



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE BATNA 2
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Docteur en sciences
Spécialité : MECANIQUE
Option : CONSTRUCTION MECANIQUE

Par

Mohamed DJENNANE

THEME

*Optimisation de l'usinage multi passes et multi stage
par la méthode du simplexe et la méthode
des algorithmes génétiques.*

Soutenue publiquement le / / , devant le jury composé de :

Mourad BRIOUA	Professeur, Université de Batna 2	Président
Rachid BENBOUTA	Professeur, Université de Batna 2	Rapporteur
Mekki ASSAS	Professeur, Université de Batna 2	Co-rapporteur
Hamid DJEBAILI	Professeur, Université de Khenchela	Examineur
Hamma ZEDIRA	Professeur, Université de Khenchela	Examineur
Semcheddine DARFOUF	MCA, Université de Biskra	Examineur
Rabah MANAA	MCA, Université de Batna 2	Invité

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et toute ma reconnaissance à mes directeurs de thèse Pr. **BENBOUTA Rachid**, et Pr. **ASSAS Mekki**, pour avoir assuré la direction de mes travaux et pour la qualité de leur encadrement, leurs conseils et la confiance qu'ils m'ont accordée, ainsi que pour les discussions scientifiques et les échanges qui nous ont permis de mieux appréhender le sujet de la thèse.

Je tiens aussi à remercier Pr. **BRIOUA Mourad** pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury.

Mes remerciements vont également aux Prs. **ZEDIRA Hamma** et **DJEBAILI Hamid**, ainsi qu'aux Drs. **DARFOUF Semcheddine** et **MANAA Rabah** pour s'être intéressés à ce travail et avoir bien voulu m'honorer de leur présence dans ce jury.

Je tiens aussi à remercier Mr **D. DJARI** et Mr **A. DJENNANE**, pour leur contribution préalable à ce travail et l'aide qu'ils m'ont apportée.

Mes remerciements s'adressent également à tous les collègues enseignants du Département de Génie Mécanique, à qui j'exprime ma reconnaissance pour leur amitié et leur disponibilité permanente.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Rappels bibliographiques	4
1.1 Introduction	4
1.2 Revue de la littérature	4
1.3 Techniques d'optimisation d'usinage	8
1.3.1 Optimisation d'un dispositif	8
1.3.2 Fonction objectif et fonction d'adaptation	10
1.4 Méthodes d'optimisation	12
1.4.1 Les méthodes déterministes	12
1.4.2 Les méthodes stochastiques	14
1.5 Insertion et Elitisme	19
1.6 Choix des paramètres	19
1.7 Optimisation multi-objectif : définition et principes de base	20
1.7.1 AG pour l'optimisation multi-objectif	22
1.8 Conclusion	22
Chapitre 2 : Optimisation des conditions d'usinage par algorithme des simplex (cas de tournage passe simple)	23
2.1 Introduction	23
2.2 Formulation du problème d'optimisation	23
2.2.1 Critères d'optimisation	24
2.3 Formulation de la fonction objective	24
2.3.1 Les contraintes	25
2.4 Méthode de la programmation géométrique	29

2.4.1 Condensation	30
2.5 Formulation du problème	31
2.5.1 Développement des contraintes	33
2.5.2 Résultats	35
2.6 Représentation graphique	37
Chapitre 3 : Optimisation des conditions de coupe par Algorithme Génétique	40
3.1 Introduction	40
3.2 Le fraisage en bout	40
3.3 Formulation des fonctions objectifs	42
3.3.1 Temps d'usinage unitaire	42
3.3.2 Coût d'usinage	42
3.3.3 Taux de production horaire	43
3.3.4 Temps de coupe	43
3.3.5 Durée de vie de l'outil	44
3.3.6 Coûts horaires des outils	44
3.3.7 Formulation des contraintes	45
3.4 Optimisation par Algorithme génétique	48
3.5 Application cas de fraisage en bout	50
3.5.1 Données de simulation	51
3.6 Formulation du problème et résolution	51
3.6.1 Résolution du problème	52
3.7 Analyse des objectives de l'optimisation	54
3.7.1 Cout de production	54
3.7.2 Temps de production	56
3.8 Impacts des principales contraintes de force et de puissance maximale	57
Chapitre 4 : Optimisation des nombres de passes en cas de tournage	60
4.1 Introduction	60
4.2 Technique d'optimisation	60
4.3 Optimisation des nombres de passes par programmation dynamique	61
4.4 Application et résultats	65

4.5 Conclusion	73
Chapitre 5 : Optimisation multi-stage des conditions d'usinage	74
5.1 Introduction	74
5.2 Les systèmes de production flexibles	75
5.3 Formulation du model mathématique de base	77
5.3.1 Fonction objective	77
5.3.2 Limitations Contraintes	78
5.4 Technique d'optimisation	78
5.5 Formulation du problème	79
5.6 Analyse du problème	80
5.6.1 Solution analytique de la fonction objective	80
5.7 Algorithme et étapes à suivre	82
5.8 Exemple Numérique	83
5.9 Utilité de l'optimisation multi-stage	90
Conclusion générale et perspectives	92
Références bibliographiques	95
Annexes	

Liste des figures

Figure 1.1 <i>L'apprentissage par essai et erreur par un schéma à trois niveaux</i>	8
Figure 1.2 <i>Processus d'optimisation selon Asimow</i>	9
Figure 1.3 <i>Schéma d'algorithme génétique d'optimisation</i>	16
Figure 1.4 <i>Exemple du codage binaire d'une solution potentielle avec 3 paramètres</i>	17
Figure 1.5 <i>Méthodes de recombinaison (croisement) utilisées par l'AG</i>	18
Figure 1.6 <i>Méthodes de mutation utilisées par le AG</i>	19
Figure 1.4 <i>Exemple d'un front de Pareto</i>	21
Figure 2.1 <i>variation de la fonction objective en fonction de v et f en 2D</i>	39
Figure 2.2 <i>variation de la fonction objective en fonction de v et f en 3D</i>	39
Figure 2.3 <i>variation de la puissance HP en fonction de v et f en 2D</i>	39
Figure 2.4 <i>Variation de la force de coupe F en fonction de v et f en 3D</i>	40
Figure 3.1 <i>Fraise en bout vertical</i>	41
Figure 3.2 <i>Fraise en bout horizontal</i>	41
Figure 3.3 <i>Fraisage en opposition et en concordance</i>	41
Figure 3.4 <i>Schéma d'une algorithmique génétique</i>	49
Figure 3.5 <i>Variation du coût d'usinage en fonction de V_f et F_f présentation sur 2D</i>	55
Figure 3.6 <i>Variation du coût de l'usinage en fonction du V_f et F_f présentation en 3D</i>	55
Figure 3.7 <i>Variation du temps de l'usinage en fonction du V_r et F_r présentation en 2D</i>	56
Figure 3.8 <i>Variation du temps de l'usinage en fonction du V_r et F_r présentation en 3D</i>	56
Figure 3.9 <i>Variation de la puissance en fonction du V_f et F_f présentation en 2D</i>	57
Figure 3.10 <i>Variation de la force de coupe en fonction de l'avance pour une profondeur de coupe fixe $d_c = 5\text{mm}$.</i>	58
Figure 3.11 <i>Variation de la force de coupe en fonction de l'avance et de la profondeur de coupe présentation 3D.</i>	58

Figure 4.1 Schéma de décomposition de la profondeur de coupe totale en 8 sections pour la programmation dynamique.	61
Figure 5.2 Organigramme pour la méthodologie de l'optimisation à passe multiples	66
Figure 4.3 Nombre de passe optimal pour $N = 4$ division égales	70
Figure 4.4 Nombre de passe optimal pour $N = 8$ divisions égales	72
Figure 4.5 Nombre de passe optimal pour $N = 10$ divisions égales	73
Figure 4.6 Nombre de passe optimal pour $N = 12$ divisions égales	73
Figure 5.1 Les étapes à suivre dans les systèmes à plusieurs phases d'usinage	79
Figure 5.2 Organigramme pour la méthodologie de l'optimisation des conditions d'usinage à plusieurs phases	84
Figure 5.3 Les dimensions de la pièce finie	85
Figure 5.4 Coût d'usinage minimum pour le temps d'usinage requis opération de tournage (l_2)	90

Liste des Tables

<i>Tableau 2.1 Les paramètres d'usinage</i>	28
<i>Tableau 2.2 Coûts et Temps de production</i>	36
<i>Tableau 2.3 Valeurs des contraintes physique pour chaque opération</i>	36
<i>Tableau 3.1 Paramètres d'usinage fraisage en bout</i>	51
<i>Tableau 3.2 Temps et Cout d'usinage pour H=6 mm</i>	53
<i>Tableau 3.3 Temps et Cout d'usinage pour H=12 mm</i>	53
<i>Tableau 3.4 Temps et Cout d'usinage pour H=25 mm</i>	53
<i>Tableau 4.1 : Paramètres d'usinages</i>	68
<i>Tableau 4.2 Vitesses de coupe et avances pour des profondeurs de coupe données</i>	68
<i>Tableau 4.3 Paramètres d'usinage optimal pour N = 4</i>	69
<i>Tableau 4.4 Paramètres d'usinage optimal pour N = 8</i>	70
<i>Tableau 4.5 Paramètres d'usinage optimal pour N = 10</i>	72
<i>Tableau 4.6 Paramètres d'usinage optimal pour N = 12</i>	72
<i>Tableau 5.1 Dimension de la pièce pour les déférentes opérations</i>	85
<i>Tableau 5.2 Les Paramètres de la durée de vie des outils pour les déférentes opérations</i>	86
<i>Tableau 5.3 Les limitations et les valeurs des contraintes physiques</i>	86
<i>Tableau 5.4 Les paramètres des équations des contraintes physiques</i>	86
<i>Tableau 5.5 Les paramètres économique des opérations</i>	87
<i>Tableau 5.6 Paramètres de coupes optimales trouvé pour les déférentes opérations</i>	87
<i>Tableau 5.7 Coût et temps de production trouvé pour les déférentes opérations</i>	87
<i>Tableau 5.8 Résultats trouver pour l'outil de chariotage en carbure revêtu C.C opération I</i>	88
<i>Tableau 5.9 Violation de contraintes</i>	89

Liste des Symboles

C_u	Coût de production (\$)
t_m	Temps de coupe par passe (min)
V	Vitesse de coupe (m/min)
f	Vitesse d'avance (mm/min)
D	Diamètre extérieur de la partie de la pièce à usinée (mm)
H	Hauteur du volume à usiné (mm).
L	Longueur de la partie de la pièce à usinée (mm)
W	Largeur du volume à usiné (mm)
D_r, D_f	Diamètre de l'outil pour les opérations d'ébauche et finition (mm)
w_r, w_f	Largeur de la passe pour l'ébauche et finition (mm)
d_r, d_f	Profondeur de coupe l'ébauche et finition (mm)
V_{fr}, V_{ff}	Vitesse d'avance en unité de temps (mm/min)
Z_r, Z_f	Nombre de dents de l'outil de coupe ébauche et finition (entier)
N_r, N_f	Vitesse de rotation de la broche (tour/min)
d_c	Pas de la profondeur de coupe
T_u	Temps d'usinage unitaire (min)
HP_{max}	Puissance utile maximale de la machine outil (KW)
SR_{max}	Rugosité de surface (μm)
Θ_{mix}	Température ($^{\circ}\text{C}$)
F_{max}	Force maximale de coupe (N)
t_R	Temps du retour rapide (min)
t_h	Temps de montage et démontage de la pièce (min)
t_{CS}	Temps de changement d'outil (min)
α	Exposant de Taylor (vitesse) (sans unité)
β	Exposant de Taylor (avance) (sans unité)
γ	Exposant de Taylor (profondeur de coupe) (sans unité)
λ	Exposant de Taylor (largeur de coupe) (sans unité)
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, K$	Constantes empiriques (\$)
C_B	Coût du matériel brut (\$)
C_{Hr}, C_{Hf}	Coût horaire de l'outil pour les opérations d'ébauche et de finition
P	taux de production horaire (Unités/heure)
c_0	Coûts pour l'outillage (\$)
c_t	Coûts de changement d'outil (\$)
Y	fonction multi-objective
f_i	Vitesse d'avance pour l'opération i (mm/min)
w_1 et w_2	Coefficients de pondération
t_{cr}, t_{cf}	Temps de coupe pour les opérations d'ébauche et finition (mn)
t_{or}, t_{of}	Durée de vie de l'outil pour les opérations d'ébauche et de finition (mn)
R_{ae}	Fini de surface en bout (rugosité moyenne, μm)
R_{ap}	Fini de surface en périphérie (rugosité moyenne, μm)
w_r, w_f	Largeurs de passe radiale pour les opérations d'ébauche et de finition (mm)
d_r, d_f	Profondeurs de passe axiale pour les opérations d'ébauche et de finition (mm)

Liste des Acronymes

AG	Algorithme génétique
FMS	Systemes de production flexibles
FTL	lignes de transfère flexible
HSS	Acier rapide
<i>DMOP</i>	Profondeur de coupe optimal
<i>DMAXP</i>	Profondeur de coupe maximal
<i>UOP</i>	Foction objective optimal

Introduction générale

Introduction générale

Les entreprises qui conçoivent et fabriquent des produits mécanique font face a une importante concurrence, pour se démarquer elles doivent proposer des produits répondant aux besoins du client et ayant un cycle d'obtention consomment le moins de ressources et de temps. L'usinage des mâtériaux occupe une place très importante dans la fabrication mécanique, les industriels spécialisé dans ce domaine ont besoins d'amélioré leurs processus de production pour augmenté la productivité amélioré la qualité et réduire les couts de revient.

L'optimisation des conditions d'usinage fait partie des stratégies intelligentes très efficaces pour réduire le temps de cycles, améliorer la qualité, accroitre la productivité et réduire les coûts d'usinage pour que les produits usinés deviennent compétitif tout en satisfaisant les besoins des clients.

La plupart des modèles d'optimisation des paramètres d'usinage se consacrent à des opérations simples, avec un nombre limité de variables, comme le tournage le fraisage, perçage ect.... L'optimisation des paramètres d'usinages se complique quand un grand nombre des contraintes sont incluses, de sorte qu'il est difficile de résoudre ce problème par les méthodes non conventionnelles. Malgré cette difficulté, l'algorithme génétique (GA) [Sardinas et al., 2006 , Djenane, 2001, Yusupet al., 2012], l'optimisation par essaim de particules (PSO) [Ameur, 2005, Gao et al., 2012] et l'algorithme de colonie de fourmis (ACO) [Vijayakumar et al. 2003, Cus et al., 2009], ont pu trouver de solutions a ces problèmes.

Le but de cette thèse est de présenter des modèles de programmation mathématique pour l'optimisation des paramètres de coupes pour les opérations de tournage, fraisage en bout et pour plusieurs opérations sur une pièce. Nous allons aussi proposer une stratégie d'optimisation par algorithme génétique pour résoudre ce

problème pour les opérations d'ébauche et de finition à passe simple, passes multiples et pour plusieurs opérations réalisé sur une pièce.

Nous allons décrire les équations de base qui vont permettre la construction des fonctions objectifs, qui incluent le coût d'usinage et le temps d'usinage, avec les contraintes pratiques telles que le fini de surface, les efforts de coupe, la température de coupe, la puissance de la machine, nous allons par la suite présenter deux méthodes pour optimiser les paramètres de coupe : la méthode du simplexe pour le cas de tournage à passe simple et la méthode des algorithmes génétiques pour les autres cas, l'optimisation des nombres de passes pour les opérations de tournage à passes multiples sera résolue par la méthode de la programmation dynamique, nous allons aussi fournir des exemples numériques pour chaque cas.

L'utilisation des stratégies intelligentes permet de réaliser des gains importants aussi bien quantitatifs que qualitatifs; les coûts et les temps d'usinage diminuent grâce à des réglages optimaux des paramètres de coupe.

L'organisation de la thèse se présente en cinq chapitres :

Le premier chapitre décrit un état de l'art sur les caractéristiques des problèmes d'optimisation et les méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire.

Le deuxième chapitre est consacré à l'optimisation des conditions d'usinage par Algorithme des simplex. Nous avons utilisé la méthode des simplexes pour un cas de tournage, pour une passe unique d'usinage pour montrer comment la fonction multi-objective peut être utilisée pour déterminer les conditions d'usinage pré-optimal ou optimal.

Le troisième chapitre est réservé à l'optimisation des conditions de coupe pour un cas de fraisage en bout par l'algorithme génétique, nous avons trois critères à optimiser le temps, coût de production.

Dans le quatrième chapitre, nous allons appliquer l'approche citée dans le chapitre deux, mais pour l'optimisation des conditions d'usinage à passes multiples.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré à l'optimisation multi-stage des conditions d'usinage, il s'agit de déterminer le temps d'usinage minimum auquel une opération peut être complétée ou le coût d'usinage minimum possible dans un temps d'usinage approprié.

Enfin, une conclusion générale parachève le travail réalisé.

Chapitre 1

Rappels bibliographiques

Chapitre 1

Rappels bibliographiques

1.1 Introduction

L'optimisation est la discipline permettant de déterminer analytiquement ou numériquement la meilleure solution à un problème, au sens d'un certain critère. Elle est fondamentale dans la résolution de nombreux problèmes liés à l'industrie, à l'économie ou à la science de la physique, en vue d'obtenir un gain d'effort ou de temps. La qualité de la solution obtenue dépend généralement du modèle utilisé pour représenter le problème réel et de la méthode de résolution adoptée.

Le développement des modèles théoriques et des techniques traitant des problèmes d'optimisation a connu une accélération spectaculaire, particulièrement après la deuxième guerre mondiale.

Durant cette période, les ingénieurs se sont trouvés face à des problèmes de taille et de complexité croissante, ce qui fut une motivation pour la recherche de méthodes de résolution fiables et systématiques. La plupart d'entre elles reposent sur un socle solide de résultats théoriques établissant les conditions pour leur convergence vers la solution optimale recherchée.

Nous allons présenter dans ce chapitre les travaux qui ont une incidence sur le projet que nous traitons.

1.2 Revue de la littérature

Nous allons commencer cette section par un petit historique de la recherche dans le domaine de l'optimisation des procédés d'usinage.

En 1950, Gilbert propose pour sa part que la minimisation du coût et la maximisation du taux de production soient les critères adéquats pour l'étude économique des procédés d'usinage. Il considère lui aussi la vitesse de coupe comme seule variable sur une opération de tournage. Il ressort qu'il y a une vitesse de coupe pour le coût d'usinage minimum et une autre, plus élevée, pour le taux de production maximum.

En 1964, Wu a présenté une étude de la durée de vie des outils de coupe basée sur des surfaces de réponses des plans d'expérience. Il a utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan composite pour étudier la durée de l'outil sous l'influence de trois variables indépendantes, l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe axiale. Les tests sont conduits en usinage par tournage.

Chua et al., en 1991, se sont consacrés, quant à eux, à l'optimisation des conditions de coupe en utilisant des modèles mathématiques de durée de vie d'outil, des forces de coupe et de puissance consommée. Les modèles sont développés seulement en terme des facteurs jugés influents qui se résument dans la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale.

Agapiou, en 1992a, déterminé les conditions d'usinage pour des opérations de passe unique et multi passe en minimisant une combinaison linéaire du coût et du temps de production. Son modèle est donc multicritère et permet de résoudre le problème à l'aide d'une méthode de gradient pour une passe unique. Il utilise la programmation dynamique pour résoudre son modèle multi passes.

En 1997, Alauddin et El-Baradie se sont intéressés, à travers les plans d'expériences, au développement d'un modèle de vie de l'outil en fraisage en bout de l'acier (190 HB) en mode d'usinage sans lubrification et en grande vitesse. Le modèle développé est fonction de la vitesse de coupe, de l'avance par dent et de la profondeur de coupe axiale.

Kuang-Hua et Hung-Yen, en 1997, ont développé un modèle de précision dimensionnelle par la méthode des surfaces de réponse pour l'usinage en

fraisage périphérique sans lubrification d'un alliage d'aluminium, sous l'influence de la dureté Brinell du matériau à usiner, de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur de coupe axiale et de la profondeur de coupe radiale.

Munoz-Escalona et Cassier (1998) proposent un modèle qui semble très performant pour prédire le fini de surface de plusieurs aciers machinés sur un tour. Leur modèle tient compte de la vitesse de coupe, de la vitesse d'avance, de la profondeur de coupe et du rayon de coin de l'outil. Ils utilisent un plan d'expérience pour vérifier leurs résultats. Ils ne font pas d'optimisation, mais se contentent de modéliser la surface fini et, encore une fois, leur modèle n'est pas adapté au fraisage en bout. C'est finalement en 1999 que Lou, Chen et Caleb proposent un modèle adéquat pour modéliser le fini de surface d'une opération de fraisage en bout. Il s'agit d'un modèle empirique basé sur un plan d'expérience qui tient compte des trois variables les plus importantes pour le fraisage en bout: la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe.

C'est 1999 Choudhury et El-Baradie ont étudié l'effet de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la durée de vie de l'outil, le fini de surface et les forces de coupe, pendant l'usinage en tournage de l'Inconel 718. Leur étude porte sur le développement et la modélisation des surfaces de réponse du système concernant la durée de vie de l'outil, le fini de surface et les forces de coupe à l'aide des plans d'expériences utilisant la méthodologie des surfaces de réponses.

Al-Ahmari (2001) présente un modèle très complet, pour déterminer les paramètres d'usinage d'une opération de tournage multi passes. Comme il s'agit d'un modèle hautement non linéaire, il propose d'utiliser un logiciel d'optimisation commercial pour le résoudre.

La technique d'optimisation par l'algorithme génétique (GA) à été utilisée par M. Assas et al (2001) pour résoudre un problème d'optimisation des conditions de coupe multicritère dans le processus de tournage. Les auteurs optimisent le coût et le temps de production simultanément. Les résultats de calcul montrent une nette

diminution des coûts et du temps d'usinage par rapport à la méthode du simplexe et celle du gradient trouvé par Agapiou 1992a.

Dans le travail de Monreal et Rodriguez (2003), les processus de planification et de choix de machine-outil, dans les opérations de fraisage à grande vitesse, sont altérés par l'anomalie entre la durée de cycle idéale et réelle. L'influence de la stratégie de chemin d'outil et des avances élevées sur la durée de cycle a été démontrée avec des chemins d'outil en mode zigzag à différents angles d'orientation. Ces expériences, avec le centre d'usinage, montrent une réduction significative des avances moyennes réelles de l'outil comparativement aux avances programmées dans la fabrication assistée par ordinateur sous certaines conditions de coupe.

Parent en 2007, présente un modèle de programmation mathématique pour l'optimisation des paramètres d'une opération de fraisage en bout. Ce modèle contient cinq variables de décision suivantes: vitesse de coupe, vitesse d'avance, diamètre de l'outil, profondeur de coupe radiale et profondeur de coupe axiale. Ces cinq variables devront être considérées à la fois pour plusieurs passe d'ébauche et une passe de finition, ce qui fait un total de dix variables. Il a aussi proposer un algorithme génétique pour résoudre ce problème à dix variables pour les opérations d'ébauche et de finition.

Liang Gao et al (2012) proposent une nouvelle méthode basée sur l'optimisation par essaim de particules cellulaire (CPSO) pour résoudre le problème d'optimisation des paramètres de coupe (la profondeur de coupe, l'avance et la vitesse de coupe) du processus de fraisage multi-passe. L'objectif est de minimiser le temps total de production. Les résultats d'un cas d'application illustrent l'efficacité de l'approche proposée que la plupart des variantes d'optimisation par essaim de particules (PSO).

1.3 Techniques d'optimisation d'usage

1.3.1 Optimisation d'un dispositif

Un problème d'optimisation est défini comme étant la recherche d'un optimum (minimum ou maximum) d'une fonction donnée. Dans de nombreux cas, les fonctions à optimiser sont accompagnées d'un nombre de contraintes qui évoluent dans une partie de l'espace de recherche. On parle dans ce cas des problèmes d'optimisation sous contraintes.

La méthode de base de l'optimisation est la méthode d'essai et d'erreur: il s'agit de tester un certain nombre de solutions potentielles jusqu'à l'obtention d'une solution adéquate.

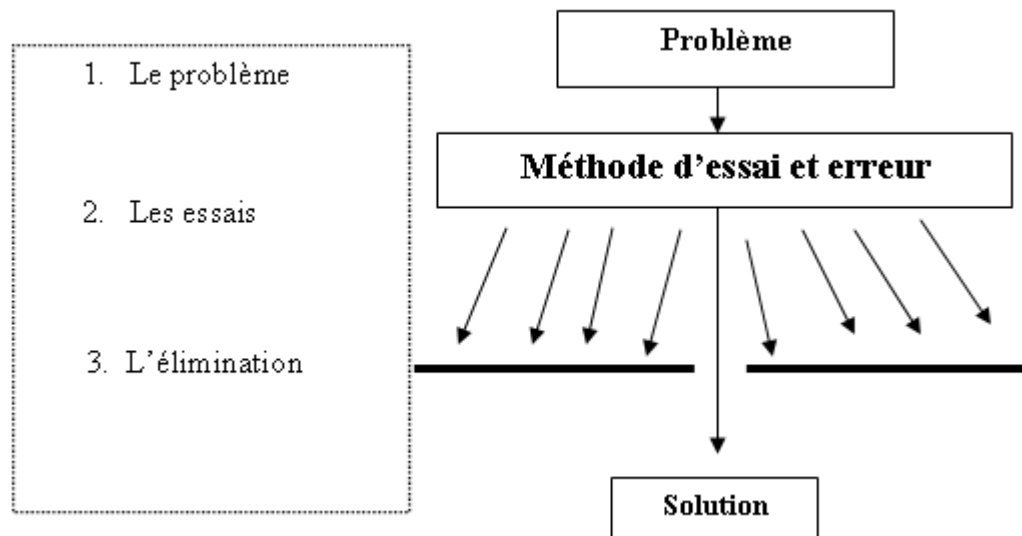


Figure 1.1 : L'apprentissage par essai et erreur par un schéma à trois niveaux [Popper, 1997]

Soit un problème figure 1.1: une situation nouvelle se présente et nécessite une solution qui n'est pas connue. La méthode d'essai et erreur est alors employée : un grand nombre de solutions potentielles sont mises à l'essai.

Les solutions inadéquates sont éliminées, jusqu'à ce qu'un essai se révèle satisfaisant. Les algorithmes informatiques constituent un puissant outil pour l'automatisation de ce processus [Popper, 1997].

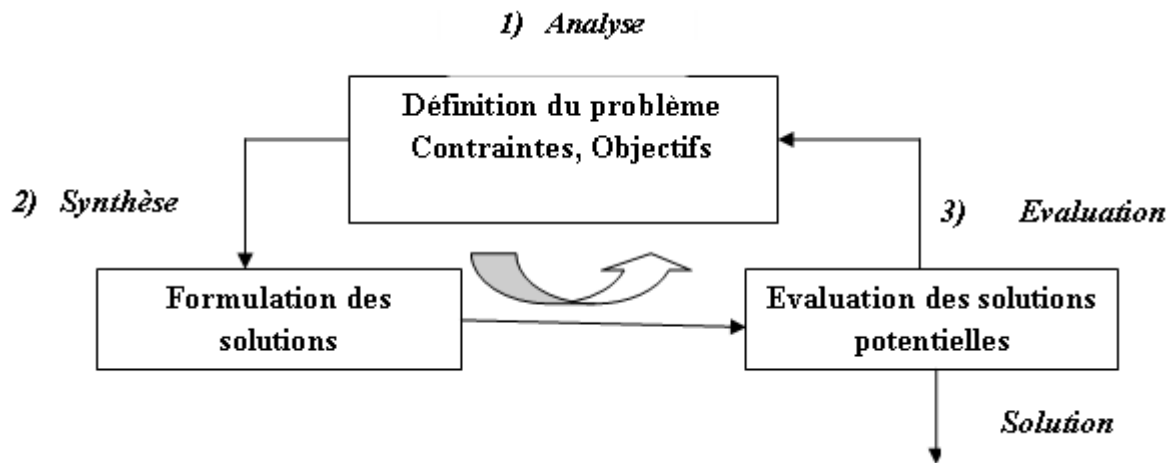


Figure 1.2 Processus d'optimisation selon Asimow [Balachandran, 1993].

La figure 1.2 présente les trois étapes du processus d'optimisation : analyse, synthèse et évaluation. Tout d'abord, il convient d'analyser le problème et d'opérer un certain nombre de choix préalables :

- Variable du problème quels sont les paramètres intéressants à faire varier?
- Espace de recherche dans quelles limites faire varier ces paramètres?
- Fonction objectives quels sont les objectifs à atteindre?
- Méthode d'optimisation quelle méthode choisir?

Une fois effectués ces différents choix, la méthode choisie synthétise des solutions potentielles qui sont évaluées, puis éliminées jusqu'à obtention d'une solution acceptable. Si nécessaire, le problème peut être redéfini à partir des solutions déjà obtenues.

1.3.1.1 Variables du problème

Les variables peuvent être de natures diverses. Par exemple, pour une opération d'usinage il peut s'agir de la matière à usiner, les conditions de coupe, etc. C'est à l'utilisateur de définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres afin d'augmenter les degrés de liberté de l'algorithme.

Dans notre étude nous désignerons par x_1, x_2, \dots, x_n les n variables du problème. Celles-ci peuvent être réelles, complexes, entières, booléennes, etc.

1.3.1.2 Espace de recherche

Dans certains algorithmes d'optimisation, tels que les stratégies d'Evolution, l'espace de recherche est infini : seule la population initiale est confinée dans un espace fini [Bäck, 1991]. Mais dans le cas des algorithmes de type Monte Carlo et génétique, il est généralement nécessaire de définir un espace de recherche fini. Cette limitation de l'espace de recherche n'est généralement pas problématique. En effet, ne serait ce que pour des raisons technologiques ou informatiques (taille de la fenêtre de modélisation), les intervalles de définition des variables sont en général limités. De plus, la plupart du temps on a au moins une idée des ordres de grandeur des variables du problème.

Nous désignerons par x_{imin} et x_{imax} les bornes de chaque variable x_i :

$$x_{i\ min} \leq x_i \leq x_{i\ max}$$

1.3.2 Fonction objectif et fonction d'adaptation

Les grandeurs à optimiser peuvent être par exemple une consommation, un rendement, un profit, un temps de production, un coût, une durée de vie d'un outil, etc..... Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles à partir des grandeurs à optimiser.

Il s'agit de la fonction d'adaptation (ou fitness fonction en terminologie anglo-saxonne). L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction quelle que soit sa définition. La pertinence de la solution dépendra donc de la pertinence de la question posée à l'ordinateur [Deneux 1993]. La fonction f doit donc traduire en langage mathématique suivant le désir de l'utilisateur.

1.3.2.1 Objectif unique

Dans le cas d'un objectif unique la définition de la fonction d'adaptation ne pose généralement pas de problème. Par exemple, si l'on se fixe l'objectif de trouver une solution dont le coût de production dans une opération d'usinage est minimal,

cette fonction sera égale au coût. Le calcul de la fonction d'adaptation se fait en deux étapes. On commence par évaluer les caractéristiques des solutions potentielles en utilisant le modèle, puis on calcule la fonction d'adaptation à partir de ces caractéristique.

1.3.2.2 Objectifs multiples

Les problèmes d'optimisation doivent souvent satisfaire des objectifs multiples, dont certains sont concurrents. Une méthode classique consiste à définir des fonctions objectifs f_i , traduisant chaque objectif à atteindre, et de les combiner au sein de la fonction d'adaptation. On établit ainsi un compromis. Le plus simple est de se ramener à une somme pondérée des fonctions objectifs [Fonseca, 1993] :

$$f = \sum w_i f_i \quad (1-1)$$

Où les valeurs des poids w_i restent bornées dans l'intervalle $[0;1]$ et leurs sommes égale à un ; c'est à l'utilisation de fixer convenablement les poids w_i .

On peut souvent classer les objectifs par importance mais les poids seront généralement adaptés par tâtonnement, jusqu'à l'obtention d'une solution acceptable.

A la place d'une somme, on peut également utiliser un produit du type:

$$f = \prod_i f_i^{w_i} \quad (1-2)$$

ou des expressions plus complexes.

Il faut néanmoins être conscient des effets d'une telle combinaison des objectifs. En effet, deux solutions potentielles dont les fonctions objectives n'ont pas la même valeur peuvent aboutir à une même valeur de la fonction d'adaptation. De plus, un algorithme utilisant une telle approche ne convergera que vers une seule solution alors qu'il existe peut-être toute une famille de solutions remplissant les objectifs fixés. L'optimisation à objectifs multiples est un domaine de recherche très actif actuellement, de part les enjeux économique et industriels auxquels il répond.

Des concepts tels que les niches écologiques ou l'optimalité de Pareto semblent prometteurs pour la résolution de ce genre de problème [Fonseca, 1995].

1.4 Méthodes d'optimisation

La résolution des problèmes d'optimisation est réalisée à l'aide des méthodes et algorithmes d'optimisation qu'on peut les présenter sous la forme de deux familles: les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

La recherche menée par les méthodes déterministes est guidée par des critères mathématiques et analytiques, tandis que pour les méthodes stochastiques, une partie de la recherche est conduite de façon aléatoire.

1.4.1 Les méthodes déterministes

Les méthodes déterministes sont généralement efficaces peu coûteuses, mais qui nécessitent une configuration initiale (point de départ) pour résoudre le problème.

L'efficacité des méthodes déterministes s'articule autour de la rapidité de l'évaluation de la fonction ou selon la connaissance à priori de la dite fonction.

La recherche des extrema d'une fonction f revient à résoudre un système de n équations à n inconnues, linéaire ou non:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) = 0. \quad (1-3)$$

Les méthodes déterministes peuvent être classées en deux catégories principales : les méthodes locales et les méthodes globales.

Pour les méthodes locales, ils assurent la convergence vers l'optimum de la fonction la plus proche de la solution courante en explorant son voisinage. Ainsi, pour les méthodes globales, ils s'attachent à converger la solution vers l'optimum global de la fonction.

On peut donc utiliser des méthodes classiques telles que la méthode du gradient ou la méthode de Gauss-Seidel [Ciarlet, 1990 et Nougier, 1987]. En général, l'utilisation de ces méthodes nécessite comme étape préliminaire la localisation des extrema. Celle-ci peut être faite, par exemple, sur un graphique ou par une discrétisation fine de l'espace de recherche.

Le problème d'optimisation en fabrication a été toujours classé comme complexe vu le nombre de variables et paramètres introduits, les contraintes techniques à respecter, les objectifs à atteindre... Ce caractère difficile a poussé les

chercheurs à la mise en place des méthodes d'optimisation dans le cadre de l'optimisation pour la fabrication. Sonmez et al., en 1999 ont étudié le fraisage à passe multiple basé sur le critère de maximum de taux de production en utilisant l'algorithme adopté dans les travaux de [Agapiou, 1992] (programmation dynamique et programmation géométrique) dans le cadre de l'optimisation des opérations du tournage. Bien que les résultats obtenus montrent une amélioration au niveau de la qualité des résultats obtenus, les techniques d'optimisation utilisées dans ce travail montrent un minimum local ainsi qu'un temps important pour converger.

1.4.1.1 Les méthodes de gradient

Pour la résolution d'un problème d'optimisation à l'aide de cette méthode on procède comme suit [Chong et Zak, 2011]:

- On choisit un point de départ x_0 et on calcule le gradient $\nabla f(x_0)$: ce gradient indique la direction de la plus grande augmentation de f .

- Après, on se déplace d'une quantité δ_0 dans le sens opposé au gradient et on obtient le point x_1 :

$$x_1 : x_1 = x_0 - \delta_0 \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|} \quad (1-4)$$

- Ainsi, on engendre une série de points $(x_{0,1}, x_{2,}, \dots, x_k)$ qui permet de se rapprocher de plus en plus de l'optimum :

$$x_{k+1} = x_k - \delta_k \frac{\nabla f(x_k)}{\|\nabla f(x_k)\|} \quad (1-5)$$

Avec $\delta > 0$ représente le pas de déplacement à chaque itération. Si ce pas est fixe, on parle de la méthode de gradient à pas prédéterminé.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la dépendance de la convergence au choix du pas. Ceci peut conduire à un processus de résolution lent. C'est dans ce sens que la méthode de la plus forte pente est mieux à utiliser. Cette dernière a l'avantage de libérer le choix du déplacement δ qui doit être calculé en minimisant à chaque itération la fonction:

$$g(\delta) = f(x_k - \delta \nabla f(x_0)). \quad (1-6)$$

1.4.1.2 La méthode de Newton

Elle consiste à utiliser d'une manière itérative l'approximation quadratique de la fonction objective f à l'itération courante x et de minimiser cette approximation.

L'application de la méthode de Newton nécessite les hypothèses suivantes :

- La fonction f est continue et deux fois différentiable.
- $\nabla^2 f(x^k)$ est défini positif.

Ainsi, de la même manière que la méthode de gradient, on définit la suite $\{x\}$ comme suit :

$$x_{k+1} = x_k - [\nabla^2 f(x_k)]^{-1} + \nabla^2 f(x^k) \quad (1-7)$$

La méthode de Newton est considérée comme puissante à cause de sa convergence rapide, en particulier si l'estimation initiale de la solution x_0 est suffisamment proche de la solution optimale.

1.4.2 Les méthodes stochastiques

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation.

Ces méthodes sont de caractère itératif où le processus d'optimisation est guidé partiellement ou totalement par un processus stochastique.

Plusieurs techniques d'optimisation ont été utilisées pour la résolution des problèmes de l'optimisation en fabrication. Mais, ils ont été accompagnés, dans la majorité des cas, de certaines carences au niveau de la qualité des résultats obtenus. Ce manque a été résolu par l'adaptation des méthodes méta-heuristique dans le cadre de l'optimisation pour la fabrication [Hassine, 2015].

On s'intéresse dans ce qui suit à la présentation des méta-heuristiques. Ces algorithmes sont basés sur l'exploration aléatoire probabiliste d'une ou plusieurs régions de l'espace de recherche.

1.4.2.1 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (GA) sont des méthodes utilisées dans les problèmes d'optimisation. Ils tirent leur nom de l'évolution biologique des êtres vivants dans le monde réel.

Le concept d'algorithme génétique a été proposé par [Holland, 1975] pour décrire les systèmes adaptatifs, et popularisée par la suite, par [Goldberg, 1998]. Ces algorithmes cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle et de la génétique dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par le scientifique C. Darwin. Dans un environnement, « les individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître [Dridi, 2005].

Un algorithme génétique va reproduire ce modèle d'évolution dans le but de trouver des solutions pour un problème donné (figure 1.3). On fera usage, alors, de termes empruntés au monde des biologistes et des généticiens et ceci afin de mieux représenter chacun des concepts abordés:

- 1- Dans notre cas, une population sera un ensemble d'individus.
- 2- Un individu sera une réponse à un problème donné, qu'elle soit ou non une solution valide du problème.
- 3- Un gène sera une partie d'une réponse au problème, donc d'un individu.
- 4- Une génération est une itération de notre algorithme.

Un algorithme génétique va faire évoluer une population dans le but d'en améliorer les individus. Et c'est donc, à chaque génération, un ensemble d'individus qui sera mis en avant et non un individu particulier. Nous obtiendrons donc un ensemble de solutions pour un problème et pas une solution unique. Les solutions trouvées seront généralement différentes, mais seront d'une qualité équivalente.

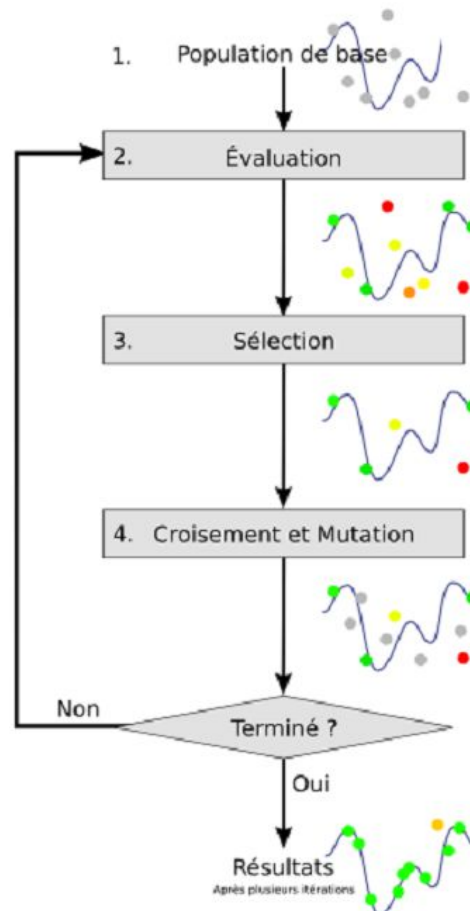


Figure 1.3 Schéma d'algorithme génétique d'optimisation [Chibane2013]

Principes généraux

Le but des algorithmes génétiques est de déterminer les extrêmes d'une fonction : $f : X \rightarrow R$, où X est un ensemble quelconque appelé espace de recherche et f est appelée fonction d'adaptation ou fonction d'évaluation ou encore fonction fitness [Bouallagui, 2010].

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

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques.

2. Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures.

3. Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.

4. Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.

5. Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Représentation

Les AG traditionnels utilisent le codage binaire comme représentation des solutions. Chaque individu est représenté par un vecteur binaire (ou chaîne de bits), donc chaque élément prend la valeur 0 ou 1. Ce vecteur est une concaténation des paramètres à optimiser, chaque paramètre étant transformé en une série binaire. La Figure 1.4 présente un exemple du codage binaire d'une solution avec 3 paramètres. Chaque paramètre est représenté par une série binaire de 4 chiffres {0,1}.

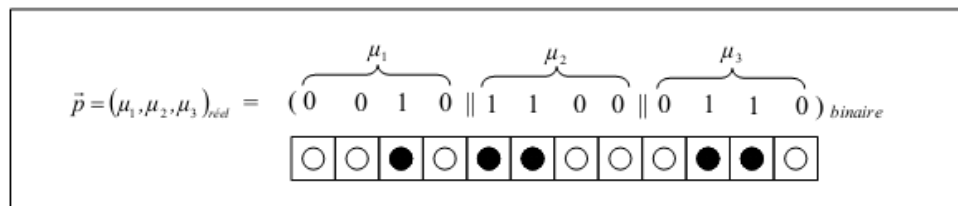


Figure 1.4 Exemple du codage binaire d'une solution potentielle avec 3 paramètres
[Tien Tho Do, 2006]

Sélection des parents

La sélection est un opérateur clé sur lequel repose en partie la qualité d'un algorithme génétique. Dans cette étape, les chromosomes de la population actuelle sont sélectionnés pour être les parents de la génération suivante. En accord avec la théorie de l'évolution de Darwin, les meilleurs individus doivent survivre et en créer les nouveaux. Il existe plusieurs méthodes pour choisir les meilleurs individus, par exemple la sélection proportionnelle, la sélection par tournoi, la sélection par rang, la sélection selon l'état d'équilibre, etc. Parmi celles-ci, la sélection proportionnelle et la sélection par tournoi sont les méthodes les plus utilisées.

Remplacement

L'étape de remplacement sert à déterminer quels individus parmi les parents de la génération courante et leurs enfants, seront les parents de la génération suivante. A la différence de l'étape de sélection, durant laquelle des individus peuvent être sélectionnés plusieurs fois, lors de l'étape de remplacement, un individu est ici sélectionné une fois et il survit alors à la génération suivante ou pas du tout et il disparaît définitivement de l'évolution en cours.

Plusieurs stratégies de remplacement sont présentées dans la littérature pour les AG : remplacement générationnel, remplacement élitiste, remplacement continu.

Croisement

Le croisement est l'opérateur principal des AG. C'est un opérateur génétique relatif à plusieurs individus parents (souvent deux). Son rôle consiste à combiner les génotypes des individus pour en produire un nouveau. Il fait partie du mécanisme de convergence de l'AG, qui permet de concentrer la population autour des meilleurs individus. On distingue plusieurs types de croisements possibles. Les plus utilisés sont:

Croisement à 1 point [Holland, 1962].

Croisement à multipoints [De Jong et al., 1991].

Croisement uniforme [Syswerda, 1989].

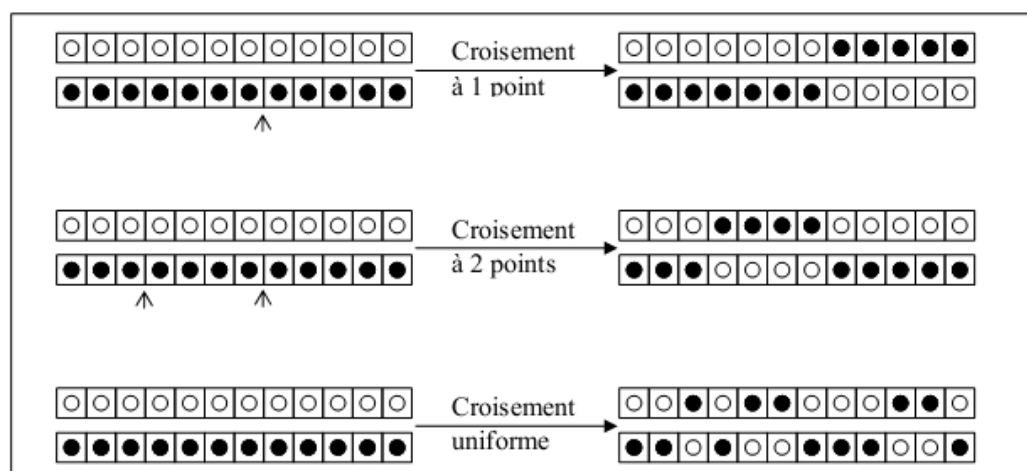


Figure 1.5 Méthodes de recombinaison (croisement) utilisées par l'AG

Mutation

Les AG utilisent l'opérateur de mutation comme moyen de préserver la diversité de la population. Elle inverse aléatoirement les bits du génotype, avec une faible probabilité, typiquement de 0,01 à 0,001. D'autre part, la mutation assure une recherche locale aléatoire autour de chaque individu. Dans cet ordre d'idée, la mutation peut améliorer considérablement la qualité des solutions découvertes [Assas and Djenane 2003].

La Figure 1.6 nous montre un exemple de la mutation binaire.

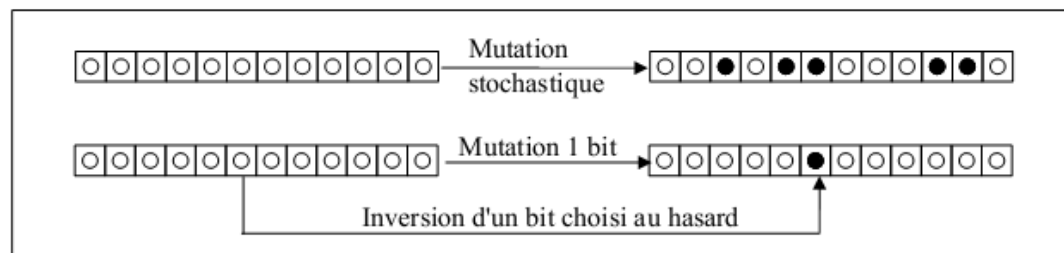


Figure 1.6 Méthodes de mutation utilisées par le AG
[Tien Tho Do, 2006]

1.5 Insertion et Elitisme

Il existe, en général, deux façons de procéder à l'insertion des individus produits lors de l'application des opérateurs génétiques de croisement et de mutation. Tout d'abord, l'implantation de l'opérateur d'insertion pourra être totale lorsque la population est remplacée par de nouveaux chromosomes. Une deuxième méthode, en régime permanent ("*steady-state*"), consiste à insérer immédiatement dans la population les chromosomes qui viennent d'être croisés et mutés. Pour l'élitisme, la principale implantation est celle où les meilleurs individus sont conservés à chaque itération. Le nombre d'élites est défini par un % du nombre total d'individus dans la population. Une autre forme d'élitisme est celle où, lors de la création de deux enfants par deux parents, une comparaison est faite entre ces quatre individus et les deux meilleurs sont conservés.

1.6 Choix des paramètres

Beaucoup d'efforts ont été déployés dans le domaine des AG afin de démontrer de façon analytique ou empirique les paramètres optimaux. Les travaux de. [Eiben et

al. 1999] font état d'une multitude de techniques pour l'obtention de ces paramètres. Entre autres, le taux de mutation P_m proposé est défini par $1/L$ où L est la longueur du chromosome. Une version dynamique équivalente peut aussi être implantée. Dans l'équation (1-8), le taux de mutation décroît en fonction des générations ce qui permet une recherche plus vaste au départ et plus raffinée à la fin. Pour le taux de croisement les valeurs les plus souvent préconisées sont $p_c \in [0.6, 0.95]$. [Eiben et al.1999] précisent que le taux de croisement ne doit pas être inférieur à 0.6.

$$P_m = \left(2 + \frac{L-2}{T} \cdot t\right)^{-1} \quad (1-8)$$

1.7 Optimisation multi-objectif : définition et principes de base

Coello Coello et al. (2002), Coello Coello (2000, 2001), Miettinen (2001), ont déjà présenté les principes et les notions de base d'une optimisation à objectifs multiples. Un problème d'optimisation multi-objectif peut être formulé de la manière suivante [Coello Coello et al., 2002] :

Trouver le vecteur qui satisfasse les m contraintes d'inégalités et les p contraintes d'égalités suivantes :

$$g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1-9)$$

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (1-10)$$

où : g_i et h_i sont les contraintes exprimées sous forme mathématique en optimisant (minimiser ou maximiser) le vecteur de fonctions suivant :

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T \quad (1-11)$$

sachant que $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ est le vecteur des variables de décision.

Le principe d'une optimisation multi-objectif est différent du principe d'une approche mono-objectif. Le but principal d'une optimisation mono-objectif est de trouver la solution optimale globale qui résulte en la meilleure valeur (plus petite ou plus grande) de la fonction mono-objectif. Dans un problème d'optimisation multi-objectif, il y a plus qu'une fonction objectif ($k \geq 2$), chaque fonction objectif pouvant avoir une solution optimale différente. Le but d'un problème multi-objectif est de trouver de « bons compromis » plutôt qu'une seule solution. Lorsqu'il y a plusieurs objectifs, la notion d'optimum change et il est préférable d'utiliser un autre terme, le

terme le plus couramment adopté étant l'optimum de Pareto (Pareto optimum), [Coello Coello et al. (2002)].

Définition 1 (Pareto optimal) : Un vecteur des variables $x^* \in S$ (S région réalisable) est un optimum de Pareto si, pour chaque $x \in S$ et $I = \{1, 2, \dots, k\}$, soit $\forall_{i \in I} (f_i(x) = f_i(x^*))$ ou bien, il existe au moins un $i \in I$ tel que : $f_i(x) > f_i(x^*)$

Au lieu d'une unique solution, l'optimisation multi-objectif donne lieu à un ensemble de solutions optimales. Toute solution de cet ensemble est « optimale » dans le sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur un critère de cette solution sans dégrader au moins la valeur d'un autre critère. Ces solutions optimales forment l'ensemble des solutions Pareto optimales.

Définition 2 (La dominance) : Une solution A domine une solution B si et seulement si : $\forall_{i \in I} \{1, 2, \dots, k\} : f_i(A) \leq f_i(B)$ et $\exists j \in \{1, 2, \dots, k\} : f_j(A) < f_j(B)$.

Si la solution (A) domine la solution (B) , on dit que (B) est dominée par (A) ou bien (A) est non dominée par (B) ou entre les deux solutions, (A) est la solution non dominée.

Les solutions « Pareto optimales » sont connues sous le nom de solutions « non dominées ». La représentation de ces solutions non dominées dans l'espace des objectifs est appelée « le front de Pareto ». La figure 1.4 montre l'exemple d'un front de Pareto pour le problème de minimisation de deux objectifs. Les points en blanc représentent le front de Pareto [Dridi, 2005].

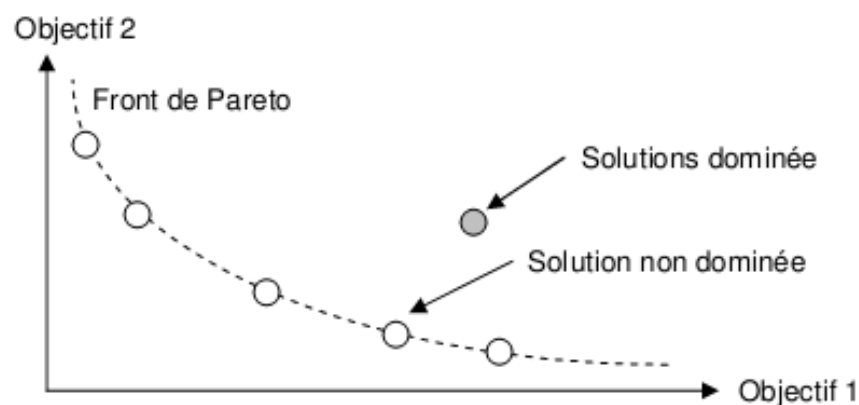


Figure 1.4 Exemple d'un front de Pareto

1.7.1 AG pour l'optimisation multi-objectif

Dans la plupart des AG d'optimisation multi-objectif développés, il s'agira de satisfaire les deux points suivants [Deb, 1999] :

- 1) trouver des solutions aussi proches que possible des vraies solutions Pareto optimales, c'est-à-dire converger le plus possible vers le front de Pareto.
- 2) trouver un ensemble de solutions très variées, tout le long du front.

Le tout premier algorithme évolutionnaire d'optimisation multi-objectif s'appelle VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm), AGEV : Algorithme Génétique à Évaluation Vectorielle) et a été présenté par Schaffer en 1985 [Coello Coello, 2001]. Cet algorithme considère une population de N individus. Ces individus sont répartis en k sous-populations, chaque valeur de k représentant un objectif à optimiser. À chaque génération, un nombre de sous populations est généré par sélection en fonction de l'objectif k . Ensuite, ces sous-populations sont regroupées pour former une nouvelle population de N individus et les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués.

L'avantage de cet algorithme est qu'il est facile à implanter mais son inconvénient majeur est qu'il a tendance à générer des solutions qui excellent dans un seul objectif, sans tenir compte des autres objectifs. Toutes les solutions de moyenne performance, qui peuvent être de très bons compromis, risquent de disparaître avec ce type de sélection [Dridi, 2005].

1.8 Conclusion

Le problème d'optimisation des conditions d'usinage en général est un problème d'optimisation très difficile à résoudre. Les modèles utilisés se regroupent principalement parmi les problèmes de satisfaction de contraintes, ces modèles demandent tous deux méthodes de solution rigoureuses. Parmi les méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation combinatoire on note la fouille cascade, la fouille Tabou, le recuit simulé et les algorithmes génétiques. Un survol des principales caractéristiques de ces méthodes de solutions a donc été fait.

Chapitre 2

Optimisation des conditions d'usinage par algorithme des simplex

Chapitre 2

Optimisation des conditions d'usinage par algorithme des simplex (cas de tournage passe simple)

2.1 Introduction

L'optimisation des régimes de coupe consiste à chercher les valeurs optimales des paramètres de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, etc....) en tenant compte de certains critères (le coût de la production, le temps de la production, la productivité, etc...)

L'intérêt de l'optimisation des régimes de coupe réside dans la réduction du prix de revient des pièces à usiner, l'augmentation de la productivité, l'amélioration de la précision et la simplification des programmes d'usinage.

La méthode d'optimisation proposée dans notre étude consiste à la formulation de la fonction objective en se basant sur deux critères économiques : le temps de production totale et le coût de production.

Dans ce chapitre nous avons utilisé la méthode des simplexes pour un cas de tournage, pour une passe unique d'usinage, on se base sur l'exemple [Agapiou 1992a] dans le but de comparer et d'améliorer les résultats trouvés, et de montrer comment la fonction multi-objective peut être utilisée pour déterminer les conditions d'usinage pré-optimal ou optimal.

2.2 Formulation du problème d'optimisation

La formulation du problème de l'optimisation d'une seule passe exige la connaissance de quelques équations mathématiques qui représentent les paramètres

économiques et physiques du processus d'usinage représenté par le système pièce-machine-outil.

2.2.1 Critères d'optimisation

Parmi, les principaux critères d'optimisation nous pouvons citer :

- Le Coût de production
- Le temps de production

2.2.1.1 Coût de production

La minimisation du coût de production C_U reste l'objectif principal dans les procédés de production mécanique lors de l'élaboration d'un produit quelconque.

2.2.1.2 Temps de production

Dans le domaine de la fabrication mécanique, l'expérience nous a montré que le temps de production est la principale donnée vu son importance pour la détermination des régimes de coupe. En fonction de cette dernière, nous pouvons noter deux points essentiels.

1. plus les régimes de coupe sont réduits, plus les temps nécessaires à l'exécution des différentes opérations sont élevés et par conséquent l'augmentation du prix de revient
2. L'augmentation du régime de coupe provoque l'usure rapide des outils, d'où leurs changements assez fréquents, conduit à une augmentation du prix de revient.

De ces deux déductions, il ressort que pour réaliser des produits dans les meilleurs délais, il faut réduire le temps de production, tout en essayant de garder le coût le moins élevé possible.

2.3 Formulation de la fonction objectif

Le coût de la production et le temps de production total sont associés pour la formulation de la fonction objectif.

Le coût de production par pièce pour une opération d'usinage contient la somme des coûts pour l'outillage, l'usinage, le temps de changement d'outil, le temps de montage et démontage de la pièce et le temps du retour rapide [Agapiou 1992a].

$$C_u = C_0 t_m + (t_m/T) \cdot (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) + C_0 (t_h + t_R) \quad (2-1)$$

Le temps de coupe par passe t_m est donné par :

$$t_m = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000 \cdot V \cdot f} \quad (2-2)$$

Ou, V et f sont respectivement, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance «variables d'usinage» tandis que, D et L sont respectivement le diamètre extérieur et la longueur de la partie de la pièce à usinée.

L'équation de la durée de vie de l'outil «modèle de Taylor» est de la forme :

$$V \cdot f^{\alpha_1} d_c^{\alpha_2} T^{\alpha_3} = K \quad (2-3)$$

Ou, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ et K sont des constantes empiriques, d_c est le pas de la profondeur de coupe pour une passe donnée.

Ainsi, le coût de production est donné par:

$$C_u = C_0 \cdot A \cdot V^{-1} \cdot f^{-1} + A \cdot V^{\left(\frac{1}{\alpha_3} - 1\right)} \cdot f^{\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_3} - 1\right)} \cdot d_c^{\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_3}\right)} \cdot K^{\left(-\frac{1}{\alpha_1}\right)} \cdot (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) + C_0 (t_h + t_R) \quad (2-4)$$

$$\text{Avec } A = \frac{\pi \cdot D \cdot L}{1000} \quad (2-5)$$

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

$$T_u = t_m + t_{cs} \cdot \left(\frac{t_m}{T}\right) + t_R + t_h \quad (2-6)$$

2.3.1 Les contraintes

L'optimisation de la fonction objectif nécessite souvent des limitations pratiques des conditions de coupe (puissance de coupe, gamme des vitesses et des avances, résistance de l'outil, etc...).

Les limitations additionnelles sont nécessaires pour la stabilité du processus de coupe et le respect de la qualité de la pièce à usiner.

2.3.1.1 Choix de la profondeur de coupe

La profondeur de coupe a un effet important sur la durée de vie de l'outil. Cependant, celle-ci en général, est plutôt affectée par la variation de la vitesse de coupe et de l'avance que par la profondeur de coupe [Agapiou 1992a].

Le compromis le plus favorable entre la durée de vie de l'outil et le taux d'enlèvement du métal se réalise pour les grandes valeurs admissibles de la profondeur de coupe.

Dans les opérations d'ébauche, le travail avec des grandes valeurs de profondeur de coupe entraîne une diminution de la durée de vie de l'outil.

La sélection de la profondeur de coupe maximale dépend de :

- a)- la matière et la géométrie de l'outil
- b)- la force de coupe
- c)- la puissance de la machine disponible
- d)- la stabilité du système outil-pièce-machine et la précision dimensionnelle
- e)- l'exigence des états des surfaces usinées.

La matière et la géométrie d'outil sont déterminées à partir du taux d'enlèvement des copeaux et par la flexion sous les forces appliquées à celui-ci.

Généralement la considération (a) est assurée par les fabrications des outils.

La considération (a) devient significative quand la flexion et les vibrations sont importantes.

Le broutement est un facteur majeur responsable pour la limitation de la profondeur de coupe à cause de ses effets sur l'état de la surface, la précision dimensionnelle, la durée de vie de l'outil, et la durée de vie de la machine.

2.3.1.2 Choix de l'avance

Les variations de l'avance ont une influence très importante sur la durée de vie de l'outil en comparaison avec la variation de la profondeur de coupe.

L'avance dans une opération de finition est limitée par l'exigence de l'état de surface et peut souvent être prédit à un certain degré en se basant sur la surface finie et le rayon du bec d'outil.

Néanmoins, une avance surestimée est généralement obtenue et peut être ajustée en tenant compte de la matière d'outil, la matière de la pièce, le lubrifiant et les angles de coupe. [Agapiou 1992a]

2.3.1.3 Choix de la vitesse de coupe

La vitesse de coupe a un plus important effet sur la durée de vie de l'outil que la profondeur de coupe et l'avance.

Il y a certaines combinaisons préférées entre l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe qui facilitent l'enlèvement des copeaux, ils dépendent principalement du type de la matière d'outil et de la pièce. Ces données peuvent être fournies par les fabricant des outils de coupe sous forme de logiciels.

2.3.1.4 Limitation des contraintes

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

- 1) Limitations sur l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe.

$$f_{min} \leq f \leq f_{max} \quad (2-7)$$

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (2-8)$$

$$d_{min} \leq d_c \leq d_{max} \quad (2-9)$$

- 2) Puissance utile maximale de la machine outil :

La puissance maximale permise est donnée en fonction de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe. [Agapiou 1992a]

$$0.0373.V^{0.91}.f^{0.78}.d_c^{0.75} \leq HP_{max} \quad (2-10)$$

- 3) Etat de surface :

La limitation de la rugosité de surface est donnée par.

$$14.785.V^{-1.52}.f^{1.004}.d_c^{0.25} \leq SR_{max} \quad (2-11)$$

4) La température :

La contrainte de température est donnée par l'inégalité (2-12) (Hati et Rao, 1976):

$$74.96.V^{0.4}.f^{0.2}.d_c^{0.105} - 17.8 \leq \Theta_{max} \quad (2-12)$$

5) La force de coupe :

La contrainte de la force maximale de coupe permise (Iwata et al., 1972):

$$844.V^{-0.1013}.f^{0.725}.d^{0.75} \leq F_{max} \quad (2-13)$$

Toutes les équations mentionnées ci-dessus déterminant les contraintes ont été développées par des données expérimentales collectées pour les études de l'usinage des aciers ordinaires. Ces dernières ont été choisies à partir de trois sources différentes.

Les valeurs des contraintes et les coefficients des exposants sont en fonction de la matière et la géométrie d'outil, ils ont été obtenus pour les mêmes limites des vitesses de coupe, avances et les profondeurs de coupe mentionnées dans le tableau (2.1).

En général la fonction objectif est constituée de plusieurs variables tels que la profondeur de coupe, l'avance, la vitesse de coupe. C'est un problème variable multidimensionnel pour lequel il est difficile de visualiser les résultats pour la présentation graphique du problème. La fonction multi-objectif est réduite à un problème de deux variables, la vitesse de coupe et l'avance puisqu'ils sont les paramètres les plus importants comme cela à été discuté auparavant.

Tableau 2.1 Les paramètres d'usinage [Agapiou 1992a]

Paramètre	Valeur	paramètre	valeur
L	203 mm	t_R	0.13 min/pass
D	152 mm	t_h	1.5 min/pièce
V_{min}	30 m/mn	Θ_{max}	500 °C
V_{max}	200 m/mn	α_1	0.29
f_{min}	0.254 mm/tour	α_2	0.35
f_{max}	0.762 mm/tour	α_3	0.25
SF_{max}	2 μ m	K	193.3
SR_{max}	8 μ m	t_{cs}	0.5 min/arrête
HP_{max}	5 kW	c_0	0.1 u/min
F_{max}	1100 N	c_t	0.5 u/arrête

2.4 Méthode de la programmation géométrique [Lee and Trang, 2000]

La programmation géométrique consiste à trouver un vecteur de variable x de N dimensions, telle que :

$$g_0(x) \quad (2-14)$$

est minimisé en satisfaisant les contraintes M :

$$\sigma_m g_m(x)^{\sigma_m} \leq 1 \quad (2-15)$$

Le signe de la fonction $\sigma_m(\pm 1)$ associé à g_m crée la possibilité de traiter les problèmes de ce que l'on appelle programmation géométrique inverse avec des contraintes qui semblent être originales tel que :

$$g_m(x) \geq 1 \quad (2-16)$$

En effet quand l'équation (2.16) est validée : $-[-g_m(x)]^{-1} \leq 1$

$$\text{La fonction } g_m(x) = \sum_{i=1}^{t_m} \sigma_{mt} C_{mt} X_n^{a_{mtn}} \quad (2-17)$$

Pour $m=0, 1, 2, \dots, M$.

Ceci est connu comme la forme primitive avec $\sigma_{mt}(\pm 1)$ comme signe de la fonction du $t^{\text{ém}}$ terme et de $m^{\text{ém}}$ expression et ou le coefficient du même terme $c_{mt} > 0$, la $n^{\text{ém}}$ composante du vecteur x est $x_n > 0$ telle que a_{mtn} est l'exposant du $n^{\text{ém}}$ variable avec le $t^{\text{ém}}$ terme de g_m et T_m est le nombre de termes dans g_m .

Les fonctions g_m sont appelées posynomiales lorsque tous les σ_{mt} sont positifs.

Elles sont appelées signomiales si un terme quelconque σ_m est négatif.

Du à l'introduction de σ_m et σ_{mt} , le nombre de types de problèmes d'optimisation pouvant être traités d'une manière efficace par la programmation géométrique a augmenté d'une manière considérable.

Ce problème primitif peut être condensé par la technique de Duffin [Lee and Trang 2000]. Si g_m sont posynomiales ou par la technique de Passy ils sont signomiales.

Dans notre cas on a utilisé la technique de Duffin, elle montre que les g_m sont posynomiales.

Dans le cas contraire la technique de Passy devrait être utilisée et on prend en considération les termes négatifs.

La fonction multi- objective qui est non linéaire devient par transformation logarithmique linéaire, Sa linéarisation est donc essentielle pour la résolution de ce problème par l'algorithme du simplexe.

2.4.1 Condensation

La procédure de la résolution d'une telle forme non linéaire est comme suit :

Sélectionnez un ensemble de poids non négatifs (w_1, w_2, \dots, w_n) tel que :

$$\sum_{t=1}^{tm} w_t = 1 \quad (2.18)$$

La forme primitive condenser est obtenue en remplaçant le $g_k(x)$ par :

$$\overline{g}_k(x) = \prod_{t=1}^{tm} [u_t/w_t]^{w_t} \quad (2.19)$$

Avec u_t est $t^{ém}$ terme de g_k :

$$\overline{g}_k(x) = \bar{C}_{mt} X_1^{amt_n} \dots X_n^{a_{mt_n}} \quad , \quad n=1,2,\dots, N \quad (2.20)$$

$$C_{mt} = \prod_{t=1}^{tm} [C_{mt}/w_t]^{w_t} \quad (2.21)$$

$$\bar{a}_{mt_n} = \sum_{t=1}^{tm} w_t a_{mt_n} \quad , \quad m=0,1,\dots, M \quad (2.22)$$

Dans lequel $m=0$ fait référence a la fonction objectif et $m=1,2,\dots, M$ aux contraintes.

La forme linéaire concentrée est obtenue par les transformations logarithmiques :

$$G_0 = \sum_n^N \bar{a}_{0tn} Z_n C_0 \quad (2.23)$$

Est minimisé sous la dépendance des contraintes :

$$G_m = \sum_{n=1}^N \bar{a}_{mt_n} Z_n + C_K \leq 0 \quad , \quad m=1,2,\dots, M \quad (2.24)$$

Ou $Z_n = \ln x_n \quad n=1,2,\dots, N$

$$G_m = \ln g_m \quad m=0,1,\dots, M$$

$$C_m = \ln c_{mt} \quad m=0,1,\dots, M$$

Pour la linéarisation de chaque problème pratique des systèmes de production et afin de garantir un espace de solution compacte, les bornes supérieures devront être imposées sur les variables.

2.5 Formulation du problème

- Le coût de production :

$$C_u = C_0 \cdot t_m + (t_m/T) \cdot (C_0 \cdot t_{CS} + C_t) + C_0(t_h + t_R)$$

Avec : $t_m = \pi \cdot D \cdot \frac{L}{1000} \cdot V \cdot f$ et $V \cdot f^{a_1} \cdot d_c^{a_2} \cdot t^{a_3} = k$.

- Le temps de production :

$$T_u = t_m + t_{CS} \cdot (t_m/T) + t_h + t_R$$

- La fonction multi-objective :

$$Y = \alpha_1 \cdot C_u + \alpha_2 \cdot T_u \tag{2-25}$$

Avec α_1 et α_2 des coefficients de pondération telle que :

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad \text{et} \quad \alpha_1, \alpha_2 \geq 0$$

Nous avons $A = \pi \cdot D \cdot L / 1000$.

En remplaçant les deux expressions de K et de t_m dans (2-1) et (2-5) on trouve :

$$C_u = C_0 \cdot A \cdot V^{-1} \cdot f^{-1} + A \cdot V^{(1-a_3)/a_3} \cdot f^{(a_1-a_3)/a_3} \cdot d_c^{(a_2/a_3)} \cdot K^{(-1/a_3)} \cdot (C_0 \cdot t_{CS} + C_t) + C_0(t_h + t_R) \tag{2-26}$$

$$T_u = A \cdot V^{-1} \cdot f^{-1} + A \cdot V^{(1-a_3)/a_3} \cdot f^{(a_1-a_3)/a_3} \cdot d_c^{(a_2/a_3)} \cdot K^{(-1/a_3)} \cdot t_{CS} + t_h + t_R \tag{2-27}$$

Donc la fonction multi-objective est de la forme :

$$Y = \alpha_1 \cdot C_u + \alpha_2 \cdot T_u.$$

$$Y = \alpha_1 \cdot [C_0 \cdot A \cdot V^{-1} \cdot f^{-1} + A \cdot V^{(1-a_3)/a_3} \cdot f^{(a_1-a_3)/a_3} \cdot d_c^{(a_2/a_3)} \cdot K^{(-1/a_3)} \cdot (C_0 \cdot t_{CS} + C_t) + C_0(t_h + t_R)] + \alpha_2 \cdot [A \cdot V^{-1} \cdot f^{-1} + A \cdot V^{(1-a_3)/a_3} \cdot f^{(a_1-a_3)/a_3} \cdot d_c^{(a_2/a_3)} \cdot K^{(-1/a_3)} \cdot t_{CS} + t_h + t_R]$$

Nous obtenons finalement :

$$Y = [\alpha_1 \cdot C_0(t_h + t_R) + \alpha_2 \cdot (t_h + t_R)] + (\alpha_1 \cdot C_0 \cdot A + \alpha_2 \cdot A) \cdot V^{-1} \cdot f^{-1} + [\alpha_1 \cdot A \cdot (C_0 \cdot t_{CS} + C_t) + \alpha_2 \cdot A \cdot t_{CS}] \cdot V^{(1-a_3)/a_3} \cdot f^{(a_1-a_3)/a_3} \cdot d_c^{(a_2/a_3)} \cdot K^{(-1/a_3)} \quad (2-28)$$

Avec $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ et $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$

Le 1^{er} terme de l'équation (2-28) reste toujours constant puisque les termes qui le composent sont constants.

Donc nous avons :

$$Y = C_{01} \cdot V^{-1} \cdot f^{-1} + C_{02} \cdot V^{(1-a_3)/a_3} \cdot f^{(a_1-a_3)/a_3} \cdot d_c^{(a_2/a_3)} + \bar{C} \quad (2-29)$$

Avec :

$$C_{01} = \alpha_1 \cdot C_0 \cdot A + \alpha_2 \cdot A$$

$$C_{02} = [\alpha_1 \cdot A \cdot (C_0 \cdot t_{CS} + C_t) + \alpha_2 \cdot A \cdot t_{CS}] \cdot K^{(-1/a_3)}$$

$$\bar{C} = \alpha_1 \cdot C_0(t_h + t_R) + \alpha_2 \cdot (t_h + t_R)$$

Dans l'équation (2-28) le dernier terme est négligé puisqu'il est constant.

Après condensation on trouve :

$$Y = C_K \cdot V^{(aw_2 - w_1)} \cdot f^{(\beta w_2 - w_1)} \cdot d_c^{\gamma w_2} \quad (2-30)$$

$$C_K = \left(\frac{C_{01}}{w_1}\right)^{w_1} \cdot \left(\frac{C_{02}}{w_2}\right)^{w_1} \quad (2-31)$$

$$\alpha = \frac{1 - \alpha_3}{\alpha_3}$$

$$\gamma = \frac{\alpha_2}{\alpha_3}$$

$$\beta = \frac{\alpha_1 - \alpha_3}{\alpha_3}$$

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (2-32)$$

w_1 et w_2 sont les deux coefficients de pondération des deux termes de l'équation

A l'aide la transformation logarithmique, l'équation (2-29) devient:

$$\ln(Y) = \ln(C_K) + (\alpha w_2 - w_1) \ln(v) + (\beta w_2 - w_1) \ln(f) + \gamma w_2 \ln(d_c)$$

$$\ln(Y) = \ln(C_K) + C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + C_3 \cdot x_3 .$$

$$\ln(Y) = C_{11} + C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + C_3 \cdot x_3 \quad (2-33)$$

Avec :

$$C_{11} = \ln(C_K)$$

$$C_1 = \alpha w_2 - w_1$$

$$C_2 = \beta w_2 - w_1$$

$$C_3 = \gamma w_2$$

$$x_1 = \ln(v) \quad , \quad x_2 = \ln(10f) \quad , \quad x_3 = \ln(d_c).$$

La forme finale de la fonction objectif à optimiser est :

$$\text{Min}(x_0) = \min(C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + C_3 \cdot x_3) \quad (2-34)$$

C_{11} est négligée puisqu'il reste toujours constant quel que soit les valeurs de w_1 et w_2

2.5.1 Développement des contraintes

La méthode consiste à utiliser le minimum de contraintes (les contraintes essentielles)

En passant à la forme logarithmique et on utilisant les données du tableau 2.1

On obtient le système d'équation suivant :

On pose : $x_1 = \ln(v)$, $x_2 = \ln(10f)$, $x_3 = \ln(d_i)$

Avec : $x_1 \geq 0$, $x_2 \geq 0$, $x_3 \geq 0$

$$x_1 \leq 5.30$$

$$x_1 \geq 3.401$$

$$x_2 \leq 2.03$$

$$x_2 \geq 0.932 \quad (2.35)$$

$$x_3 = d_i$$

$$0.91x_1 + 0.78x_2 + 0.75x_3 \leq 6.694$$

$$-1.52x_1 + 1.004x_2 + 0.25x_3 \leq -5.21$$

$$0.4x_1 + 0.2x_2 + 0.105x_3 \leq 2.393$$

$$-0.1013x_1 + 0.2725x_2 + 0.75x_3 \leq 1.934$$

Donc nous avons 9 contraintes dont 2 inégalités supérieures ou égales à zéro et 6 inégalités inférieures ou égales à zéro et une égalité, avec 3 variables.

La fonction objective est de la forme :

$$\text{MIN}(x_0) = \text{MIN}(C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + C_3 \cdot x_3)$$

$$\text{Avec : } C_1 = \alpha w_2 - w_1, \quad \alpha = \frac{1-a_3}{a_3} = \frac{1-0.25}{0.25} = 3$$

$$C_2 = \beta w_2 - w_1, \quad \beta = \frac{a_1 - a_3}{a_3} = \frac{0.29 - 0.25}{0.25} = 0.16$$

$$C_3 = \gamma w_2, \quad \gamma = \frac{a_2}{a_3} = \frac{0.35}{0.25} = 1.4$$

$$- C_1 = 3 w_2 - w_1$$

$$- C_2 = 0.16 w_2 - w_1 \quad \text{avec } w_1 + w_2 = 1, \quad w_1 \text{ et } w_2 \geq 0$$

$$- C_3 = 1.4 w_2$$

Donc la fonction objective prend la forme suivante :

$$- \text{Min } (x_0) = \text{Min } ((3 w_2 - w_1) \cdot x_1 + (0.16 w_2 - w_1) \cdot x_2 + 1.4 w_2 \cdot x_3)$$

2.5.2 Résultats

On varie w_1 et w_2 pour avoir la valeur minimal de la fonction objective et les valeurs des coefficients de pondération qui conviennent :

$$\text{Pour : } w_2 = 0.9, w_1 = 0.1 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (2.6x_1 + 0.044x_2 + 1.26x_3)$$

$$w_2 = 0.1, w_1 = 0.9 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (-0.6x_1 - 0.884x_2 + 0.14x_3)$$

$$w_2 = 0.2, w_1 = 0.8 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (-0.2x_1 - 0.768x_2 + 0.28x_3)$$

$$w_2 = 0.8, w_1 = 0.2 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (2.2x_1 - 0.072x_2 + 1.12x_3)$$

$$w_2 = 0.3, w_1 = 0.7 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (0.2x_1 - 0.652x_2 + 0.42x_3)$$

$$w_2 = 0.7, w_1 = 0.3 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (1.8x_1 - 0.188x_2 + 0.98x_3)$$

$$w_2 = 0.4, w_2 = 0.6 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (0.6x_1 - 0.536x_2 + 0.56x_3)$$

$$w_2 = 0.6, w_1 = 0.4 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (1.4 x_1 - 0.304x_2 + 0.84x_3)$$

$$w_2 = 0.5, w_2 = 0.5 \Rightarrow \text{MIN } (x_0) = \text{MIN } (1x_1 - 0.42x_2 + 0.7x_3)$$

La meilleure solution trouvée par l'algorithme du simplexe s'obtient pour les coefficients de pondération suivante : $w_1 = 0.2, w_2 = 0.8$

En variant la profondeur de coupe on obtient les valeurs optimales de la vitesse de coupe et de l'avance, les résultats sont trouvés par l'application d'Algorithme du simplexe intègre sous Maple.

Les équations (2-4) et (2-5) donnent les coûts et les temps de production correspondants qui sont mentionnées dans le tableau 2.2.

$$\text{Avec : } V = e^{x_1}, \quad f = \frac{e^{x_2}}{10}, \quad d_c = e^{x_3}$$

Tableau 2.2 Coûts et temps de production

Profondeur (mm)	Vitesse d'avance (mm/tour)	Vitesse de coupe (m/min)	Coût (\$)	Temps (min)
1.27	0.76	134.82	0.382	2.688
2.54	0.641	122.48	0.526	3.082
3.81	0.552	118.62	0.687	3.45
5.08	0.461	110.94	0.789	3.93

Le tableau 2.3 présente les valeurs des contraintes physiques pour chaque opération,

Tableau 2.3 Valeurs des contraintes physique pour chaque opération

d_c (mm)	f (mm/tour)	V (m/min)	F (N)	HP (KW)	SR (μm)	θ ($^{\circ}\text{C}$)
0.50	0.761	172.3	244	1.94	2.73	499
0.75	0.761	154.4	335	2.38	4.88	499
1.00	0.761	142.6	419	2.75	5.91	498
1.25	0.761	134.2	498	3.07	6.86	497
1.50	0.761	129.1	573	3.40	7.6	499
1.75	0.735	126.2	629	3.64	7.9	499
2.00	0.700	124.9	672	3.84	7.89	499
2.50	0.645	122.7	750	4.19	7.87	499
3.00	0.603	120.9	820	4.49	7.85	499
4.00	0.539	117.7	940	4.99	7.82	498
5.00	0.466	111.0	1006	4.99	7.77	483

Interprétation des résultats

D'après les résultats du tableau 2.3 on remarque que :

- 1- L'usinage avec des grandes profondeurs de coupe provoque l'augmentation des forces de coupe, l'augmentation de la consommation de la puissance et la diminution de la durée de vie de l'outil.
- 2- La température est proche de la frontière de la température maximale permise $\theta_{max} = 500^{\circ}\text{C}$ pour toute les opérations ce qui nécessite la lubrification.

- 3- L'usinage avec des régimes optimaux ramène les contraintes physiques à leurs limites maximal permises, donc le choix optimal des paramètres de coupe et très important car:
- L'usinage avec des profondeurs de coupe trop faible provoque des chaleurs excessives, mauvais contrôle de copeaux et des coûts élever, et l'usinage avec des profondeurs de coupe trop grande consomme trop de puissance, provoque l'usure rapide des outils de coupe et demande trop de force.
 - L'usinage avec des avances faible provoque l'usure des outils et des coûts élevés, l'usinage avec des avances trop fortes provoque le mauvais contrôle et soudage des coupeaux, mauvais état de surfaces et demande trop de puissance.
 - L'usinage avec des vitesses de coupe faible génère des coûts élevés, mauvais état de surface et des arrêts d'outil émoussés, l'usinage avec des vitesses de coupe trop élevées provoque l'usure des outils mauvais état de surface et la déformation plastique.

2.6 Représentation graphique

Les figures (2.1) et (2.2) présentent les courbes de variation de la fonction multi-objectif en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour une profondeur de coupe $d_c = 2.54$ mm, et les figures (2.3) et (3.4) présente les courbes de variation de la force de coupe F et la puissance HP respectivement, en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour une profondeur de 2.54 mm en deux et trois dimensions.

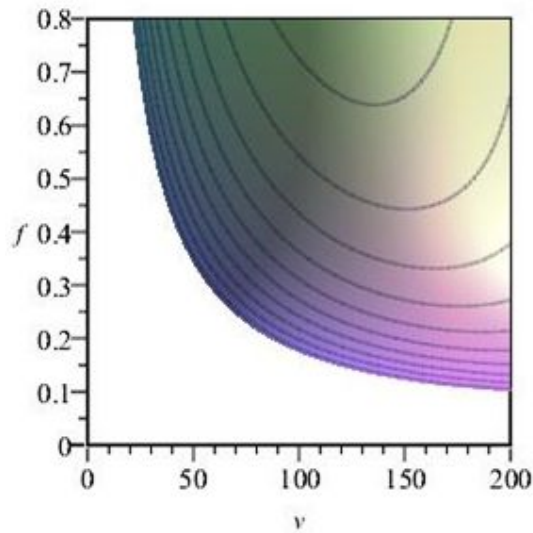


Figure 2.1 variation de la fonction objective en fonction de v et f en 2D

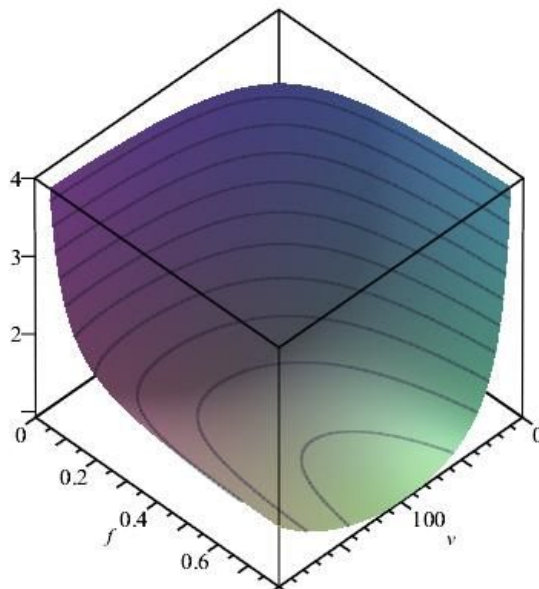


Figure 2.2 variation de la fonction objective en fonction de v et f en 3D

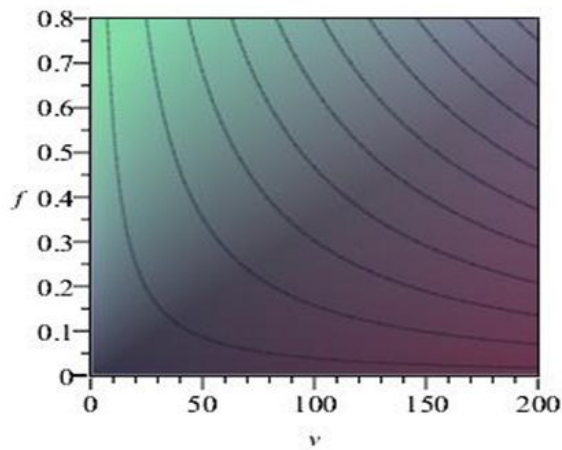


Figure 2.3 variation de la puissance HP en fonction de v et f en 2D

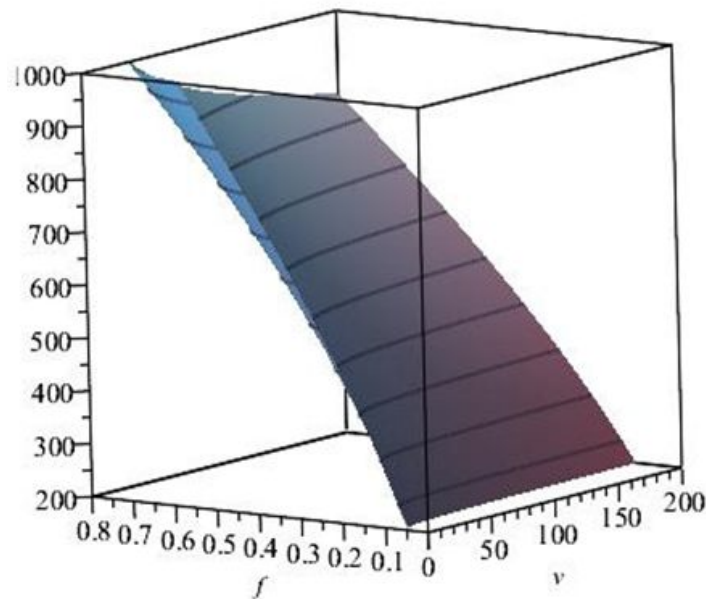


Figure 2.4 Variation de la force de coupe F en fonction de v et f en 3D

Interprétation des représentations graphiques :

En respectant les limitations des différentes contraintes on remarque que :

Pour les grandes valeurs de l'avance et de la vitesse de coupe on obtient des coûts élevés et temps minimums, par contre pour des petites valeurs de l'avance et de la vitesse de coupe on obtient des coûts et des temps élevés. D'après le tableau 2.2 on remarque que pour une profondeur de coupe de 2.54 mm on a trouvé une vitesse de coupe $V = 122$ m/min et un avance $f = 0.641$; ces deux valeurs respectent toutes les limitations de contraintes et représentent le point de fonctionnement optimal.

On peut améliorer les résultats trouvés en augmentant les deux limitations des contraintes puissance et force de coupe pour les grandes valeurs de la profondeur de coupe. Donc le fait d'augmenter la puissance signifie que l'on utilise une machine plus puissante pour faire l'opération, et le fait d'augmenter la limitation de force exige l'utilisation d'un montage plus solide de la pièce sur la machine.

Chapitre 3

Optimisation des conditions de coupe par Algorithme Génétique (cas de fraisage en bout)

Chapitre 3

Optimisation des conditions de coupe par Algorithme Génétique (cas de fraisage en bout)

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons utiliser un algorithme génétique intégré sous Matlab pour l'optimisation des conditions de coupe pour un cas de fraisage en bout, Nous allons utiliser beaucoup de symboles pour construire nos équations. La plupart d'entre eux sont des données qu'il faut recueillir sur la pièce à usiner, sur l'outil de coupe ou sur la machine qui est utilisée.

Il y a aussi bien sûr les variables à déterminer et les différentes équations intermédiaires.

3.2 Le fraisage en bout

Trois types de fraisages peuvent être distingués: le fraisage en bout, le fraisage en roulant et fraisage combiné. Le fraisage en bout (Figures 3.1 et 3.2) est le plus répandu en industrie car il permet de réaliser des surfaces complexes obtenues par un travail d'enveloppe généré par la rotation conjuguée au déplacement de l'outil. Dans ce procédé d'usinage, l'outil est tangent à la surface à usiner au point de contact. La partie de l'outil jouant un rôle important dans ce type de fraisage est le bout de l'outil. En effet, selon la forme de l'outil (bout torique, sphérique, plat etc.) la trace laissée sur la surface et la quantité de matière enlevée diffèrent. L'aspect visuel d'une surface usinée en fraisage en bout est caractérisé par une série de surfaces sécantes correspondant aux traces laissées par les dents de la fraise sur la pièce. La raison pour laquelle nous avons choisi l'opération de fraisage en bout pour notre modèle est que

cette opération nous permettra de développer un modèle le plus général possible qui pourra facilement être adapté aux autres types de fraisage.

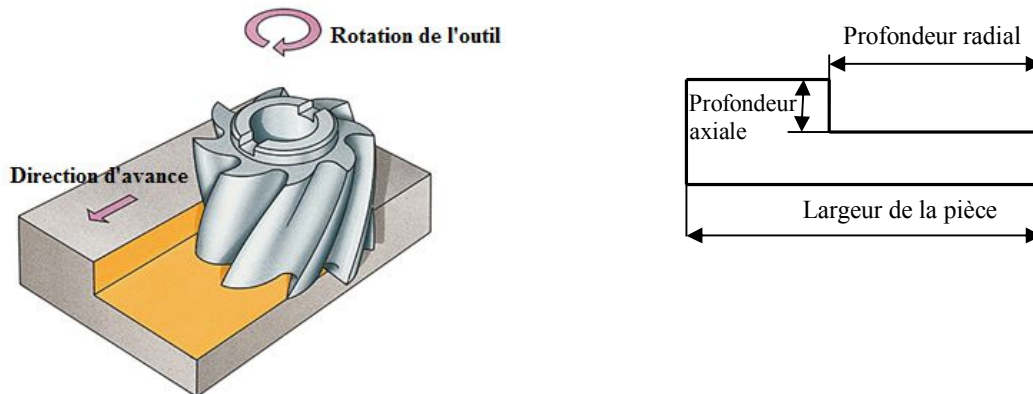


Figure 3.1 Fraise en bout vertical

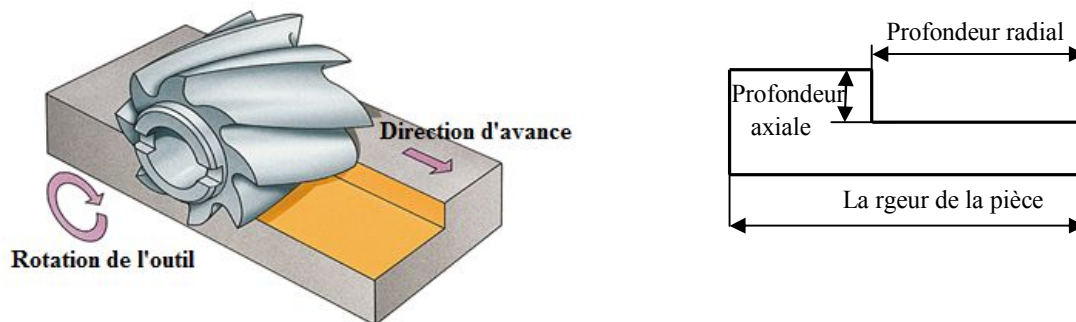


Figure 3.2 Fraise en bout horizontal

Il y a deux façons de faire avancer la fraise dans le matériau: en concordance ou en opposition (figure 3.3). Ce qui est important de mentionner pour notre modèle, c'est qu'il faut utiliser le même mode pour usiner que celui qui a été utilisé dans les plans d'expérience.

Ces plans d'expérience sont requis afin de déterminer les paramètres des équations de coupe.

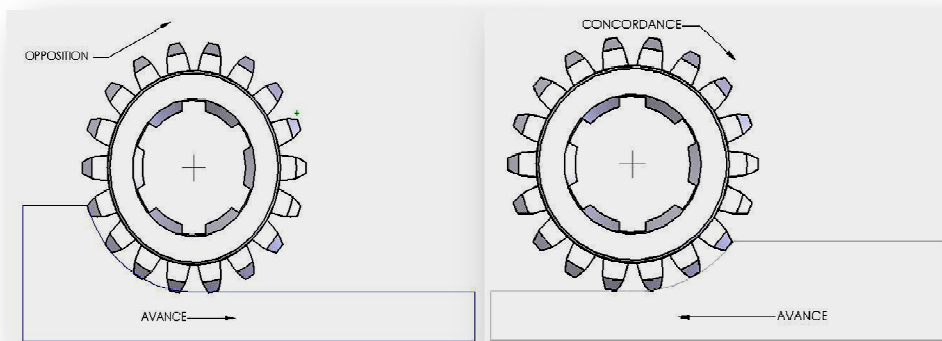


Figure 3.3 Fraisage en opposition et en concordance

3.3 Formulation des fonctions objectifs

La production maximale sera atteinte lorsque le temps de fabrication unitaire sera minimal. Le temps d'usinage unitaire est le temps nécessaire pour la réalisation d'une passe sur une pièce. C'est l'élément-clé des deux fonctions objectifs (le coût d'usinage unitaire et le taux de production).

3.3.1 Temps d'usinage unitaire

Le temps d'usinage unitaire est la somme des temps suivants [Parent 2007]:

$$T_u = t_{cr} + t_{cf} + \frac{R}{v_t} + t_L + \frac{t_s}{N_L} + \frac{t_{cr} \cdot t_e}{t_{or}} + \frac{t_{cf} \cdot t_e}{t_{of}} \quad (3-1)$$

Avec :

t_{cr}, t_{cf} : le temps de coupe pour les opérations d'ébauche et finition

v_t : vitesse d'avance rapide (mm/min)

t_L : le temps pour charger et enlever une pièce.

t_s : le temps de mise en course réparti à la pièce (min).

N_L : nombre de pièces par lot.

R : distance à parcourir en avance rapide.

t_e : le temps pour changer un outil émoussé.

t_{or}, t_{of} : durée de vie de l'outil pour les opérations d'ébauche et de finition.

3.3.2 Coût d'usinage

L'équation du coût d'usinage est donnée par l'expression suivante:

$$C_u = C_B + K_0 \cdot T_u + C_{Hr} \cdot t_{cr} + C_{Hf} \cdot t_{cf} \quad (3-2)$$

Avec :

C_B : le coût du matériel brut.

K_0 : le coût d'opération, incluant salaire et machine.

T_u : le temps d'usinage.

C_{Hr} : le coût horaire de l'outil pour les opérations d'ébauche.

C_{Hf} : le coût horaire de l'outil pour les opérations de finition.

3.3.3 Taux de production horaire

La formule du taux de production horaire quant à lui ne tient compte que du temps d'usinage unitaire est donnée par:

$$P = \frac{60}{T_u} \text{ (Unites/heure)} \quad (3-3)$$

Dans le reste de ce chapitre, nous allons minimiser le temps d'usinage au lieu de maximiser le taux de production, parce que cela facilite l'implémentation et que les résultats sont les mêmes.

3.3.4 Temps de coupe

Les temps de coupe sont définis par le volume à usiner et le débit du copeau ou d'enlèvement de matière.

Le volume à usiner dépend de la géométrie de la pièce qui, dans notre exemple, est un prisme rectangulaire.

H: Hauteur du volume à usiné (mm).

L: Longueur du volume à usiné (mm).

W : Largeur du volume à usiné (mm).

D_r, D_f : Diamètre de l'outil pour les opérations d'ébauche et finition (mm).

w_r, w_f : Largeur de la passe pour l'ébauche et finition (mm).

d_r, d_f : Profondeur de coupe l'ébauche et finition (mm).

V_{fr}, V_{ff} : Vitesse d'avance en unité de temps (mm/min).

Z_r, Z_f : Nombre de dents de l'outil de coupe ébauche et finition (entier).

N_r, N_f : Vitesse de rotation de la broche (tour/min).

v_r, v_f : Vitesse de coupe (m/min).

f_r, f_f : Avance par dent (mm/dent).

Le débit du copeau dépend des variables de décision, les temps de coupe se calculent par :

$$t_{cr} = \frac{LWH - WLd_f}{w_r d_r v_{fr}} \quad (3-4)$$

$$t_{cf} = \frac{WL}{w_f v_{ff}} \quad (3-5)$$

Avec $v_{fr} = Z_r \cdot N_r \cdot f_r$, $v_{ff} = Z_f \cdot N_f \cdot f_f$ et $N = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}$

Donc $v_{fr} = \frac{1000 \cdot Z_r \cdot v_r \cdot f_r}{\pi \cdot D_r}$ et $v_{ff} = \frac{1000 \cdot Z_f \cdot v_f \cdot f_f}{\pi \cdot D_f}$

3.3.5 Durée de vie de l'outil

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 [Gelin et Vincent, 1995]

Le modèle empirique de Taylor (1907) est généralement considéré comme adéquat pour calculer la durée de vie de l'outil.

[Al-Ahmari 2001] et [Malakooti and Deviprasad 1989] ont utilisé le modèle le plus général qui s'applique à une opération de tournage. Cette expression tient compte de la vitesse d'avance et de la profondeur de passe en plus de la vitesse de coupe:

$$t_0 = \frac{k}{v^\alpha \cdot f^\beta \cdot d^r}$$

Comme nous modélisons une opération de fraisage en bout, il faut étendre encore l'expression du modèle. Nous allons donc ajouter la largeur de passe radiale afin d'avoir un modèle général convenable pour le fraisage en bout :

$$t_0 = \frac{k}{v^\alpha \cdot f^\beta \cdot d^r \cdot w^\lambda}$$

Ou k, α, β, γ et λ sont des constantes. Il y a deux équations en réalité, une pour l'ébauche et une pour la finition, soit t_{or} et t_{of} .

$$t_{or} = \frac{k}{v_r^\alpha \cdot f_r^\beta \cdot d_r^r \cdot w_r^\lambda} \quad (3-6)$$

$$t_{of} = \frac{k}{v_f^\alpha \cdot f_f^\beta \cdot d_f^r \cdot w_f^\lambda} \quad (3-7)$$

3.3.6 Coûts horaires des outils

Les coûts horaires des outils, C_{Hr} et C_{Hf} , sont calculés en utilisant les durées de vies t_{or} et t_{of} , le coût d'achat initial c_p , le coût d'aiguisage C_A , et le nombre de fois qu'il peut être aiguisé N_A :

$$C_{Hr} = \frac{c_{pr} + (C_A \cdot N_{Ar})}{t_{or}(N_{Ar} + 1)} \quad (3-8)$$

$$C_{Hf} = \frac{c_{pf} + (C_A \cdot N_{Af})}{t_{of}(N_{Af} + 1)} \quad (3-9)$$

3.3.7 Formulation des contraintes [Parent, 2007]

Plusieurs facteurs agissent sur le choix des conditions de coupe. Ces facteurs sont pris comme des contraintes d'optimisation.

Les principales contraintes de ce modèle sont les finis de surface, la puissance de la machine et la force maximale admissible de l'opération.

3.3.7.1 Finis de surface

Dans une opération de fraisage en bout, la surface de coupe axiale n'est pas générée par un rayon d'outil comme dans une opération de tournage ou de surfaçage. Il n'existe pas d'équation fondamentale adéquate pour exprimer le fini de surface en bout, mais [Lou et al. 1999] ont démontré que l'on peut utiliser une relation empirique en déterminant les paramètres à l'aide d'un plan d'expérience:

$$X_0 + X_1 \cdot v_{ff} - X_2 \cdot N_f \cdot v_{ff} + X_3 \cdot N_f \cdot d_f - X_4 \cdot v_{ff} \cdot d_f \leq R_{ae} \quad (3-10)$$

Où X_0 , X_1 , X_2 , X_3 et X_4 sont des facteurs à déterminer à l'aide d'un plan d'expérience.

C'est, à notre connaissance, la seule expression du fini de surface qui soit bien adaptée au fraisage en bout.

Pour le fini de surface radiale ou en périphérie de l'outil, étant donné que l'on peut facilement modéliser la fraise en bout comme un cylindre en déplacement (voir la figure 3.2), nous utiliserons l'équation présentée par [Tolouei-Rad et Bidhendi 1997] qui ne dépend que de l'avance par dent et du diamètre de l'outil :

$$\frac{318 f_f}{4 D_f} \leq R_{ap} \quad (3-11)$$

Les finis de surfaces, R_{ae} , et R_{ap} , sont les rugosités moyennes, exprimés en micromètres.

3.3.7.2 Puissance de la machine

La puissance requise dépend du débit du copeau et de la puissance spécifique du matériau de la pièce :

$$P_r = \frac{P_s \cdot Z_w}{\eta}$$

La puissance maximale de la machine détermine le débit maximal de matière qui peut être enlevée d'une pièce:

$$Z_w = \frac{P_{max} \cdot \eta}{P_s}$$

Le débit est lié à la profondeur et la largeur de passe et à la vitesse d'avance ce qui nous donne finalement deux contraintes, une pour l'ébauche et une pour la finition:

$$d_f w_f v_{ff} \leq \frac{P_{max} \eta}{P_s} \quad (3-12)$$

$$d_r w_r v_{fr} \leq \frac{P_{max} \eta}{P_s} \quad (3-13)$$

3.3.7.3 Force maximale

Compte tenu de la rigidité du montage de la pièce et de l'outil, la force maximale est celle à laquelle l'opération peut être effectuée de manière sécuritaire. Les équations de force sont facilement calculées à partir des équations de puissance requise:

$$\frac{60 \cdot p_r}{V_r} \leq F_{rmax} \quad (3-14)$$

$$\frac{60 \cdot p_r}{V_f} \leq F_{fmax} \quad (3-15)$$

3.3.7.4 Limitations pratiques des conditions de coupe

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

La largeur de passe radiale est une variable reliée au nombre de passes radiales et à la largeur du volume à usiner moins la passe de finition :

La largeur de passe radiale est une variable reliée au nombre de passes radiales et à la largeur du volume à usiner moins la passe de finition, les largeurs de la passe en ébauche sont supposées être égaux :

$$\frac{N_w}{2} \cdot (w_r + w_f) = W$$

De même, la profondeur de la passe axiale est aussi une variable reliée au nombre de passes axiales et à la hauteur du volume à usiner moins la passe de finition les profondeurs de passes en ébauche sont supposées être égaux:

$$d_r = \frac{H - d_f}{N_p}$$

Ce qui nous donne la contrainte :

$$d_r N_p + d_f = H \quad (3-16)$$

Les largeurs de passe radiale sont limitées par le diamètre de l'outil :

$$w_r \leq D_r \quad (3-17)$$

$$w_f \leq D_f \quad (3-18)$$

Les profondeurs de passe axiale sont limitées par la longueur des flûtes de l'outil :

$$d_r \leq h_{r \max} \quad (3-19)$$

$$d_f \leq h_{f \max} \quad (3-20)$$

Les vitesses d'avance sont limitées par la vitesse d'avance maximale de la machine:

$$v_{fr}, v_{ff} \leq v_{f \max} \quad (3-21)$$

Les vitesses de coupe et de rotation de la broche dépendent essentiellement du diamètre de l'outil:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \rightarrow N = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}$$

Les vitesses de coupe sont limitées par la vitesse de rotation maximale de la machine :

$$\frac{1000v_r}{\pi \cdot D_r} \leq N_{max} \quad (3-22)$$

$$\frac{1000 \cdot v_f}{\pi \cdot D_f} \leq N_{max} \quad (3-23)$$

Finalement, il y a les contraintes de non-négativité sur les variables de décision :

$$v_r, f_r, d_r, w_r, D_r, v_f, f_f, d_f, w_f, D_f \geq 0 \quad (3-24)$$

3.4 Optimisation par algorithme génétique

Selon les caractéristiques du critère d'optimisation, des contraintes et des variables du système, on peut trouver différents types de problèmes d'optimisation: optimisation linéaire sous contraintes (programmation linéaire), optimisation non-linéaire sous contraintes (programmation non linéaire), optimisation multicritères (programmation multi-objectif), optimisation non-linéaire à variables entières ou mixtes,...

On peut facilement remarquer que le modèle d'optimisation présenté est hautement non linéaire. Les variables de décision se multiplient entre elles autant dans les fonctions objectifs que dans les contraintes.

Les méthodes de base en optimisation : résolution graphique, programmation linéaire, quadratique ou dynamique, sont difficilement applicables à ce modèle. Il ne reste donc que les techniques numériques pour résoudre ce problème. Nous avons choisi d'utiliser un code d'algorithme génétique (AG) de base capable de résoudre ce problème dans un temps raisonnable intégré sous Matlab (Annexe 3).

Les algorithmes génétiques cherchent à simuler le processus de la sélection naturelle et de la génétique dans un environnement défavorable en s'inspirant de la théorie de l'évolution proposée par C. Darwin (1859). Dans un environnement, « les individus » les mieux adaptés tendent à vivre assez longtemps pour se reproduire alors que les plus faibles ont tendance à disparaître.

La tâche la plus importante pour l'élaboration d'un AG est la détermination du génome. Ce génome est en général un vecteur de valeurs (binaires, entières, réelles,

etc.) contenant la représentation des variables de décision. En fait, chaque individu contient une solution plus ou moins faisable selon les contraintes et plus ou moins performante selon la ou les fonctions objectifs.

L'algorithme génétique de base comprend sept étapes. La Figure 3.4 illustre schématiquement l'algorithme. Pour commencer l'algorithme génère une population initiale aléatoirement.

1- Dès l'initialisation, l'algorithme rejette les individus qui sont trop loin hors contraintes, mais il tolère les individus qui ne sont pas trop hors contraintes parce que ceux-ci peuvent être près de la solution optimale. Plus la taille est grande, plus les itérations demandent de temps de calcul, il convient donc de bien ajuster ce paramètre.

2- Pour déterminer quels individus sont plus enclins à obtenir les meilleurs résultats, une sélection est opérée. Ce processus est analogue à un processus de sélection naturelle, les individus les plus adaptés gagnent la compétition de la reproduction tandis que les moins adaptés meurent avant la reproduction, ce qui améliore globalement l'adaptation.

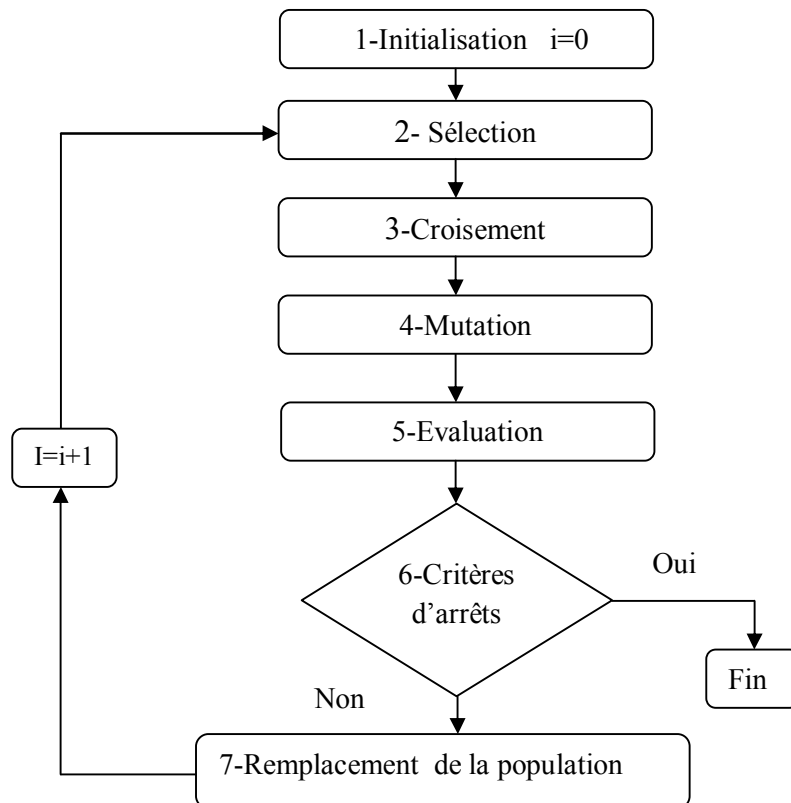


Figure 3.4 Schéma d'une algorithmique génétique

3- La reproduction, ou croisement, permet de mélanger le génome des parents pour produire la prochaine génération.

4- La mutation, comme dans la nature, on introduit une perturbation d'une ou plusieurs variables de l'enfant produit au croisement. La mutation sert à éviter une convergence prématurée de l'algorithme. Par exemple lors d'une recherche d'extremum la mutation sert à éviter la convergence vers un extremum local.

5- On évalue ensuite la valeur des fonctions objectifs et de la fonction d'adaptation de chaque enfant produit. La vérification des critères d'arrêt détermine si on arrête l'algorithme ou si on passe à une autre itération.

6- Si aucun des critères n'est atteint, on fait une autre itération à partir de l'étape de la sélection. Il y a trois critères d'arrêt que l'on peut ajuster, deux absolus et un relatif. Les critères absolus sont le temps de calcul et le nombre d'itération maximum que l'on donne à l'algorithme pour résoudre le problème. Le critère relatif est le nombre maximum d'itération que l'on fait sans qu'il n'y ait d'amélioration de la meilleure solution.

7- En effet, si la meilleure solution ne s'améliore pas pendant un certain nombre d'itération, c'est que l'algorithme a convergé vers une solution. Celle-ci est généralement très près de l'optimum.

3.5 Application cas de fraisage en bout

Voici l'ensemble des paramètres que nous avons utilisé pour notre exemple numérique. Il s'agit d'une opération de fraisage en bout typique sur une pièce en acier allié, avec une fraise à quatre flûtes en acier rapide [White and Houshyar 1992] (HSS pour High Speed Steel).

3.5.1 Données de simulation

Tableau 3.1 Paramètres d'usinage fraisage en bout [Prent, 2007]

Paramètre	valeur		Paramètre	valeur	
R	300	mm	C_A	55	\$
D_r	40	mm	c_b	0.75	\$
D_f	40	mm	k_0	4	\$/min
V_t	36000	mm/min	z_r	4	
t_1	0.5	min	z_f	4	
t_s	30	min	C_{pr}	90	\$
N_L	200		C_{pt}	90	\$
L	300	mm	N_{ar}	7	
W	30	mm	N_{af}	4	
H	25	mm	p_{max}	7.5	kw
P_S	$5.92 \cdot 10^{-4}$	kw.min/mm ³	F_{max}	2	kN
η	0.85		R_{ap}	2	µm
α	5		R_{ae}	2	µm
β	1.75		N_{max}	12000	rpm
γ	1.5		V_{fmax}	8000	mm/min
λ	0		w_f	30	mm
K	$5.00 \cdot 10^{11}$		w_r	30	mm
t_e	1	min			

3.6 Formulation du problème et résolution

Pour chercher les conditions optimales de coupe pour le cas de fraisage en bout nous avons deux critères à optimiser le temps et le coût de production, donc nous avons un problème composé de 6 variables sous 17 contraintes ou 15 contraintes d'inégalité et 2 contraintes d'égalité .

Minimiser

$$T_u = \frac{LWH - WLd_f}{w_r d_r v_{fr}} + \frac{WL}{w_f v_{ff}} + \frac{R}{v_t} + t_l + \frac{t_s}{N_L} + \frac{(LWH - WLd_f) t_e v_r^\alpha f_r^\beta d_r^\gamma w_r^\lambda}{k w_r d_r v_{fr}} + \frac{WL t_e v_f^\alpha f_f^\beta d_f^\gamma w_f^\lambda}{k w_f v_{ff}}$$

$$C_u = C_B + K_0 T_u + \left[\frac{v_r^\alpha f_r^\beta d_r^\gamma w_r^\lambda (C_{pr} + (C_A \cdot N_{Ar}) (LWH - WLd_f) t_e)}{k w_r d_r v_{fr} (N_{Ar} + 1)} \right] + \left[\frac{v_f^\alpha f_f^\beta d_f^\gamma w_f^\lambda WL (C_{pf} + (C_A \cdot N_{Af}))}{k w_f v_{ff} (N_{Af} + 1)} \right]$$

Sous les contraintes

$$- \frac{318 f_r}{4 D_r} \leq R_{ar}$$

- $\frac{318 f_f}{4 D_f} \leq R_{af}$
- $d_f w_f v_{ff} \leq \frac{P_{max} \cdot \eta}{P_s}$
- $d_r w_r v_{fr} \leq \frac{P_{max} \cdot \eta}{P_s}$
- $k_c \cdot d_r \cdot f_r \leq F_{rmax}$
- $k_c \cdot d_f \cdot f_f \leq F_{fmax}$
- w_r et $w_f \leq W$
- $w_r \leq D_r$ et $w_f \leq D_f$
- $\frac{N_w}{2} \cdot (w_r + w_f) = W$
- $d_r N_p + d_f = H$
- $d_r \leq h_{rmax}$
- $d_f \leq h_{fmax}$
- V_{fr} et $V_{ff} \leq V_{fmax}$
- $\frac{1000 \cdot v_r}{\pi \cdot D_r} \leq N_{max}$
- $\frac{1000 \cdot v_f}{\pi \cdot D_f} \leq N_{max}$
- $v_r, f_r, d_r, w_r, D_r, v_f, f_f, d_f, w_f, D_f \geq 0$

3.6.1 Résolution du problème

Les données nécessaires pour notre application : La largeur total du volume à usiner $W = 30$ mm, la longueur = 80mm et la largeur de passe pour l'opération d'ébauche et finition w_r et $w_f = 30$ mm, les limitations des vitesses $50 \leq (v_r \text{ et } v_f) \leq 250$ m/min, $0.01 \leq (f_r \text{ et } f_f) \leq 0.8$ mm/dent

Les coefficients de pondération pour la fonction multi-objective sont 0.8 et 0.2.

Les tableaux (3.2, 3.3 et 3.4) illustre les résultats que nous avons obtenus pour une profondeur de coupe total $H = 6$ mm, 12 mm et 25 mm, on fait varier le nombre des passes pour trouver la meilleur combinaison des nombres de passes qui donne un coût et un temps minimal en respectant toutes les contraintes physique.

Tableau 3.2 Temps et cout d'usinage pour $H=6$ mm.

N_p	d_r mm	d_f mm	v_r m/min	f_r m/min	v_f mm/dent	f_f mm/dent	T_u min	C_u \$
4	1.25	1.00	175	0.1	112	0.2	1.36	6.44
3	1.00	3.00	159	0.4	208	0.036	1.06	6.51
2	1.50	3.00	195	0.076	164	0.046	1.33	6.42
1	3.00	3.00	178	0.04	220	0.035	1.34	6.75

Tableau 3.3 Temps et cout d'usinage pour $H=12$ mm.

N_p	d_r mm	d_f mm	v_r m/min	f_r m/min	v_f mm/dent	f_f mm/dent	T_u min	C_u \$
5	2.00	2.00	177	0.063	180	0.062	2.02	9.47
4	2.25	3.00	220	0.045	210	0.035	2.05	10.06
3	3.00	3.00	220	0.034	170	0.043	2.07	9.85
2	4.55	2.90	220	0.022	170	0.045	2.03	9.81
1	9.25	2.75	146.0	0.016	165	0.05	2.04	9.20

Tableau 3.4 Temps et cout d'usinage pour $H=25$ mm

N_p	d_r mm	d_f mm	v_r m/min	f_r m/min	v_f mm/dent	f_f mm/dent	T_u min	C_u \$
8	3	1	157.0	0.048	111	0.20	3.45	15.34
7	3.25	2.25	214.0	0.033	188	0.05	3.45	16.68
6	4.00	1	196.0	0.028	140	0.16	3.54	16.40
5	4.50	2.50	150.0	0.034	102	0.09	3.40	14.96
4	5.5	3	220	0.018	130	0.06	3.55	16.77
3	7.33	2.98	220	0.014	186	0.04	3.47	16.53

Commentaires :

Le meilleur résultat pour une profondeur de coupe total $H = 6$ mm tableau 3.2 a été trouver pour un nombre de passe total égale a 4 pour une largeur de passe pour les opérations d'ébauche et finition w_r et $w_f = 30$ mm est comme suit:

Trois passes pour l'ébauche avec une profondeur de coupe $d_r = 1$ mm, $v_r = 159$ m/min et $f_r = 0.4$ mm/dent et une passe pour la finition avec $d_f = 3$ mm, $v_f = 208$ m/min et $f_f = 0.036$ mm/dent, ce qui donne un temps de production total $T_u = 1.06$ min et un coût de production total $C_u = 6.51$ \$.

La meilleure solution pour une profondeur de coupe total $H = 12$ mm tableau 3.3, a été trouver pour un nombre de passe total égale a deux :

Une passe d'ébauche avec $d_r = 9.25$ mm, $v_r = 146$ m/min et $f_r = 0.016$ mm/dent et une pour la finition avec $d_f = 2.75$ mm, $v_f = 165$ m/min et $f_f = 0.05$ mm/dent, ce qui donne un temps de production total $T_u = 2.04$ min et un coût de production total $C_u = 9.20$ \$.

Pour une profondeur de coupe total $H = 25$ mm tableau 3.4, la solution optimal a été trouver avec un nombre de passes total égale à 6 :

Cinq passes d'ébauche avec $d_r = 4.5$ mm, $v_r = 150$ m/min et $f_r = 0.034$ mm/dent et une pour la finition avec $d_f = 2.5$ mm, $v_f = 102$ m/min et $f_f = 0.09$ mm/dent, ce qui génère un temps de production total $T_u = 3.4$ min et un coût de production total $C_u = 14.96$ \$.

Le fait d'augmenter la profondeur de coupe total le volume de la matière à usiner augmente ce qui provoque une augmentation du coût et du temps d'usinage, on a choisi de doublé le volume à usiner pour déterminer le nombre de passes optimales pour chaque volume et le rapport d'augmentation du coût et du temps d'usinage pour chaque volume. On a constaté que le choix optimale des paramètres de coupe tel que le nombre de passes, la profondeur, la largeur de passe, la vitesse de coupe et l'avance peut diminuer le coût et le temps de production de 15 a 40 %.

3.7 Analyse des objectives de l'optimisation

Les objectifs à atteindre suite à la procédure d'optimisation sont : le temps de production et le coût de production. Les deux plus importantes variables pour minimiser ces objectifs sont les vitesses d'avance et les vitesses de coupe, soit en ébauche ou en finition.

3.7.1 Coût de production

Les figures 3.5 et 3.6 présentent la variation du coût de production en fonction des vitesses d'avance et vitesses de coupe pour une profondeur de coupe $d_r = 2$ mm et $d_f = 2$ mm (ligne 1 tableau 3.3), on remarque que l'usinage avec des grandes valeurs de profondeur de coupe nécessite une diminution de l'avance et de la vitesse de coupe ce qui provoque une augmentation des coûts et du temps de production.

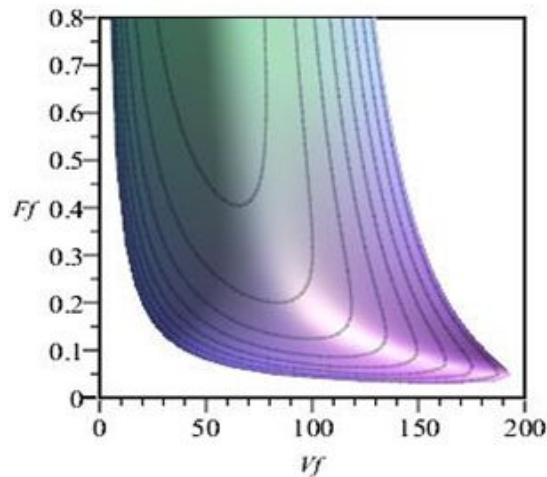


Figure 3.5 Variation du coût d'usinage en fonction de V_f et F_f présentation sur 2D

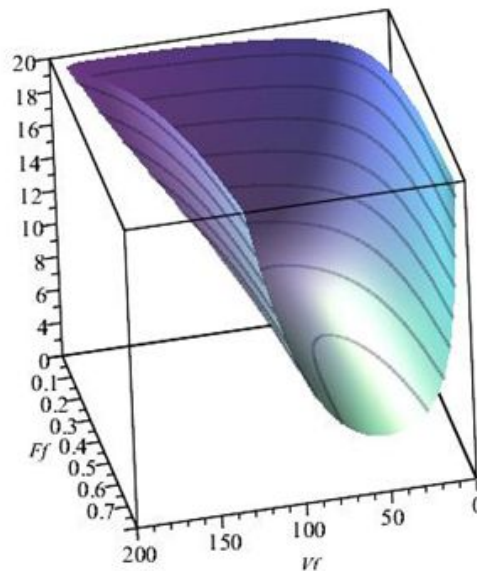


Figure 3.6 Variation du coût de l'usinage en fonction du V_f et F_f présentation en 3D

Interprétation des représentations graphiques de C_u :

- On remarque que plus que la valeur de la vitesse d'avance est grande et la vitesse de coupe est petite, plus que le coût est minime. Ceci s'explique facilement par le fait que plus la vitesse d'avance est grande, plus le temps d'usinage est court, ce qui diminue le coût relié au temps d'usinage.
- Plus la vitesse de coupe, elle est basse, plus l'outil dure longtemps, ce qui diminue les coûts reliés à l'outil. La minimisation du coût C_u doit être limitée par les contraintes actives.

4.7.2 Temps de production

Les figures 3.7 et 3.8 présentent la variation de temps de production en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance pour des opérations d'ébauche.

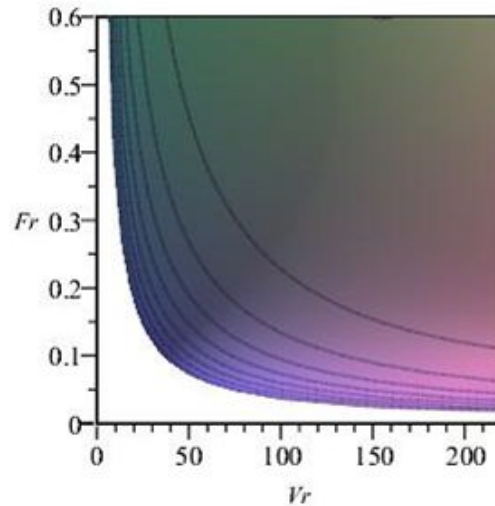


Figure 3.7 Variation du temps de l'usinage en fonction du V_r et F_r présentation en 2D

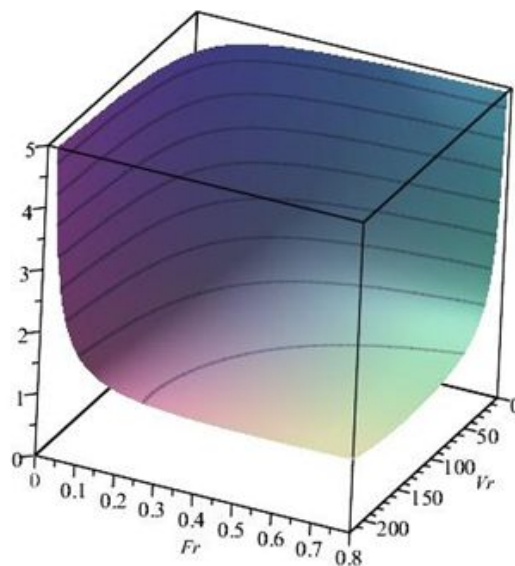


Figure 3.8 Variation du temps de l'usinage en fonction du V_r et F_r présentation en 3D

Interprétation des représentations graphiques de T_u :

Le graphe montre que plus que la vitesse d'avance est grande plus que le temps d'exécution est minimal, d'après les résultats trouver avec résolution par algorithme génétique mentionner dans les tableaux 3.3 et 3.4, et qui respectent toute les limitations des contraintes nous constatent que plus que les régimes de coupe sont

réduit plus que les temps nécessaire a l'exécution des différentes opérations sont élevés, et par conséquent l'augmentation des prix de revient, et l'augmentation de régimes de coupe provoque l'usure rapide des outils d'ou leur changement asse fréquent, conduit a une augmentation du prix de revient.

De ces deux déductions il ressort que pour réaliser des produits dans les meilleurs délais, il faut réduire le temps de production tout en essayant de garder le coût de production le mois élevé possible.

3.8 Impacts des principales contraintes de force et de puissance maximale

La contrainte de force et la contrainte de puissance maximales agissent directement sur le choix de la machine et sur la conception des montages et les gabarits des pièces.

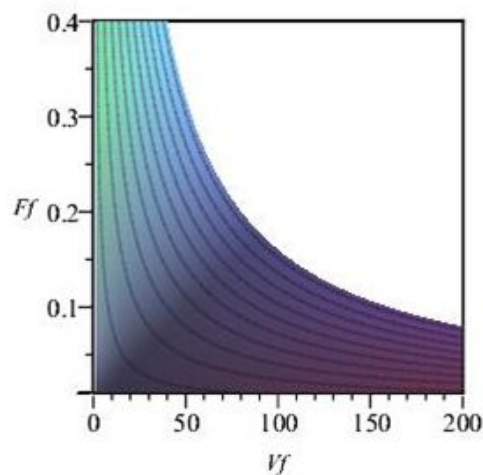


Figure 3.9 Variation de la puissance en fonction du V_f et F_f présentation en 2D

En effet, le fait d'augmenter la puissance maximale (figure 3.9) signifie que l'on utilise une machine plus puissante pour faire l'opération. La force maximale quant à elle peut être augmentée en utilisant un montage plus solide de la pièce sur la machine.

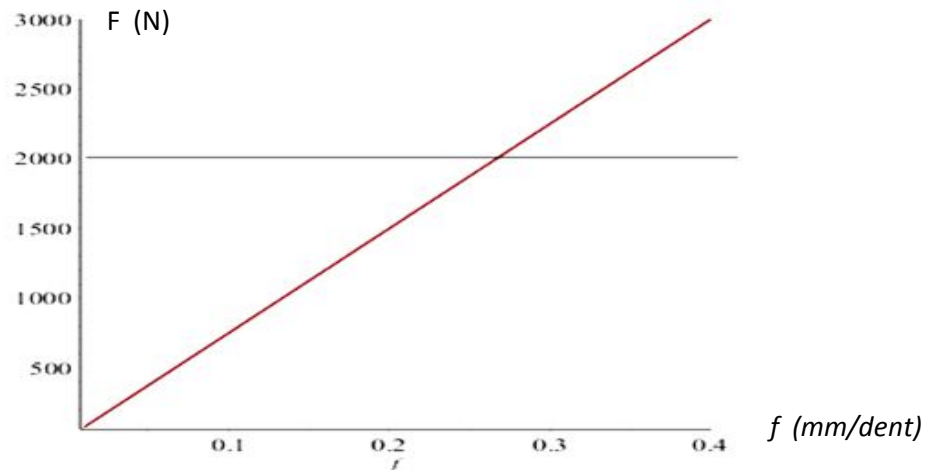


Figure 3.10 Variation de la force de coupe en fonction de l'avance

L'obtention d'une diminution importante du temps ou du coût d'usinage cela ne pourra pas être possible seulement en augmentant la puissance ou la force admissible. Il faudra donc chercher à améliorer d'autres caractéristiques du procédé, comme de meilleurs outils de coupe par exemple, ou alors d'ajouter des machines si la capacité de production n'est pas suffisante.

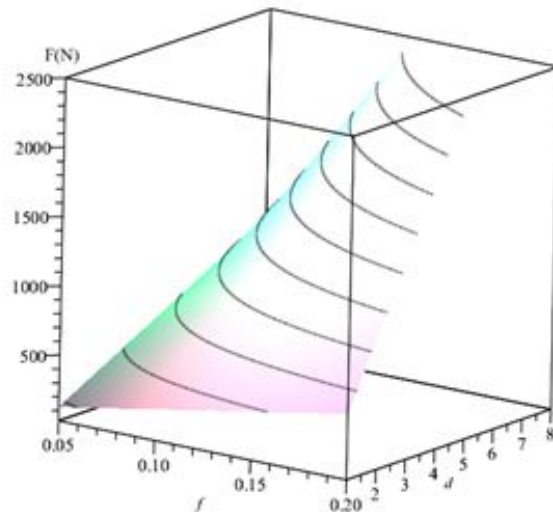


Figure 3.11 Variation de la force de coupe en fonction de l'avance et de la profondeur de coupe présentation 3D.

La figure 3.10 présente la variation de la force de coupe en fonction de l'avance par dent. On remarque sur la figure que la limite permise sur la force de coupe est 2000 N ce qui donne une valeur d'avance maximale $f = 0.266$ mm/dent si on

augmente la force de coupe à 2500 N la vitesse d'avance maximal permise augmente à 0.342 mm/dent ce qui devrait diminuer les valeurs des fonctions objectives.

La figure 3.11 présente la variation de la force de coupe en fonction de la profondeur de coupe et l'avance par dent en 3 dimensions.

On peut noter finalement par cette analyse qu'on peut demandé au logiciel d'optimisation de garder dans une liste des individus les plus performants qui dépassent globalement les contraintes d'un certain pourcentage, par exemple de 5 % ou 10 % et regarder comment ce pourcentage de dépassement de contrainte se répartit entre les différentes contraintes. Cette caractéristique pourrait par exemple permettre au logiciel de faire des recommandations aux utilisateurs concernant l'amélioration des fonctions objectifs.

Chapitre 4

Optimisation des nombres de passes en cas de tournage

Chapitre 4

Optimisation des nombres de passes en cas de tournage

4.1 Introduction

Dans le chapitre 2 nous avons proposé une méthode d'optimisation basée sur un critère combiné, en résolvant un problème d'optimisation avec une fonction objectif bi-critère pour l'usinage à passe unique dans le cas de tournage.

Dans ce chapitre, nous allons appliquer l'approche citée, mais pour l'optimisation des conditions d'usinage à passes multiples.

4.2 Technique d'optimisation

Nous utilisons la méthode élaborée par [Agapiou 1992b] basée sur la programmation dynamique pour laquelle nous avons introduit des modifications et développé un programme. La valeur optimale du nombre de passes, la vitesse, l'avance et la profondeur de coupe pour chaque passe représentent les variables de décision.

C'est un problème à quatre variables où le nombre de passe et la profondeur de coupe pour chaque passe sont déterminés à l'aide de la procédure de la programmation dynamique.

La vitesse de coupe optimale ainsi que l'avance optimale pour chaque passe sont déterminées en utilisant la méthode du critère combiné par algorithme génétique.

Le concept de la programmation dynamique est très utile pour le traitement du problème à plusieurs passes dans le cas du tournage.

La profondeur de coupe totale est divisée en N sections égales à $d : d = D_c/N$

La variable de décision qui est la profondeur de coupe d_c à enlever par passe i est représentée par $d(i, j)$ et la variable d'état qui est le diamètre de la pièce à la passe i est représenté par D_i .

Le $d(i, j)$ signifie que la profondeur de coupe commence au diamètre D_i et contient j sections de dimension d .

Par conséquent la profondeur de coupe totale D_c est divisée en N sections égales qui sont les N états de décision discrets pour la programmation dynamique.

4.3 Optimisation des nombres de passes par programmation dynamique

En général lorsque la passe commence de la section i et se termine a la section q la fonction multi-objective optimal est donne par :

$$U(i, j) = W_1 C_u(i, j) + W_2 T_u(i, j) \tag{4-1}$$

avec $j=i - q$, j est le nombre de sections de taille d

Ce pendant, l'optimisation à passe simple est généralement considéré pour les quelque premières étapes de la procédure de la programmation dynamique ou d_c peut être enlevée en une seule passe.

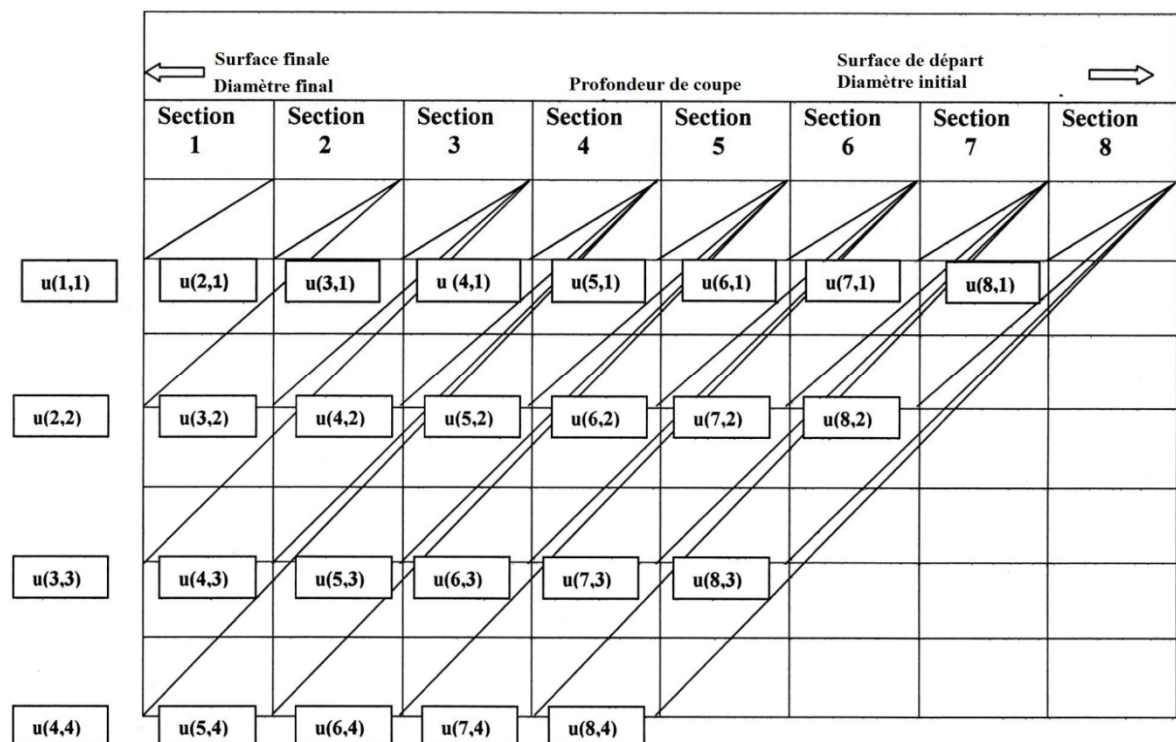


Figure 4.1 Schéma de décomposition de la profondeur de coupe totale en 8 sections pour la programmation dynamique.

- Le coût de la production par passe est donné par :

$$C_u(i, j) = C_0 \cdot A \cdot V^{-1}(i, j) \cdot f^{-1}(i, j) + A \cdot V^{\left(\frac{1}{\alpha_3} - 1\right)}(i, j) \cdot f^{\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_3} - 1\right)}(i, j) \cdot d^{\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_3}\right)}(i, j) \cdot K^{\left(-\frac{1}{\alpha_1}\right)}(i, j) \cdot (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) + C_0 (t_h + t_R) \quad (4.2)$$

- Le temps de production est donnée par

$$T_u(i, j) = A \cdot V^{-1}(i, j) \cdot f^{-1}(i, j) + A \cdot V^{(1-\alpha_3)/\alpha_3}(i, j) \cdot f^{(\alpha_1 - \alpha_3)/\alpha_3}(i, j) \cdot d_c^{(\alpha_2/\alpha_3)}(i, j) \cdot K^{(-1/\alpha_3)} \cdot t_{cs} + t_h + t_R \quad (4.3)$$

Avec $A = \frac{\pi \cdot D \cdot L(i, j)}{1000}$ et $d(i, j) = d_c = j \cdot d$

La longueur de coupe reste toujours constante pour toute les passes d'usinage $L(i, j) = L$

Le diamètre pour chaque passe est donnée par

$$D_i = D - 2(N + j - i) \cdot d = D_0 + 2q \cdot d \quad \text{et} \quad D_{i-1} = D_i - j \cdot d \quad (4-4)$$

Pour l'usinage a plusieurs passes si M est le nombre de passes utilisée pour effectuer l'opération de tournage, le coût de production total et le temps de production total sont donné par :

$$C_u = \sum_{k=1}^M \left[C_0 (t_m(i, j)_k + t_R) + \frac{t_m(i, j)_k}{T(i, j)_k} (C_0 t_{cs} + C_t) \right] + C_0 t_h \quad (4.5)$$

$$T_u = \sum_{k=1}^M \left[t_m(i, j)_k + t_R + \frac{t_m(i, j)_k}{T(i, j)_k} t_{cs} \right] + t_h \quad (4.6)$$

k est l'indice indiquant le numéro d'une passe quelconque.

Le temps machine pour chaque passe est :

$$t_m(i, j) = \frac{\pi (D_i)_k L(i, j)_k}{1000 V(i, j)_k f(i, j)_k} \quad (4.7)$$

Les étapes et les itérations de la programmation dynamique sont présentées dans une matrice triangulaire inférieur de dimension $(N \times N)$.

Les éléments (i, j) de la matrice représentent respectivement la section du diamètre de démarrage et le diamètre des sections usinées pour une passe quelconque.

La représentation schématique du procédure de la programmation dynamique est donnée par le diagramme de la figure (4.1) ou D_c est divisé en huit sections égales ($N=8$).

Il est connu qu'au dessous d'une certaine valeur de profondeur de coupe $DMOP$, pour un couple spécifique outil-matière, l'usinage à passe simple est optimal.

La valeur maximale de la profondeur de coupe $DMAXP$ est aussi donnée ou connue (dépend de la force de coupe et la puissance de la machine maximale), a matrice triangulaire inférieure pour l'exemple décrit dans la figure (4.1) est donnée par :

$$U(i, j) = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ou X représente les valeurs de la fonction objective, les éléments de la diagonale représentent les passes simples possibles. Les éléments : 21, 31 et 32 sont nuls puisque la profondeur de coupe pour une seule passe donnée d_c est inférieure à $DMOP$ et les éléments : 55, 65, 66, 75, 76, 77, 85, 86, 87 et 88 sont nuls puisque la profondeur de coupe pour une seule passe donnée dc est supérieur a $DMAXP$. De la même manière, les vitesses de coupe et les avances sont aussi rangées dans deux matrices triangulaires inférieures séparées.

Nous introduisons les notations suivantes :

$$U(1,1) = UOP(1), U(2,2) = UOP(2), \dots, U(8, 8) = UOP(8).$$

En utilisant la stratégie de la programmation dynamique, en supposant que l'optimum est obtenue a partir de la i^{me} section, ($1 < i < N$) jusqu'au diamètre final (interne) de la première section, les étapes de la méthode de la programmation dynamique à suivre sont les suivantes:

Etape 1 : Pour une profondeur de coupe inférieure a $DMOP$ tel que :

$d(i, i) = i.d \leq DMOP$, on calcule les fonctions objectives correspondantes $UOP(i)$ pour des opérations de finition d'une seule passe est on continue avec les étapes suivantes.

Etape 2 : Pour des profondeurs de passe $DMOP < id \leq DMAXP$: on calcule les fonctions objectives correspondantes $u(i, j)$ pour des opérations d'une seule passe de finition.

Etape 3 : Par la suite on évalue les calculs des fonctions objectives pour des opérations de plusieurs passes telle que :

$$UOP(i) = UOP(i - r) + u(i, r) \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, p \quad (4-8)$$

Avec :

$$p = \min \{i-1, DMAXP/d\} \quad (4-9)$$

$UOP(i - r)$ est la fonction "objective" minimal allant de la section $(i - r)$ jusqu'a la première section, $u(i, r)$ est la fonction "objective" d'une seule passe allant de la section (i) a la section $(i - r)$ avec une profondeur de coupe $dc = r.d$.

Etape 4 : On continue ce processus pour $i = DMOP/d \dots \dots \dots, N$.

L'approche basée sur la programmation dynamique est décrite par l'algorithme de la figure 4.2. On remarque comment les sections optimales sont sélectionnées.

La formulation mathématique de ces fonctions est comme suit :

L'optimum aux sections 1 a 3 est obtenue avec une seule passe, puisqu'il est supposé que :

$$d(i, i) \leq DMOP, \text{ les sections } i = 1, 2, 3 \text{ formant une seule branche.}$$

Dans la 4^{eme} section pour $i = 1, 2, 3$ les résultats sont données en quatre branches :

$$UOP(2) + u(4,2) > UOP(4) > UOP(3) + u(4,1) > UOP(1) + u(4, 3) \quad (a)$$

L'optimum est obtenu par l'équation :

$$UOP(4) = UOP(1) + u(4, 3) \quad (b)$$

$u(4, 3)$ représente la branche de la 4^{ème} section connectée a la 1^{ère} section, et $UOP(1)$ correspond a la branche de la 1^{ère} section qui est connectée au diamètre final $D0$.

En répétant la procédure a chaque itération on obtient les résultats suivants :

$$UOP(5) = UOP(2) + u(5, 3) \quad (c)$$

$$UOP(6) = UOP(4) + u(6, 2) \quad (d)$$

$$UOP(7) = UOP(5) + u(7, 2) \quad (e)$$

$$UOP(8) = UOP(4) + u(8, 4) \quad (f)$$

La 6^{ème} section est non connectée a $D0$ puisque $d(6, 6)$ est plus grand que $DMAXP$.

De même la 7^{ème} et la 8^{ème} section sont non connectées a la 1^{ère} section et a $D0$ puisque $d(7; 6)$, $d(7; 7)$, $d(8; 8)$, $d(8; 7)$ et $d(8; 6)$ sont plus grands que $DMAXP$.

On remplaçant (b) dans (f) on obtient :

$$UOP(8) = u(8; 4) + u(4; 3) + UOP(1) \quad (g)$$

L'équation (g) donne le nombre de passes optimum $M = 3$, deux passes pour les opérations d'ébauches et une passe pour la finition avec les profondeurs de coupe respectivement :

$$d(8, 4) = 4d, \quad d(4, 3) = 3d \quad \text{et} \quad d(1, 1) = d, \quad \text{avec une profondeur de coupe totale :}$$

$$D_c = 4d + 3d + d = 8d.$$

4.4 Application et résultats

Pour trouver le nombre de passes optimal nous avons développé un programme en Langage fortran dont l'organigramme est donné par la figure 4.2.

Dans le but de tester l'influence du nombre de sections sur la valeur optimale de nombre de passe nous avons divisé la profondeur de coupe totale $D_c = 10,16$ mm successivement en 4, 8, 10 et 12 sections égales pour une longueur de la pièce $L = 203$ mm et un diamètre $D = 152$ mm.

Les paramètres d'usinage sont mentionnés dans le tableau 4.1.

Le tableau 4.2 représente les valeurs des vitesses d'avance et vitesses de coupe qui correspondent aux différentes profondeurs de coupe calculées par la méthode des Algorithmes génétique.

Les limitations sur les contraintes sont les suivantes [Agapiou, 1992b] :

a) Limitations sur la vitesse d'avance :

$$f \geq f_{min} \quad , \quad f \leq f_{max}$$

b) Limitations sur la vitesse de coupe :

$$V \geq V_{min} \quad , \quad V \leq V_{max}$$

c) Limitations sur la profondeur de coupe :

$$d_c \geq d_{cmin} \quad , \quad d_c \leq d_{cmax}$$

d) Limitations sur la puissance maximale admise par la machine-outil :

$$0.0373.V^{0.91} . f^{0.78} . d_c^{0.75} \leq HP_{max}$$

e) Limitations sur l'effort de coupe :

$$844.V^{-0.1013} . f^{0.725} . d_c^{0.75} \leq F_{max}$$

f) Limitations sur l'état de surface :

$$14.785.V^{-1.52} . f^{1.004} . d_c^{0.25} \leq SR_{max}$$

g) Limitations sur la température de :

$$74.96.V^{0.4} . f^{0.2} . d_c^{0.105} - 17.8 \leq \Theta_{max}$$

Les conditions d'usinage optimales pour les différents nombres de sections 4, 8, 10, 12 sont mentionnées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.1 : Paramètres d'usinages [Agapiou, 1992b]

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
L	203 mm	t_R	0.13 min/pass
D	152 mm	t_h	1.5 min/pièce
V_{min}	30/min	θ_{max}	500 °C
V_{max}	200 m/min	a_1	0.29
f_{min}	0.254 mm/ tour	a_2	0.35
f_{max}	0.762 mm/tour	a_3	0.25
SF_{max}	2 μm	K	193.3
SR_{max}	8 μm	t_{cs}	0.5 min/arrêt
HP_{max}	5KW	C_o	0.1 s/min
F_{max}	1100N	C_t	0.5 s/arrête
C_t	0.5 s/arrête	w_1	0.6
		w_2	0.4

Tableau 4.2 Vitesses de coupe et avances pour des profondeurs de coupe données

d_c mm	$SF_{max} = 2 \mu m$		$SR_{max} = 8 \mu m$	
	f	V	f	V
0.85	0.437	197.55	0.761	149.93
1.02	0.409	195	0.761	142.59
1.27	0.377	191	0.76	134.82
1.69	0.339	187.16	0.738	126.34
2.03	0.317	184.56	0.695	123.96
2.54	0.291	181	0.641	122.48
3.05	0.333	178.93	0.598	120.30
3.38	0.262	177.15	0.576	119.58
3.81	0.251	174	0.552	118.62
4.06	0.245	174.16	0.531	116.74
4.23	0.242	174.16	0.521	116.16
5.08	0.226	170.71	0.461	109.94

Pour voir l'influence du nombre de sections N utilisée par la technique de la programmation dynamique sur le coût et le temps d'usinage total on va diviser la profondeur de coupe total à usiner en 4, 8, 10 et 12.

1- En premier cas on divise N en 4 sections égales :

$$N = 4$$

$$DMOP = 2.54 \text{ mm}$$

$$DMAXP = 5.08 \text{ mm}$$

La longueur totale à usiner $L=203 \text{ mm}$

L'exécution du programme donne les résultats suivants :

$$uop(1) = u(1,1)$$

$$uop(2) = uop(1) + u(2,1)$$

$$uop(3) = uop(1) + u(3,2)$$

$$uop(4) = uop(2) + u(4,2)$$

Ce qui donne : $UOP(4) = u(4,2) + u(2,1) + u(1,1)$

Avec $d(4,2) = 2d$, $d(2,1) = 1d$ et $d(1,1) = 1d \Rightarrow Dc = 2d + d + d = 4d$

Tableau 4.3 Paramètres d'usinage optimal pour $N = 4$

N° passes	d_c (mm)	f (mm/tour)	V (m/min)	C_u (\$)	T_u (min)
1	5.08	0.461	109.94	0.599	2.285
2	2.54	0.641	122.48	0.341	1.438
3	2.54	0.291	181	0.767	2.264
Coût et temps total				1.858	7.486

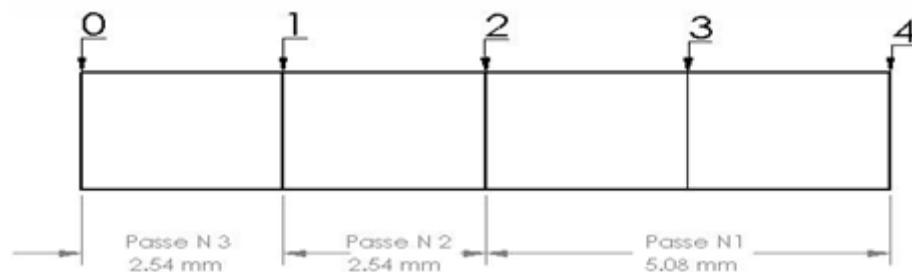


Figure 4.3 Nombre de passe optimal pour $N = 4$ division égales

2- En deuxième cas on devise N en 8 sections égales :

$$N = 8$$

$$DMOP = 3.81 \text{ mm}$$

$$DMAXP = 5.08 \text{ mm}$$

La longueur totale à usiner $L=203 \text{ mm}$

L'exécution du programme donne les résultats suivants :

$$uop(1) = u(1,1)$$

$$uop(2) = u(2,2)$$

$$uop(3) = u(3,3)$$

$$uop(4) = uop(1) + u(4,3)$$

$$uop(5) = uop(1) + u(5,4)$$

$$uop(6) = uop(5) + u(6,3)$$

$$uop(7) = uop(5) + u(7,2)$$

$$uop(8) = uop(4) + u(8,4)$$

Ce qui donne :

$$UOP(8) = u(8,4) + u(4,3) + u(1,1)$$

Tableau 4.4 Paramètres d'usinage optimal pour $N = 8$

N° passes	d_c (mm)	f (mm/tour)	V (m/min)	C_u (\$)	T_u (min)
1	5.08	0.461	109.94	0.599	2.285
2	3.81	0.552	118.62	0.477	1.740
3	1.27	0.377	191	0.406	1.546
Coût et temps total				1.632	7.071

Donc si on divise la profondeur de coupe total D_c en 8 sections égales il résulte un nombre de passe optimal égale a 3 ; deux passes pour les opérations d'ébauche et une pour la finition (figure 4.4).

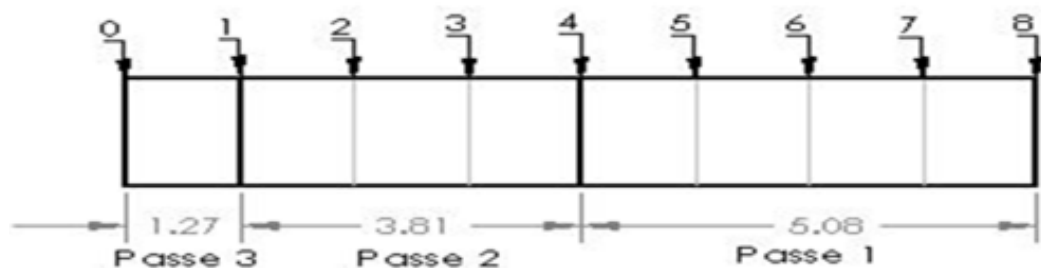


Figure 4.4 Nombre de passe optimal pour $N = 8$ divisions égales

3- En troisième cas on devise $D_c = 10.16$ mm en 10 sections égales :

$$N = 10$$

$$DMOP = 3.048 \text{ mm}$$

$$DMAXP = 5.08 \text{ mm}$$

La longueur totale à usiner $L=203$ mm

L'exécution du programme donne les résultats suivants :

$$uop(1) = u(1,1)$$

$$uop(2) = u(2,2)$$

$$uop(3) = u(3,3)$$

$$uop(4) = uop(1) + u(4,3)$$

$$uop(5) = uop(1) + u(5,4)$$

$$uop(6) = uop(1) + u(6,5)$$

$$uop(7) = uop(3) + u(7,4)$$

$$uop(8) = uop(3) + u(8,5)$$

$$uop(9) = uop(5) + u(9,5)$$

$$uop(10) = uop(5) + u(10,5)$$

Ce qui donne :

$$UOP(10) = u(10,5) + u(5,4) + u(1,1)$$

Tableau 4.5 Paramètres d'usinage optimal pour $N = 10$

N° passes	d_c (mm)	f (mm/tour)	V (m/min)	C_u (\$)	T_u (min)
1	5.08	0.457	109.94	0.599	2.285
2	4.06	0.531	116.74	0.495	1.818
3	1.02	0.409	195	0.336	1.38
Coût et temps total				1.581	6.982

Donc si on divise la profondeur de coupe total D_c en 10 sections égales il résulte un nombre de passe optimal égale a 3 ; deux passes pour les opérations d'ébauche et une pour la finition (figure 4.5).

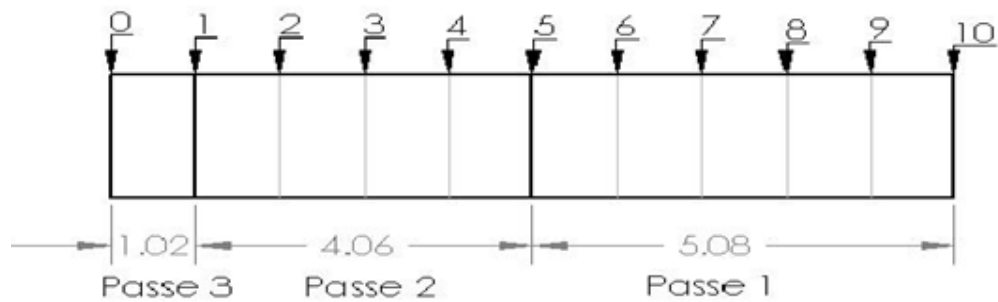


Figure 4.5 Nombre de passe optimal pour $N = 10$ divisions égale

4- On devise $D_c=10.16$ mm en 12 sections égales :

$$N = 12$$

$$DMOP = 3.38 \text{ mm}$$

$$DMAXP = 5.08 \text{ mm}$$

La longueur totale à usiner $L=203$ mm

$$uop(1) = u(1,1)$$

$$uop(2) = u(2,2)$$

$$uop(3) = u(3,3)$$

$$uop(4) = u(4,4)$$

$$uop(5) = uop(1) + u(5,4)$$

$$uop(6) = uop(1) + u(6,5)$$

$$uop(7) = uop(1) + u(7,6)$$

$$uop(8) = uop(2) + u(8,6)$$

$$uop(9) = uop(3) + u(9,6)$$

$$uop(10) = uop(5) + u(10,5)$$

$$uop(11) = uop(6) + u(11,5)$$

$$uop(12) = uop(6) + u(12,6)$$

Ce qui donne :

$$UOP(12) = u(12,6) + u(6,5) + u(1,1)$$

Tableau 4.6 Paramètres d'usinage optimal pour $N = 12$

N° passes	d_c (mm)	f (mm/tour)	V (m/min)	C_u (\$)	T_u (min)
1	5.08	0.461	109.94	0.599	2.85
2	4.23	0.521	116.16	0.511	1.859
3	0.85	0.437	197.55	0.288	1.263
Coût et temps total				1.548	6.901

Donc si on divise la profondeur de coupe total D_c en 12 sections égales il résulte un nombre de passe optimal égale à 3 ; deux passes pour les opérations d'ébauche et une pour la finition (figure 4.6).

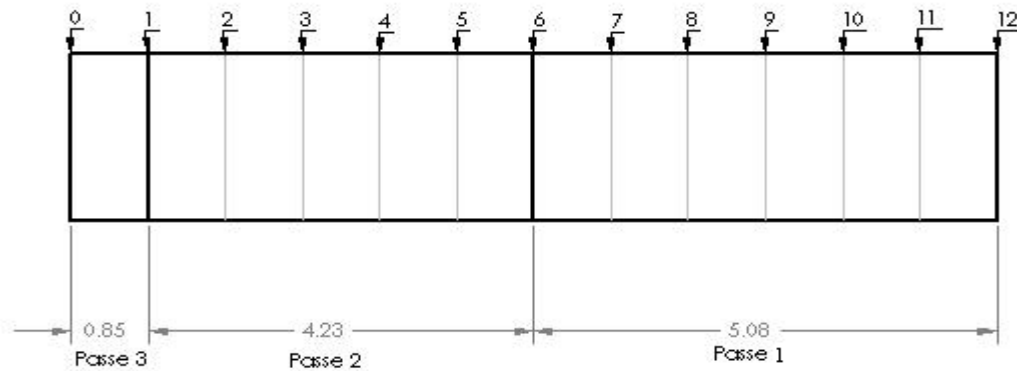


Figure 4.6 Nombre de passe optimal pour $N = 12$ divisions égale

4.4 Conclusion

L'optimisation du processus d'usinage à plusieurs passes a été résolue d'une manière efficace à travers l'usage de la programmation dynamique, cette procédure a permis de déterminer le nombre de passes optimal pour une profondeur de coupe total donnée.

L'influence du nombre de sections N utilisée par la technique de la programmation dynamique est observée en comparant les résultats des tableaux précédents pour $N = 4, 8, 10, 12$.

En augmentant le nombre de sections N de 4 à 8 il en résulte une diminution du coût et temps de production total de 12.16% et 5.54%, de même l'augmentation du nombre de sections de 8 à 10 provoque une réduction du coût et temps de production totale d'environ 3.125% et 1.25%.

Par contre si on augmente le nombre de sections de 10 à 12 on remarque que la valeur de la deuxième passe devienne importante $d_c = 4.23$ mm et on remarque une légère diminution du coût et temps total.

Finalement on constate que le nombre de passe optimum et les conditions d'usinages correspondantes en respectant toutes les limitations des contraintes pour une profondeur de coupe totale égale à 10.16 mm est obtenue avec le nombre de sections $N=12$.

Chapitre 5

Optimisation multi-stage des conditions d'usinage

Chapitre 5

Optimisation multi stage des conditions d'usinage

5.1 Introduction

La majorité des produits sont fabriqués dans les lignes de transfert conventionnel ou récemment dans des lignes de transfert flexible (FTL), (Flexible transfert line), ou systèmes de manufacturiers flexibles (FMS) [Agapiou, 1992a].

Donc la productivité dans les FTL ou FMS est affectée par les conditions d'usinage, le transfert des pièces à usiner entre les machines ou par la vitesse de transfert des mécanismes. Donc l'optimisation des conditions d'usinage joue un rôle très significatif non seulement dans le temps des cycles de production mais aussi dans la qualité des produits. Ce qui résulte que l'optimisation multi-stage des systèmes d'usinage. Devient très important pour augmenter les taux de production.

Le problème d'équilibrage des systèmes de fabrication à phase multiple consiste à organiser les tâches du processus au niveau de chaque poste de travail de telle sorte que le temps total requis pour chaque station similaire est approximativement le même.

L'analyse fondamentale des systèmes d'usinage (multi-stage) a été présentée par [Hitomi, 1971] où la vitesse de coupe optimale et les cycles de temps ont été analysés sur la base des trois critères suivants :

- 1) Coût de production minimal
- 2) Taux de production maximal
- 3) Cycle de temps optimal

Cette Méthode ne tient pas compte de l'optimisation des majorités des paramètres de coupe telle que l'avance et la profondeur de coupe, mais par contre il utilise des simplifications approximatives dans l'ordre pour optimiser la vitesse de coupe et l'avance, Le cycle du temps est contrôlé par le temps de production optimal pour chaque phase.

Les conditions de coupe optimales pour réaliser une pièce avec des opérations d'usinage dans un système dit multi-stage sont déterminées par l'utilisation d'une approche basée sur l'optimisation du coût de production pour chaque opération en gardent le temps de production le plus bas possible (Stage I) et en deuxième lieu par l'optimisation du temps de production en gardent le coût le plus bas possible (stage II), donc on aura le choix de prendre les paramètres de coupe qui génère un temps d'exécution minimal ou l'inverse c'est-à-dire, les paramètres qui donne un coût de production minimal. Le choix et la décision seront présent suivant la grandeur des lots à produire, les capacités des machines, le volume des commandes et les délais de livraison du produit fini.

L'approche fournie à l'utilisateur le temps et le coût d'usinage, et les paramètres de coupe correspondantes suivant deux critères économique (temps et coût d'usinage) tout en respectant les limitations des contraintes et le temps du cycle prédéfini.

5.2 Les systèmes de production flexibles

L'optimisation de performances d'un atelier flexible repose souvent sur la détermination des valeurs optimales de variables de décision permettant de répartir de façon équilibrée les flots de produits dans l'atelier.

Connaissant les différents types de pièces à fabriquer et les quantités de production désirées, ces variables peuvent servir en premier lieu à améliorer la configuration d'un atelier flexible (nombre de machines par station, capacités des stocks), et ensuite à optimiser les routages de produits sur les machines [Smaili et Hennet, 1991].

On peut inclure différents aspects dans le terme général de flexibilité [Parent, 2007].

- La flexibilité des machines indique la facilité pour une machine à exécuter des opérations différentes; elle est caractérisée par le nombre d'opérations qui sont exécutées sur un équipement et par le temps de mise en course nécessaire au changement d'opération, qui doit bien sûr être le plus court possible.
- La flexibilité des opérations est la facilité à faire une séquence différente d'opérations afin d'arriver aux mêmes produits finis. Elle est notamment caractérisée par le type de design, le temps pour implanter une séquence d'opérations et l'hierarchie du système de contrôle informatique.
- La flexibilité des volumes est la capacité de fabriquer différent volume de la même pièce.
- La flexibilité de l'expansion est la facilité de prendre de l'expansion au niveau du plancher d'usine sans avoir à reconfigurer l'aménagement existant. Elle est augmentée par la réduction de l'investissement nécessaire pour accroître la capacité de l'usine.
- La flexibilité des cheminements est mesurée par le nombre de chemins efficaces possibles que peut prendre la matière première afin de se transformer en produits finis.
- La flexibilité du procédé représente le volume d'une pièce qu'on peut produire dans le système sans avoir à faire de mise en course. Elle regroupe directement la flexibilité des machines, des équipements de manutention, des opérations et des cheminements.
- La flexibilité du produit relève de sa conception, les différents produits d'une compagnie doivent être très similaires dans les composantes pour minimiser les niveaux d'inventaire des pièces nécessaires à la production. Les gabarits doivent également être flexibles afin de pouvoir fabriquer plusieurs pièces sur un même gabarit sans devoir le changer.
- La flexibilité des programmes est le temps qu'un programme peut s'exécuter sans devoir subir d'intervention externe (humaine).
- La flexibilité de la production regroupe les catégories précédentes, car elle est définie comme étant la capacité du système à produire des pièces différentes sans avoir à faire des investissements importants en capitaux. La capacité à

faire les changements d'outils (avec les magasins d'outils) est également comprise dans ce type de flexibilité.

- La flexibilité du marché est la facilité de s'adapter au changement des conditions du marché. Ceci veut dire le temps pour s'adapter au changement de commandes des clients afin de répondre à leurs besoins.

5.3 Formulation du model mathématique de base

Les variables de décisions associées au système d'usinage sont présentées dans une matrice de dimension ($N \times K$), Les lignes représentent les opérations d'usinage et les colonnes représentent les variables d'usinage (vitesses de coupe, avance profondeur de coupe) pour toutes les stations (i.e., s_{ik} correspond V_i, f_i, d_{c_i} respectivement pour $k = 1, 2, \dots, K$) avec $i = 1, 2, \dots, N$.

5.3.1 Fonction objective

Le coût de production pour une opération est la somme des coûts de l'usinage : Coût de l'outillage, le coût généré par (le temps de changement d'outil, temps de manipulation et le temps de retour rapide).

$$C_{ui} = C_0 \cdot t_{m_i} + \frac{t_{m_i}}{T_i} \cdot (C_0 \cdot t_{cs_i} + C_t) + C_0 \cdot (t_{h_i} + t_{R_i}), \quad \forall i. \quad (5-1)$$

Le temps de coupe pour tournage, alésage et perçage

$$t_{m_i} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot L_i}{1000 \cdot V_i \cdot f_i} \quad (5-2)$$

Et pour les opérations de fraisage

$$t_{m_i} = \frac{\pi \cdot D_i \cdot (L + \epsilon)_i}{1000 \cdot N_{t_i} \cdot V_i \cdot f_i} \quad (5-3)$$

Avec D_i et L_i représente la largeur et la longueur de la pièce.

ϵ_i et N_{t_i} le trajet du retour rapide de l'outil et le nombre de dents d'outil.

T_i Représente la durée de vie de l'outil pour chaque opération d'usinage, le temps de coupe pour les opérations de taraudage est donnée par l'équation (5-2) ou la vitesse

d'avance f_i est remplacé par le pas de filet m_i l'équation général de la durée de vie de l'outil qui sera appliqué pour tout le processus est :

$$T_i(s) = R_i \cdot \sum_{k=1}^k s_{ik}^{aki} \quad \forall i, \forall k, s \in \{v, f, d_c, \dots\} \quad (5-4)$$

R_i : Représente les constantes de la durée de vie de l'outil.

La durée de vie de l'outil dans l'usinage multi-stage et un facteur critique et spécifiquement quand les outils seront change en groupe dans un intervalle de temps spécifique (chaque groupe de travail, jour, semaine, etc.....)

Le temps total de production pour chaque étape est :

$$T_{ui} = t_{mi} + t_{csi} \cdot \left(\frac{t_{mi}}{T_i} \right) + t_{hi} + t_{Ri} \quad \forall i. \quad (5-5)$$

5.3.2 Limitations Contraintes

Les limitations physique pour les conditions d'usinage sont toujours présents pour l'optimisation des fonctions objectifs telle que la force de coupe maximale, la température de coupe, la profondeur de coupe, la vitesse, l'avance, la puissance de la machine, les vibrations et les contrainte de qualité comme l'état de la surface fini.

En général les contraintes sont exprimées par la forme Taylorienne par l'équation suivante :

$$G_{ij}(s) = B_{ij} \cdot \sum_{k=1}^k s_{ik}^{b_{kij}} \leq E_{ij} \quad \forall i, \forall k, \forall j \quad (5-6)$$

telle que B_{ij} et b_{kij} sont des constantes empiriques représentés par les éléments de la matrice $N (M_i \times K)$

M_i : Le nombre de contraintes disponible pour la i^{eme} opération d'usinage. ($j = 1, 2, \dots, M_i$).

5.4 Technique d'optimisation

Le problème d'optimisation de l'usinage est représenté comme suit [Agapiou, 1992a]:

$$U(\underline{s}) = \sum_{i=1}^N U_i(s), \quad \forall i \tag{5-7}$$

Soumis a des contraintes :

$$\mathcal{F}_{ij}(s) = G_{ij}(s) - E_{IJ} < 0, \quad \forall i, \forall j \tag{5-8}$$

$$\forall i: T_{ui} \leq t_x \tag{5-9}$$

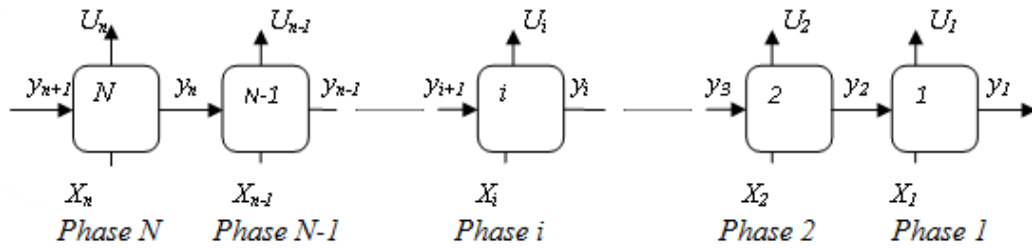


Figure 5.1 Les étapes à suivre dans les systèmes à plusieurs phases d'usinage.

La contrainte représentée par l'équation (5-9) est appliquée seulement quand le temps de production de la i^{eme} opération est supérieur au temps prédéfini du cycle du système t_x :

$$U(\underline{s}^*) = \min_{s^* \in S} U(\underline{s}^*) \quad \text{ou} \quad U: S \rightarrow E_i \tag{5-10}$$

$$S = \{ \underline{s}^* \in E_i^n / \mathcal{F}(\underline{s}^*) \leq 0 \text{ et } H(\underline{s}^*) = 0 \}$$

Ou $\underline{s}^* \in [V, f, d_c, \dots]$ donc \underline{s}^* appartient au vecteur des variable de décision de N dimension, et les conditions optimale de coupe sont donnée dans la matrice \underline{s}^*

5.5 Formulation du problème

La figure 5.1 représente un système d'usinage à phases multiples (N phases) et chaque phase correspond à une étape d'usinage.

Le processus de décision est caractériser par les paramètres d'entrée (input) $y(D, d_c, L, \dots)$ et les variables de décision $x(v, f)$. les variables de décision optimal, sont déterminée par l'optimisation de la fonction objective $U(x, y)$.

Donc la résolution du problème consiste à obtenir les valeurs optimales de la vitesse de coupe et l'avance de coupe pour chaque phases d'usinage sur la base des paramètres d'entrée $y(D, d_c, L, V_b \dots)$ par l'optimisation du temps ou cout d'usinage pour chaque phase, noter bien que chaque phase peut performe plus qu'une seule opération.

5.6 Analyse du problème

- Supposons une ligne de transfère conventionnel constituer de Z stations avec N opérations ($Z \leq N$), le cycle de temps maximal t_x est composé du temps d'usinage, temps de changement d'outil et le temps de transfère entre les machines.
- Chaque pièce et composée de N opérations distribuer on ordre avec les machines ou les stations d'usinage.
- les paramètres initial tel que (les dimensions de la pièce, les propriétés mécanique de la matière des pièces, les tolérances, etc....) et les spécifications de la surface fini sont supposées connue.
- Le temps théorique prédéfini des opérations t_x est supposée bien connue .
- Les paramètres économique de chaque opération telle que le coût de machine, coût d'un arrêt de coupe, le coût d'outillage sont supposées connue.
- La duré de vie des outils et les contraintes physique pour chaque opérations sont supposées être connue a partir des travaux et expériences antérieurs.

5.6.1 Solution analytique de la fonction objective

Le modèle d'optimisation est réduit à une fonction de deux variables vitesse de coupe et avance. L'équation de la durée de vie forme Taylorienne est donnée comme suit :

$$T_i = R_i \cdot V_i^{a_{1i}} \cdot f_i^{a_{2i}} \cdot d_i^{a_{3i}}, \quad \forall i. \quad (5-11)$$

En substituent l'équation (5-11) dans l'équation (5-1) et (5-5) on obtient l'équation du temps et du coût de production respectivement.

$$C_{u_i} = C_0 \cdot \frac{A_{1i} + B_{1i}}{V_i \cdot f_i} \cdot V_i^{e_{1i}} \cdot f_i^{e_{2i}} \cdot (C_0 \cdot t_{cs} + C_{t_i}) + C_0 \cdot (t_{h_i} + t_{R_i}), \quad \forall i \quad (5-12)$$

$$T_{u_i} = \frac{A_{1i} + B_{1i}}{V_i \cdot f_i} \cdot V_i^{e_{1i}} \cdot f_i^{e_{2i}} \cdot t_{cs_i} + t_{h_i} + t_{R_i} \quad \forall i \quad (5-13)$$

Avec : $A_{1i} = \frac{\pi D_i \cdot L_i}{1000}$

L'optimisation de la fonction objective $U_i(s)=C_{u_i}$ ou $U_i(s)=T_{U_i}$ sous les contraintes présentées dans l'équation (5-6) présente le même objectif dans notre cas on va optimiser le temps de production pour chaque opérations d'usinage par la méthode des algorithmes génétique.

$$H(s) = T_{U_i} - t_x \leq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\}. \quad (5-14)$$

Cette équation a pour but de réduire le temps mort durant la production dans chaque phase d'usinage.

Le temps total de production pour toutes les opérations dans une opération doit être inférieur ou égal à t_x (le temps du cycle prédéfini):

La fonction objectif et les contraintes présent un problème d'optimisation hautement non linéaire, la méthode du simplexe n'est pas utiliser pour résoudre se problème à cause de sa complexité, donc la résolution de ce problème et faite par algorithme génétique.

Le système d'usinage multi-stage est généralement basé sur le nombre de phases et chaque phase incorpore un ou plusieurs opérations. La distribution des opérations est faite dans un ordre suivant le processus de fabrication des pièces, par exemple le perçage ou le taraudage d'un trou est généralement considéré comme deux opérations d'usinage tel que le temps d'usinage total et la somme des temps des deux opérations d'une façon individuel. Cependant ça ce n'est pas toujours vrais parce que quelque opération peuvent être combinée dans une seule phase avec un seul outil ou on utilisant (une tête a plusieurs outils, plusieurs opération avec le même outil, plusieurs passes, etc. ...)

Le problème d'optimisation d'usinage multi-stage, est considéré comme une série de simple opération et chaque opérations est optimisée individuellement les vitesses est les avances optimal sont déterminé en se basant sur le temps et ou le coût de production (équations (5-12) et (5-13)) en respectant les limitations des contraintes représenté dans l'équation (5-6).

5.7 Algorithme et étapes à suivre

L'optimisation des conditions de coupe dans un système d'usinage multi-stage se déroule sur la base du cycle de temps prédéterminé (t_x) pour chaque opération comme c'est expliquer dans les étapes suivantes :

Etape (1) : Définir tous les forme d'équation pour les durées de vie des outils et les limitations des contraintes pour chaque opération.

Etape (2) : Déterminer le nombre de passes le type d'opération est les profondeurs de coupe pour les opérations à passes multiples.

Etape (3) : Déterminé les opérations qui peut être réalisé avec des têtes à multibroches ou avec des outils combinées et le nombre de machines à utiliser.

Etape (4) : Déterminé les paramètres de coupe optimale telle que la vitesse de coupe, l'avance, pour chaque opération on se basant sur deux critères économiques coût de production et temps de production minimal comme fonction objectif.

$i \in A_s$: ou $A_s = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ et $S = \{v, f, d_c, v_b, D, \dots\}$.

Etape (5) : Calculé le coût et le temps de production pour chaque opération, on se basant sur les paramètres de coupe obtenu dans l'étape (4).

Etape (6) : Trouver l'opération q telle que $q \in \{ A_c/t_{u_q}^* \geq t_x \}$ le temps de cycle prédéfini est t_x et l'opération q ne respecte pas le cycle de temps.

5.8 Exemple Numérique

L'exemple numérique suivant a été utilisé pour le but d'analyser et comparer les résultats trouvés par la méthode élaborée par [Agapiou, 1992a].

La méthode consiste à déterminer les paramètres de coupes optimales de chaque opération en optimisant les fonctions objectives appropriées tout en respectant les limitations de contraintes et le temps prédéfini, le temps mort est considéré nul.

La méthode proposée consiste à utiliser les algorithmes génétiques pour déterminer les paramètres de coupe optimales de chaque opération et la programmation dynamique pour déterminer le nombre de passe pour les opérations à plusieurs passes, les coûts et les temps d'usinage de chaque opération sont toujours calculés à partir des valeurs optimales des paramètres de coupe trouvés par la méthode citée précédemment. Pour un système d'usinage à plusieurs phases pareil les étapes à suivre sont présentées dans le diagramme de la figure 5.2.

La pièce est en fonte grise figure 5.3, la réalisation passe par 7 phases et 10 opérations d'usinage, 6 opérations de tournage (Ebauche, demi finition et finition), 2 opérations de perçage et une opération de taraudage comme c'est indiqué dans le tableau 5.1.

Le tableau 5.2 présente les valeurs des constantes empiriques pour les durées de vie des outils pour les différentes opérations. On utilise pour le tournage 2 types d'outil le premier en UC : outil en carbure non revêtu et le deuxième en CC : outil en carbure revêtu, pour le perçage et le taraudage on utilise des outils en H.S.S (acier rapide).

Le tableau 5.3 présente les valeurs des constantes empiriques pour les différentes contraintes physiques et le tableau 5.4 présente les valeurs minimales et maximales des contraintes physiques et leurs variables suivant l'équation (5-6).

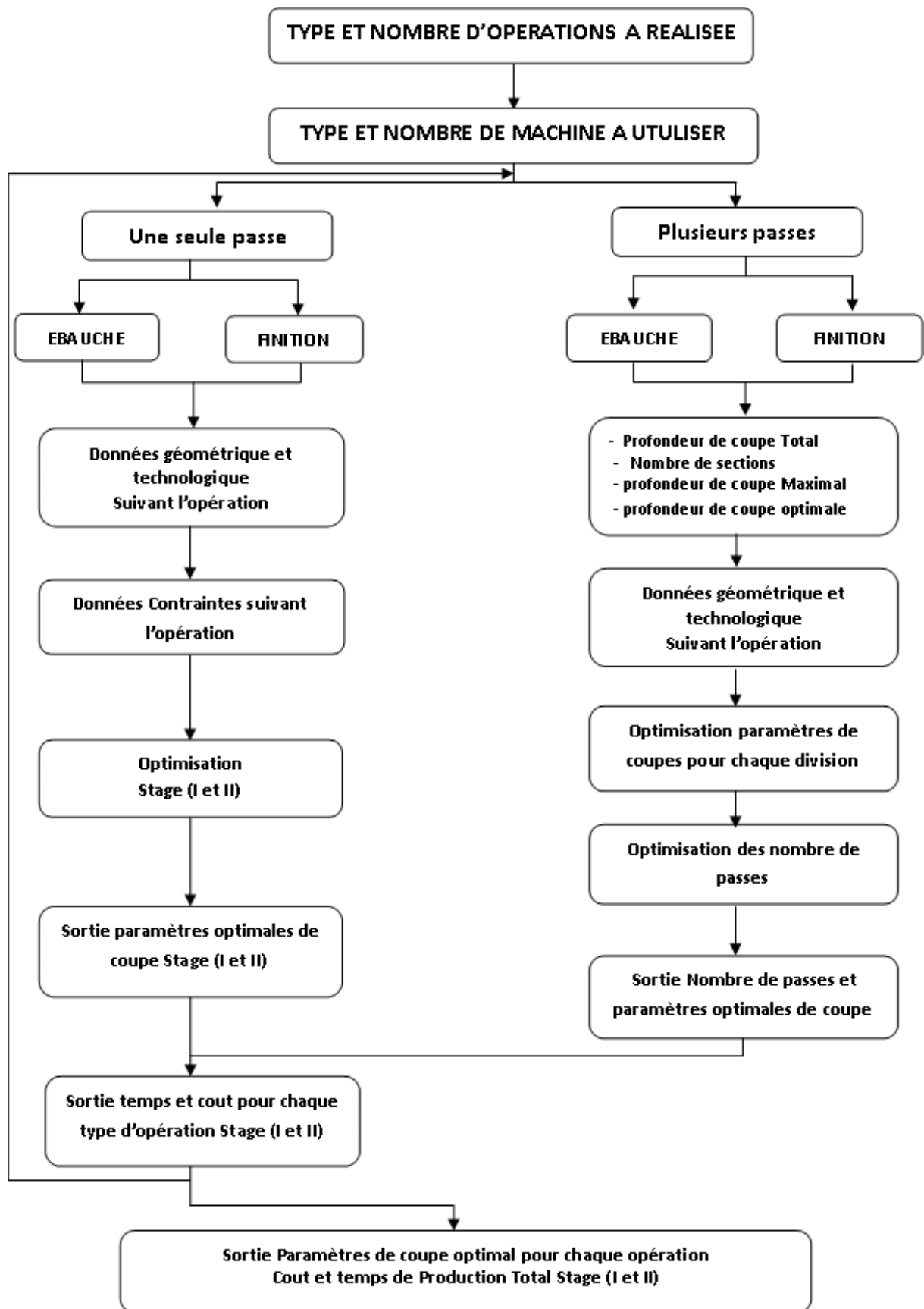


Figure 5.2 Organigramme pour la méthodologie de l'optimisation des conditions d'usinage à plusieurs phases

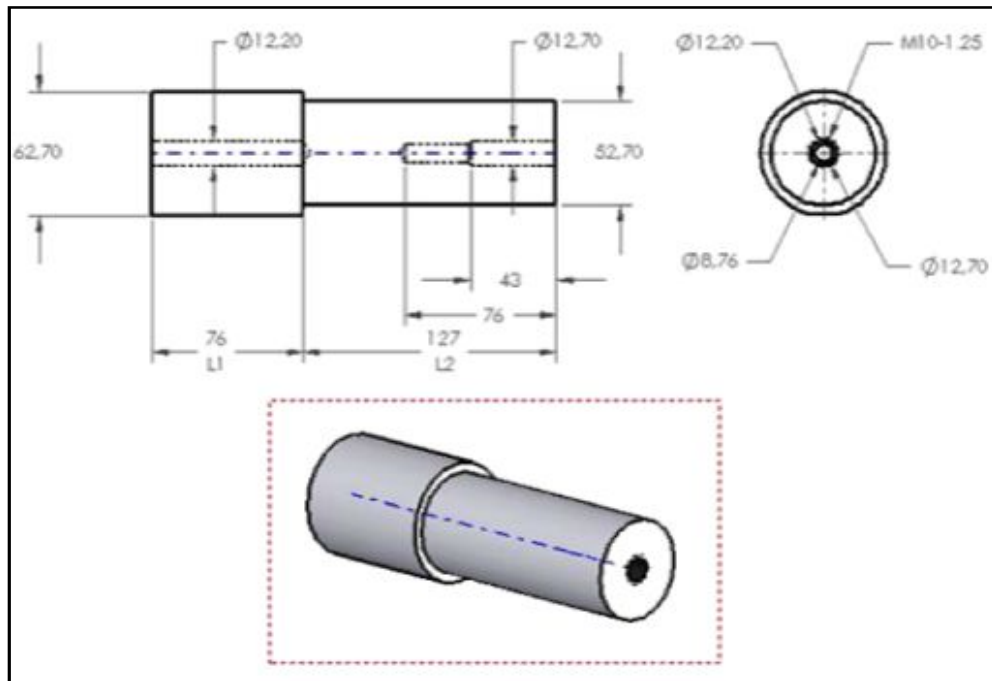


Figure 5.3 Les dimensions de la pièce finie

Le problème est résolu en se basant sur deux critères d'optimisation coût minimal (Stage I) et Temps minimal (Stage II), tout en respectant le temps de cycle prédéterminé pour chaque opération $t_x = 1 \text{ min}$, le temps mort égal à zéro.

Le tableau 5.5 présente les paramètres économiques de chaque opération, les paramètres de coupe optimal pour chaque opération trouver par Algorithme Génétique sont représentés dans le tableau 5.6.

Tableau 5.1 Dimension de la pièce pour les différentes opérations.

N° Opération	Type d'opération	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	d_c (mm)
1	Tournage ($l_1 + l_2$)	203	76	5.0
2	Tournage (l_2)	127	66	5.0
3	Tournage (l_1)	76	66	1.27
	Tournage (l_2)	127	56	1.27
4	Tournage (l_1)	76	63.5	0.38
	Tournage (l_2)	127	53.5	0.38
5	Perçage (l_1)	76	12.2	-
	Perçage (l_2)	43	12.7	-
6	Perçage (l_2)	33	8.76	-
7	Taraudage (l_2)	25	M10-1.25	-

Tableau 5.2 Les Paramètres de la durée de vie des outils pour les différentes opérations

N° Opération	Matière d'outil	Constante R_i	Exposant pour vitesse a_{1_i}	Exposant pour avance a_{2_i}	Exposant pour d_c a_{3_i}
1	U.C.	$1.396 \cdot 10^9$	-4.0	-1.16	-1.4
2	U.C.	$1.396 \cdot 10^9$	-4.0	-1.16	-1.4
3	U.C.	$1.396 \cdot 10^9$	-4.0	-1.16	-1.4
4	U.C.	$1.396 \cdot 10^9$	-4.0	-1.16	-1.4
5(l_1)	H.S.S.	$7.549 \cdot 10^{12}$	-9.8	-4.9	0.0
5(l_2)	H.S.S.	$7.549 \cdot 10^{12}$	-9.8	-4.9	0.0
6	H.S.S.	$7.549 \cdot 10^{12}$	-9.8	-4.9	0.0
7	H.S.S.	753.4	-1.825	0.0	0.0

Tableau 5.3 Les limitations et les valeurs des contraintes physiques.

Contrainte	Opération N°	Constante $B_{1_{ij}}$	Exposant vitesse $b_{1_{ij}}$	Exposant avance $b_{2_{ij}}$	Exposant d_c $b_{3_{ij}}$	Exposant diamètre $b_{4_{ij}}$
Puissance, (kW)	1, 2, 3,4	0.0373	0.91	0.78	0.75	0.0
Puissance, (KW)	5,6	0.0171	0.81.0	0.8	0.0	0.8
Force, (N)	1, 2, 3,4	844	-0.1013	0.725	0.75	0.0
Force, (N)	5.6	45	0.0	0.85	0.0	1.3
Températ (c^0)	1, 2, 3,4	75	0.4	0.2	0.105	0.0
S.F., (μm)	1, 2, 3,4	14785	-1.52	1.0	0.25	0.0

Tableau 5.4 Les paramètres des équations des contraintes physiques.

N° opération	Les limites des vitesses		Les limites des avances		Puissance Max KW	Force Max N	Température Max C^0	S.R. Max μm
	Min	Max	Max	Min				
1(a)	30	120	0.03	0.8	7.5	1100	500	7.6
1(b)	120	180	0.03	0.8	7.5	1100	600	7.6
2	30	120	0.03	0.8	7.5	1100	500	7.6
3	30	185	0.03	0.8	3.7	1100	600	2.5
4	30	220	0.03	0.8	3.7	1100	600	0.76
5(l_1)	6	30	0.025	0.28	1.12	1640	-	-
5(l_2)	6	30	0.025	0.28	1.12	1640	-	-
6	6	30	0.025	0.28	1.12	1640	-	-
7	4.5	17	-	-	-	-	-	-

Tableau 5.5 Les paramètres économique des opérations

paramètre	N° Opération							
	1	2	3	4	5(l_1)	5(l_2)	6	7
t_{co_i} (min)	0.5	0.5	0.5	0.5	2.0	2.0	2.0	2.0
t_{r_i} (min)	0.05	0.035	0.05	0.05	0.025	0.02	0.025	0.025
t_{h_i} (min)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
c_o (s)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
c_{t_i} (s)	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	4.0	4.0

Tableau 5.6 Paramètres de coupes optimales trouvé pour les différentes opérations

N°	Type d'opération	Stage I			Stage II		
		d_c (mm)	V (m/min)	f (mm/tour)	d_c (mm)	V (m/min)	f (mm/tour)
1	Tournage ($l_1 + l_2$)	5	110	0.42	5	115	0.44
2	Tournage (l_2)	5	112	0.43	5	118	0.44
3	Tournage (l_1)	1.27	160	0.35	1.27	181	0.42
	Tournage (l_2)	1.27	160	0.35	1.27	181	0.42
4	Tournage (l_1)	0.38	210	0.22	0.38	216	0.23
	Tournage (l_2)	0.38	210	0.22	0.38	216	0.23
5	Perçage (l_1)	-	23	0.28	-	25	0.28
	Perçage (l_2)	-	23	0.28	-	25	0.28
6	Perçage (l_2)	-	22	0.30	-	30	0.30
7	Taraudage (l_2)	-	22	0.30	-	28	0.3

Tableau 5.7 Coût et temps de production trouvé pour les différentes opérations

N°	Type d'opération	Stage I		Stage II	
		Coût (\$)	Temps (min)	Coût (\$)	Temps (min)
1	Tournage ($l_1 + l_2$)	1.25	1.532	1.380	1.479
2	Tournage (l_2)	0.602	0.961	0.694	0.886
3	Tournage (l_1)	0.220	0.558	0.262	0.497
	Tournage (l_2)	0.292	0.687	0.351	0.601
4	Tournage (l_1)	0.156	0.588	0.158	0.558
	Tournage (l_2)	0.200	0.706	0.202	0.695
5	Perçage (l_1)	0.145	0.682	0.149	0.651
	Perçage (l_2)	0.124	0.505	0.165	0.456
6	Perçage (l_2)	0.075	0.363	0.108	0.347
7	Taraudage (l_2)	0.080	0.363	0.098	0.356
Total		3.144	6.945	3.592	6.526

NOTE : Stage I : Optimisation par coût de production minimal.

Stage II : Optimisation par temps de production minimal.

Le tableau 5.7 présent les résultats trouver pour chaque opération des phases de réalisation de la pièce présenter dans la figure 5.3 et qui comporte 10 opérations comme le temps mort = 0 et le temps prédéfini du cycle $t_x = 1 \text{ min}$ suivant l'équation (5-14) il faut que le temps d'usinage pour chaque opération soit inférieur à t_x , d'après nos résultats on remarque que la première opération (chariotage sur une longueur de 203mm) est réalisé dans un temps de (1.532 min stage I) et (1.497min stage II) donc un temps supérieur à $t_x = 1 \text{ min}$ mais le temps de réalisation du reste des opérations satisfaire la condition de l'équation (5-14), pour remédier à cette situation on a décidé de changer l'outil de coupe. Les caractéristiques technologiques de ce dernier sont les suivantes :

- Outil de chariotage en carbure revêtu (C.C)

- Equation de la durée de vie : $T_{1b} = 3.772 \cdot 10^7 \cdot V_i^{-3.125} \cdot f_i^{-0.91} \cdot d_i^{-1.09}$

- Gamme de la vitesse de coupe : $0.8 \geq f \geq 0.03$

- Gamme de la vitesse d'avance : $30 \geq V \geq 180$

- Equation de la contrainte de puissance : $0.0373 \cdot V^{0.91} \cdot f^{0.78} \cdot d^{0.75} \leq 7.5$

- Equation de la contrainte de Force : $844 \cdot V^{-1.013} \cdot f^{0.725} \cdot d^{0.75} \leq 1100$

- Equation de la contrainte de rugosité : $14785 \cdot V^{-1.52} \cdot f^1 \cdot d^{0.25} \leq 7.6$

- Equation de la contrainte de la Température : $75 \cdot V^{0.4} \cdot f^{0.2} \cdot d^{0.105} - 17.8 \leq 600 \text{ °C}$

L'application de la même approche, on trouver les résultats présentés dans le tableau 5.8:

Tableau 5.8 Résultats trouver pour l'outil de chariotage en carbure revêtu C.C opération 1

Stage	Opération	d_c mm	f mm/tour	V m/min	Coût \$	Temps min
Stage I	Tournage ($l_1 + l_2$)	5	0.50	130	0.714	1.12
Stage II		5	0.55	152	0.878	0.999

On remarque que le temps d'usinage trouvé par la deuxième méthode est inférieur au temps du cycle prédéfini $t_x = 1 \text{ min}$.

Compte tenu de ces observations, le choix de changement d'outil a apporté une nette amélioration des résultats concernant le coût et le temps de productions tout en respectant le temps prédéfini pour la somme des phases à réaliser, ce qui prouve que le choix minutieux des outils de coupe est très important dans le domaine de l'usinage.

Si on compare les résultats trouvés par [Agapiou, 1992b], nous avons apporté une nette amélioration au niveau du coût et du temps d'usinage total de la pièce tout en respectant les limitations physiques des contraintes et les gammes de vitesse et d'avance pour chaque type d'opération, mais par contre nous avons remarqué qu'il y a quelques résultats présentés par ce dernier qui ne respectent pas les limites des contraintes physiques voir tableau 5.9.

Tableau 5.9 Limite de contraintes

N°	Opération	d_c (mm)	f (mm/tour)	V (m/min)	contraintes
1	Tournage ($l_1 + l_2$)	5	0.37	121	HP = 753 > 750
1	Tournage ($l_1 + l_2$)	5	0.37	121	F = 1182 > 1100
4	Tournage (l_1)	0.38	0.23	208	SR= 0.8 > 0.76
4	Tournage (l_2)	0.38	0.23	208	SR= 0.8 > 0.76

La figure 5.4 présente la variation du coût de production optimal en fonction du temps de production optimal pour la deuxième opération de tournage sur l_2 . On remarque bien que pour une plage de temps d'usinage va de 0.87 min jusqu'à 1.52 min à un coût de 0.72 \$ jusqu'à 0.51 \$ en tenant compte de toute sorte d'information et qu'on veut produire des opérations à un temps inférieur à 1.00 min le coût approprié d'usinage de cette opération est de 0.60 \$, si on veut produire à un coût plus bas il faut accepter un temps d'usinage plus long et si on veut que l'opération soit réalisée à un coût de 0.55 \$ le temps d'usinage sera 1.18 min. On remarque bien sur le graphique que la relation n'est pas du tout linéaire entre le temps d'usinage et le coût d'usinage, mais on peut dire approximativement qu'une légère diminution du coût de l'opération de 5.4 % engendre une augmentation du temps d'usinage de 14 %. Il convient donc de bien choisir les objectifs que l'on veut optimiser.

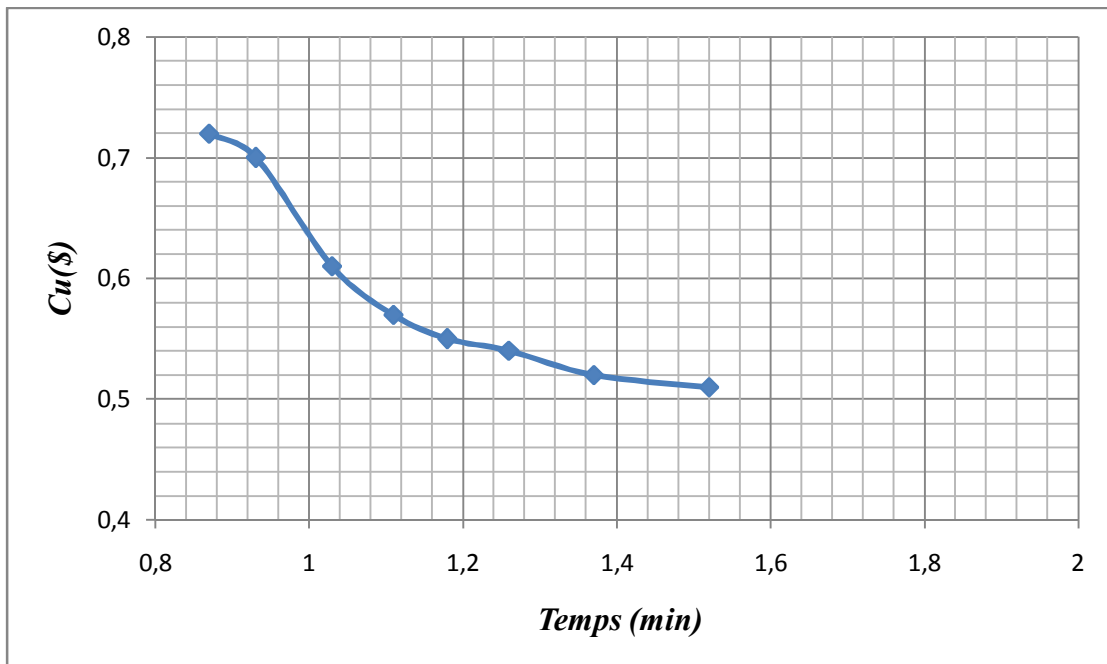


Figure 5.4 Coût d'usinage minimum pour le temps d'usinage requis opération de tournage (l_2)

5. 7 Utilité de l'optimisation multi-stage

L'approche consiste à déterminer le temps d'usinage minimum auquel une opération peut être complétée ou le coût d'usinage minimum possible dans un temps d'usinage approprié, notre modèle d'optimisation peut être utilisé dans la conception et la planification d'un atelier de fabrication. En effet, à partir des dessins des pièces à produire, les caractéristiques des outils disponibles et les spécifications des machines, on peut utiliser ce modèle afin de prévoir les performances du système en conception.

Ces performances sont bien sûr les temps et coûts d'usinages. Premièrement, les coûts d'usinage prévus peuvent être utilisés dans une analyse économique. On pourra prévoir les investissements requis en machine, main d'œuvre et outillage, et les revenus ou profits auxquels on peut s'attendre.

Nous pouvons néanmoins affirmer que le modèle d'optimisation présenté peut fournir beaucoup d'informations qui peuvent aider et soutenir les décisions de conception et de planification des systèmes de production par usinage.

Dans la gestion des opérations d'usinage, il faut bien sûr prévoir l'achat et la livraison des matières premières et la vente et l'expédition des produits finis, les opérations d'usinage ont aussi besoin de matériel et de produits de soutien pour bien

fonctionner. Il faut entre autres prévoir la disponibilité des stocks d'outil et des fluides de coupe, des pièces de rechange et des lubrifiants pour les machines. Cette approche peut fournir de l'information pour aider à la gestion de ces stocks de soutien.

En fournissant les temps d'usinage, on peut prévoir les temps d'utilisation des machines. Ces temps d'utilisations permettent de prévoir les entretiens préventifs et ainsi connaître les besoins en pièces de rechange et lubrifiants pour les machines.

D'une manière plus directe encore, cette approche inclut spécifiquement la durée de vie des outils de coupe. On peut donc prévoir le nombre de pièces que l'on peut fabriquer avec un outil et le temps d'usinage total que peut effectuer un outil. Ces informations peuvent donc soutenir la gestion des stocks d'outils afin d'assurer un approvisionnement adéquat sans garder trop de stocks inutilement, ce qui entraîne des coûts supplémentaires.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Nos travaux se sont focalisés principalement sur la modélisation et l'optimisation des paramètres de coupe pour les procédés de tournage et de fraisage. Il s'agissait, en particulier, pour nous, de proposer une stratégie d'optimisation par algorithme génétique pour résoudre ce problème pour les opérations d'ébauche et de finition à passe simple, passes multiples et pour plusieurs opérations réalisées sur une pièce. Nous avons fait ressortir l'importance de modéliser le coût et le temps d'usinage en fonction des variables du procédé.

Le travail que nous avons effectué est parti de l'idée que si les algorithmes évolutionnaires étaient capables d'apporter des améliorations à la recherche des solutions optimales pour le problème d'optimisation d'usinage, afin de trouver les conditions de coupe qui assurent des meilleurs coûts et temps de production en respectant les limites et les contraintes de coupe, l'usinage pourrait être beaucoup plus rentable.

Des modèles d'optimisation plus complets, incluant les fonctions objectives et les contraintes ont été élaborés. Ces modèles qui tiennent compte de l'ébauche et de la finition, permettent d'optimiser les opérations de tournage et de fraisage selon deux fonctions objectives, coût d'usinage minimal et/ou temps d'usinage minimal. Les réalisations de ce travail se résument comme suit:

Un historique de la recherche dans le domaine de l'optimisation des procédés d'usinage et les techniques d'optimisation d'usinage ont été présentés dans le premier chapitre.

Dans le chapitre deux, nous avons optimisé les paramètres de coupe dans un cas de tournage à passe simple le modèle a été résolu en utilisant l'algorithme du simplexe après avoir linéarisé le modèle par programmation géométrique. Nous avons présenté un exemple numérique avec une analyse de sensibilité pour évaluer les impacts des

principales contraintes de force et de puissance maximale sur les fonctions objectifs. Cette analyse nous a révélé que la relation est directe entre les paramètres de coupe, les contraintes et l'amélioration des fonctions objectifs.

Dans le chapitre trois, nous avons présenté la technique d'optimisation des paramètres de coupe dans un cas de fraisage en bout le modèle a été résolu en utilisant un algorithme génétique (AG), vu que ce problème est très difficile de le résoudre avec les outils classiques d'optimisation, nous avons propose un algorithme d'optimisation qui permet une résolution adéquate du problème dans un temps de calcul raisonnable.

Nous avons présenté un exemple numérique de problème que nous avons résolu avec l'algorithme proposé, on a constaté que le choix optimale des paramètres de coupe tel que le nombre de passes, la profondeur, la largeur de passe, la vitesse de coupe et l'avance peut diminuer le coût et le temps de production de 15 a 40 %. Nous avons aussi proposé une analyse de sensibilité pour évaluer les impacts des principales contraintes de force et de puissance maximale sur les fonctions objectifs.

Dans le chapitre quatre, nous avons présenté une technique d'optimisation pour les problèmes d'optimisation à passe multiple élaboré par [Agapiou 1992b] basée sur la programmation dynamique une approche qui utilise conjointement les Algorithmes génétiques et la programmation dynamique pour l'optimisation multicritères des conditions d'usinage, cette procédure a permet de déterminer le nombre de passes optimal pour une profondeur de coupe total donnée.

L'optimisation de chaque phase a été accomplie à travers la méthode des algorithmes génétiques (A.G), la quelle fournit la vitesse et l'avance optimum pour chaque passe indépendamment.

En fin, nous avons présente la technique d'optimisation des systèmes d'usinage à plusieurs phases (multi-stage) élaboré par [Agapiou 1992a et b] les conditions optimal pour chaque opérations sont déterminer par algorithme génétiques ; les phases qui contient des opérations de plusieurs passes, la technique de la programmation dynamique seras utilisée. Nous avons présenté un exemple numérique résolut par la

technique du coût de production minimale et la technique de zéro temps mort (idle time), nous avons remarqué une nette amélioration dans les résultats obtenus par [Agapiou 1992a et b].

En général, nous pouvons dire que malgré les études effectuées dans le domaine des AG, ce domaine reste très vaste pour des nouvelles recherches.

Le travail n'est pas terminé pour pouvoir appliquer les modèles en industrie. Il faudrait développer un logiciel industriel commercialisable afin d'être utilisé. Ce logiciel pourrait contenir plusieurs modules :

- Détermination du coût d'usinage et donc, détermination des prix de vente et aide à la préparation des soumissions.
- Détermination des paramètres d'usinage afin d'appliquer une commande en minimisant le coût pour un taux de production demandé ou en minimisant le temps d'usinage pour un coût donné.
- Gestion des commandes et suivi des pièces.
- Politique de remplacement des outils.

Pour que ces modèles soient vraiment faciles à implanter en industrie, il faudrait aussi développer une méthode d'application comprenant un protocole de base de données pour les expériences de la durée de vie des outils. Il faudrait aussi s'assurer de l'application des paramètres optimaux et faire le suivi des modifications. Finalement, une mesure des résultats réels des paramètres optimaux et des mesures de performance permettra de confirmer les résultats.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Agapiou, J.S. (1992a). Optimization of machining operations based on a combined criterion, part 1. The use of combined objectives in single-pass operations. *Journal of Engineering/or Industry, Transactions of the ASME*, 114(4), 500-507.

Agapiou, J.S. (1992b). Optimization of machining operations based on a combined criterion, part 2. Multipass operations. *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, 114(4), 508-513.

Al-Ahmari, A.M.A. (2001). Mathematical Model for Determining Machining Parameters in Multipass Turning Operations with Constraints. *International Journal of Production Research*, 39(15), 3367-3376.

Al-Ahmari, A.M.A. (2002). Computer aided Optimization of Scheduling and Machining Parameters in Job Shop Manufacturing Systems. *Production planning & control*, 13(4), 401-406.

Alauddin, M., El-Baradie, M.A., (1997). Tool Life model for end milling steel (190BHN), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 68, 1997, pp. 50-59.

Ameur, T. (2005). Optimisation des conditions de coupe en utilisant le calcul évolutionnaire. *Mémoire de magistère. Université Mohamed Khider – Biskra*.

Assas, M. and Djenane, M. (2001). Optimisation des conditions d'usinage basée sur un critère combiné. *2^{ème} Journées de Mécanique EMP*, A 23 et 24 Décembre 2001.

Assas, M. and Djenane, M. (2003). Optimization of metal-working process at the base of combined criteria. *Morskoy Vestnik Magazine N°2*, Leningrad, Russia.

Assas, M., Djenane, M. (2003). Optimisation des conditions d'usinage basée sur un critère combiné par la méthode des Algorithmes Génétiques. *16^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Nice, France, 1 au 5 Septembre 2003.

Astakhnov, V.P., Osman, M.O.M., Al-Ata, M., (1997). Statistical design of experiments in metal cutting- part one: methodology, *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol.25, N°3, May 1997, pp. 322-327.

Bäck, T. and Hoffmeister, F. (1991). Global optimization by means of evolutionary algorithms ", in A.N. Antamoshkin, editor, *Random Search as a Method for Adaptation and Optimization of Complex Systems* , p. 17-21, Divnogorsk, ex-URSS.

Bahrami, A. and Dagli, C.H. (1993). Modes of Design Processes. *Concurrent Engineering: Contemporary Issues and Modern Design Tools*. Parsaei, H.R. and Sullivan W.G., editors, 113-126, *Chapman and Hall*.

- Balachandran, M. (1993). Knowledge-Based Optimum Design, *Topics in Engineering* Vol. 10. Southampton : Computational Mechanics Publications, 1993. BU : 006.3 BAL.
- Bouallagui, S. (2010). Techniques d'optimisation déterministe et stochastique pour la résolution de problèmes difficiles en cryptologie, INSA de Rouen.
- Boothroyd, G. and Dewhurst, P. (1987). Concevoir pour concevoir et assembler par robot. *ISBN 2-85400-110-9*.
- Boothroyd, G. (1988). *American Machinist*. 132, August, 54-7.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P. and Knight, W. (1994). Product Design for manufacture and assembly", ISBN: 0-8247-9176-2
- Burke, E.K., Newall, J.P. (1999). A multistage evolutionary algorithm for the timetable problem, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on* , Vol.3 Issue : 1, 63-74.
- Campocasso. S (2013). Développement d'un modèle d'efforts de coupe multi-opération et multi-matériaux Application au tournage du cuivre dans différents états métallurgiques. *Thèse de doctorat, école supérieure Paris, France*.
- Chang, T-C. (1990). Expert process planning for manufacturing, ISBN 0-201-18297-1
- Chibane, H. (2013). Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire, *Thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours*.
- Chua, M.S., Rahman, M., Wong, Y.S., Loh, H.T., (1991). Determination of optimal cutting design of experiments and optimization techniques. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* vol. 33, N° 2, 1993, pp. 297-305.
- Ciarlet, P. G. (1990). Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation, Masson, Paris.
- Coello Coello, Carlos A. (2000). An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques. *ACM Computing Surveys, ACM Press*, Vol. 32, No 2, pp.109-143.
- Coello Coello, Carlos A. (2001). A Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization. *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science No 1993, pp. 21-40.
- Coello Coello, Carlos A., Van Veldhuizen D.A. et Lamont G.B. (2002). Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems. Kluwer Academic Publishers, New York 576 p.
- Côté, P., Wong, T. and Sabourin, R. (2004) Application of a Hybrid Multi-Objective Evolutionary Algorithm to the Uncapacitated Exam proximity Problem Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT2004).

- Cus, F. Balic, J. Züperl, U. (2009). Hybrid ANFIS-ants system based optimization of turning parameters. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 36, no 1, pp. 79-86.
- Darwish, S.M., El-Tamimi, A.M., (1997). Formulation of surface roughness models for machining nickel super alloy with different tools. *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 12, N° .3, 1997, pp. 395-408.
- De Jong, K. and Spears, W. (1991). On the virtues of parameterized uniform crossover. In R. K. Belew and L. B. Booker, editors, *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, pages 230-236, San Mateo, July 1991. Morgan Kaufman.
- Deneux, D. (1993). Méthodologie de reconnaissance de caractéristiques d'usinages dans un modèle technologique de produit. *Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France*.
- Dridi, L. (2005). Les algorithmes génétiques. INRS, Québec, *Extrait de la thèse de doctorat*.
- Deb, K. and Goel, T. (2001). Controlled elitist non-dominated sorting genetic algorithms for better convergence, *Proceedings of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO-2001)*, Zurich, Switzerland, 67-81.
- Deneux, D. (1993). Méthodologie de reconnaissance de caractéristiques d'usinages dans un modèle technologique de produit. *Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France*.
- Djari, D., Assas, M., Djenane M., Belkacem Bouzida, A., and Mazouz, H. (2007). Optimization of the conditions of machining based on a criterion combined by genetic algorithms. *International Review of Mechanical Engineering*, Vol.1, 3, 232-236.
- Djenane, M., D. Derraji, Benbouta, R. and Assas, M. (2016). Multi pass optimisation of cutting condition by using Genetic Algorithms. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol .13 Issue :3, 223-231.
- Djenane, M. (2001). Optimisation des régimes de coupe à l'aide d'un critère combiné par la méthode du simplexe et la méthode des algorithmes génétiques. *Mémoire de magistère. Université Hadj Lakhdar- Batna*.
- Dong, J., Parsaei, H.R. and Leep, H.R. (1996). Manufacturing process planning in a concurrent design and manufacturing environment. *Computers industrial engineering*, 30(1), 83-93
- Eiben, A.E., Hinterding, R. and Michalewicz, Z. (1999) Parameter Control in Evolutionary Algorithms. *IEEE Trans on Evolutionary computation*, Vol. 3, No 2, 124-141.
- Ermer, D. S. (1997). A Century of Optimizing Machining Operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119, 817-822.
- Fonseca, C.M. et Fleming, P.J., (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization : Formulation, Discussion and Generalization ", in *Genetic Algorithms : Proceedings of the Fifth International Conference* , S. Forrest, editeur, San Mateo, CA : Morgan Kaufmann, juillet 1993.

- Fonseca, C.M. et Fleming, P.J., (1995). An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization ", *Evolutionary Computation* , vol. 3, n°1, p. 1-16.
- Gao, L. Huang, J. Li, X. (2012). An effective cellular particle swarm optimization for parameters optimization of a multi-pass milling process. *Applied Soft Computing* 12, 3490–3499.
- Gelin, D. and Vincent, M. (1995). *Elément de Fabrication*, COPYRIGHT.
- Gilbert, W. W. (1950). *The economies of machining, machining theory and practice*. Cleveland : ASM, H. Ernst ed.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Ed. Addison Wesley, N.Y, pp. 412.
- Gottlieb, J. (2000). *Evolutionary Algorithms for Constrained Optimization Problems. PhD Thesis, Tech. Univ. of Clausthal, Germany*.
- Hartley, J.R. (1992). *Concurrent Engineering*. Productivity Press, Portland, Oregon, ISBN 1-56327-006-4
- Hassine, H. (2015). *Modélisation, simulation et optimisation pour l'éco-fabrication, Thèse de doctorat, École Centrale Paris (ED287)*.
- Hati, S. K. and Rao, S. S. (1976). Determination of optimum machining conditions deterministic and probabilistic approaches. *Transactions of the AS M E, Journal of Engineering for Industry*, 98, 354-359.
- Herrera, F., Lozano, M. and Verdegay, J.L. (1998). Tackling Real-Coded Genetic Algorithms: Operators and Tools for Behavioural Analysis. *Artificial Intelligence Rev.*, Vol. 12, No.4, 265-319.
- Herrera, F. and Lozano, M. (2000) Gradual Distributed real-Coded Genetic Algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 4, No.1, 43-63.
- Hitomi, H.K. (1971) Optimization of Multistage Machining System: Analysis of Optimal Machining Conditions for the Flow-Type Machining System. *J. Eng. Ind* , 93(2), 498-506
- Holland, H. J. (1975). *Adaptation in natural and artificial system*, Ann Harbor, *The University of Michigan Press*.
- Holland, H. J. (1962). Outline for a logical theory of adaptative systems. *Journal of the association of computing machinery*, 3.
- Huthwaite, B. (1987). *Product design for manufacture and assembly: the five fundamentals. Proceedings of the 2nd International Conference on Product Design for Manufacture and Assembly*, Newport, Rhode Island.
- Iwata, K., Murotsu, Y., Iwatsubo, T. and Fujii, S. (1972). A Probabilistic Approach to the Determination of the Optimum Cutting Conditions *J. Eng. Ind* 94(4), 1099-1107.

- Jaques, W.S., Billingsley, J. and Harrison, D. (1991). Generative feature-based design by constraints as a means of integration with the manufacturing industry. *Computer Aided Engineering Journal*, 261-267.
- Jacquet, L. (1998). Contribution à l'élaboration d'une démarche de spécification fonctionnelle. *Thèse de doctorat, Université de Valenciennes, France*.
- Kline, W.A., Devor, R.E., Shareef, I.A., (1982). The prediction of surface accuracy in end milling. *Transactions of the ASME*, Vol. 104, August 1982, pp 272-278.
- Klocke, F., FallbOhmer, M., Kopner, A. and Trommer, G. (2000). Methods and tools supporting modular process design. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 16, 411-423
- Kuang-Hua, F., Hung-Yen, C., (1997). An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response surface design. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 72, 1997, pp.42- 47.
- Liang, M., Magwatu, M. and Zuo, M. (2001). Integration of Cutting Parameter Selection and Tool Adjustment Decision for Multipass Turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17: 861-86.
- Liu, T.I., Yang, X.M., Kalambur, G.J. (1995). Design for machining using expert system and fuzzy Logic approach. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 4(5) 599-609
- Lou, M. S., Chen, J. C. and Caleb, M. L. (1999). Surface Roughness Prediction Technique For CNC End-Milling. *Journal of Industrial Technology*, 15(1).
- Malakooti, B. and Deviprasad, J. (1989). An Interactive Multiple Criteria Approach for Parameter Selection in Metal Cutting. *Operations Research*, 37(5), 805-818.
- Maltais, Y. (1994). Utilisation des grammaires régulières pour la liaison des procédés d'usinage aux caractéristiques d'usinage. *Thèse de maîtrise, École de technologie supérieure Université du Québec*
- Maropoulos, P.G. and Baker, R.P. (2000). Integration of tool selection with design Part I. Feature creation and selection of operations and tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 107(1-3), 127-134.
- Massaf, O. (2002). Validation des caractéristiques d'usinage par des grammaires d'usinage attribuées une contribution à la prise en compte des contraintes d'usinage en cours de conception. *Thèse de doctorat, école de technologie supérieur Université de Québec, Canada*.
- Mawussi, K., Duong, V.H. and Ponsonnet, R. (2000). Détermination de ressources virtuelles pour la conception intégrée. IDMMME 2000 SCGM, *Presses internationales Polytechnique*, pp. 59.
- Miettinen, K. (2001). Some methods for nonlinear multi-objective optimization. Dans: Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. Coello Coello et David Corne (éditeurs),

First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Springer-Verlag, Lecture Notes in Computer Science, No 1993, pp. 1-20.

Miller, L., C.G. (1993). Concurrent engineering design: integrating the best practices for process improvement. ISBN 0-87263-433 -7.

Monreal, M. and Rodriguez, C. A. (2003). Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling, *Computer-Aided Design* 35, pp. 395-401.

Munoz-Escalona, P., Cassier, Z. (1998). Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel. *Wear*, 218(1), 103-109.

Nougier, J.P. (1987). Méthodes de calcul numérique. Paris: Masson, BU: 519.4

Popper, K. (1997). Toute vie est résolution de problèmes. Actes Sud.

Parent, L., Songmene, V. and Kenné J. P. (2011). A generalized model for optimizing endmilling operation. *Production Planning & Control*, TPPC 229154, 319-337.

Parent, L. (2007). Modélisation et Optimisation de la performance des systèmes de Production par usinage. *Thèse de Maîtrise en génie mécanique*, Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec, CANADA.

Park, J. Y. and Khoshnevis, B. (1993). A real time computer aided process planning system as a support tool for economic product design. *Journal of manufacturing Systems*. 12(2), 181-193.

Peihua, G. (1994). A feature representation scheme for supporting integrated manufacturing. *Computers industrial Engineering*. 26(1), 55-74

Pennel, J.P. (1988). DARPA Concurrent Design/Concurrent Engineering Workshop", Final Report, KeyWest, FL

Rao. S and Hati .S. (1978). Computerized Selection of Optimum Machining Condition for a job Requiring Multiple Operation. *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol 100, pp 356-362.

Sardiñas, R. Q. Santana, M. R. Brindis, E. A. (2006). Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 19, 127–133.

Smaili, K. et Hennet, J.C. (1991). Optimisation du routage des pièces dans un atelier flexible à contraintes de populations locales. *Systèmes de production discontinue, R.A.I.R.O. APII*, Vol. 26, n° 3, 227-252.

Sonmez, I., Baykasoglu, A., Dereli, T. and Huseyin, I. (1999). Dynamic Optimization of Multi-pass Milling Operations via Geometric Programming, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, 297–320.

Suh, N.P. (1990). The principles of design, Oxford Series on advanced manufacturing. Oxford university press.

- Syswerda, G. (1989). Uniform crossover in genetic algorithms. *In Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pages 2-8. Morgan Kaufman.
- Tien Tho DO, M. (2006). Optimisation de forme en forgeage 3D. *Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris*.
- Trang, B.Y. and Lee, Y.S. (2000). Cutting parameter selecting for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations. *Journal of Material Processing Technology*, 105, 61-66.
- Tolouei-Rad, M. and Bidhendi, I.M. (1997). On the Optimization of Machining Parameters for Milling Operations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(1), 1-16
- Venkata Rao, R., and Pawar P.J., (2010). Parameter optimization of multi-pass milling process using on traditional optimization algorithms. *Applied Soft Computing Journal*, Vol. 10, Issue 2, 445-456.
- Venkararaman, P., (2001) *Applied Optimization with Matlab Programming*, John Wiley & Sons.
- Vijayakumar, K. Prabhakaran, G. Asokan, P. Saravanan, R. (2003). Optimization of multi-pass turning operations using ant colony system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol 43, no 15, pp 1633-1639.
- White, B. and Houshyar, A. (1992). Quality and Optimum Parameter Selection in Metal Cutting. *Computers in industry*, 20 (1), 87-98.
- Wolfram, M. and Ehrlenspiel K. (1993). Design concurrent calculation in a CAD-System environment. *Design for manufacturability. ASME*. pp. 63-67
- Wong, T., Côté, P. and Sabourin, R. (2004) A Hybrid MOEA for the Capacited Exam Proximity Problem, Congress on Evolutionary Computation (CEC2004).
- Wu, S. M., (1964). Tool-life testing by response surface methodology-Part 1, *Journal of Engineering for Industry*, May 1964, pp.105-116.
- Yusup, N. Zain, A. M. Hashim, S. Z. M. (2012). Evolutionary techniques in optimizing machining parameters: Review and recent applications (2007–2011). *International Journal Science Direct Expert Systems with Applications* 39, 9909–9927.
- Zhang, H.C. and Zhang, D. (1995). Concurrent Engineering : An Overview from manufacturing engineering perspectives *Concurrent Engineering : Research and Applications*. 3(3), 221-236
- Zeid, L. (1991). CAD/CAM- Theory and Practice. *Mc Graw-Hill series in Mechanical Engineering*.
- Zitzler, E.(1999). Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization : Methods and Applications, *Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich. TIKSchriftenreihe Nr. 30, Diss ETH No. 13398, Germany: Shaker Verlag*.

Annexes

Annexe 1

CODE SIMPLEX SUR MAPLE

-Les instructions utilisées pour l'optimisation linéaire sous Maple

```

> restart

> LES VALEURS VITESSE ET AVANCE POUR PROFONDEUR DE COUPE d DE 0.5
  JUSQU'À 5 mm

  LES VALEURS VITESSE ET AVANCE POUR PROFONDEUR DE COUPE d = 0.5 mm

>
  obj := -0.2*x - 0.768*y + 0.28*z;

  constraints := {x ≥ 3.4, x ≤ 5.30, y ≥ 0.932, y ≤ 2.03, z = ln(5), 0.91·x + .78·y + .75·z
    ≤ 6.694, -1.52·x + 1.004·y + .25·z ≤ -5.21, 0.4·x + .2·y + .105·z ≤ 2.393, -.1013·x
    + .2725·y + .75·z ≤ 1.934 };

  Optimization[LPSolve](obj, constraints); option remember;

                                obj := -0.2x - 0.768y + 0.28z

  constraints := {z = ln(5), 0.932 ≤ y, 3.4 ≤ x, x ≤ 5.30, y ≤ 2.03, -1.52x + 1.004y + 0.25z ≤
    -5.21, -0.1013x + 0.2725y + 0.75z ≤ 1.934, 0.4x + 0.2y + 0.105z ≤ 2.393, 0.91x
    + 0.78y + 0.75z ≤ 6.694}

  [-1.67400673181441, [x = 4.70956615006468, y = 1.54002098604560, z
    = 1.60943791243410]]

                                option remember

> v := exp(4.7095)
                                v := 110.9966477

> f :=  $\frac{\exp(1.5400)}{10}$ 
                                f := 0.4664590271

> d := exp(1.6094)
                                d := 4.999810441

> A :=  $\frac{3.14 \cdot 152 \cdot 203}{1000}$ 
                                A := 96.88784000

>
> B := d*1.4
                                B := 9.517764501

> C := .5*193.3*(-4)
                                C := 3.581315548 10-10

> H := A*B*C
                                H := 3.302530346 10-7

>

```

$$> TU := \frac{A}{v*f} + H*(v**(3)) * f**(.16) + 1.63 ;$$

$$TU := 3.901058980$$

$$> CU := \frac{0.1 \cdot A}{v*f} + H * \frac{0.55}{0.5} (v**(3)) * f**(.16) + .163$$

$$CU := 0.7898541422$$

- les instructions utilisées pour la représentation graphique sous Maple

> restart

$$> A := \frac{\text{Pi} \cdot 152 \cdot 203}{1000}$$

$$A := \frac{3857}{125} \pi$$

$$> d := 2.54$$

$$d := 2.54$$

$$> B := d * 1.4$$

$$B := 3.687798669$$

$$> C := .55 * 193.3 ** (-4)$$

$$C := 3.939447103 \cdot 10^{-10}$$

$$> x := A * B * C$$

$$x := 1.408289610 \cdot 10^{-7}$$

$$> v := 'v'$$

$$v := v$$

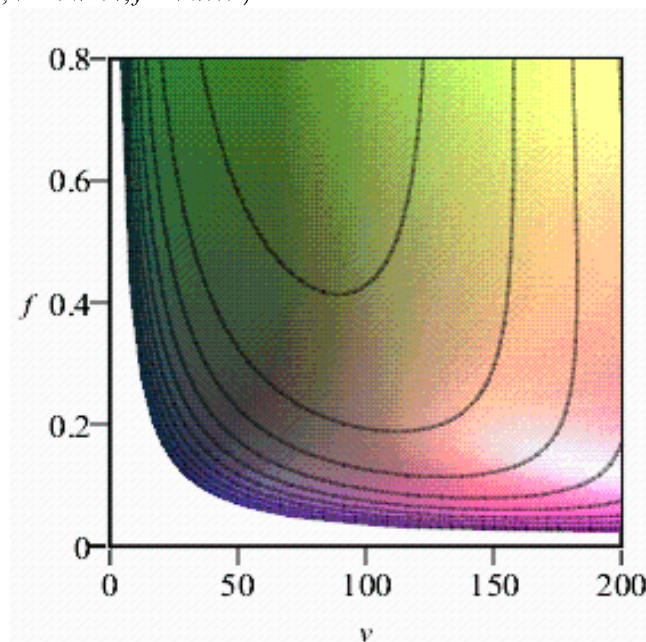
$$> f := 'f'$$

$$f := f$$

$$> CU := (v, f) \rightarrow \frac{0.1 \cdot A}{v*f} + x*(v**(3)) * f**(.16) + .163 ;$$

$$CU := (v, f) \rightarrow \frac{0.1A}{vf} + xv^3f^{0.16} + 0.163$$

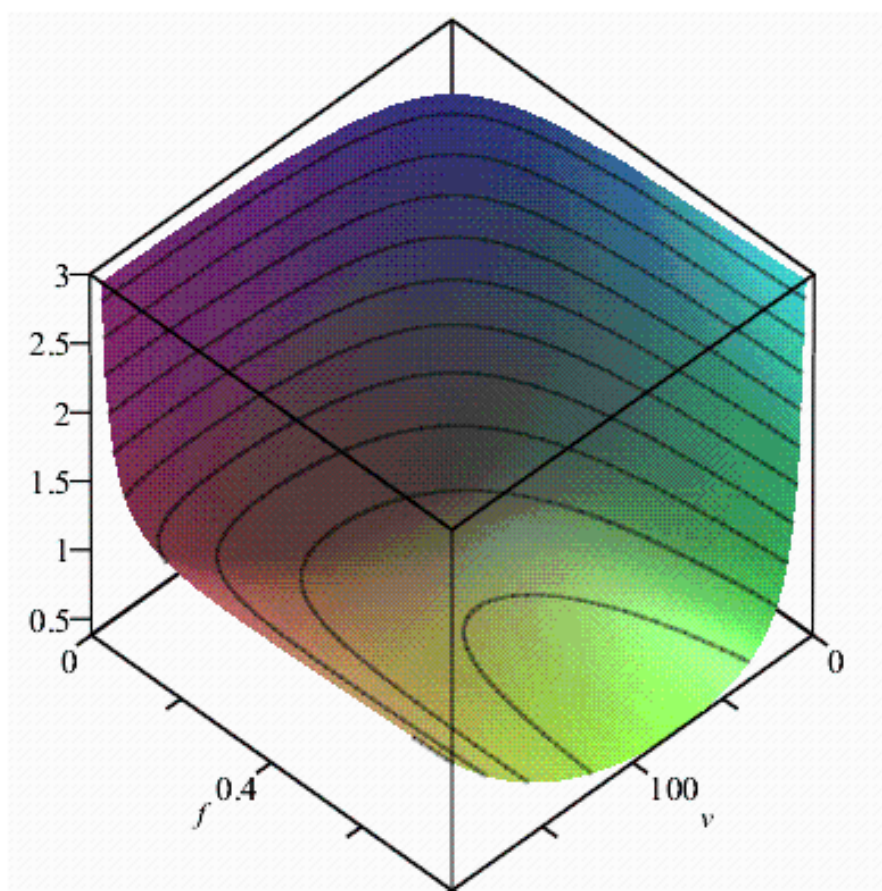
$$> \text{plot3d}(CU(v, f), v = 0 .. 200, f = 0 .. 0.8)$$



$$> CU(122, .634)$$

$$0.5260676888$$

```
> plot3d(CU(v, f), v = 0 .. 200, f = 0 .. .8)
```



```
>
```

Annexe 2

-Code pour trouver le nombre de passes optimums développé en langage fortran

Program dynafortran

Implicit none

Save

integer :: im,i,j,n,m,l,r,k,q,c,la,lb,lc,xin,ia,ib,ic

double precision :: hf(20,20), v(20,20),of(20 ,20),ov(20,20),pv(20,20)

double precision :: f(20),cu(20,20),tu(20,20),u(20 ,20),da(20),uop(20)

real :: dr,cut,tut,d,df,lo,DC ,dmaxp,dmop,a

real :: ad,au,opw,tpo

go to 202

33 read (*,*)im

write(*,13)

13 format(1x,'nom de passes',2x,'dc',8x,'avance',4x,'vitesse de coupe',&

& 1x,'cout',6x,'temps')

cut = 0.15

tut = 1.5

do k = 1,m

read(*,*)i,j

dr = j*d

if (hf(i,j).eq.0) go to 71

write (*,12)k,dr ,hf(i,j),v(i,j),cu(i,j),tu(i,j)

```
12  format(i5,f12.2,4(f12.3))

67  cut = cut + cu(i,j)

    tut = tut+tu(i,j)

    end do

    write (*,14) cut,tut

14  format(121x,2(f12.3))

    go to 700

202  open (unit = 11,file = 'don3.p, statut = 'old')

    write (*,*)

    read(11,*)df,lo,dc,dmaxp,dmop ,n

    do i =1,n

    do j =1,n

    u(i,j) = 0

    hf(i,j) = 0

    v(i,j) = 0

    end do

    end do

    d=dc/n

    m = (dmaxp/d)+0.1

    l = (dmop/d)+.01

    print * ;''

    do i=1,m

    read(11,*) of(i,i)
```

```
    read(11,*) ov(i,i)

end do

print*,''

do i= 1,m

read (11,*)pf(i)

read (11 ;*) pv(i)

end do

do = i+1,n

do j = 1 ,i-1

r = i-1

if (r.gt.m) r = m

if (j.gt.r) go to 5

hf(i,j) = pf(j)

v(i,j) = pv(j)

end do

5  end do

a = 3.14*df*lo/1000

do i= 1,m

dr = i*d

au = a/(ov(i,i)*of(i,i))

ad = (ov(i,i)**(3))*(of(i,i)**(0.16))*(dr**(1.4))*(193.3**(-4))

cu(i,i) = (0.1*au)+(a*ad*0.55)+0.013

tu(i,i) = au +(a*ad*0.5)+0.13
```

```
u(i,i) = 0.2*cu(i,i)+0.8*tu(i,i)

end do

8  end do

do i = 1,m

uop(i) = u(i,i)

end do

do i=1,1

write(*,*)'uop(',i,')', '=', 'u(',i,i,')'

55 format (5x,i5,5x,i5,1x,i5)

end do

do i = l+1,m

do j = 1,i-1

k = i-j

opw = uop(k)+u(i,j)

if(opw.lt.uop(i)) goto 40

c = 1

go to 30

40 uop(i) = opw

la = i

lb = j

lc = i-j

c = 2

30 end do
```

```
If(c.eq.2) go to 111

write(*,*)"uop",("i, ")", "=", "u",("i,i, ")

go to 20

111 write (*,*)"uop",("la, )", " =", "uop",("lc, )", "+", "u",("la,lb, ")

20 end do

do i = m+1,n

xin = 100000

do j =1,m

k = i-j

opw = uop (k) + u(i,j)

tpo = uop (k) + u(i,j)

if (opw.lt.xin) go to 500

go to 60

500 xin = opw

uop(i) = tpo

ia = i

ib = j

ic = i-j

60 end do

write (*,*)"uop",("ia, )", " =", "uop",("ic, )", "+", "u",("ia,ib, ")

end do

! do 55 i = 1,n

! write (*,11)(u(i,j), j=1,n)
```

!11 format (2x,10f10.4)

!55 continue

go to 33

700 stop

end program dynafortran


```
W = 30 ;
H = 6;
% wr = 15 ;
% wf = 15 ;
% N = 2;
Dr = 40 ;
Df = 40 ;
K = 5e+11;
vfr = 1000*Zr*x(1)*x(2)/(3.141*Dr);
vff = 1000*Zf*x(3)*x(4)/(3.141*Df);
A = W*L*(H-x(6))/(x(5)*wr*vfr) ;
B = W*L/(wf*vff);
C = x(1)^5*x(2)^(1.75)*x(5)^(1.5)/K ;
G = x(3)^5*x(4)^(1.75)*x(6)^(1.5)/K ;
TU = A + B +.6589 + (A*C) +(B*G) ;
CU = .75 + (4*TU) + (59.375*A*C) + (62*B*G) ;
% % % % % % % % % % % FONCTION MULTIOBJECTIVE % % % % % % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
w1 = 0.8;
y = w1*TU + (1-w1)*CU ;
%FIN
```

Résumé

L'optimisation des conditions d'usinage fait partie des stratégies efficaces pour réduire les coûts d'usinage et demeurer compétitif tout en satisfaisant les besoins des clients. La plupart des modèles d'optimisation des paramètres d'usinage se consacrent à des opérations simples, avec un nombre limité de variables, comme le tournage par exemple.

Ce travail présente un modèle de programmation mathématique pour l'optimisation des paramètres pour les opérations de tournage à passe simple et à passes multiple ainsi que pour l'opération de fraisage en bout et pour plusieurs opérations sur une pièce. Nous allons aussi proposer un algorithme génétique pour résoudre ce problème pour les opérations d'ébauche et de finition. Ensuite nous allons décrire les équations de base qui vont permettre la construction des fonctions objectifs, qui incluent le coût d'usinage et le taux de production. Nous allons par la suite présenter une méthode pour résoudre ce problème à l'aide d'un algorithme génétique.

Abstract

Machining condition optimization is one of the efficient strategies used to reduce machining costs and to remain competitive while meeting customer's needs. Most models used for optimizing machining parameters usually deal with simple operations, with limited numbers of variables, such as turning.

This Work's presents a generalized mathematical programming model for optimizing the parameters for turning operations has single pass and multiple passes as well as for face milling operation and for several operations on a work piece. A genetic algorithm is also proposed for solving this problem for roughing and finishing operations. We then describe the basic equations allowing the construction of the objective functions, including machining cost and productivity. We then present a method to solve the problem using a genetic algorithm.