évaluation de la totalité des facteurs opératoires ayant des effets sur la précision de la machine-outil est difficile à mettre en œuvre. La budgétisation de toutes les sources d'erreur ne peut être exhaustive vu la difficulté de couvrir toutes les causes qui les provoquent. De plus, l'évaluation de ces facteurs demande la mobilisation des outils technologiques extrêmement rapides dans le temps et ayant une bonne précision afin de couvrir l'ensemble des facteurs opératoires ayant des effets sur la précision de la machine.

3- lors du procédé de coupe, les effets dynamiques ne se sont pas pris en compte dans la modélisation, puisque les mesures sont effectuées dans des conditions opératoires statiques (mesure hors ligne). La modélisation du comportement des erreurs géométriques dans des conditions dynamiques est complexe à mettre en place vu la multitude des sources pouvant avoir un effet sur ces erreurs et la complexité de la configuration des différents éléments composant une machine-outil ainsi que la prédiction complète de la réponse des machines-outils dans un contexte dynamique [21].

Finalement, (4) l'utilisation de l'approche élémentaire de mesure des composantes d'erreur ne permet pas de considérer les mécanismes d'interaction entre les différentes erreurs. Ceci modifie complètement la dynamique de l'analyse du comportement des erreurs. De plus, plusieurs machines-outils doivent être étalonnées, d'une façon périodique, pour palier à la dégradation de leur structure sous l'effet des conditions statiques et dynamiques ainsi que l'usure des éléments mobiles [21].

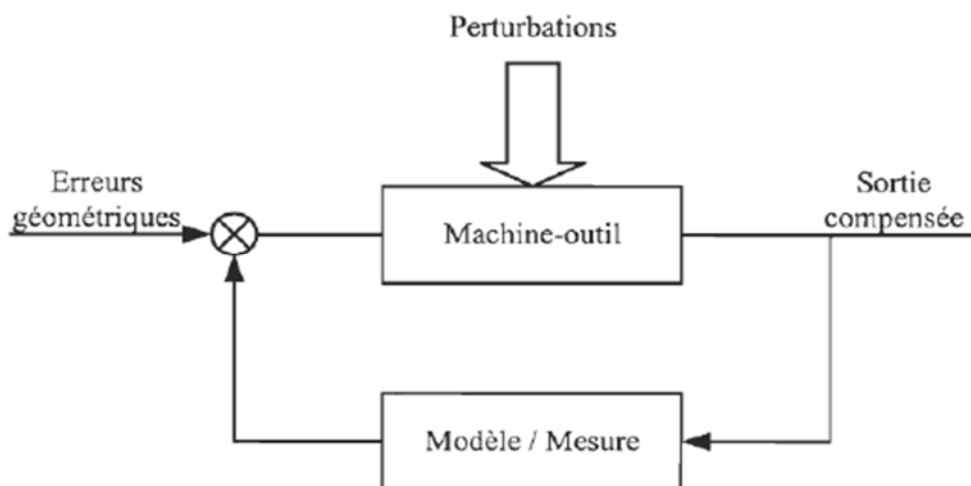


Figure II.14 Concept de la compensation active des erreurs [21].

Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description générale sur les défauts d'usinages et leur erreurs, ainsi les Techniques de Réduction des effets d'erreurs a fin de détermine un lien qui va nous permettre de faire une optimisation multi objectif entre le paramètre technologique et économique, tout ça pour obtenir des bonne résultats pendant l'usinage.

L'objectif de cette méthode est de cherche la meilleure combinaison entre les facteurs étudiés afin d'arriver à une réponse voulu.

Une application de cette méthode sera étudiée et présentée dans les prochains chapitres.

CHAPITRE III

TECHNIQUES

D'OPTIMISATION

Introduction

Les problèmes d'optimisation occupent actuellement une place très importante dans le domaine de la recherche. L'évolution des techniques informatiques a permis de dynamiser les recherches dans ce domaine.

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser ou minimiser une fonction donnée. Les complexités relatives, en taille ou en structure, de l'espace de recherche et de la fonction à maximiser conduisent à utiliser des méthodes de résolution radicalement différentes. En première approximation, on peut dire qu'une méthode déterministe est adaptée à un espace de recherche réduit et complexe et qu'un espace de recherche large nécessite plutôt une méthode de recherche stochastique (recuit simulé, algorithme génétique, recherche tabou....) [34].

Le monde réel offre un ensemble très divers de problèmes d'optimisation, tels que le :

- Problème combinatoire ou à variables continues,
- Problème à un ou plusieurs objectifs,
- Problème statique ou dynamique,
- Problème dans l'incertain.

Aussi, un problème peut être à la fois multi objectif et dynamique.

III-1 Définitions

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

b) L'espace d'état est défini par l'ensemble des domaines de définition des variables du problème.

Dans la plupart des problèmes, cet espace est fini car la méthode de résolution utilisée nécessite un espace de travail restreint (Exemples : la méthode Monte-Carlo, les algorithmes

génétiques...).

Cette limitation n'est pas la seule problématique car lorsqu'un problème est posé, le décideur précise un domaine de valeurs envisageables à chacune des variables. De plus,

Pour des raisons opératoires et de temps de calcul, il est préférable de travailler sur des domaines finis [34].

c) Les variables du problème peuvent être de natures diverses (réelle, entière, booléenne, etc.) et exprimer des données qualitatives ou quantitatives. La difficulté de mise en œuvre de certaines méthodes si les variables sont de types différents.

d) Une fonction objectif représente le but à atteindre pour le décideur (minimisation de coût, de durée, d'erreur, etc.). Elle définit un espace de solutions potentielles au problème.

e) Les contraintes

L'optimisation de la fonction objectif nécessite souvent des limitations pratiques des conditions de coupe (puissance de coupe, force de coupe, température, l'état de surface, gammes des vitesses et des avances, etc..).[35] Les limitations additionnelles sont nécessaires pour la stabilité du processus de coupe et le respect de la qualité de la pièce à usiner.

f) Une méthode d'optimisation recherche le point ou un ensemble de points de l'espace des états possibles qui satisfait au mieux un ou plusieurs critères(s). Le résultat est appelé *valeur optimale* ou *optimum*.

III-2 Stratégies d'optimisation mono-objective

La majorité des publications relatives à l'optimisation du procédé de tournage traitent du problème d'optimisation mono-objectif, dont la fonction « objectif » considérée est le plus souvent liée au critère économique, visant à minimiser le temps ou le coût de production, mais parfois aussi liée au critère technologique, pour maximaliser la qualité de la surface usinée, ou bien encore pour réduire la consommation de l'énergie. Cette section constitue alors une revue des critères d'optimisation mono-objective les plus considérés jusqu'à ce jour :

III-2-1 Les critères économiques

III-2-1-1 Le temps de production

La minimisation du temps d'usinage est l'un des critères économiques d'optimisation les plus utilisés pour les opérations de tournage. Dans le cas des opérations d'ébauche multi-passes, la durée de vie de l'outil, la puissance et l'effort de coupe sont des contraintes imposées, tandis que pour les opérations de finition, la rugosité de la surface usinée imposée a priori en est la contrainte à respecter.

Gilbert [36] a été le premier à avoir étudié le volet économique de la coupe des métaux à une seule passe, avec comme seules variables de décision, l'avance et la profondeur de passe. De son côté, Hitomi [37] a essayé de déterminer uniquement la vitesse de coupe optimale afin de minimiser le temps d'usinage par cycle. De même, White et Houshyar [38] ont déterminé la vitesse de coupe optimale permettant un temps d'usinage minimal sous contrainte de la qualité du produit manufacturé. En Tournage à Grande Vitesse (TGV) et à Commande Numérique (NC), Bouzid [39] a mis au point une méthode pour le calcul de la vitesse de coupe optimale dans le but de minimiser le temps total de production.

En proposant un paradigme d'optimisation basé sur les algorithmes génétiques, D'Adonna et Teti [40] ont pu obtenir le temps d'usinage minimal et les conditions de coupe optimales, à savoir la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, tout en imposant des restrictions sur les limitations de production liées à la durée de vie de l'outil, la rugosité, l'effort et la puissance de coupe.

III-2-1-2 Le coût de production

La réduction du coût de production par optimisation mono-objectif des conditions de coupe, représente le critère le plus largement considéré, Shin et Joo [41] ont développé des modèles d'optimisation du coût de production pour les opérations d'ébauche multi-passes et de finition mono-passe. De même que pour le tournage d'ébauche et de finition, Lee et Tarng [42] ont utilisé la méthode de la programmation quadratique séquentielle pour chercher le minimum efficace du coût de production. Ils se sont servis des réseaux polynomiaux afin de construire les différentes fonctions « contrainte », à savoir la rugosité de la surface usinée, la durée de vie de l'outil et l'effort de coupe.

III-2-1-3 Le taux d'enlèvement de la matière

Le taux d'enlèvement de matière en usinage (MRR) est le volume du matériau enlevé durant le temps de coupe réel. Un taux d'enlèvement de matière élevé rime donc avec une productivité élevée. Ce critère est adopté d'ordinaire lors des opérations d'ébauche.

En tournage d'un acier S45C avec un outil en carbure de tungstène, Ko et Kim [43] ont combiné un réseau de neurones (ANN) avec un algorithme génétique (GA) afin de modéliser et de sélectionner les paramètres de coupe optimaux, qui maximisent le MRR tout en satisfaisant les contraintes liées à l'effort de coupe maximal, l'amplitude maximale des vibrations de l'outil et la puissance électrique disponible. Non moins, Chein et Tsai [44] ont utilisé un ANN à rétro-propagation (BPNN) pour modéliser l'usure en dépouille de l'outil lors du tournage d'un acier inoxydable. À l'aide de l'algorithme génétique (GA), ils ont ensuite déterminé les conditions de coupe optimale, assurant le maximum du MRR sous contrainte d'un seuil d'usure en dépouille prédéterminé et prédit par l'ANN.

III-2-2 Les critères technologiques

III-2-2-1 La durée de vie de l'outil

L'usure inévitable et le bris éventuel des outils de coupe, fait en sorte qu'ils ont une durée de vie limitée, notée (T), qui est définie à travers un critère d'usure en dépouille maximal (VB) d'après la norme ISO 3685 [45]. Dépasser cette durée de vie limite entraînerait des efforts de coupe supplémentaires, un état de surface usinée de plus en plus médiocre et des imprécisions d'usinage géométriques et dimensionnelles.

Par conséquent, l'optimisation, par le rallongement de la durée de vie de l'outil est à la fois judicieuse et économique puisque en pratique le coût d'outil à lui seul représente environ (25%) du coût total de production [46]. En effet, maximiser la durée de vie d'un outil réduit le nombre de changements d'outil par pièce, donc le coût et le temps de changement d'outil par pièce ainsi que le coût d'outil sont systématiquement réduits.

Par conséquent, la sélection des paramètres de coupe optimaux qui permettent de respecter le seuil d'usure en dépouille tout en garantissant l'utilisation maximale de chaque outil est très importante dans le contexte de compétitivité économique.

Taylor [47] est l'un des pionniers scientifiques qui a traité le problème d'optimisation des conditions de coupe en usinage sous son aspect économique. Taylor est reconnu comme étant le fondateur de l'organisation scientifique du travail. Il a proposé un modèle prédictif de la durée de vie de l'outil pour une vitesse de coupe donnée. Depuis, ce modèle est utilisé par la majorité des chercheurs dans de nombreux domaines de recherche. Dans une stratégie de prédiction-optimisation de la durée de vie de l'outil, Wu [48] a développé un modèle de surface de réponse du 1er ordre en fonction des paramètres de coupe avec une excellente fiabilité. Nagasaka et Hashimoto [49] ont proposé un modèle de la durée de vie de l'outil en fonction des paramètres de coupe et du taux d'usure. Le modèle développé a été testé et validé pour les trois étapes d'usure à savoir ; une usure initiale et rapide, une usure graduelle et une usure très rapide et catastrophique.

III2-2-2- La qualité de la pièce usinée : la rugosité

Après les opérations d'ébauche à plusieurs passes, où on vise un taux d'enlèvement de la matière maximal, les opérations de finition ont pour objet de respecter la rugosité de la surface, indice de qualité retenu pour une pièce usinée en production, et synonyme d'une grande valeur ajoutée. Dans la section qui suit, nous montrerons clairement l'intérêt suscité par l'optimisation de la qualité de la surface usinée à travers les diverses méthodes et stratégies publiées.

Taraman et al. [50] ont développé des méta-modèles pour la rugosité de la surface et de la durée de vie de l'outil en tournage d'un acier AISI 1045 à l'aide de la méthodologie des plans d'expériences (DOE). Aussi, les paramètres de coupe et les paramètres géométriques ont été pris en considération. Hassan et Suliman [51] ont construit des modèles prédictifs de second ordre en tournage d'un acier à moyenne teneur en carbone, à l'aide de la DOE (Cf. Chap.3). Les combinaison des paramètres de coupe, minimisant la rugosité de la surface et satisfaisant les contraintes de production liées à la puissance consommée, les vibrations de l'outil et le temps d'usinage, ont été déterminés. Leur approche pour l'optimisation n'était pas très fiable, vu que le coefficient de détermination du modèle des vibrations de l'outil n'était pas satisfaisant ($R^2 = 87\%$). Ce dernier a engendré une erreur de (43.30 %) par rapport aux résultats expérimentaux. De la même façon, aux conditions opératoires de Hassan et Suliman [52], Suresh et al. [53] ont développé un modèle de surface de réponse (RSM) pour l'optimisation de la rugosité superficielle en fonction des paramètres de coupe et du rayon du bec. Bien que l'algorithme génétique compte parmi les meilleures techniques d'optimisation.

III-2-2-3 L'effort de coupe

En tournage d'ébauches multi-passes, des profondeurs de passe et des avances maximales sont souvent recommandées par les manuels d'usinage afin d'augmenter la productivité et réduire les coûts d'usinage. Cela entraîne des efforts de coupe très élevés pouvant conduire à la déflexion plastique et aux vibrations auto-entretenues de l'outil et de la pièce, voire, provoquer des défauts dimensionnels et géométriques de 1er ordre très importants sur la pièce usinée. En dépit des intérêts émanant de la réduction des efforts de coupe, à savoir, la préservation du matériel d'usinage et la garanti de la qualité des produits manufacturés, ce critère n'a pas reçu autant d'intention par rapport aux autres critères présentés précédemment.

En vue de réduire la variabilité des efforts de coupe, Yuan et al. [50] ont montré que l'orientation cristallographique du matériau usiné a un effet très significatif sur la variabilité des efforts de coupe et de la qualité de la surface usinée, lors du tournage d'un monocristal de cuivre et d'aluminium avec un outil en diamant. Similairement, Chen et al. [51] ont étudié l'influence de l'orientation cristallographique des cristaux de Potassium Dihydrogéné-Phosphate (PDK) sur les variations des efforts de coupe. Ils ont démontré que l'amplitude de variation des efforts de coupe est minimisée pour une épaisseur de copeau non déformée inférieure à (30 nm). Yang et al. [53] ont développé un système de compensation d'erreur en temps réel pour réduire les efforts de coupe responsables d'erreur de planéité dans un centre de tournage (CNC) à deux axes. En utilisant ce système de compensation, les erreurs ont été réduites de (85 %).

III-2-2-4 L'énergie et la puissance de coupe consommées

En raison du déficit énergétique que vit le monde actuellement, le coût de l'énergie est de plus en plus élevé. La réduction de l'énergie consommée dans les procédés de manufacture et spécialement par la machine-outil s'inscrit actuellement dans une démarche planétaire visant la protection de l'environnement. En effet, faire fonctionner les machines-outils aussi efficacement que possible en termes d'énergie consommée contribuera sans doute à la réduction du coût de production.

L'économie d'énergie électrique entraînera une réduction des émissions de gaz nocifs, car à présent le carburant fossile (charbon, pétrole et gaz naturel) recouvre la quasi-totalité des ressources utilisées pour la production d'électricité.

Dans une approche pour la modélisation de l'impact environnemental des procédés d'usinage, Munoz et Sheng [54], ont établi que l'énergie consommée en usinage dépend des paramètres de réglage et de la conception de la pièce. Ils ont annoncé que d'une part, la minimisation de la puissance de coupe implique une taille réduite des composants des machines-outils et finalement, du capital investi. D'autre part, la réduction de la puissance de coupe implique l'augmentation du temps d'usinage, ce qui entraîne aussi des coûts d'exploitation plus élevés.

III-3- Stratégies d'optimisation multi-objective

À cause de la complexité du processus d'usinage, les différentes performances d'usinage citées précédemment évoluent de façon contradictoire et elles sont fortement corrélées. Par conséquent, il est difficile et voire impossible d'atteindre une optimalité globale du système usinant compte-tenu d'un seul objectif dans la formulation du problème d'optimisation. En effet, l'optimisation d'une seule performance entraîne systématiquement la dégradation d'une autre, et de ce fait, on est ramené à considérer simultanément plusieurs objectifs dans la formulation du problème d'optimisation visant à obtenir des solutions qui réalisent un compromis entre les performances considérées. Cette stratégie est communément appelée optimisation multi-objectifs. Il existe deux types de formulation principale des problèmes d'optimisation multi-objectifs :

- Combiner les objectifs dans une seule la fonction « objectif » ou fonction d'utilité, où des « poids » sont affectés à chacun des objectifs selon leur importance. Cette approche, facilement mise en œuvre en théorie, génère une solution unique choisie a priori à l'aide de ces coefficients de pondération, qui sont cependant difficiles à mettre en œuvre en pratique.

- Générer un ensemble de solutions optimales dites « solutions non dominées » au sens du principe de Pareto [55]. À l'opposé de la première approche, ces solutions ont différents « poids » et peuvent être appréciées a posteriori. Cette stratégie représente donc un excellent outil d'aide à la décision.

Après un recensement des travaux effectués sur une durée s'étalant des années soixante-dix jusqu'à présent concernant l'optimisation multi-objectifs du procédé de tournage, nous avons observé que les critères les plus fréquemment considérés comme étant des objectifs à minimiser ou à maximiser sont dans un ordre décroissant (Fig.III-1), à savoir : la rugosité de la surface usinée, la durée de vie de l'outil, le taux d'enlèvement de la matière (le débit copeau), le temps de production, le coût de production, l'effort de coupe, la puissance consommée, l'énergie consommée par la machine, le nombre de pièces usinées entre deux changements d'outil et le temps de coupe, etc.

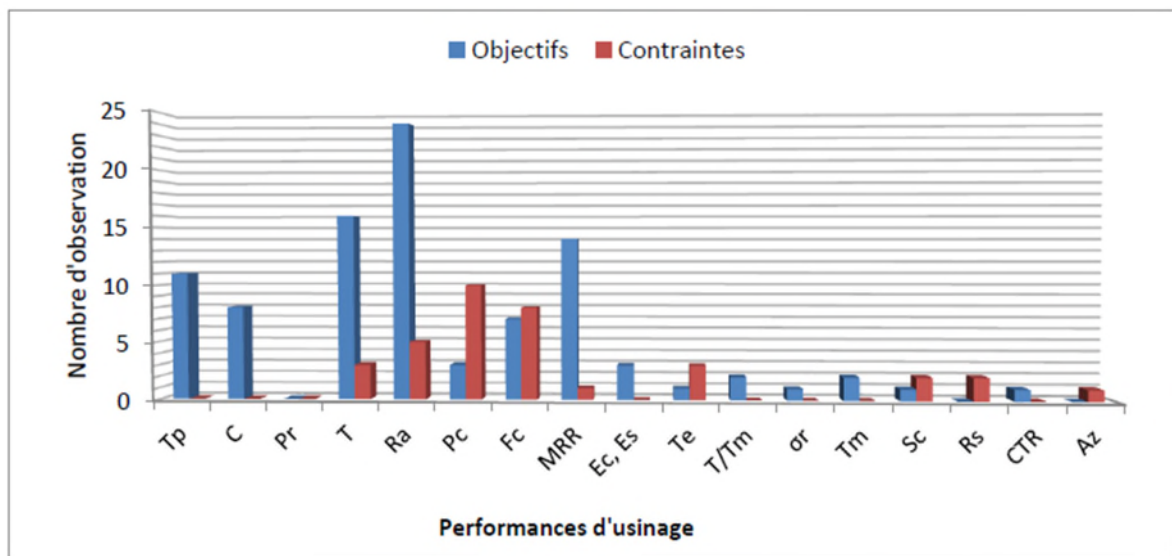


Figure III-1- Fréquence d'apparition des performances d'usinage dans des travaux d'optimisation multi-objectifs en tournage.

À l'inverse, les performances d'usinage considérées comme contraintes dans la formulation des problèmes d'optimisation multi-objectifs correspondent à un ordre différent, où la puissance consommée, l'effort de coupe et la rugosité superficielle sont les plus usitées.

III-3-1 Optimisation bi-objectifs

L'optimisation bi-objective traite simultanément deux critères souvent contradictoires. Les objectifs peuvent être économiques ou technologiques ou bien encore les deux à la fois. Parmi les travaux recensés (Fig.III-2), on remarque que l'optimisation bi-objectif est la plus utilisée, portant d'abord sur les critères purement technologiques, basés sur le minimum de la rugosité de la surface et le maximum du taux d'enlèvement de la matière [56] et ensuite sur

les critères économiques en minimisant en même temps le coût et le temps de production [57].

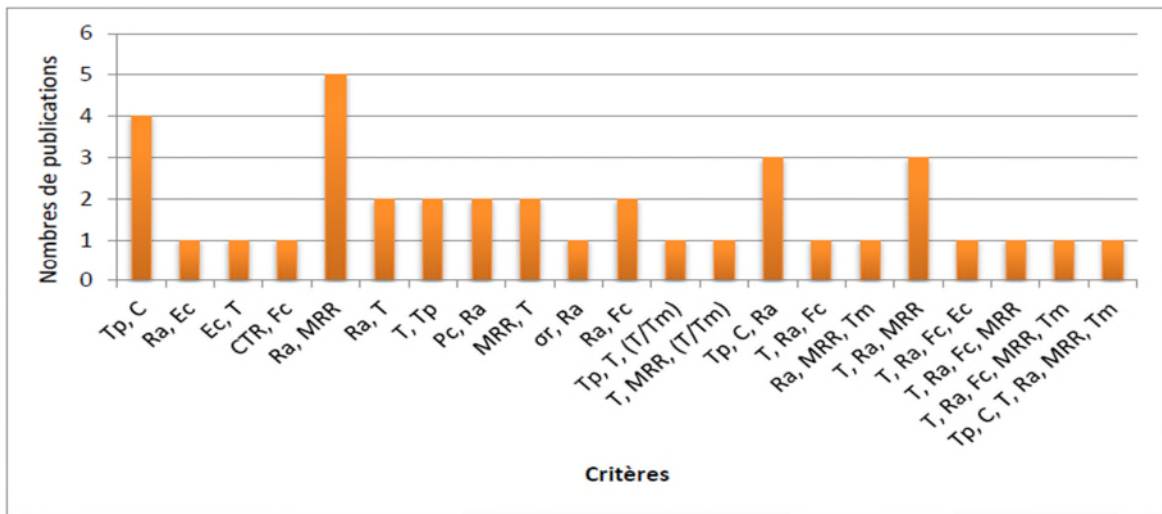


Figure III-2- Critères d’optimisation multi-objectifs les plus utilisés en tournage.

III-3-2 Optimisation Tri-objectif

L’optimisation Tri-objectif a suscité également un fort intérêt pour la prise en charge de la qualité de la surface, du coût et du temps de production [58], avec quasiment les mêmes limitations liées au système usinant. Cependant, la rugosité de la surface, le débit copeau et la durée de vie de l’outil sont optimisés sans tenir compte de l’existence d’aucune contrainte [59].

III-4-1 Optimisation des systèmes non linéaires

Étudie le cas général dans lequel l’objectif ou les contraintes (ou les deux) contiennent des parties non-linéaires, éventuellement non-convexes. La forme générale d’un problème d’optimisation est la suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f(x) \\ x \in R^n \\ \text{sousdescontraintes} \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{array} \right.$$

Où les fonctions f , g et h sont typiquement non-linéaires. L'équation désigne ce que nous appelleront des contraintes d'inégalité et l'équation des contraintes d'égalité. Il va de soi que la plupart des problèmes réels ou industriels ne sont pas initialement sous une des formes proposées. C'est pourquoi un des premiers travaux consiste en général à mettre le problème initial sous une forme standard. Pour résoudre les problèmes non linéaires nous utilisons les méthodes d'approximation les plus populaires surtout les méthodes déterministes comme la méthode du gradient, méthode de la pénalité intérieur et simplexe etc.

III-4-2 Optimisation des systèmes linéaires

Cette optimisation correspond aux problèmes formés par des équations linéaires, elle est exprimée tel que :

$$[A] \cdot \vec{x} - b = 0$$

Toutes les équations soit la fonction objective ou les contraintes sont linéaires.

- **Sans contrainte :**

Elle est équation de fonction objectif c'est tout, Nous recherchons des solutions approche pour des systèmes impossible en résolvant un problème d'approximation des moindres carrés ainsi que conserve les conditions de limitation de variable.

- Avec contrainte :

La modélisation de problème est telle que :

$$\begin{cases} f(\vec{x}) \\ A \cdot \vec{x} - b \leq 0 \quad (1) \\ A^* \cdot \vec{X} - b^* = 0 \quad (2) \\ \vec{x}_{min} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{max} \end{cases}$$

(1) contrainte linéaire (inégalité)

(2) contrainte linéaire (égalité)

Lorsque nous avons un système linéaire avec contraintes à optimiser bien souvent, et de manière quasi immédiate, nous recourons à la méthode du simplexe.

-Modèle de Taylor

Au début du 20esiècle, Taylor [60] relie la durée de vie de l'outil (T) à la vitesse de coupe (V_c) de la manière suivante:

$$V_c T^s = K \quad (2.42)$$

Où (s) est un exposant dépendant essentiellement du matériau de l'outil et (K) est une constante qui dépend de tous les paramètres d'entrée, y compris l'avance de l'outil. Il faut noter que(K) est égale à la vitesse de coupe quand (T=1min).

Ce pendant, l'exposant (s) dépend aussi des conditions et de l'environnement de coupe, d'où le développement d'autres modèles plus complets et plus pertinents.

Pour Usinages effectues avec des outils en en carbure (Tableau III.1).

| Matériaux | Aciers | Fontes grises | Fontes malléables | Alliages d'Aluminium |
|-----------|--------|------------------|----------------------|-------------------------|
| Tournage | -4,5 | -5 | -5 | -2,5 |

Tableau III-1- Valeurs approximative de n pour carbure. [61]

-Loi de Gilbert

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

$$T=K.V_c^k.f^x.a^y$$

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

k, x et y: Exposants dépendants de la nuance de l'outil. [62]

III-5 techniques d'optimisation

De nombreuses techniques d'optimisation des paramètres de coupe en tournage existent. Ces techniques font appel à des stratégies de calcul totalement différentes, et ce en fonction des divers modèles d'optimisation comme suite :

- des techniques dites conventionnelles ou encore classiques, recouvrant les méthodes analytiques et itératives.
- des techniques non conventionnelles, basées sur la méthodologie des plans d'expériences et les méthodes de soft computing et les algorithmes génétiques (...etc.).
- des techniques hybrides, combinant les méthodes conventionnelles et non conventionnelles.

III-5-1 Techniques d'optimisations conventionnelles et non conventionnelles :

➤ Il y a plusieurs méthodes **d'optimisation mono objectif**, telles les méthodes déterministes :

- **Méthode du simplexe**

L'intérêt principale de la méthode du simplexe par rapport aux autres méthodes est qu'elle ne nécessite pas de calcul de gradient, elle est uniquement basée sur l'évolution de fonction, cela rend utilisable pour des fonctions bruitées. Soit une fonction à minimiser.

On appelle simplexe de R^n un ensemble (x_0, x_1, \dots, x_n) de point de R tel que $f(x_0) \geq f(x_i) \forall i \in [1, \dots, n]$, donc x_0 est le meilleur Elément et $f(x_0)$ est la valeur optimale.

- **Méthode du gradient**

Historiquement, les méthodes de gradient sont les plus anciennes, elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte ; La connaissance de la dérivée de la fonction-objectif en chacun des points de l'espace. Cette famille des méthodes procède de la façon suivante : On choisit un point de départ x_0 et on calcule le gradient $\nabla f(x_0)$ en x_0 .

Ce gradient indique la direction de 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 :

$$x_1 = x_0 - \lambda_0 \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|}$$

Cette procédure est répétée et engendre les points x_0, x_1, \dots, x_k ainsi pas à pas la distance entre le point d'indice

$$x_{k+1} = x_k - \lambda_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|}$$

λ_{k+1} est le pas de déplacement à chaque itération.

➤ **l'optimisation multi-objective.**

- **Méthode de Taguchi**

Genichi Taguchi est un ingénieur japonais qui a œuvré à l'amélioration des produits et des procédés industriels de son pays. La contribution majeure de Taguchi réside dans la combinaison de l'ingénierie et des méthodes statistiques pour obtenir des améliorations rapides en termes de coût et de la qualité, en optimisant les processus de conception et de fabrication des produits. L'idée de la conception robuste de Taguchi est basée sur la conception d'un produit ou d'un procédé de telle manière à rendre ses performances moins sensibles à la variabilité, qui est due aux facteurs de bruits, dont le contrôle est soit très coûteux ou tout simplement impossible. La méthode Taguchi est généralement appréciée pour sa distribution libre et à ses plans et tables orthogonales. Les tables optimisées de Taguchi

permettent une réduction considérable du temps et des ressources nécessaires pour réduire la variabilité de la réponse par rapport au plan d'expériences traditionnel, et cela avec une amélioration simultanée de la qualité et du coût de la fabrication [60]. La méthode de Taguchi est basée sur la séparation des variables du problème d'optimisation en deux ensembles [61] :

Système usinant Facteurs de bruit Facteurs de décision Performances

i) les facteurs de décision contrôlables qui agissent sur la moyenne ou la dispersion de la réponse ou simultanément sur les deux,

ii) les facteurs de bruit interne et externe au système, qui sont au moins mesurables quand ils ne sont pas maîtrisables.

Les étapes de taguchi :

Étape 1: Sélectionner la table ou le plan orthogonal en fonction du nombre des paramètres contrôlables. Pour distinguer et éliminer les variables non significatives, le nombre maximal possible de facteurs devraient être inclus dans les expériences.

Étape 2: Exécuter les essais ou expériences du plan de Taguchi choisi et mesurer les réponses ciblées pour chaque combinaison des paramètres.

Étape 3: Analyse des données mesurées à l'aide de l'ANOVA.

Étape 4: Identification des paramètres optimums en utilisant l'analyse de la réponse du rapport signal sur bruit (S/N).

Étape 5: Conduire des tests de confirmation avec le niveau optimal de toutes les combinaisons des paramètres.[64]

• Les méthodes de Soft-Computing

Le soft computing a été introduit par L.A. Zadeh en 1994 comme un moyen de construire des systèmes intelligents répondant à des obligations d'efficacité, de robustesse, de facilité d'implémentation et d'optimisation de coûts temporels, énergétiques, financiers, etc, mais aussi prenant en compte la composante humaine généralement présente dans les systèmes.

Ses principales composantes en sont la logique floue, les réseaux neuronaux, le raisonnement probabiliste et les méthodes d'optimisation telles que les algorithmes génétiques. Leur point de départ est la gestion d'imprécision et d'incertitude inhérentes à la plupart des problèmes.

Le principal intérêt du soft computing réside dans l'utilisation conjointe de plusieurs de ces composantes dans des systèmes hybrides tirant parti d'une synergie entre les différentes méthodes afin d'exploiter les avantages de chacune tout en compensant ses inconvénients par l'utilisation d'une autre dont les propriétés sont complémentaires.

III-5-2 Méthode agrégées :

Ceux qui transforment le problème multi-objectif en un problème mono-objectif en utilisant une fonction objectif équivalente Les AGs de cette classe sont appelés : méthodes agrégées

- **Approche par ε -contraintes**

Cette méthode est basée sur la minimisation d'un objectif f_i en considérant que les autres objectifs f_j avec $j \neq i$ doivent être inférieurs à une valeur ε_j .

En générale, l'objectif choisi est celui que le décideur souhaite optimiser en priorité

$\min f_i(x)$ Avec

$$f_j(x) \leq \varepsilon_j, \forall j \neq i$$

De cette manière, le problème multi objectif sera traduit par un problème simple objectif sous contraintes qu'on peut le résoudre. Le décideur peut ensuite réitérer ce processus sur un objectif différent jusqu'à ce qu'il trouve une solution satisfaisante.

- **Méthode min-max**

Cette méthode consiste à transformer le problème multi objectif en un problème à un seul objectif où l'on cherche à minimiser le maximum de l'écart relatif entre le point de référence appelé but et un autre point but associé par le décideur, on peut écrire la distance entre le but et l'autre point comme suit :

$$L_r(\vec{f}(\vec{x})) = \left[\sum_{i=1}^m |B_i - f_i(\vec{x})|^r \right]^{\frac{1}{r}}$$

Avec $i=1.....m$

B_i le but à pour le $i^{ème}$ objectif

Selon l'indice r il y a plusieurs normes, le plus utiliser en méthode min-max est :

$$L_\infty = \max_{i \in \{1.....m\}} [B_i - f_i(\vec{x})]$$

III-5-3 Méthodes Pareto

Cette catégorie de méthodes introduit et prend en charge le concept d'optimalité de Pareto dans leurs mécanismes de sélection,

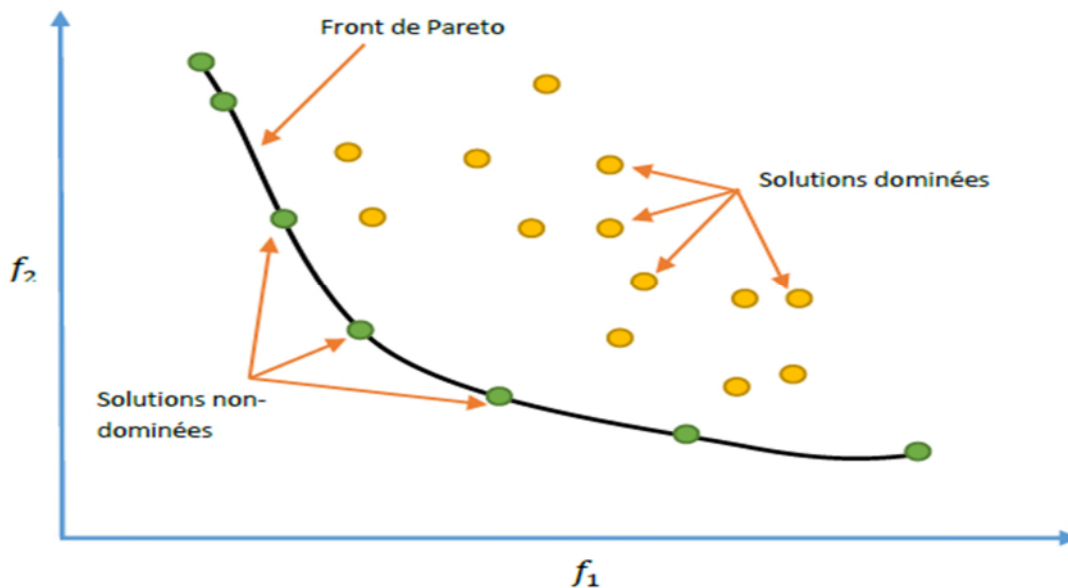


Figure III-4- Front de Pareto

il existe plusieurs variétés d'algorithmes génétique qui sont répartis en deux types, on va citer quelques-unes :

➤ **Les méthodes élitistes**

On appelle élitistes, les méthodes qui conservent les solutions Pareto-optimales pour une réintroduction dans des populations nouvelles.

- **Pareto Envelope Based Selection Algorithm (PESA)**

Proposée par Cornes et al. en 2000 [44], le point de différence entre cette méthode et la précédente c'est que cette méthode n'utilise pas la stratégie d'évolution (1+1), elle utilise deux paramètres relatifs à la population : $P1$ qui représente la taille de la population interne, PE la taille de l'archive (population externe), si une solution dans $P1$ est non-dominée, elle est systématiquement transférée à l'archive, en même temps, toutes les solutions dominées par cette nouvelle solution sont supprimées de la population.

- **No dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA II)**

Toutes les méthodes que nous venons de présenter ne conservent pas leurs solutions Pareto-optimales trouvées au cours des générations. Elles sont dites non élitistes. Pour résoudre cette difficulté, de nouvelles techniques ont été appliquées. Nous avons choisi de présenter uniquement le NSGA-II. En proposant le NSGA II, le chercheur Deb (Deb et al. 2002) a tenté de résoudre toutes les critiques faites sur NSGA: non élitiste, complexité de calcul et utilisation de sharing qui implique le réglage d'un ou plusieurs paramètres. Dans cet algorithme, à chaque génération t une population de parents (P_t) de taille N et une population d'enfants (Q_t) de même taille sont assemblées pour former une population (R_t) de taille $2N$, Cet assemblage permet d'assurer l'élitisme. La population (R_t) est ensuite répartie en plusieurs fronts ($F1, F2, \dots$) par une procédure de tri, plus rapide que celle proposée dans la première version de NSGA. Une nouvelle population parent (P_{t+1}) est formée en ajoutant les fronts au complet (premier front $F1$, second front $F2, \dots$ etc) tant que ce ceux-ci ne dépassent pas N . Si le nombre d'individus présents dans (P_{t+1}) est inférieur à N , une procédure de crowding est appliquée. La figure III-3 illustre le principe de fonctionnement de NSGA-II [67].

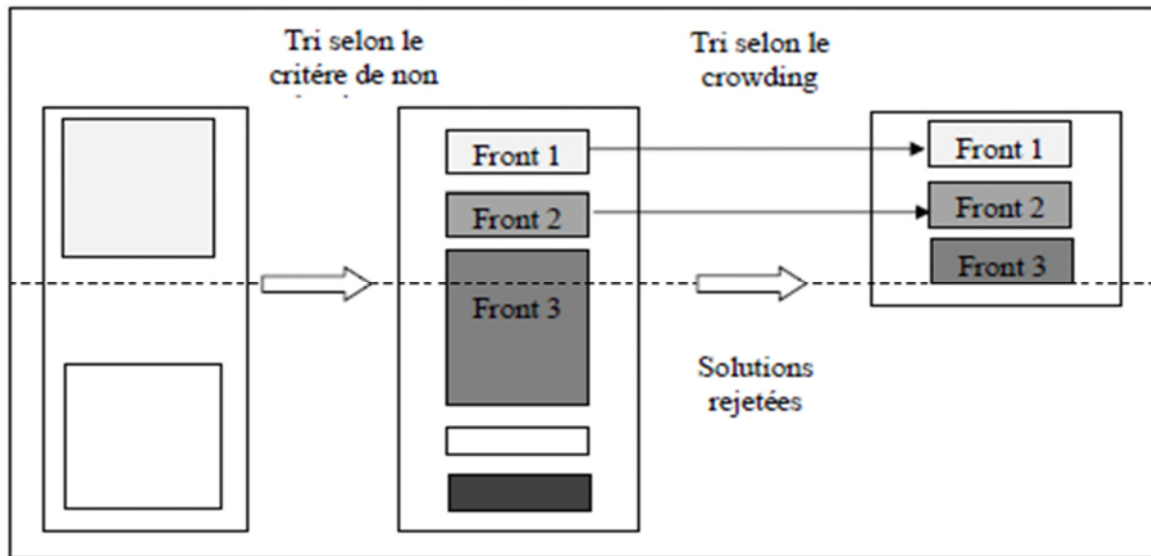


Figure III-5-Algorithm (NSGA II)[68].

➤ **Les Méthodes non-élitistes**

• **Niched Pareto Genetic Algorithms (NPGA)**

Proposée par Horn et Napflotis en 1994 [20], cette méthode utilise la sélection par tournoi basée sur la dominance de Pareto. Deux individus de la population sont choisis aléatoirement et comparés à une sous-population, si un des deux est non-dominé et l'autre dominé, alors l'individu non-dominé est sélectionné, s'il y a un nœud (les deux individus sont non-dominés), la fonction de sharing est appliquée, elle permet de distinguer le meilleur entre plusieurs individus non-dominés.

• **Nondominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)**

Dans l'algorithme NSGA proposé par Srinivas et Deb (1993), le calcul de fitness s'effectue en divisant d'abord la population en plusieurs fronts en fonction du degré de dominance au sens de Pareto de chaque individu. Les individus non dominés de la population courante constituent le premier front de Pareto. On attribue alors à tous les individus de ce front la même valeur de fitness factice. Cette valeur est supposée donner une chance égale de reproduction à tous ces individus. Mais pour maintenir la diversité de la population, il est

nécessaire d'appliquer une fonction de partage sur cette valeur. Ensuite, ce premier groupe d'individus est temporairement supprimé de la population. On recommence cette procédure jusqu'à l'identification des solutions du deuxième front. La valeur factice de fitness attribuée à ce second groupe est inférieure à la plus petite fitness, après application de la fonction de partage sur le premier front. Ce mécanisme est répété jusqu'à ce que l'on ait traité tous les individus. L'algorithme se déroule ensuite comme un algorithme génétique standard. Grâce à sa procédure d'assignement de fitness basée à la fois sur la notion de dominance et la fonction de partage, le NSGA semble le plus approprié à maintenir la diversité de la population et à répartir plus efficacement les solutions sur le front de Pareto. Néanmoins, cet algorithme présente quelques insuffisances en raison de sa complexité de Calcul et de sa sensibilité au choix de la valeur σ [68].

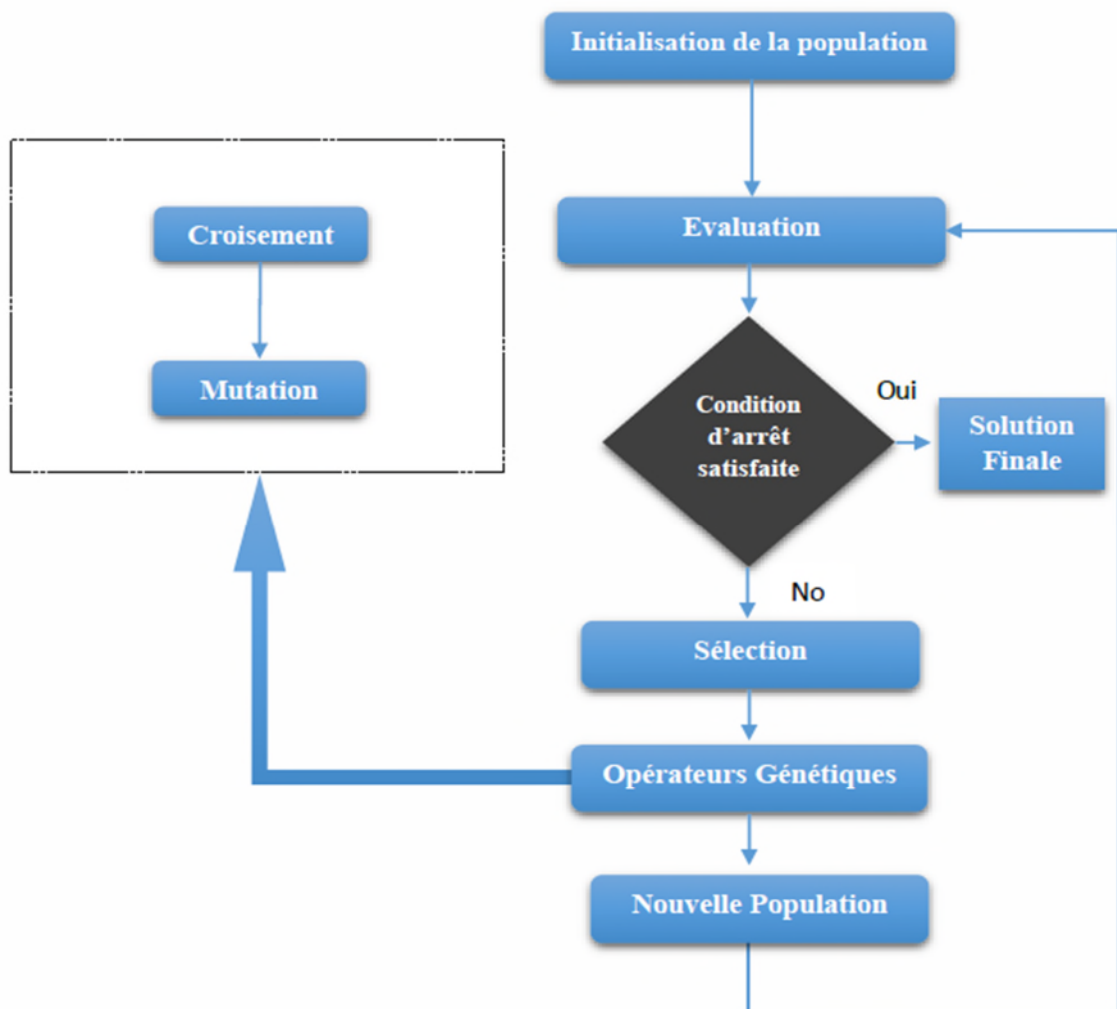


Figure III.6. Fonctionnement d'un Algorithme génétique.

- **Adaptation (fitness)**

La fonction d'adaptation, ou fitness, associe une valeur pour chaque individu.

Cette valeur a pour but d'évaluer si un individu est mieux adapté qu'un autre à son environnement. Ce qui signifie qu'elle quantifie la réponse fournie au problème pour une solution potentielle donnée. Ainsi les individus peuvent être comparés entre eux.

Cette fonction, propre au problème, est souvent simple à formuler lorsqu'il y a peu de paramètres. Au contraire, lorsqu'il y a beaucoup de paramètres ou lorsqu'ils sont corrélés, elle est plus difficile à définir. Dans ce cas, la fonction devient pondérée de plusieurs fonctions. Un ajustement des coefficients est nécessaire.

III-5-4 Les techniques d'optimisation hybrides

En partant du constat que les techniques d'optimisation étudiées précédemment présentent encore des inconvénients, des chercheurs ont couplé judicieusement certaines techniques fondamentalement différentes afin de proposer de nouvelles approches hybrides plus performantes. Ces méthodes reposent sur l'utilisation des performances des unes, et allient la rapidité des calculs, la garantie de la convergence vers un optimum global, l'implémentation facile, etc., réduisant ainsi certaines limitations des autres méthodes. Nous présentons dans ce qui suit les techniques hybrides les plus connues.

- **L'approche hybride ANNs-FL**

Wang [69] a déclaré que le véritable défi dans la planification des processus d'usinage à critères multiples réside dans l'évaluation de la préférence du fabricant. Car selon lui, dans un environnement de décision floue, un fabricant est souvent incapable d'articuler sa préférence sur un ensemble de solutions d'une manière distincte en raison de l'incertitude extrinsèque du processus de coupe. De ce fait, l'auteur a présenté une approche hybride basée sur un réseau de neurones artificiel et la logique floue pour la planification des opérations de tournage. Au-

delà de toute attente, les résultats ont montré que l'approche proposée est capable de capturer diverses relations de préférence floues de l'usineur et de déterminer les paramètres de coupe optimaux.

- **L'approche hybride TM-ANNs-GA**

Chien et Tsai [70] ont fixé comme objectif le maximum du MRR sous contraintes de l'usure de l'outil lors du tournage de l'acier inoxydable 17-4 PH. Pour atteindre leur objectif, ils ont employé un réseau de neurones à rétro-propagation (BPN) réajusté, pour construire un modèle prédictif fidèle de l'usure de l'outil et un algorithme génétique (GA) à configuration optimisée pour la détermination des conditions de coupe optimales. Les paramètres internes du BPN et du GA sont optimisés, à travers des tables orthogonales (L18) de Taguchi. Quoique l'approche utilisée ait donné des résultats performants et robustes, mais le nombre d'expériences à considérer si les dimensions du problème venaient d'être augmentées, nécessitera d'énormes préparatifs ce qui rend l'approche moins pratique à l'échelle industrielle.

Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à l'optimisation (multi/mon)-objectif et aux algorithmes génétiques (multi/mon)-objectifs. Il existe plusieurs AGs et on distingue ceux qui sont basés sur le principe de Pareto, ceux qui travaillent sur une population, et ceux qui n'opèrent qu'avec un seul individu à la fois, leur utilisation dépend du type du problème à résoudre. Afin de comprendre le fonctionnement des AGs multi-objectifs, une application va être entamée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

ETUDE DE CAS PRATIQUE

Introduction

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

- Pour les grandeurs géométriques :
 - La profondeur de passe a (en mm).
- Pour la grandeur cinématiques :
 - La vitesse de coupe V_c en (m/min). L'avance par f (en mm /tr).

Le problème de choix des conditions de coupe consiste à déterminer les valeur des variables de coupe (f, a, V_c) pour chaque opération élémentaire d'usinage en prenant en compte les limites de performance des élément de la cellule élémentaire d'usinage que se traduisent par des contraintes établies à partir des lois de coupe et qui font intervenir les variables de coupe avec lesquelles le domaine des solution réalisable est borné. D'une manière générale, la détermination des paramètres de coupe nécessite une bonne connaissance des facteurs d'incidence relatifs au couple outil-matière à l'opération d'usinage et à l'environnement.

IV-1 Optimisation des conditions de coupe

IV-1-1 Fonctions objectifs

Temps d'usinage :

La production maximale sera atteinte lorsque le temps de fabrication unitaire sera minimal. Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire à la réalisation d'une passe sur une pièce. C'est la somme des temps machine, temps de changement de l'arête, temps retour de l'outil et le temps de montage et démontage de la pièce. Il s'exprime par la relation (I.5) :

$$T_u = T_m + T_{cs} \left(\frac{T_m}{T} \right) + T_r + T_h \text{ (IV.1)}$$

T_{cs} (Temps outil) : temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire.

T_r : Temps de retour.

T_h : temps de montage et démontage de la pièce.

T_m : (Temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une Avance), puisque : On déterminer le temps technologique comme suite :

L_u : Longueur usinée.

e : Distance de sécurité

V_f : vitesse d'avance

Longueur totale de déplacement de l'outil :

$$L = l_u + e$$

Temps technologique d'usinage d'une pièce est:

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

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

T : Durée de vie de l'outil de coupe. La durée de vie de l'outil T est donnée par la loi de TAYLOR développée (loi de GILBERT).

$$V_c \cdot f^{a_1} a^{a_2} T^{a_3} = K$$

Car : a_1 et a_2 et a_3 et K sont des constant empirique et dépend de matériaux choisie. Exposants dépendants la nuance de l'outil

$$\text{Donc : } T = K^{1/a_3} V_c^{(-1/a_3)} f^{(-a_1/a_3)} a^{(-a_2/a_3)}$$

En remplaçant T_m et T par ses expressions et en prennent : $A = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000}$

Le temps total d'usinage sera :

$$T_u = A \cdot V_c^{-1} f^{-1} t_{cs} \cdot A \cdot V_c^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot a^{\frac{a_2}{a_3}} + t_h + t_R \text{ (IV.2)}$$

Coût d'usinage :

Le critère de coût de production d'une pièce fabriquée par l'enlèvement de matière s'écrit comme suivant :

$$C_u = C_0 \cdot t_m + (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) \left(\frac{t_m}{T} \right) + C_0(t_h + t_R) \quad (\text{IV.3})$$

C_u : Coût d'usinage unitaire.

C_0 : Coût de machine en €/ min.

C_t : coût d'une arrête de coupe en € / arrête.

T_m (temps technologique) : temps de machine (temps de coupe avec une avance).

t_{cs} : Temps de changement d'outil y compris le temps de réaffûtage si nécessaire.

T : durée de vie de l'outil de coupe.

t_r : Temps de retour pour la dernière passe.

t_h : Temps de montage et démontage de la pièce.

De la même manière du temps, le coût sera :

$$C_u = C_0 A \cdot V_c^{-1} f^{-1} + A \cdot V_c^{\frac{1-a_3}{a_3}} \cdot f^{\frac{a_1-a_3}{a_3}} \cdot K^{\frac{-1}{a_3}} \cdot a^{\frac{a_2}{a_3}} \cdot (t_{cs} C_0 + C_t) + C_0(t_h + t_R) \quad (\text{IV.4})$$

- **La variation de temps et de Coût en fonctions de V_c :**

D'après un simple programme sur Matlab, et après effectuée la simulation on obtient le graphe suivante :

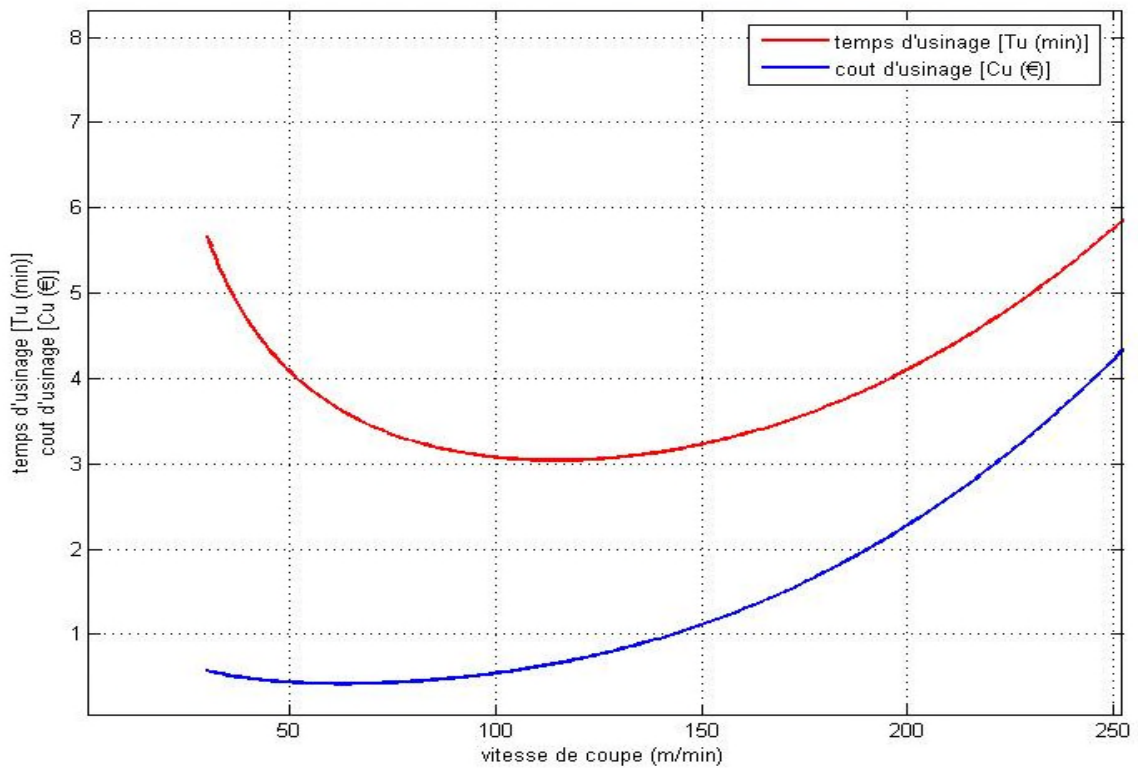


Figure IV.1. L'évolution de temps et de cout en fonction V_c

Discussion N°1

Ce graphe représente l'évolution de temps et de cout d'usinage suivante la vitesse de coupe, telle que on voit que dans l'intervalle [0-30]m/min que ce dernier n'a aucune influence sur le $T_u(\text{min})$ et $C_u(\text{€})$ car y'aura pas d'enlèvement de matière, en suite on remarque une chute des deux courbes C_u et T_u entre [30,100]m/min qui va nous définir notre champ faisable (optimale).

IV-2 Contraintes de problème

- L'avance par tour f doit être comprise entre deux valeurs extrêmes programmables sur la machine-outil

$$f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (\text{IV.5})$$

- La vitesse de coupe V_c doit être comprise dans les limites de validité du modèle de la loi de la durée de vie établie pour la couple outil-machine

$$V_{c \min} \leq V_c \leq V_{c \max} \quad (\text{IV.6})$$

- **Limitation sur la puissance de coupe**

La puissance nécessaire à la coupe doit être inférieure à une puissance limite il donne comme suivant :

$$P = C_p \cdot V_c^b f^c a^d \leq P_{\max} (\text{IV.7})$$

C_p, b, c, d : coefficients spécifique et exposantes de la puissance de machine (sont des coefficients empirique qu'on détermine expérimentalement).

P_{\max} : Le maximum autorisé de puissance pour toutes les opérations

Car : $C_p = 0.0373$, $b = 0.91$, $c = 0.78$, $d = 0.75$

- **Limitation sur l'état de surface**

L'état de surface résultante d'usinage doit être inférieure à une rugosité maximale imposée :

$$R_a = C_s V_c^e f^g a^i \leq R_{\max} (\text{IV.8})$$

C_s, e, g, i coefficients spécifique et exposantes de la rugosité de surface résultante, (sont des coefficients empirique qu'on détermine expérimentalement).

R_{\max} : Le maximum autorise de rugosité de surface.

Car : $C_s = 14.785$, $e = -1.52$, $g = 1.004$, $i = 0.25$

- **Limitation sur la température de coupe**

Le facteur de contrôle est la température d'interface outil-coupeau qui doit être inférieure à une température θ_{\max} :

$$\theta = C_m V_c^m f^p a^q \leq \theta_{\max} (\text{IV.9})$$

C_m, m, p, q : coefficients spécifique et exposantes de la température de coupe, (sont des coefficients empirique qu'on détermine expérimentalement).

Car : $C_m = 74.96$, $m = 0.4$, $p = 0.2$, $q = 0.105$

▪ Limitation sur l'effort de coupe

L'effort de coupe doit être inférieur à une force de coupe limite ;

$$F = C_f \cdot V_c^x \cdot f^y \cdot a^z \leq F_{max} \text{ (IV.10)}$$

C_f, x, y, z : coefficients spécifique et exposantes de la force de coupe, (sont des coefficients empirique qu'on détermine expérimentalement).

$$\text{Car : } C_f=844 \quad , x=-0.1013 \quad , y=0.725 \quad , z=0.75$$

F_{max} : Le maximum autorise de la force de coupe pour toutes les opérations.

IV-3 Modèle d'optimisation retenu

L'opération de tournage sera menée en mono passe. On cherchera à déterminer la vitesse de coupe V_c et l'avance par tour f et la profondeur de passe pour minimiser le temps et le cout
Par conséquent, le problème de minimisation de temps et coût d'usinage sera exprimé par le modèle suivant :

$$\left. \begin{aligned} & \text{minimiser} \begin{cases} T_u = 96,936 \cdot f^{-1} \cdot V_c^{-1} + 3,4716 \cdot a^{1,4} \cdot 10^{-8} \cdot f^{0,16} \cdot V_c^3 + 1,6 \\ C_u = 9,693 \cdot f^{-1} \cdot V_c^{-1} + 3.8187 \cdot a^{1,4} \cdot 10^{-8} \cdot f^{0,16} \cdot V_c^3 + 0.163 \end{cases} \\ & \text{sous contraintes :} \\ & \quad 0,254 \leq f \leq 0,862 \\ & \quad 0.4 \leq a \leq 12 \\ & \quad 30 \leq V_c \leq 200 \\ & \quad 0.0373 \cdot V_c^{0,91} \cdot f^{0,78} \cdot a^{0,75} \leq 7 \\ & \quad 74.96 \cdot V_c^{0,4} \cdot f^{0,2} \cdot a^{0,105} - 17,8 \leq 500 \\ & \quad 844 \cdot V_c^{-0,1013} \cdot f^{0,725} \cdot a^{0,75} \leq 1100 \end{aligned} \right\}$$

IV-4-3 Constantes et variables d’usage

Considérons l’opération de chariotage d’une pièce sur la longueur L=203 mm et de diamètre D=152mm dont les paramètres sont donnée sur le tableau(IV.1).

| paramètre | valeur | Paramètre | valeur | paramètre | valeur |
|--------------|-------------|-----------------------|---------------|--------------|-------------|
| $V_{c \min}$ | 30 m /min | p_{max} | 7 KW | C_t | 0.5€/arrête |
| $V_{c \max}$ | 200m /min | F_{max} | 1100N | C_0 | 0.1€/min |
| f_{min} | 0.254mm/tr | θ_{max} | 600°c | a_1 | 0.29 |
| | | $\theta_{f \min,max}$ | [500c°,600c°] | | |
| f_{max} | 0.862 mm/tr | $f_{f \min}$ | 0.05 | a_2 | 0.35 |
| R_{max} | 15 µm | t_h | 1.5min/pièce | a_3 | 0.25 |
| $R_{f \max}$ | 5 µm | t_{cs} | 0.5min/arrête | $a_{p \max}$ | 12mm |
| k | 193.3 | t_R | 0.13min/passe | $a_{p \min}$ | 0.4mm |

Tableau. IV.1. paramètres d’usage [72].

IV-5 Simulation

Le modèle considéré représente un problème d'optimisation multi-objectif. Les variables d'optimisation sont l'avance par tour f et la vitesse de coupe V_c et la profondeur de passe a_p . Ces variables sont notées :

$$x_1 = V_c, \quad x_2 = f, \quad x_3 = a_p.$$

D'après l'étude effectuée, ce problème peut être résolu à l'aide de plusieurs méthodes ; parmi eux en a La fonction fitness de Matlab qui travail avec la méthode d'algorithme génétique (NSGA II) L'utilisation de cette fonction nécessite la déclaration des objectifs et des contraintes.

Pour le cas d'une profondeur de passe donné $a=0.4$ mm (ébauche)

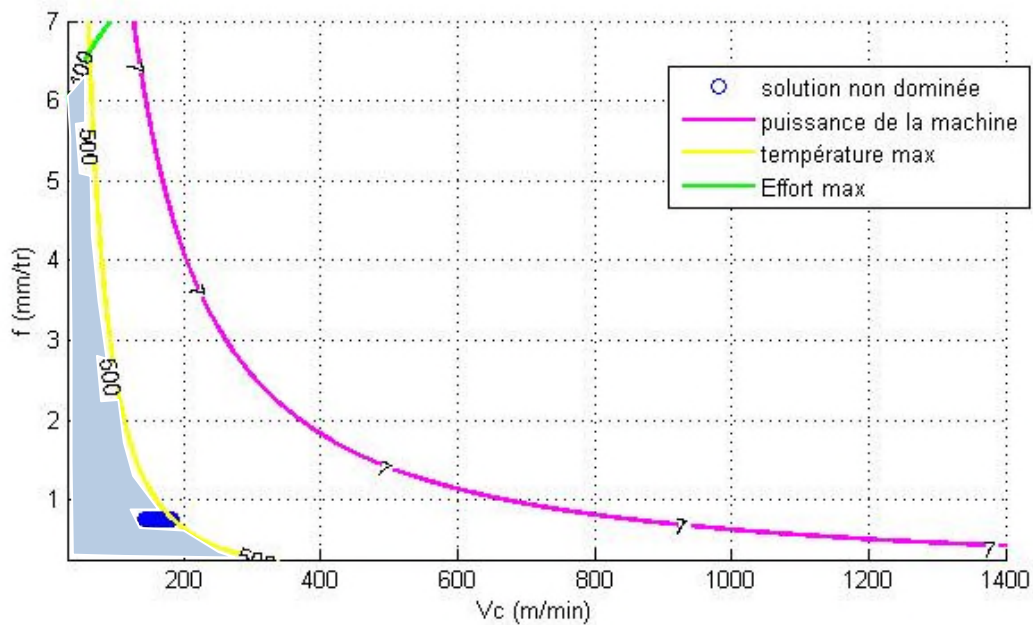


Figure IV.2. Espace de recherche faisable (ébauche)

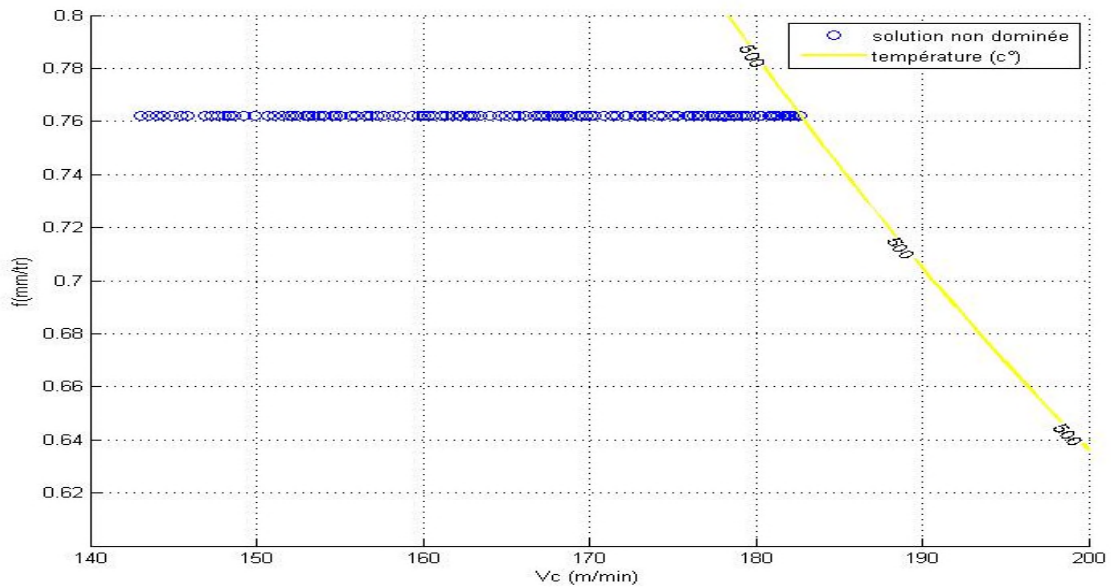


Figure IV.3. Agrandissement d'espace de recherche Faisable.

Discussion N°2

D'après avoir fixe les contrainte sur (Figure IV.3) on observe que la 1^{er} contrainte qui limite notre champs faisable est la température(T) et on 2^{ème} lieu c'est l'effort(E).

On constate d'après avoir fixé les solutions optimales sur le graphe (Figure IV.4) que l'ensemble des solutions est linéaire.

- **Interprétation de représentation graphique :**

- plus que la vitesse de coupe(V_c) augmenté on remarque que l'avancé(f) diminué pour une profondeur de passe de [0.4, 12] mm.

- les solutions optimales que le logicielle nous sa fournie sont constante suivante l'axé des avancé (f) et variante pour la vitesse de coupe(V_c).

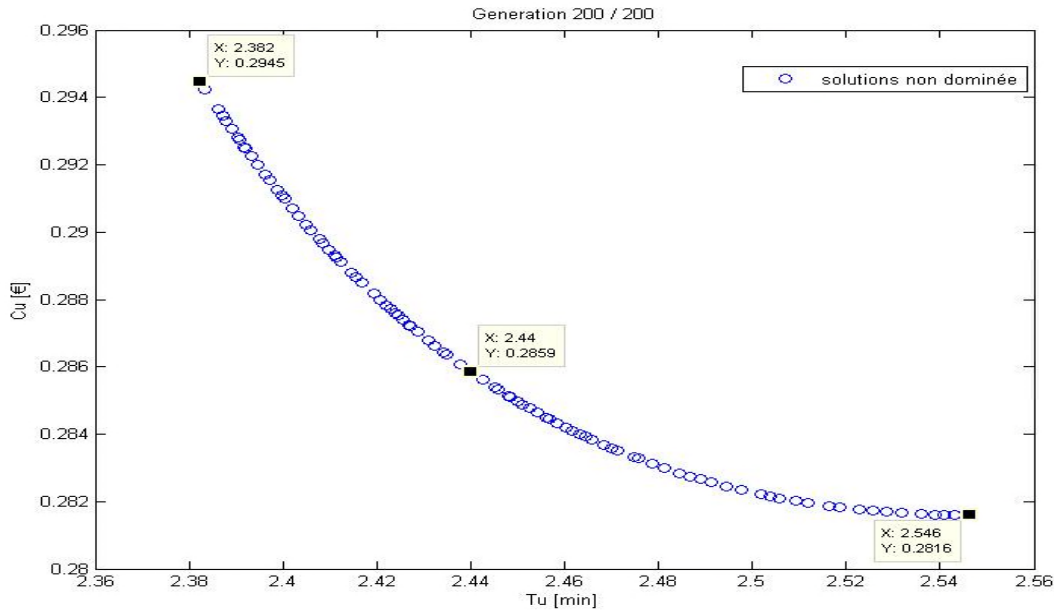


Figure IV.4. les solutions non dominée de front de pareto.

Discussion N°3

On observe pour les solutions de front de Pareto se défère on fonction de l'objectif 1 ($Tu(\text{min})$) et l'objectif 2 ($Cu(\text{€})$) pour des valeurs de vitesse de coupe et d'avance différentes suivant la favorisation de l'objectif .

IV-6 Résultats

À l'aide d'un programme implémenté sur Matlab, et en utilisant les données précédente :

Une limitation inférieure sur x : $L_b = [30 \ 0.2540.4]$;

Une limitation supérieure x : $U_b = [200 \ 0.868 \ 12]$;

Un point de départ $x_0 = 0$;

On trouve les résultats suivants:

On sélectionne trois solutions optimale de problème d'optimisations bi-objectif (temps, cout) d'après les résultats obtenue a partir d'un front de pareto :

- 1-la 1^{er} solution consiste a favorisé l'objectif 1(Tu) par rapport a l'objectif 2(Cu).
- 2-la 2^{émé} solution consiste a favorisé 50% de l'objectif 1 et 50% de l'objectif 2.
- 3-la 3^{émé} solution consiste a favorisé l'objectif 2 par rapport a l'objectif 1.

| Les cas | Variable de décision | Objectif 1 (Tu) | Objectif 2 (Cu) |
|--------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| Premier solution | $V_c = 182,644 \text{ m/min}$ | 2.382 min | 0.2945€ |
| | $f = 0.7620 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 0.4 \text{ mm}$ | | |
| Deuxième solution | $V_c = 165,718 \text{ m/min}$ | 2.440 min | 0.2859 € |
| | $f = 0.7620 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 0.4 \text{ mm}$ | | |
| Troisième solution | $V_c = 143,046 \text{ m/min}$ | 2.546 min | 0.2816 € |
| | $f = 0.7620 \text{ mm/tr}$ | | |
| | $a_p = 0.4 \text{ mm}$ | | |

Tableau IV.2. Les paramètres de coupe optimaux

IV-7 Résolution pour le cas de finition

Dans ce travail, nous allons minimiser simultanément le coût et le temps d'usinage sous les contraintes liées à la rugosité, la puissance, la température. Prenons les expressions du coût, et le temps, la rugosité, puissance de la machine et la température issue du modèle considéré dans le chapitre IV. En remplaçant les paramètres d'usinage par les valeurs du tableau (IV.1)

On trouve :

$$\text{minimiser } \begin{cases} T_u = 96,936 \cdot f^{-1} \cdot V_c^{-1} + 3,4716 \cdot a^{1,4} \cdot 10^{-8} \cdot f^{0,16} \cdot V_c^3 + 1,63 \\ C_u = 9,693 \cdot f^{-1} \cdot V_c^{-1} + 3,8187 \cdot a^{1,4} \cdot 10^{-8} \cdot f^{0,16} \cdot V_c^3 + 0,163 \end{cases}$$

sous constraints :

$$0,05 \leq f \leq 0,862$$

$$0,4 \leq a \leq 12$$

$$30 \leq V_c \leq 200$$

$$0,373 \cdot V_c^{0,91} \cdot f^{0,78} \cdot a^{0,75} \leq 7$$

$$1000 \cdot \left(\frac{f^2}{3,2}\right) \leq 5$$

$$74,96 \cdot V_c^{0,4} \cdot f^{0,2} \cdot a^{0,105} - 17,8 \leq 600$$

IV-8 Simulation (finition)

-pour le cas d'une profondeur de passe donné $a=0.4$ mm (finition)

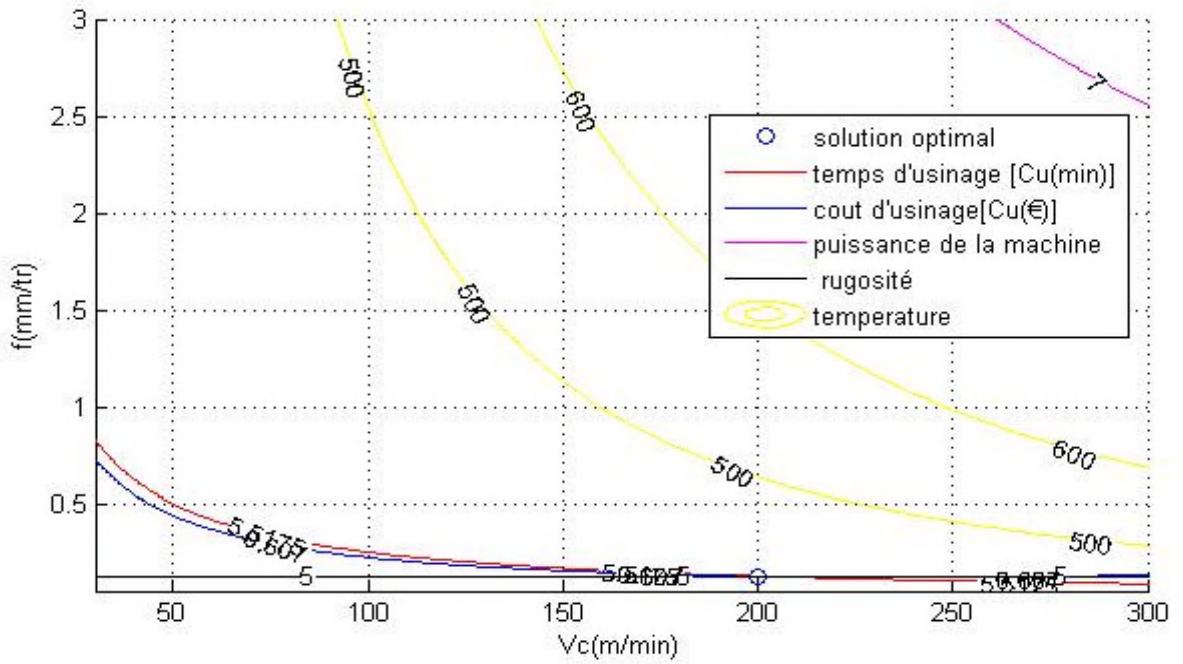


Figure IV.5. Espace de recherche faisable (finition)

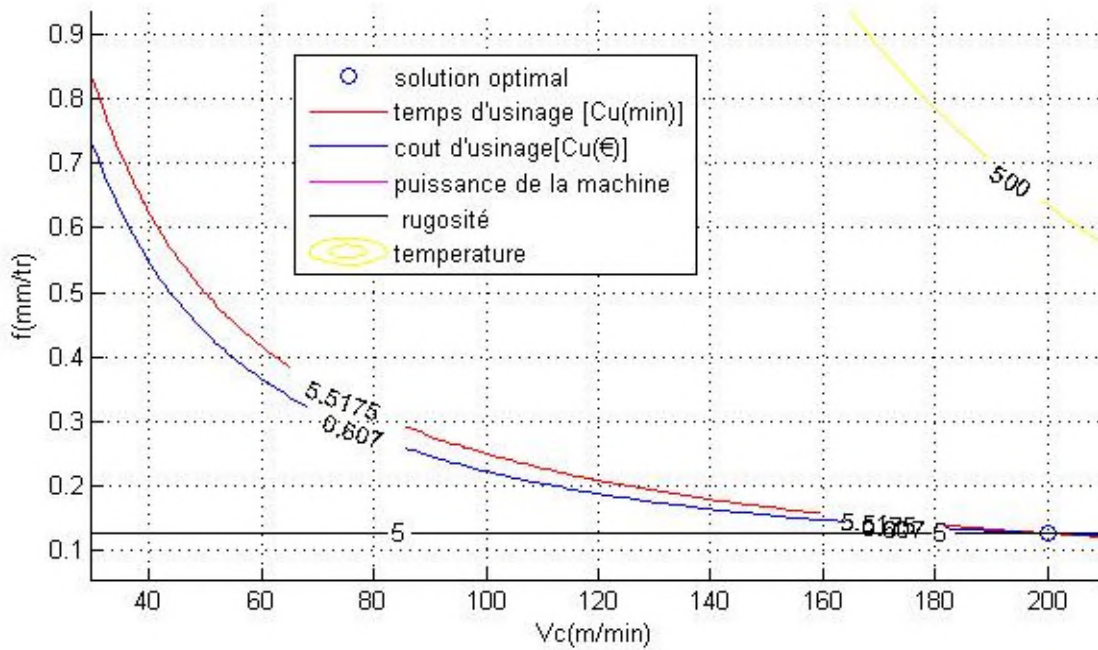


Figure IV.6. Agrandissement d'espace de recherche Faisable (finition)

Discussion N°4

D'après avoir fixé les contraintes on remarque sur la (figure IV7) de notre champs faisable que la contrainte qui influe sur notre problème avec une énorme importance et la rugosité (Ra), et on constate après avoir fait la simulation on obtient qu'une seule solution optimale.

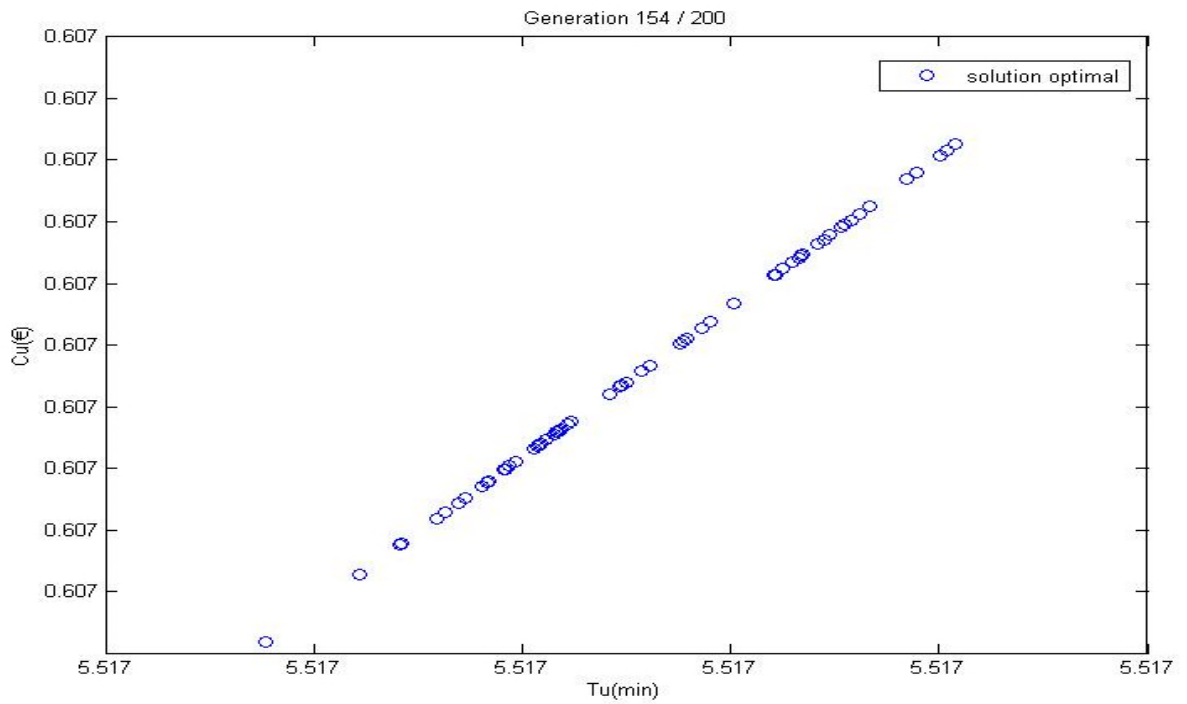


Figure IV.7. La solution non dominée de front de pareto (finition)

Discussion N°5

On observe pour le front de Pareto pour le cas de finition (Figure IV.8), que l'ensemble des solutions ne varient pas qui va nous conduire une solution optimale obtenu par le logiciel suivant l'objectif 1(Tu) et l'objectif 2(Cu)

Conclusion

Nous avons présenté Dans ce chapitre, une formulation d'un modèle d'optimisation des conditions de coupe (Choix des variables du modèle, Formulation de l'objectif, Formulation des contraintes), basé sur deux critères : la minimisation du coût d'usinage et la minimisation de temps d'usinage pendant le tournage, les modèles utilisés se regroupent principalement parmi les problèmes de satisfaction de contraintes et ces modèles demandent des méthodes de solution rigoureuses, parmi les méthodes utilisées pour la résolution des problèmes NSGA II.

Conclusion générale

Dans le présent travail, une opération de tournage est modélisée afin de sélectionner les conditions de coupe optimales. Dans ce but, le critère d'optimisation considéré est combiné du temps et coût d'usinage sous les contraintes liées aux efforts de coupe, à la puissance, à la rugosité de surface et la température d'interface outil-pièce. Ce travail nous a permis de comprendre au mieux l'opération de tournage en particulier le chariotage en opération de décolletage des pièces en aciers pour arbres de transmission.

Ensuite, nous avons présenté un domaine de recherche relativement récent qui s'intéresse à l'optimisation multi-objectif sous contraintes des conditions de coupe en tournage, en utilisant la technique des algorithmes génétiques et une approche de résolution au sens de Pareto optimale, que nous avons implémentés sous Matlab. Notre démarche nous a permis de mettre en évidence la facilité d'exploitation de ce genre d'algorithmes de résolution et leur efficacité dans le traitement des problèmes complexes, après définition de leur opérateurs génétiques tels que le codage des individus, la sélection, le croisement et la mutation, notamment en optimisation multi-objectif des conditions de coupe, sans restriction inhérentes aux limitations des contraintes de production. En outre, le concept introduit permet une extension flexible à tous les procédés d'usinage par enlèvement de copeau, moyennant de simples extensions au sens de la mise en œuvre algorithmique et de l'implémentation.

Nous avons présenté dans ce mémoire un état de l'art sur les problèmes relatifs à l'optimisation dans les sciences de l'ingénieur en général. Ensuite, les problèmes d'optimisation multi-objective et leur intérêt technico-scientifique, ainsi que les méthodes d'optimisation multi-objectif basées sur la dominance de Pareto.

Avant la résolution de la problématique posée, nous avons formulé les développements mathématiques inhérents au problème d'optimisation multi-objectif des conditions de coupe dans le cas du tournage, ainsi que les relations des fonctions objectif et des contraintes ou limitations de production liées à la pièce, à l'outil et à la machines.

Pour la résolution du problème nous avons élaboré trois programmes en langage MATLAB, permettent de trouver les conditions de coupe optimales pour les différents cas : Optimisation mono passe pour le cas débauche et optimisation mono passe pour le cas de

Conclusion générale

finition. Dans notre étude les deux cas on donne des résultats mais pour le cas débauche on a obtenue plusieurs point optimum par contre pour la finition on a obtenue qu'un seule point optimum.

Bibliographie

- [1]. **M. Benglia**, Sélection Optimale des Conditions Coupe d'Opération de Tournage à Passe Multiple, Mémoire de Master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2014
- [2]. **Passeron**, Tournage, Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997
- [3]. **J.P. Cordebois, Coll**, Fabrication Par Usinage, DUNOD, Paris 2003.
- [4]. **F. Amier**, Etude Comportementale de l'Outil – Pièce en Tournage, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran,
- [5]. **A. Toumine**, Cours de Fabrication, Usinage par Enlèvement de Copeaux, 2007
- [6]. **H. Hadjsad**, Choix Optimal d'une Technique D'optimisation des Conditions de Coupe en Tournage, Mémoire de Master, Université KasdiMerbah Ouargla, 2014
- [7]. «Cours de Fabrication», Génie Mécanique, 2005
- [8]. **Rocdacier**, Cours sur le Tournage - Usinage Cours Technologie, 2011
- [9]. **S. Benlahmidi, H. Aouici**, Tournage, TP Production/ 2ème année GM&P, Ecole Nationale Supérieure de Technologie
- [10]. **M. Madani, R. Ghouini**, Amélioration des Paramètres Technologiques de Coupe en Tournage, Mémoire de Master Université, kasdiMerbah de Ouargla, 2011.
- [11]. Détermination Des Paramètres De Coupe, Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail-maroc-,
- [12]. **M. Rahou, F. Sebaa**, Automatisation des Instruction d'Usinage Cas Paramètres de Coupe, Mémoire de Master Université, Abou Baker Belkaid, Tlemcen, 2007
- [13]. **J. Vergnas**, Usinage, Technologie et Pratique, Génie Mécanique Dunod, Isbn 2-04-011186-7, Bordas, Paris 1982
- 14] **TOUINE**, *Usinage*, INSA de LYON, Groupe conception - productique, 2007.
- [15]. **A. Debbache, M. Benglia**, Optimisation Multi-Passe des Régimes de Coupe En Chariotage, Mémoire de Master Université kasdiMerbah de Ouargla, 2011.
- [16] **J.P. CORDEBOIS, COLL**, *Fabrication Par Usinage*, 2eédition, 583p DUNOD, Paris, 2008.

Bibliographie

- [17] **Conditions de coupe et Optimisation**, TN23A09, université de technologie Compiègne.
- [18] **ALAIN PASSERON**, *Tournage*, Techniques de L'Ingénieur, BM7086, 1997.
- [19]. **A.F. Djilali**, Etude Comportement de L'outil-Pièce En Tournage, Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique D'oran, 2014
- [20] **R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo**, "Error compensation in machine tools -- a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1235-1256, 2000.
- [21] **BARKA Nouredine**, Développement d'un système de mesure en temps réel des erreurs dans les machines-outils à axes multiples pour une compensation active, thèse De Doctorat, Université du Québec, Janvier 2005
- [22] **STEPHEN C. VELDHUIS, B. Eng. and Mgmt., M. Eng.** modeling and compensation of errors in five-axis machining, thesis of doctorate, McMaster University, July 1998
- [23] **Côté, M. (2011)**. Estimation d'incertitudes associées aux huit écarts de membrure d'une machine-outil (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).
- [24] **GUIASSA Rachid**, méthodes de compensation des erreurs d'usinage utilisant la sur machines-outils, thèse De Doctorat, Université de Montréal, décembre 2012
- [25] **X. Kong et C. M. Gosselin**, "Kinematics and Singularity Analysis of a Novel Type of 3-CRR 3-DOF Translational Parallel Manipulator," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 21(9), pp. 791–798, Septembre 2002.
- [26] **Nakazawa, H. (1994)**. Principles of precision engineering. Oxford University Press, USA.
- [27] **Bui, M. H. (2011)**. Identification et simulation des incertitudes de fabrication (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- [28] **R. Ramesh, M. A. Mannan, and A. N. Poo**, "Error compensation in machine tools - a review. Part II: Thermal errors," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 40, pp. 1257-1284, 2000.
- [29] **Zhou, J. M., Andersson, M., & Ståhl, J. E. (2004)**. Identification of cutting errors in precision hard turning process. *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 746–750. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.331
- [30] **V. MOREAU**, Etude Dynamique De L'usinage Et De L'interaction Pièce-Outil Par Mesure Des Déplacements : Application Au Fraisage Et Au Tournage, thèse De Doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, paris, 28 Janvier 2010

Bibliographie

- [31] **D. AOUCHE**, Etude de l'effet du couplage entre les déformations de l'outil de coupe et de la pièce usinée sur la stabilité de l'opération du tournage, Mémoire de Magistère, Université De Batna, Algérie, 2009.
- [32] **R. BOUGHEDAOU, I. BELAIDI, M. OUALI**. Modélisation Des Vibrations D'usinage, Publication, January 2014, Université Saad Dahlab Blida, Université M'Hamed bougaraBoumerdes, Université Yahia Farés Médéa, Algérie.
- [33] **X. Qian, W. Ye, and X. Chen**, "On-machine measurement for touch-trigger probes and its error compensation," *Key Engineering Materials*, vol. 375-376, pp. 558-563, 2008.
- [34] **thesemerджаouibrahim**.
- [35] **M. Djenane**, « Optimisation des Conditions de Coupe en Tournage », Mémoire de Magistère, Université de Batna, 2001.
- [36] **Gilbert, W.W.** (1950). Economics of Machining: Machining Theory and Practice, American Society of Metals, 465-485.
- [37] **HITOMI, K.** (1977). Optimization of multistage production systems with variable production times and costs. *International Journal of Production Research*, 15(6), 583–597. doi:10.1080/00207547708943151
- [38] **White, B., &Houshyar, A.** (1992). Quality and optimum parameter selection in metal cutting. *Computers in Industry*, 20(1), 87–98. doi:10.1016/0166-3615(92)90129-b
- [39] **Bouzid, W.** (2005). Cutting parameter optimization to minimize production time in high speed turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 161(3), 388–395. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.07.062
- [40] **Wang, Y.-C.** (2007). A note on “optimization of multi-pass turning operations using ant colony system.” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(12-13), 2057–2059. doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.03.001
- [41] **Shin, Y. C., &Joo, Y. S.** (1992). Optimization of machining conditions with practical constraints. *International Journal of Production Research*, 30(12), 2907–2919. doi:10.1080/00207549208948198
- [42] **Lee, B. ,&Tarng, Y.** (2000). Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 105(1-2), 61–66. doi:10.1016/s0924-0136(00)00582-3
- [43] **Ko, T. J., & Kim, H. S. (1998). Ko, T. J., & Kim, H. S. (1998).** Autonomous cutting parameter regulation using adaptive modeling and genetic algorithms. *Precision Engineering*, 22(4), 243–251. doi:10.1016/s0141-6359(98)00019-1

Bibliographie

- [44] **Chien, W.-T., & Tsai, C.-S. (2003).** The investigation on the prediction of tool wear and the determination of optimum cutting conditions in machining 17-4PH stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 340–345. doi:10.1016/s0924-0136(03)00753-2
- [45] **ISO 3685, (1993).** Tool-Life Testing with Single-Point Turning Tools, ISO 3685: (E), International Standard, 2nd ed.
- [46] **Sakharov, G. N., Ilinykh, V., & Konyukhov, V. Y. (1990).** Improvement of fastening elements in an assembled cutting tool. *Soviet Engineering Research*, 10, 102.
- [47] **Taylor, F. W. (1907).** The Art of Cutting Metals. *Scientific American*, 63(1619supp), 25942–25944. doi:10.1038/scientificamerican01121907-25942supp
- [48] **Wu, S. M. (1964).** Tool-Life Testing by Response Surface Methodology—Part 2. *J. Eng. for Industry*, 86(2), 111. doi:10.1115/1.3670465
- [49] **Nagasaka, K., & Hashimoto, F. (1982).** The establishment of a tool life equation considering the amount of tool wear. *Wear*, 81(1), 21–31. doi:10.1016/0043-1648(82)90301-5
- [50] **Yuan, Z. J., Lee, W. B., Yao, Y. X., & Zhou, M. (1994).** Effect of Crystallographic Orientation on Cutting Forces and Surface Quality in Diamond Cutting of Single Crystal. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 43(1), 39–42. doi:10.1016/s0007-8506(07)62159-3
- [51] **Chen, H., Dai, Y., Zheng, Z., Gao, H., & Li, X. (2011).** Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of kdp crystals. *Machining Science and Technology*, 15(2), 231–242. doi:10.1080/10910344.2011.580701
- [52] **Yang, S., Yuan, J., & NI, J. (1997).** Real-time cutting force induced error compensation on a turning center. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(11), 1597–1610. doi:10.1016/s0890-6955(97)00028-x
- [53] **Munoz, A. A., & Sheng, P. (1995).** An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 53(3-4), 736–758. doi:10.1016/0924-0136(94)01764-r
- [54] **Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., & Ahmed, M. (2006).** Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2), 299–304. doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022
- [55] **Pareto, V. (1906).** *Manuale di EconomicaPolitica*, SocietaEditriceLibraria. Milan; In: Schwier AS , Page AN (eds) translated to English by Schwier AS as *Manual of Political Economy*, Kelley, New York.
- [56] **Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., & Davim, J. P. (2008).** Multiperformance Optimization in Turning of Free-Machining Steel Using Taguchi Method and Utility Concept. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(3), 231–236. doi:10.1007/s11665-008-9269-6
- [57] **Agapiou, J. S. (1992).** The Optimization of Machining Operations Based on a Combined Criterion, Part 1: The Use of Combined Objectives in Single-Pass Operations. *J. Eng. for Industry*, 114(4), 500. doi:10.1115/1.2900704

Bibliographie

- [58] Zuperl, U., Cus, F., Mursec, B., & Ploj, T. (2004). A hybrid analytical-neural network approach to the determination of optimal cutting conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 157-158, 82–90. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.09.019
- [59] Yanda, H., Ghani, J. A., Rodzi, M. N. A. M., Othman, K., & Haron, C. H. C. (2010). Optimization of material removal rate, surface roughness and tool life on conventional dry turning of FCD700. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 5(2), 182-190.
- [60] Ross, P. J. (1989). *Taguchi techniques for quality engineering*. New York: McGraw-Hill.
- [61] Salonitis, K., & Kolios, A. (2014). Reliability assessment of cutting tool life based on surrogate approximation methods. *Int J AdvManufTechnol*, 71(5-8), 1197–1208. doi:10.1007/s00170-013-5560-2
- [62] Taguchi, G., & Taguchi, G. (1987). *System of experimental design; engineering methods to optimize quality and minimize costs* (No. 04; QA279, T3.).
- [63] Taraman, K. S., Taraman, S. R., & El-Tamimi, A. M. (1986). *Machinability: model development and utilization*.
- [64] Corne, D. W., Knowles, J. D., & Oates, M. J. (2000, January). The Pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization. In *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI* (pp. 839-848). Springer Berlin Heidelberg.
- [65] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2), 182-197.
- [66] Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248.
- [67] Wang, J. (1993). A neural network approach to multiple-objective cutting parameter optimization based on fuzzy preference information. *Computers & Industrial Engineering*, 25(1-4), 389–392. doi:10.1016/0360-8352(93)90303-f
- [68] Taylor, F. W. (1907). *The Art of Cutting Metals*. *Scientific American*, 63(1619supp), 25942–25944. doi:10.1038/scientificamerican01121907-25942supp
- [79] Denis Gelin, Michel Vincent, «Eléments de Fabrication », Les Editions Foucher, 1995.
- [70] R. butin, M. pinot, «Fabrication Mécanique, Technologie Tome 3»
- [71] A. Guerrah, C. Bettayeb: «Optimisation non linéaire des conditions de coupe», thèse d'ingénieure université kasdiMerbah de Ouargla, 2009.

ANNEXE

- ✚ Procédure algorithmique et pseudo-code implémentés sous Matlab par les fonctions (fitness) de l'algorithme NSGA-II pour la variation de (Tu et Cu) en fonction de V_c

-TP : espace faisable

```
V=(30:1:600)';
F=0.8;
a=4;

%OBJECTIFS
T = 96.936 .* F.^-1.*V.^-1+3.4716*a^1.4*10^-8.*F.^0.16.*V.^3+1.63;%TEMPS
C =9.693 .* F.^-1.*V.^-1+3.8187*a^1.4*10^-8.*F.^0.16.*V.^3+0.163 ;%COUT

Plot (V, T, 'r', V, C, 'b')
```

- ✚ Procédure algorithmique et pseudo-code implémentés sous matlab par les fonctions (fitness) de l'algorithme NSGA-II, pour le cas (EBAUCHE)

-TP : espace faisable(EBAUCHE)

```
v=(30:1:200)';
f=(0.254:0.01:0.868)';
a=0.4;% PROFONDEUR DE PASSE OPTIMALE
[V,F]=meshgrid(v,f);

%OBJECTIFS
Tp = 96.936 .* F.^-1.*V.^-1+3.4716*a^1.4*10^-8.*F.^0.16.*V.^3+1.63;
Cp = 9.693 .* F.^-1.*V.^-1+3.8187*a^1.4*10^-8.*F.^0.16.*V.^3+0.163 ;

%contraintes
P = 0.0373 .*V.^0.91 .* F.^0.78 .* a.^0.75 ; %PUISSANCE
R = 1000*F.^2/3.2 ;%RUGOSITE
T = 74.96.*V.^0.4.*F.^0.2.*a.^0.105-17.8;%TEMPERATURE
E = 844*V.^-0.1013.*F.^0.725.*a.^0.75;%EFFORTS
PMAX = [7,7];RMAX = [15,15];TMAX = [500,500];EMAX = [1100,1100];%LIMITES
FIXEES

%Resultas
%PARAMETRES OPTIMAUX
Vopt=[182.644000000000;143.046000000000;182.644000000000;159.345000000000;158.555000000000;174.450000000000;146.912000000000;173.691000000000;163.453000000000;175.316000000000;158.167000000000;171.640000000000;180.844000000000;157.588000000000;173.283000000000;150.683000000000;175.041000000000;176.800000000000;145.884000000000;149.938000000000;169.321000000000;149.269000000000;180.297000000000;172.267000000000;166.129000000000;172.122000000000;175.869000000000;152.431000000000;148.645000000000;177.195000000000;181.337000000000;178.794000000000]
```



```

plot(Vopt,Fopt,'O')
contour(V,F,P,PMAX,'m*');
%contour(V,F,R,RMAX,'black');
contour(V,F,T,TMAX,'y');
contour(V,F,E,EMAX,'g');
-TP: EXECUTE (EBAUCHE)

%*****
% Test Problem : 'TP_KUR_objfun'
% Description:unconstrained bi-objectives problem
%
%*****

options = nsgaopt( ); % create default options structure
options.vartype =[1 1 1];
options.popsize = 100; % populaion size
options.maxGen = 200; % max generation
options.numObj = 2; % number of objectives
options.numVar = 3; % number of design variables
options.numCons = 3; % number of constraints
options.lb = [30 0.254 0.4]; % lower bound of x
options.ub = [200 0.868 12]; % upper bound of x
options.objfun = @TP_objfun_classical; % objective function handle
options.plotInterval = 2; % interval between two calls of
"plotnsga".
result = nsga2(options); % begin the optimization!

```

-TP :tp_objfun_classical.m (EBAUCHE)

```

function [y, cons] = TP_objfun_classical(x)
% Objective function : Test problem 'TNK'.
%*****

y = [0,0];% OBJECTIFS
cons = [0,0,0];% CONTRAINTES

%objectives
y(1) = 96.936 * x(2)^-1*x(1)^-1+3.4716*x(3)^1.4*10^-8*x(2)^0.16*x(1)^3+1.63;
y(2) =9.693 * x(2)^-1*x(1)^-1+3.8187*x(3)^1.4*10^-8*x(2)^0.16*x(1)^3+0.163 ;

%constraints
c = 0.0373 * x(1)^0.91 * x(2)^0.78 * x(3)^0.75 - 7; % PUISSANCE
if(c>0)
    cons(1) = abs(c);
end
%c = 1000*x(2)^2/3.2-15;%RUGOSITE
%if(c>0)
    %cons(2) = abs(c);
%end
c = 74.96*x(1)^0.4*x(2)^0.2*x(3)^0.105-17.8-500;%TEMPERATURE
if(c>0)
    cons(2) = abs(c);
end

```

```

c = 844*x(1)^-0.1013*x(2)^0.725*x(3)^0.75-1100;%EFFORTS
if(c>0)
    cons(3) = abs(c);
end

end

```

✚ Procédure algorithmique et pseudo-code implémentés sous Matlab par les fonctions (fitness) de l'algorithme NSGA-II pour le cas (FINITION)

-TP : espace faisable(finition)

```

v=(30:1:200)';
f=(0.05:0.01:0.8)';
a=0.4;% PROFONDEUR DE PASSE OPTIMALE
[V,F]=meshgrid(v,f);

%OBJECTIFS
Tp = 96.936 .* F.^-1.*V.^-1+3.4716*a^1.4*10^-8.*F.^0.16.*V.^3+1.63;
Cp = 9.693 .* F.^-1.*V.^-1+3.8187*a^1.4*10^-8.*F.^0.16.*V.^3+0.163 ;

%contraintes
P = 0.0373 .*V.^0.91 .* F.^0.78 .* a.^0.75 ; %PUISSANCE
R = 1000*F.^2/3.2 ;%RUGOSITE
T = 74.96.*V.^0.4.*F.^0.2.*a.^0.105-17.8;%TEMPERATURE
%E = 844*V.^-0.1013.*F.^0.725.*a.^0.75;%EFFORTS
PMAX = [7,7];RMAX = [5,5];TMAX = [500,500];EMAX = [1100,1100];%LIMITES FIXEES

%Resultas
%PARAMETRES OPTIMAUX
Vopt=200;
Fopt=0.126477;
%COUT ET TEMPS OPTIMAUX
Tpopt = [5.51747,5.51747];
Cpopt = [0.607,0.607];

hold on
grid on

plot(Vopt,Fopt,'o')
contour(V,F,Tp,Tpopt,'r');%OBJ1
contour(V,F,Cp,Cpopt,'b');%OBJ2
contour(V,F,P,PMAX,'m*');
contour(V,F,R,RMAX,'black');
contour(V,F,T,TMAX,'y');
%contour(V,F,E,EMAX,'g');

```

-TP : EXECUTE (FINITION)

```
%*****
% Test Problem : 'TP_KUR_objfun'
% Description:unconstrained bi-objectives problem
%
%*****

options = nsgaopt( ); % create default options structure
options.vartype = [1 1 1];
options.popsize = 100; % populaion size
options.maxGen = 200; % max generation
options.numObj = 2; % number of objectives
options.numVar = 3; % number of design variables
options.numCons = 3; % number of constraints
options.lb = [30 0.05 0.4]; % lower bound of x
options.ub = [200 0.8 12]; % upper bound of x
options.objfun = @TP_objfun_classical; % objective function handle
options.plotInterval = 2; % interval between two calls of
"plotnsga".
result = nsga2(options); % begin the optimization!
```

-TP :tp_objfun_classical.m (FINITION)

```
function [y, cons] = TP_objfun_classical(x)
% Objective function : Test problem 'TNK'.
%*****

y = [0,0];% OBJECTIFS
cons = [0,0,0];% CONTRAINTES

%objectives
y(1) = 96.936 * x(2)^-1*x(1)^-1+3.4716*x(3)^1.4*10^-8*x(2)^0.16*x(1)^3+1.63;
y(2) =9.693 * x(2)^-1*x(1)^-1+3.8187*x(3)^1.4*10^-8*x(2)^0.16*x(1)^3+0.163 ;

%constraints
c = 0.0373 * x(1)^0.91 * x(2)^0.78 * x(3)^0.75 - 7; % PUISSANCE
if(c>0)
    cons(1) = abs(c);
end
c = 1000*x(2)^2/3.2-15; %RUGOSITE
if(c>0)
    cons(2) = abs(c);
end
c = 74.96*x(1)^0.4*x(2)^0.2*x(3)^0.105-17.8-500;%TEMPERATURE
if(c>0)
```

```
    cons(2) = abs(c);  
end  
%c = 844*x(1)^-0.1013*x(2)^0.725*x(3)^0.75-1100;%EFFORTS  
%if(c>0)  
    %cons(3) = abs(c);  
%end  
end
```

Résumé

L'optimisation des conditions de coupe en fabrication sérielle de produits industriels par enlèvement de matière est une étape indispensable dans le cadre de l'automatisation complète de la chaîne cinématique de la production de produits manufacturés. Aussi, nous disposons de nombreuses méthodes et outils mathématiques d'optimisation multi-objectif, à savoir les méthodes non déterministes ou stochastiques telles que l'écueil simulé, la colonie de fourmis, les algorithmes génétiques, la recherche tabou...etc. Dans le cadre de ce mémoire, nous présentons les étapes de la mise en œuvre d'un problème d'optimisation "multi-objectif" des paramètres d'usinage sous contraintes des limitations de production liées au système « Pièce-Outil-Machine » pour les opérations de tournage. Nous utilisons un algorithme génétique basé sur la technique des optima de Pareto, implémenté sous Matlab. Cette méthode, appliquée pour résoudre un problème d'optimisation bi-objectif en tournage, permet de réaliser simultanément un usinage à coûts et temps minimisés en respectant la qualité des produits manufacturés (opérations de finition) d'une part et les délais de production pour des coûts d'usinage minimisés (opérations d'ébauche) d'autre part. Les résultats obtenus dans le cadre de notre application sont présentés sous formes de front de Pareto, laissons ainsi largement le choix à l'opérateur de favoriser une performance parmi d'autres ou de réaliser un compromis entre ces dernières.

Mots-clés: Optimisation multi-objectif, algorithmes génétiques, conditions de coupe, frontière de Pareto optimale.

Abstract

The optimization of the cutting conditions in serial manufacture of industrial products per removal of matter is an essential stage within the framework of the complete automation of the kinematic chain of the production of manufactured goods. Also, we have many methods and mathematical tools for optimization multi-objective, namely the nondeterministic or stochastic methods such as simulated annealing, colonies of ants, genetic algorithms, seek taboo... etc Within the framework of this memory, we present the developments and the implementation of a new concept for an optimization "multi-objective" of the parameters of machining under constraints of the production ceilings related to the system "Part-Tool- Machine" for the operations of turning. We use a genetic algorithm based on the technique of the Pareto's optimums, implemented under Matlab. This method, applied in the case of parameters of turning, allows simultaneously to carry out a machining at cost and times minimized by respecting the quality of the manufactured goods (finishing operations) on the one hand and the lead times at minimized costs of machining (operations of outline) on the other hand. The obtained results within the framework of our application appear to us, compared too the results brought back by the literature, appreciably improved.

Key-word: Multi-objective optimization, genetic algorithm, cutting conditions, front of Pareto.