

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed Khider - BISKRA

Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Mécanique

Mémoire Présenté

En vue de l'obtention du diplôme de Magistère

En Construction mécanique

Par Ameer Toufik

THEME

**OPTIMISATION DES CONDITIONS DE
COUPE EN UTILISANT LE CALCUL
EVOLUTIONNAIRE**

Devant le Jury

HECINI Mabrouk	Président	Dr.M/C	Université de Biskra
ASSAS Mekki	Rapporteur	Dr.C/C	Université de Batna
MAZOUZ Hamoudi	Examineurs	Dr.M/C	Université de Batna
MANAA Rabeh	Examineurs	Dr.C/C	Université de Batna

ANNEE 2005

Dédicace

Je tien à dédier le fruit de ce modeste travail à ceux qui me sont les plus au monde, mon père et ma mère.

A mes frères et spécialement El-Hadj.

A mes sœurs.

A mes nièces et mes neveux.

Ainsi qu'à toute la famille.

A mes amis.

A tous mes collègues de promotion.

Et à tous ceux que j'aime et je respecte.

Toufik.

REMERCIEMENTS

Avant, je tien à remercier grand Dieu tout puissant de m'avoir aidé et donné la force nécessaire pour arriver là où je suis.

Je tien ainsi à témoigner ma profonde gratitude à mon encadreur M^r Assas Mekki pour tout ce qu'il a fait pour moi.

Mes remerciements s'adressent entre autres à :

- M^r M.Ayad Docteur en électrotechnique.
- M^r T.Tibarmacine Magistère en Mécanique de Précision.
- M^r A.Snoussi Magistère en Mathématique.

TABLES DES MATIERES

<i>Tables des matières</i>	i
<i>Liste des Figures</i>	iii
<i>Liste des Tableaux</i>	iv
<i>Nomenclature</i>	v
<i>Introduction générale</i>	01
Chapitre I : <i>Choix des conditions de coupe</i>	
<hr/>	
I.1 Introduction	04
I.2 Notions de base	04
I.2.1 Surfaces de la pièce	04
I.2.2 Eléments de l’outil	05
I.2.3 Paramètres cinématiques de coupe	08
I.2.4 Paramètres géométriques de coupe	09
I.3 Etude de la coupe de métaux	10
I.3.1 Efforts de coupe	11
I.3.2 Mécanisme de formation de copeau	14
I.4 Endommagement des outils de coupe	16
I.4.1 Mécanisme endommageant des outils de coupe	19
I.4.2 Détermination de la durée de vie des outils de coupe	21
I.5 Discussion	25
Chapitre II : <i>Algorithmes évolutionnaires</i>	
<hr/>	
II.1 Introduction	27
II.2 Algorithme évolutionnaire	27
II.3 Principes généraux	28
II.4 Algorithme génétique	30
II.4.1 Principes généraux	30
II.4.2 Représentation	30
II.4.3 Evolution.....	31
II.5 Algorithme à essaim de particules	33
II.5.1 Principes généraux	33
II.5.2 Représentation	34
II.5.3 Evolution	34
II.6 Notre choix	36
Chapitre III : <i>Optimisation multiobjectif des conditions de coupe</i>	
III.1 Problème d’optimisation	38
III.1.1 Critères d’optimisation	40
III.1.2 Contraintes d’optimisation	42
III.2 Optimisation mono-objectif	43

III.3 Optimisation multiobjectif	44
III.3.1 Les méthode d'agrégation des objectifs	45
III.3.2 L'approche par ϵ -contraintes	46
III.3.3 L'approche Min-Max	47
III.3.4 Le but à atteindre	47
III.4 Modèle d'optimisation retenu	48
<i>Chapitre IV : Algorithmes a essaim de particules</i>	
<hr/>	
IV.1 Introduction	50
IV.2 Algorithme à essaim de particules standard (PSO)	51
IV.3 Algorithme à essaim de particules avec rassemblement passif (PSOPC)	52
IV.4 Optimisation par essaim de particules	54
IV.4.1 Méthode de pénalité	54
IV.4.2 Application d'algorithme à essaim de particules	56
<i>Chapitre V : Application et discussion des résultats</i>	
<hr/>	
V.1 Cas d'application	59
V.2 Résultats	60
V.3 Discussion et interprétation des résultats	62
<i>Conclusion et perspectives</i>	68
<i>Références</i>	71

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Surfaces de la pièce.....	05
Figure I-2 : Eléments de l'outil.....	06
Figure I-3 : Angles du taillant (outil en main).....	07
Figure I-4 : Angles du taillant (outil en travail).....	07
Figure I-5 : Mouvement de l'outil et de la pièce.....	09
Figure I-6 : Dimensions de coupe	10
Figure I-7 : Coupe orthogonale	11
Figure I-8 : Décomposition des efforts de coupe.....	11
Figure I-9 : Présentation du phénomène de cisaillement de matière.....	12
Figure I-10 : Diagramme de Merchant	13
Figure I-11 : Principe et caractérisations des procédés de coupe	15
Figure I-12 : Formation de copeau et usure de l'outil	16
Figure I-13 : Arête rapportée restée soudée à un copeau obtenue en utilisant un acier XC10.....	19
Figure I-14 : Présentation de la durée de coupe en fonction de la vitesse de coupe.....	23
Figure II-1 : Différentes branches des algorithmes évolutionnaires.....	30
Figure II-2 : Modèle de la roulette (représentation d'une population de 6 individus.....	31
Figure II-3 : Opérateur de recombinaison	32
Figure II-4 : Opérateur de mutation	33
Figure II-5 : Interaction entre les particules et la meilleure solution	35
Figure II-6 : Interaction des particules avec rassemblement passif	36
Figure III-1 : Schématisation d'un processus de coupe	38
Figure IV-1 : Organigramme de l'algorithme à essaim de particules	58
Figure V-1 : Simulation du PSO	61
Figure V-2 : Les courbes de la fonction-objectif en fonction du nombre générations	63
Figure V-3 : Présentation graphique des coûts et des temps de production	65
Figure V-4 : Présentation graphique du taux de profit	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau V-1 : Paramètres d'usinage.....	59
Tableau V-2 : Paramètres des programmes	60
Tableau V-3 : Résultats trouvés par le programme du PSO	62
Tableau V-4 : Résultats trouvés par le programme du PSOPC	62
Tableau V-5 : Résultats trouvés par la méthode du gradient	63
Tableau V-6 : Résultats trouvés par la méthode génétique	64
Tableau V-7 : Taux de profit	66

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
a_1, a_2, a_3	Constantes	
C_0	Coût machine	\$/min
C_t	Coût d'une arrête de coupe	\$/arrête
C_U	Coût de production	\$/pièce
d_c	Profondeur de coupe pour une passe	mm
D	Diamètre extérieur de la pièce	mm
f	Avance par tour	m/tour
F	Effort de coupe	N
K	Constante de l'équation de la durée de vie	
L	Longueur de la pièce à usiner	mm
P	Puissance de la machine	kW
Pr	Taux de profit	\$/min
S	Prix de vente	\$
SF	Rugosité de la surface finie	μm
SR	Rugosité de surface ébauche	μm
t_{cs}	Temps de changement d'outil	min
t_h	Temps auxiliaire	min
t_m	Temps machine	min
t_R	Temps de retour de l'outil	min/passe
T	Durée de vie de l'outil	min/arrête
T_U	Temps de production	min
V_c	Vitesse de coupe	m/min
V_{opc}	Vitesse de coupe optimale correspondante au coût minimal	m/min
V_{opt}	Vitesse de coupe optimale correspondante au temps minimal	m/min
α_1, α_2	Coefficients de pondération	
\mathcal{g}	Température de coupe moyenne	$^{\circ}\text{C}$

INTRODUCTION GENERALE

La mise en forme par enlèvement de matière (usinage) occupe une place très importante parmi les différentes techniques de transformation de matière tant par le parc de machines mobilisé que par les outils de coupe utilisés ou la perte inévitable de la matière par la formation de copeaux, mais néanmoins c'est la seule méthode qui permet de produire des pièces mécaniques de formes complexes avec des tolérances très serrées.

Le tournage est l'un des processus d'usinage les plus utilisés en fabrication où le besoin industriel est en progression rapide et permanente en terme de qualité technique ou économique. Ce besoin ne peut être satisfait que par un choix judicieux des paramètres de coupe. De ce fait, le processus de tournage doit réaliser un taux de rentabilité acceptable en profitant le maximum possible des moyens disponibles soit sur la machine-outil utilisée ou par les performance des outils de coupe.

Le but d'optimisation des régimes de coupe réside dans l'amélioration de certains performances de coupe (coût ou temps de production, productivité, précision d'usinage, etc...) par la recherche des meilleures valeurs de paramètres de coupe (profondeur de passe, avance par tour, vitesse de coupe) en prenant en compte des limites de performances de la machine-outil (effort de coupe, puissance absorbée par la coupe, etc..), de l'outil de coupe utilisé (matière, géométrie, etc..) et de la pièce usinée (matière, dimensions, montage, etc..). De cette manière, le problème d'optimisation d'usinage nécessite une très bonne connaissance du phénomène de coupe.

D'une manière générale, la stratégie prédominante adoptée par les chercheurs pour traiter ce problème consiste en première étape à trouver les relations mathématiques existantes entre les facteurs relatifs à la coupe (temps réel de coupe, durée de vie des outils, effort de coupe, puissance de coupe, état de surface produite, etc...) et les conditions de coupe. Cela nécessite d'étudier tous les phénomènes relatifs au phénomène principal de coupe tels que le phénomène de formation de copeaux, les mécanismes endommagements des outils de coupe, les efforts de coupe, etc... Cette étape fait l'objet du premier chapitre : choix des conditions de coupe.

En deuxième étape, les résultats trouvés sont regroupés et utilisés pour définir un modèle comportant les facteurs à améliorer dit critères d'optimisation et les paramètres à satisfaire dit contraintes d'optimisation. Ces facteurs et paramètres sont fonctions des conditions de coupe. Nous en faisons une présentation dans le troisième chapitre : optimisation multicritère des conditions de coupe.

Toutefois, des travaux mettent l'accent sur des méthodologies nouvelles, visant une meilleure utilisation des données existantes, reçoivent une plus grande attention de la communauté scientifique. L'optimisation des conditions de coupe a ainsi fait l'objet de nombreux travaux qui ont pris en considération plus qu'un critère d'optimisation [14] [17] [26]. Ce genre de problème appelé optimisation multicritère nécessite de nouvelles méthodes de résolution. Une multitude d'approches a ainsi été élaborées afin d'améliorer l'optimalité des solutions trouvées.

Nous sommes conscient du travail déjà fait dans d'optimisation d'usinage qui forme une base solide pour les nouveaux travaux dans le domaine. Mais il y a à notre avis un très grand effort à ajouter que se soit dans la modélisation ou la résolution des problèmes.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressé à un type d'algorithmes inspirés des mécanismes naturels, qui propose de faire évoluer des populations d'individus en favorisant la sélection et la reproduction des individus les plus meilleurs (les principes de ces méthodes sont présentés en deuxième chapitre : algorithmes évolutionnaires). On connaît l'efficacité de ce type d'algorithmes d'optimisation pour la résolution des problèmes non-linéaires complexes. Nous Cherchons à savoir ce que l'on peut apporter par ce type d'algorithmes appelés algorithmes évolutionnaires au problème d'optimisation des conditions de coupe.

Dans ce contexte, notre travail s'est situé à deux niveaux :

Dans un premier temps, nous chercherons à adopter un modèle d'optimisation, à partir du quel nous pouvons améliorer les performances d'usinage les plus importantes en satisfaisant un ensemble global des contraintes d'optimisation. Ce modèle sera décrit par la considération de deux critères d'optimisation, coût et temps de production, en l'optimisant à l'aide d'une approche d'agrégation des objectifs sous la forme d'une somme pondérée. Le modèle est présenté dans le troisième chapitre : optimisation multicritère des conditions de coupe.

Dans un second temps, nous placerons à la résolution du problème. En utilisant une nouvelle méthode évolutionnaire appelée optimisation par essaim de particule (l'algorithme de cette méthode est présenté dans le quatrième chapitre : optimisation par essaim de

particules). Nous chercherons à trouver des solutions plus performantes pour le problème en comparant nos résultats avec ceux trouvés par M .Assas et M .Djennane [17] en utilisant la méthode des algorithmes génétiques et par J.S .Agapiou [14] en utilisant la méthode du gradient. Ce travail fait l'objet du cinquième chapitre : application.

En résumé, l'organisation générale du présent document est articulée en 5 chapitres :

- Le chapitre I présente une vue générale du problème ainsi que les plus importants paramètres qui interviennent dans la modélisation du processus de coupe.
- Le chapitre II décrit les principes généraux des algorithmes évolutionnaires et leurs capacités ainsi que notre choix concernant la méthode évolutionnaire utilisée pour la résolution du problème.
- Le chapitre III présente le modèle d'optimisation adopté pour le problème et l'approche choisie pour le traitement de ce modèle.
- Le chapitre IV décrit les algorithmes des deux variantes de la méthode d'optimisation par essaim de particules ainsi que la méthode utilisée pour le traitement des contraintes lors d'application de ces algorithmes.
- Le chapitre V propose une application de ces deux algorithmes sur un exemple déjà résolu par deux autres méthodes et la comparaison des résultats.

Chapitre I

CHOIX DES CONDITIONS DE COUPE

Sommaire

I.1 Introduction	04
I.2 Notions de base	04
I.2.1 Surfaces de la pièce	04
I.2.2 Eléments de l'outil	05
I.2.2.1 Faces et arêtes de l'outil	05
I.2.2.2 Angles de l'outil	06
I.2.3 Paramètres cinématiques de coupe	08
I.2.3.1 Mouvement de l'outil et de la pièce	08
I.2.3.2 Mouvement de coupe	08
I.2.3.3 Mouvement d'avance	09
I.2.4 Paramètres géométriques de coupe	09
I.3 Etude de la coupe de métaux	10
I.3.1 Efforts de coupe	11
I.3.2 Mécanisme de formation de copeau	14
I.4 Endommagement des outils de coupe	16
I.4.1 Mécanisme endommageant des outils de coupe	19
I.4.1.1 Endommagement induit par les dépôts macroscopiques	19
I.4.1.2 Endommagement induit par les dépôts microscopiques	20
I.4.1.3 Endommagement induit par les débris	21
I.4.2 Détermination de la durée de vie des outils de coupe	21
I.4.2.1 Loi de Taylor	22
I.4.2.2 D'autres modèle de la durée de vie des outils	24
I.5 Discussion	25

I.1. Introduction :

La mise en œuvre des opérations d'usinage pour réaliser une pièce ou une famille de pièces est un problème complexe du fait de la multiplicité des procédés disponibles et de la grande variété des spécifications des pièces et des matériaux constitutifs. Nous souhaitons par cette partie de l'étude fournir les éléments fondamentaux du problème en double objectif :

- Présenter les paramètres relatifs au procédé de coupe.
- Etudier l'influence de ces paramètres sur le bon déroulement du procédé et sur la qualité technologique et économique des produits réalisés par ce procédé.

Afin de bien viser l'objectif qui est la modélisation du procédé de coupe, nous allons étudier dans ce travail un seul procédé d'usinage qui est le tournage.

I.2. Notions de base :

Afin de bien comprendre les chapitres qui suivent, il faut définir certaines notions de base concernant l'outil, la pièce et la machine-outil. L'office de la langue française définit l'usinage comme une opération consistant à soumettre une pièce à l'action d'une ou de plusieurs machines-outils essentiellement dans le cas où cette action consiste en un enlèvement de matière. Trois éléments interviennent dans l'action d'usinage : une machine-outil, une pièce (avec un porte pièce) et un outil (avec un porte outil).

I.2.1. Surfaces de la pièce :

La figure (I-1) illustre les principaux éléments d'une pièce à usiner et d'un outil. La surface de la pièce sujette à l'usinage est appelée **surface de la pièce**. Elle peut être brute (résultant de différents procédés comme moulage, forgeage, laminage, etc.) ou obtenue par usinage au cours d'opérations précédentes. La **surface engendrée** (ou surface usinée) est une surface désirée, générée par le processus d'enlèvement de matière (un outil de coupe au cours d'usinage). Les deux surfaces sont reliées par une surface engendrée intermédiaire (générée pendant l'usinage par une arête coupante) appelée **surface coupée**.

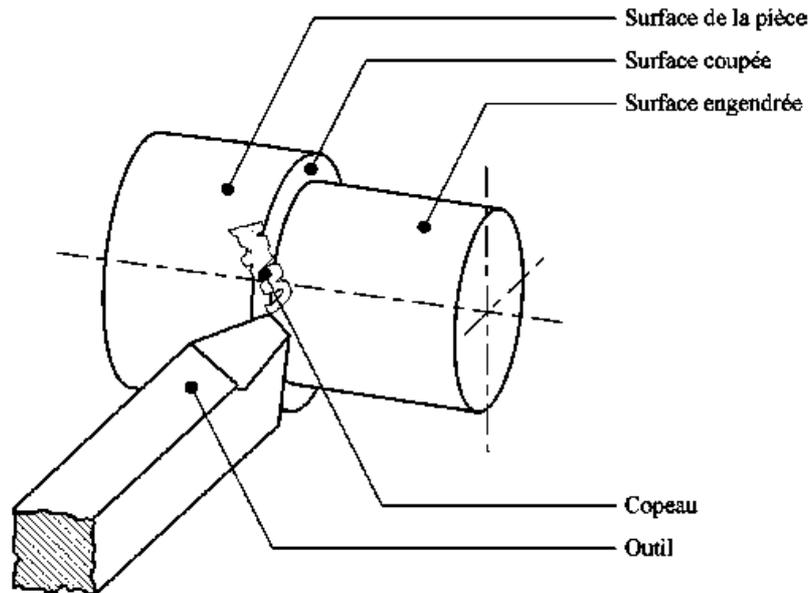


Figure I-1 : Surfaces de la pièce.

I.2.2. Eléments de l'outil :

Il existe une grande diversité d'outils de coupe. Toutefois, les principaux éléments des différents outils sont semblables. Ainsi, nous nous baserons sur qu'un seul outil de coupe en tournage. Les définitions peuvent ensuite être déduites pour tout autre type d'outil. Dans cette partie, on ne donne que les définitions nécessaires à la compréhension de phénomènes de coupe expliqués plus loin. Les définitions complètes se trouvent dans la norme ISO3002/1982.

I.2.2.1. Faces et arêtes de l'outil :

Un outil de coupe consiste en un **corps** et une **queue**. Un corps est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps. D'autre part, la queue de l'outil est la partie par laquelle celui-ci est maintenu.

La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille) est appelée **partie active**. On y distingue différentes faces et arêtes qui sont illustrées sur la figure (I-2) (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille).

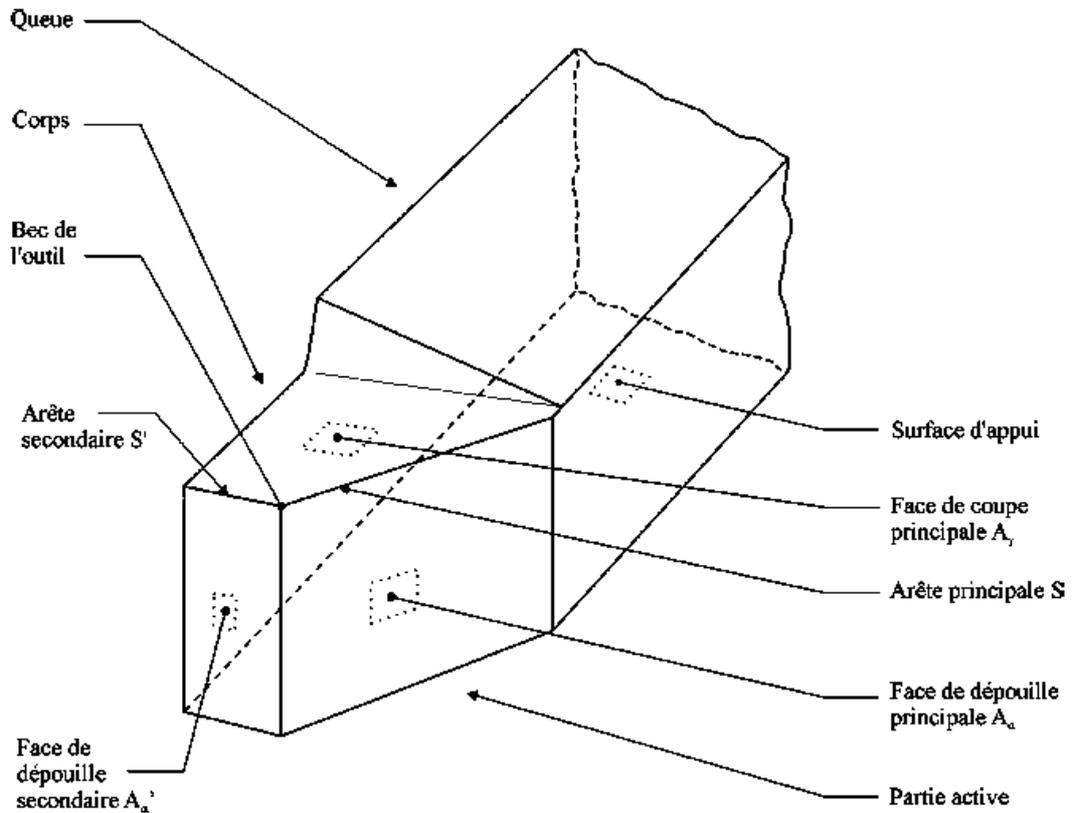


Figure I-2 : Eléments de l'outil.

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

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

I.2.1.2. Angles de l'outil :

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

La figure (I-3) illustre, dans le système de référence outil en main, les trois angles principaux du taillant, l'angle de dépouille α , l'angle de taillant β et l'angle de coupe γ .

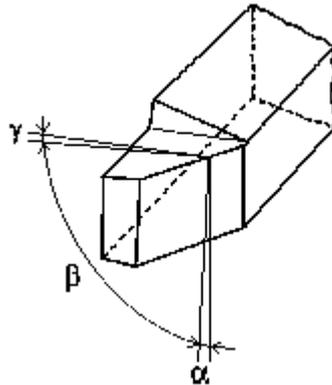


Figure I-3 : Angles du taillant (outil en main).

La figure (I-4) illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail : outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

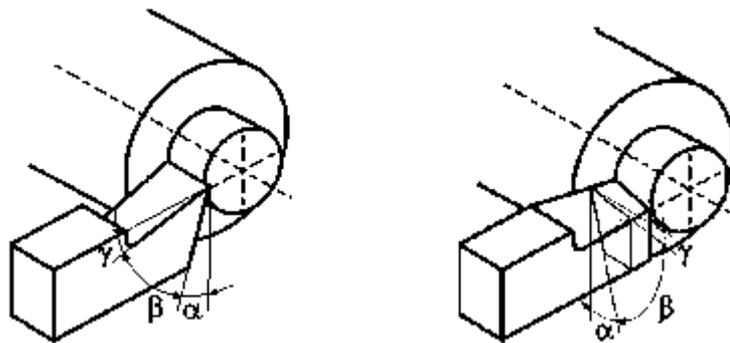


Figure I-4 : Angles du taillant (outil en travail).

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

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (\text{I-1})$$

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

I.2.2. Paramètres cinématiques de coupe :

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe en plus d'autres facteurs qui influent l'usinage tels que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, les fluides de coupe, l'état de la machine-outil, etc.

I.2.2.1. Mouvement de l'outil et de la pièce :

Les paramètres d'usinage sont des grandeurs qui caractérisent les mouvements de l'outil et de la pièce à usiner ainsi que les valeurs de la surépaisseur d'usinage et de la section de coupe.

Pour enlever de la matière en cours d'usinage, deux mouvements sont nécessaires : **mouvement de coupe** et **mouvement d'avance**. D'une manière générale les mouvements de coupe peuvent être donnés soit par la pièce comme dans notre cas (le tournage) soit par l'outil.

I.2.2.2. Mouvement de coupe :

Le mouvement de coupe est un mouvement relatif principal entre l'outil et la pièce. Il est caractérisé par la **vitesse de coupe** V_c qui est une vitesse instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la **vitesse de rotation** n et de diamètre D de l'élément en rotation. Pour le tournage, il faut prendre le diamètre du cercle qui se trouve sur le point de l'arête de coupe le plus éloigné de l'axe de rotation.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad [m/min] \quad (I-2)$$

Etant donné que la vitesse de coupe V_c est définie en m/min , le diamètre D en mm et la vitesse de rotation n en tr/min , le chiffre « 1000 » tient place de facteur de conversion d'unité.

I.2.2.3. Mouvement d'avance :

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Il peut être composé de plusieurs mouvements mais seulement de façon à ce qu'au moins une de ses composantes soit rectiligne. Le mouvement d'avance est caractérisé par l'**avance** f qui est une vitesse instantanée du mouvement d'avance du point considéré de l'arête de coupe par rapport à la pièce. Elle est exprimée soit en mm/min soit en $mm/tour$.

Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance combinés constituent le **mouvement résultant de coupe**, alors que l'angle entre ces deux mouvements est appelé **angle de direction d'avance** φ .

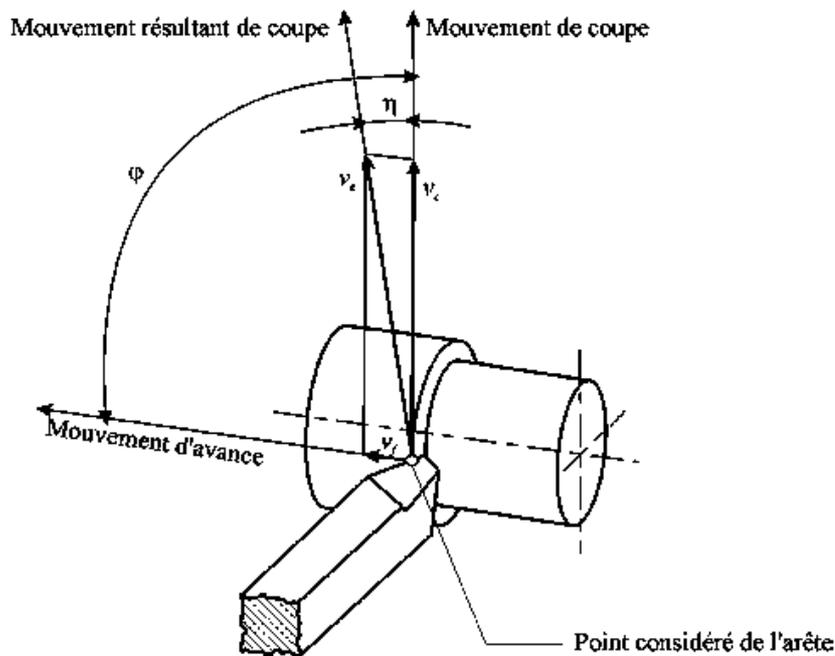


Figure I-5 : Mouvement de l'outil et de la pièce.

I.2.3. Paramètres géométriques de coupe :

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée **profondeur de coupe** dc . Cependant, afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil de coupe. La partie de matière usinée entre la surface de la pièce et la surface finale désirée (après avoir effectué toutes les passes nécessaires) est appelée **surépaisseur d'usinage**. On appelle la **coupe** la couche de matière

qui est enlevée par une action unique de la partie active et transformée en copeaux. Ces différents paramètres sont illustrés à la figure 6.

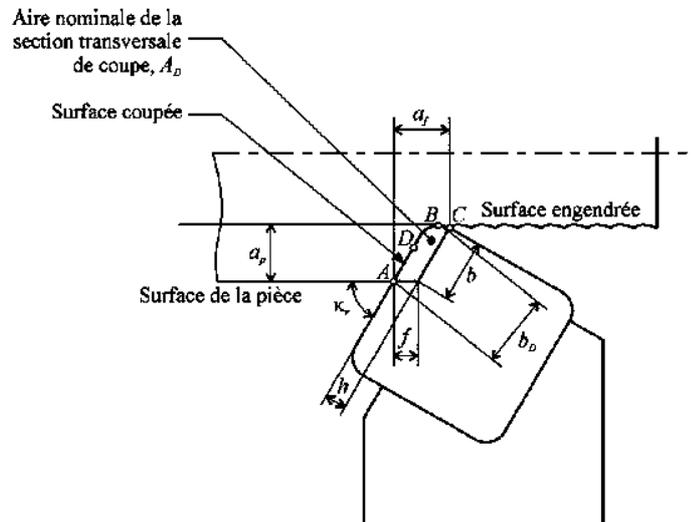


Figure I-6 : Dimensions de coupe.

Où : dc - profondeur de coupe, a_f - engagement de l'arête, f - avance, h - épaisseur de coupe, b - largeur nominale de coupe, K_r - angle de direction d'arête, D - point principal de l'arête.

D est un point particulier de référence appartenant à l'arête active principale et utilisé pour la définition de grandeurs géométriques de base. D'habitude il est placé de telle sorte qu'il divise la longueur de l'arête principale en deux parties égales.

I.3. Etude de la coupe des métaux :

L'opération de la coupe consiste à transformer une ébauche, constituée d'un certain matériau, en une pièce par l'action d'outils animés d'un mouvement relatif par rapport à la pièce par la machine-outil.

D'un point de vue énergétique, le processus de formation des copeaux absorbe une puissance P pour produire un débit volumique de copeaux Q . L'opération de coupe s'effectue aussi au prix d'efforts et d'échauffements, qui généralement évoluent et fluctuent au cours de l'opération et qui risquent de compromettre le respect des tolérances dimensionnelles. La structure de la machine-outil doit, notamment pour les opérations de finition, posséder une grande rigidité, être capable de réduire rapidement et fortement l'amplitude des vibrations et être conçue ou choisie en fonction des caractéristiques des pièces à usiner.

I.3.1. Efforts de coupe :

Pour simplifier le problème relatif aux actions de contact pièce sur outil, c'est-à-dire aux efforts de coupe, on se placera dans les conditions d'une coupe orthogonale où le vecteur avance f est perpendiculaire à l'arête de coupe figure (I-7).

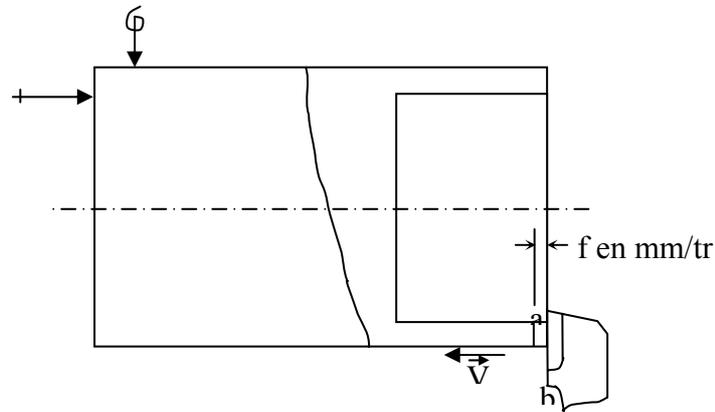


Figure I-7 : Coupe orthogonale.

D'après J. Vergnas [15], la coupe par chariotage longitudinal donne lieu, au moins à deux efforts composants F_s et F_t , et un effort de coupe résultant F_c figure (I-8). Expérimentalement, J. Vergnas a vérifié que $F_t \approx F_c$.

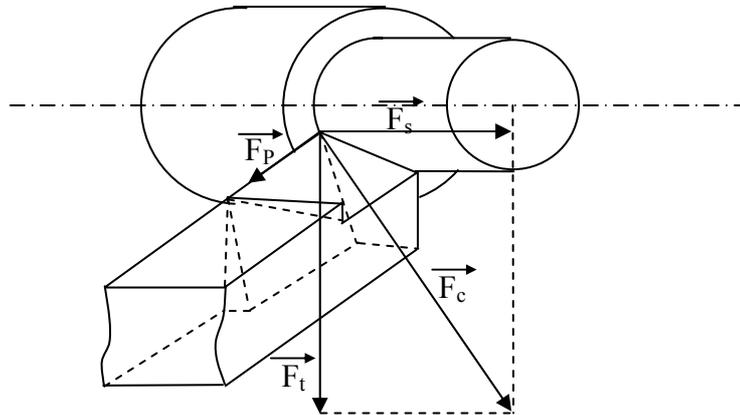


Figure I-8 : Décomposition des efforts de coupe

F_t : effort tangentiel ; F_s : effort d'avance ; F_p : effort de répulsion (négligeable dans le cas d'une coupe orthogonale) ; F_c : effort de coupe.

L'outil cisaille la matière dans les conditions dynamiques. La vitesse de cisaillement V_i , relativement importante, crée un effet thermique qui élève la température au niveau du plan de cisaillement. Le résultat se présente sous la forme d'un copeau qui se déroule sur la face d'attaque de l'outil.

La figure (I-9) présente le phénomène de cisaillement de matière.

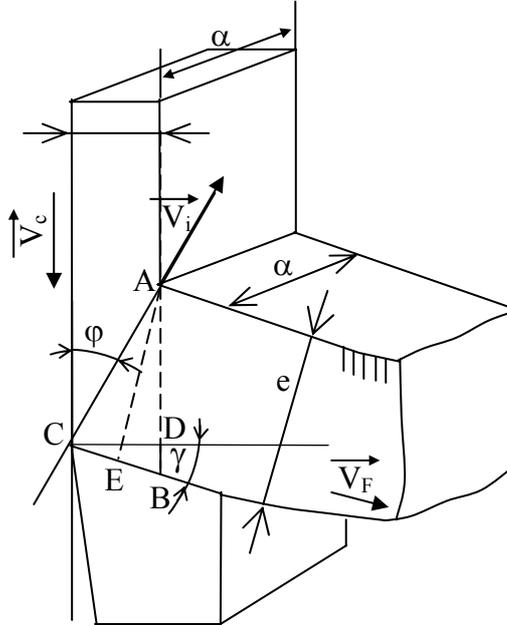


Figure I-9 : Présentation du phénomène de cisaillement de matière [15].

Où :

V_i : vitesse de cisaillement, V_c : vitesse de coupe, V_F : vitesse de sortie ou de fuite du copeau,
 f : avance par tour, e : épaisseur de copeau $e > f$, φ : angle de cisaillement,
 γ : angle de coupe.

Nous pouvons calculer l'angle de cisailment φ :

$$\tan g \varphi = \frac{CD}{AD} \tag{I-3}$$

Où

$$CD = f$$

$$AD = AB - BD = \frac{e}{\cos \gamma} - f \cos \gamma$$

alors :

$$\tan g \varphi = \frac{f \cos \gamma}{e - f \sin \gamma} . \tag{I-4}$$

Quelle que soit la nature de l'outil de coupe, les efforts de coupe s'inscrivent dans un diagramme établi par Merchant figure (I-10).

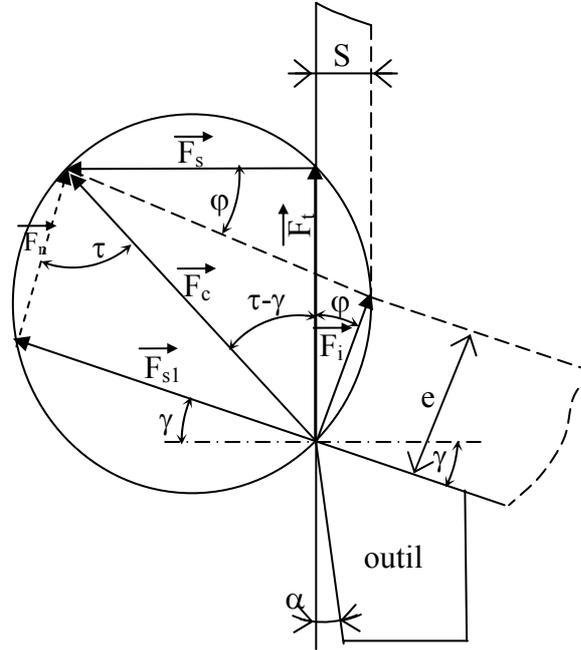


Figure I-10 : Diagramme de Merchant [15].

La théorie de Merchant permet de tracer un système d'efforts qui explicite la formation de copeau.

Soient : F_i : l'effort de cisaillement, F_t : l'effort tangentiel, F_s : l'effort d'avance,

F_c : l'effort de coupe résultant et F_{s1} : l'effort parallèle à la face d'attaque ; nous aurons les relations suivantes :

$$F_i = F_t \cos \varphi - F_s \sin \varphi$$

$$F_{s1} = F_t \sin \gamma + F_s \cos \gamma$$

$$F_n = F_t \cos \gamma - F_s \sin \gamma .$$

L'angle de frottement dans l'interface outil-pièce a pour expression :

$$\tan g \tau = \frac{F_{s1}}{F_n} = \frac{F_s + F_t \tan g \gamma}{F_t - F_s \tan g \gamma} \tag{I-5}$$

Et

$$F_c = \frac{F_i}{\cos(\tau - \gamma + \varphi)} . \tag{I-6}$$

La puissance absorbée par la coupe est égale à :

$$P = F_t (V_c / 60) \quad (I-7)$$

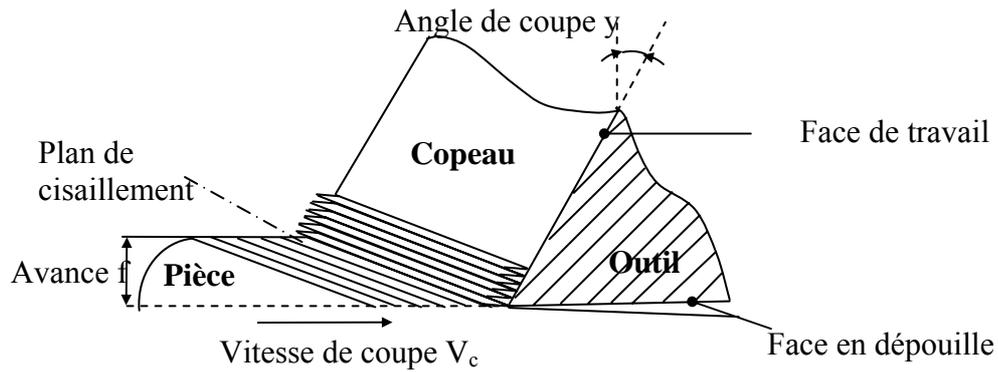
Avec $F_t \approx F_c$

I.3.2. Mécanisme de formation de copeau :

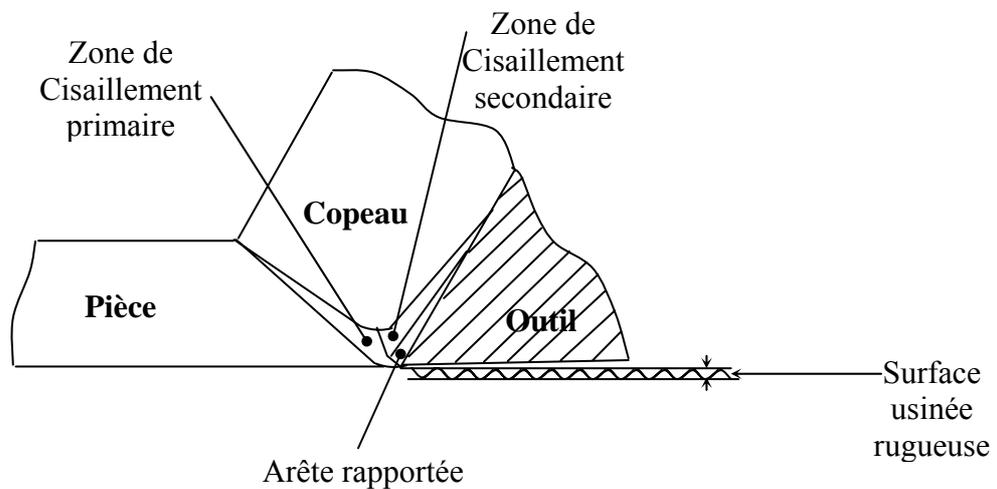
Même si l'usinage a fortement évolué, les phénomènes physiques présents dans les procédés de coupe demeurent dans une large part inchangés, mais ne sont pas toujours clairement perçus par le praticien. C'est pourquoi nous voudrions ici les présenter succinctement, ainsi que leurs conséquences sur le choix des conditions de coupe. La formation de copeau présente un paradoxe, simple dans son principe et complexe dans les phénomènes physiques impliqués.

La coupe consiste, en effet, à séparer de la pièce un copeau à l'aide de l'arête tranchante d'un outil à l'instar d'une palette soulevant un paquet de cartes et les faisant glisser les une sur les autres figure (I-11, a). Toutefois, la matière donne naissance au copeau par passage dans la zone de cisaillement primaire où elle subit en un temps très bref une déformation plastique et un échauffement considérables. En outre, le frottement quasi sec du copeau sur l'outil créé, au voisinage de l'interface à basse vitesse de coupe, une arête rapportée figure (I-11, b).

La rugosité de surface usinée augmente avec les dimensions de l'arête rapportée. Selon E.Felder [10], cette rugosité devient inacceptable pour une grande arête rapportée dont les dimensions (épaisseur, longueur) sont du même ordre que l'avance. A grande vitesse, cette arête rapportée est remplacée par une zone de cisaillement secondaire qui élève très fortement la température de l'outil et conditionne directement sa dégradation (par abrasion, déformation plastique, réaction chimique, diffusion...) et sa durée de vie. Dans des conditions extrêmes de déformation plastique, de vitesse de déformation et de température, nous devons choisir au mieux nos paramètres de coupe dont les principaux sont l'avance f et la vitesse de coupe V_c .



a) formation du copeau par cisaillement : analogie du paquet de cartes



b) usinage avec arête rapportée et zones de cisaillement primaire et secondaire lors de la formation du copeau

Figure I-11 : Principe et caractérisations fondamentales des procédés de coupe [10].

Dans la zone de coupe, le matériau usiné est soumis à des déformations intenses à grande vitesse. Plusieurs cas peuvent être rencontrés lorsque l'arête de l'outil reste continûment en prise [11] :

- Le matériau usiné est fragile : une fissure se propage dès le début du cisaillement. L'amorce de copeau se détache de la pièce avant même qu'un ruban de matière ne se soit formé ; on obtient de la limaille.
- Le matériau usiné est ductile et l'échauffement dans la zone de coupe ne permet pas d'effacer l'écroutissage dû au cisaillement ; un ruban de matière est créé, dont la dureté est supérieure à celle du matériau usiné et dont la ténacité est faible (fragilisation due au fort écroutissage). Il suffit souvent d'imposer à ce ruban un rayon de courbure ou une trajectoire qui le conduise à rencontrer un obstacle, pour qu'il se casse. Parfois la

ténacité du ruban est suffisamment élevée pour que sa fragmentation mécanique devienne une contrainte très coûteuse.

- Le matériau usiné est ductile, mais l'adoucissement dû à l'échauffement compense le durcissement dû à l'écrouissage. Périodiquement le régime de cisaillement stable est remplacé par un cisaillement localisé instable ; le copeau est constitué donc d'une succession de zones très déformées et de zones peu déformées.

Pour un matériau usiné tel que l'acier, on passe continûment du cas du copeau ductile obtenu par cisaillement stable au cas du copeau pseudo-fragile obtenu par cisaillement instable.

Si l'on admet que le travail de coupe ne modifie pas notablement la structure de la matière enlevée, on aura un débit de copeau en mm^3 / min exprimé par la formule suivante :

$$Q = Vc.f.dc \quad (I-8)$$

Dans laquelle $f.dc$ est la section à couper.

I.4. Endommagement des outils de coupe :

La formation du copeau implique le triple frottement sec de deux corps pressés l'un contre l'autre figure (I-12 ; a).

- Le système C-O : copeau-outil côté face A_γ ;
- Le système P-O : pièce-outil côté face A_α ;
- Le système P-O : pièce-outil côté face A_α' .

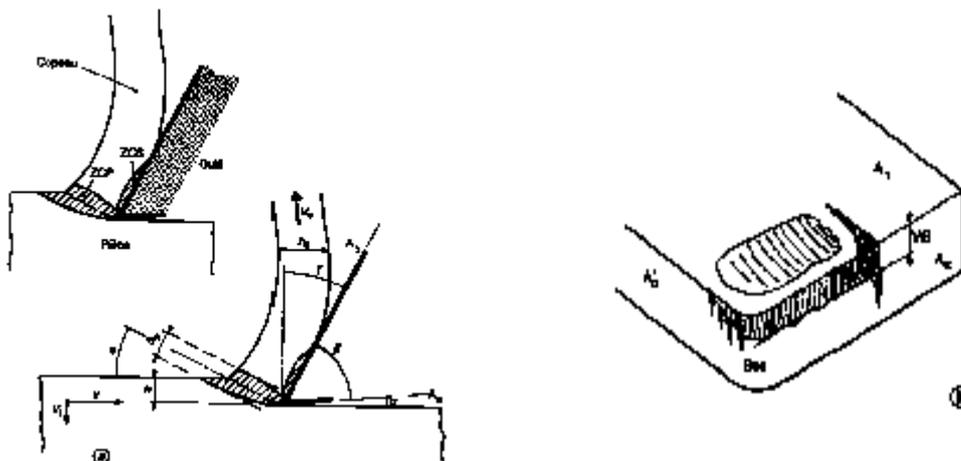


Figure I.12 : (a) Formation du copeau et (b) Usure de l'outil [6].

Ces trois types de contact ne sont pas équivalents : le premier se produit à haute température en condition de confinement, le deuxième à température modérée en condition de semi-confinement et le troisième à température modérée en condition de non-confinement. Si l'on met à part les ruines d'outil par écaillage et micro-écaillage, on peut observer que les systèmes C-O (A_γ), P-O (A_α) et P-O (A_α') donnent lieu plus ou moins rapidement à trois types d'endommagements macroscopiques figure (I-12 ; b) [11] :

- Une plage d'usure plane sur la face A_α en dépouille principale, dont la hauteur moyenne est couramment désignée par le symbole VB. Quand VB croît, l'arête de coupe recule et les cotes s'écartent de la valeur visée ;
- Le creusement d'un cratère sur la face de coupe A_γ , dont la profondeur maximale est couramment désignée par le symbole KT. La résistance mécanique de l'outil décroît lorsque KT augmente ;
- Le creusement d'un sillon sur la face A_α en limite de zone de coupe et d'une multitude de petits sillons sur la face A_α' . L'état de la surface usinée est d'autant plus détérioré que ces sillons sont plus développés.

Il est nécessaire de se préoccuper de l'évolution des trois systèmes ci-dessus dont dépendent la productivité et la qualité des usinages. Puisqu'on s'intéresse dans cette partie de l'endommagement des outils, on se limitera à l'analyse du seul système C-O.

Le frottement sec de deux corps sous une pression de contact élevée conduit fréquemment à la construction d'un troisième corps plus au moins stable entre les deux premiers. Passons en revue les paramètres spécifiques de chacun des trois corps **1**, **2** et **3** qui déterminent l'évolution de ce système frottant C-O.

- **Corps 1 : le copeau**

Le copeau se différencie du matériau usiné par l'intense déformation et par le cycle thermique subi. Ainsi, dans le cas d'un acier qui a (sauf exception) une structure cubique centrée à température ambiante, la face interne du copeau a très souvent une structure cubique face centrée.

Le copeau est rarement monphasé ; les mécanismes endommageants vont dépendre de chaque famille de phases, et notamment :

- De leur quantité respective et de leur dureté à chaud après écrouissage ;
- De leur répartition et notamment de leur homogénéité et de leur isotropie ;
- De leur histoire thermomécanique et notamment des étapes de la mise en forme des pièces, qui précède l'usinage. C'est ainsi qu'il peut souvent y avoir des écarts

d'usinabilité entre une barre laminée et pièce forgée à chaud à partir de cette même barre.

- **Corps 2 : l'outil**

L'outil est soumis à un gradient thermique important. Il peut travailler en subissant des cycles thermiques fréquents. Des phénomènes tels que la fatigue thermique vont dépendre de la conductivité du matériau de l'outil, de son coefficient de dilatation, de son module d'élasticité E, etc.

L'outil est soumis à des sollicitations mécaniques qui dépendent des conditions de coupe, de la rigidité du contact pièce-outil, de la technique d'usinage. Des endommagements tels que la fatigue mécanique, l'écaillage, dépendent de la dureté du matériau de l'outil, de sa compacité, de sa ténacité, etc.

L'outil est en contact intime avec le copeau à haute température. A chaque dégagement, sa face de coupe est exposée au contact de l'air ambiant. Il faut donc considérer la réactivité chimique entre le matériau de l'outil et :

- L'élément principal du matériau usiné ;
- Telle ou telle phase incluse du matériau usiné ;
- Un constituant de réaction du matériau usiné avec l'air ambiant ;
- L'air ambiant (résistance à l'oxydation de l'outil).

L'outil est endommagé par les dures ou les inclusions abrasives du matériau usiné. Sa résistance dépend de sa dureté à chaud, de sa compacité, etc.

- **Corps 3 :**

En coupe, on observe trois grandes familles de troisième corps :

- Les dépôts macroscopiques, qui sont constitués de particules issues du corps **1** et stabilisées sur le corps **2** ;
- Les dépôts microscopiques qui peuvent être constitués de particules issues du corps **1**, avec ou sans réactivité chimique entre celles-ci et le corps **2** ;
- Les débris, qui peuvent être des particules abrasives préalablement incluses dans le corps **1**, des produits de réaction du corps **1** avec l'atmosphère, des morceaux du corps **2** arrachés, etc.

Nous allons montrer par la suite que :

- Les dépôts macroscopiques constitués à température modeste provoquent essentiellement un endommagement mécanique (régime vibratoire de travail de l'outil conduisant à fissuration et rupture) ;

- Les dépôts microscopiques constitués à température élevée donnent lieu à des altérations de l'outil : endommagement chimique ;
- Les débris de toute nature sont cause d'une abrasion de la surface des outils : endommagement physique.

I.4.1. Mécanismes endommageant des outils de coupe:

I.4.1.1. Endommagement induit par les dépôts macroscopiques :

La surface interne du copeau qui frotte sur l'outil est vierge, exempte de tout corps étranger. Il en est très rapidement de même de la surface de l'outil nettoyée par le copeau. Les conditions sont donc favorables pour réaliser des soudures par friction après écrasement des aspérités, à moins qu'un film de lubrifiant ne vienne s'interposer [11]. Trois cas peuvent se produire.

Premier cas (d'effet nul en terme d'endommagement) : la plupart des soudures qui se sont constituées n'ont aucune résistance mécanique.

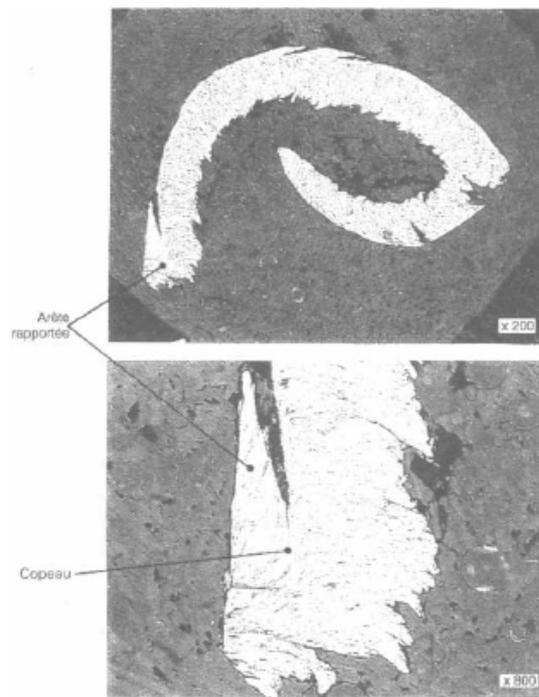


Figure I-13 : Arête rapportée restée soudée à un copeau obtenu en usinant un acier XC10 [11].

Deuxième cas : les soudures constituées résistent plus que les aspérités. La rupture des jonctions conduit à déposer des fragments du matériau le plus doux sur le plus dur. Il y a transfert de l'un sur l'autre. Compte tenu de la nature des corps **1** et **2**, c'est pratiquement toujours sur l'outil que se dépose le corps **3**, constitué du corps **1** très écroui. Quand la zone

de contact C-O est recouverte, des particules du matériau usiné peuvent continuer à se déposer sur lui-même : un dépôt macroscopique se constitue. La géométrie de la zone de coupe évolue (perte d'acuité de l'arête) et un effort plus important doit être appliqué à l'outil pour poursuivre la coupe. Le dépôt atteint une épaisseur et une forme qui dépende de la rigidité de la liaison outil-pièce et de la résistance au cisaillement du matériau déposé. Dans les cas les plus spectaculaires, une arête rapportée se constitue sur l'outil figure (I-14).

Très souvent des morceaux des dépôts macroscopiques sont évacués, ce qui peut entraîner un régime vibratoire : l'outil se cambre, puis se relaxe. On observe une altération de la qualité des surfaces usinées et un endommagement mécanique de l'outil soumis à des surcharges importantes.

Troisième cas : l'évacuation d'un dépôt macroscopique constitué comme dans le deuxième cas (en particulier d'une arête rapportée très instable en régime vibratoire) se réalise par arrachement d'une partie de la couche superficielle de l'outil sur laquelle s'est constitué le dépôt.

I.4.1.2. Endommagement induit par les dépôts microscopiques :

Dans les conditions d'usinage à vitesses de coupe élevées (et par conséquent températures élevées dans la zone de coupe secondaire), un dépôt du matériau usiné qui se formerait ne serait pas écroui et n'atteindrait pas une taille capable de modifier les efforts de coupe. Seuls peuvent être obtenus :

- Des dépôts (corps **3** d'un frottement sec) du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, dont l'ordre de grandeur d'épaisseur est celui de la microgéométrie de l'outil ;
- Des dépôts un peu plus épais du matériau usiné ou d'éléments inclus dans le matériau usiné, dont la rhéologie à la température du contact copeau-outil rend possible une lubrification hydrodynamique.

Dans un cas ou dans l'autre de ces deux types de dépôts qui ne font pas croître les efforts de coupe (et par conséquent ne génèrent pas un endommagement mécanique), ces dépôts peuvent être réactifs avec le matériau de l'outil ; ils contribuent alors à un endommagement chimique. Si ces dépôts ne sont pas réactifs avec le matériau de l'outil, leurs effets endommageants sont assez modestes : étant non durcis, ils ne sont pas abrasifs. Leur évacuation peut toutefois donner lieu à des arrachements de particules de l'outil.

I.4.1.3. Endommagement induit par les débris :

L'usure abrasive des outils de coupe résulte de l'arrachement de petits morceaux par l'impact sur leur surface de particules ayant une dureté équivalente ou supérieure à la leur. Ces débris peuvent provenir du matériau usiné, de grains de l'outil arrachés par rupture de microsoudures, de morceaux d'arête rapportée évacués, de morceaux de l'outil arrachés au moment de l'évacuation de parties de dépôts, de morceaux de l'outil abrasés par l'impact des autres débris, etc. il apparaît utile de séparer ce mécanisme de celui décrit au paragraphe 4.1.2 consacré à la pollution des outils. Bien souvent les mécanismes sont liés et le matériau de l'outil qui est altéré a lui-même une dureté ou une ténacité superficielle qui est amoindrie.

La nature de l'abrasif est le premier paramètre à prendre en compte. Si l'on se place du côté de l'outil, l'échelle de résistance à l'abrasion est sensiblement celle de sa dureté à chaud, soit dans l'ordre croissant [11]:

- Carbure de tungstène ;
- Cermet ;
- Carbure de titane ;
- Alumine ;
- Nitrure de bore cubique ;
- Diamant.

Cette échelle des matériaux de coupe n'est pas nécessairement le critère essentiel pour sélectionner un outil. En général, plus une nuance a une grande dureté, plus sa ténacité est faible et plus le coût fabrication de l'outil est élevé.

La taille des particules abrasives, qu'elles proviennent des outils ou des matériaux usinés, est le deuxième paramètre dont dépend la vitesse d'abrasion : celle-ci est d'autant plus faible que les particules abrasives sont plus petites. Le contrôle de la taille des inclusions dures d'un matériau usiné est souvent très déterminant. En particulier dans l'usinage de matériaux moulés alliés riches en éléments carburigènes.

I.4.2. Détermination de la durée de vie des outils de coupe :

Au cours de l'usinage, une arête rapportée se forme presque instantanément au début de la coupe. Si cette arête rapportée protège momentanément l'arête de coupe, elle altère la surface usinée en laissant, derrière elle, des traces d'enlèvement de matière et de frottement.

Ce frottement s'accroît très vite. Il se traduit par une élévation de température dans la zone de coupe et un affaissement dans la face de coupe et une usure rapide dans la face frontale de l'outil de coupe.

Lorsque l'usure frontale VB devient trop importante, l'arête de coupe s'effondre et l'outil sera pratiquement hors service. Dans ces conditions, on ne peut pas tolérer un dépassement VB trop important sans risquer une détérioration de la surface usinée et une erreur dimensionnelle excessive. Il faut donc déterminer une valeur limite de l'usure frontale pour laquelle les surfaces usinées sont acceptables.

Les fabricants sont intéressés par ce problème. Ils ont dirigé toutes ces recherches à établir une relation entre la durée de coupe et la vitesse de coupe dans les conditions de travail constantes.

C'est à partir de 1907 que l'américain Taylor développe un plan de recherche pour déterminer la durée de vie d'un outil de coupe en fonction de la vitesse de coupe.

I.4.2.1. Loi de Taylor :

Dans ces travaux, Taylor a négligé l'état de surface produit et applique systématiquement l'opération de chariotage par un outil à bec rond en acier rapide coupant à sec avec les paramètres suivants :

$f = 0.5\text{mm} / \text{tour}$: avance par tour

$dc = 5\text{mm}$: profondeur de passe.

Il a retenu douze variables :

1. Durée de vie de l'outil.
2. Nature de l'arrosage.
3. Elasticité de la pièce et de l'outil.
4. Puissance de la machine.
5. Gamme des vitesses de coupe et des avances de la machine.
6. Quantité de la matière à usiner.
7. Composition chimique et traitement thermique de l'outil.
8. Forme de la partie active de l'outil.
9. Vitesse de coupe V_c .
10. Profondeur de passe dc .
11. Epaisseur du copeau.
12. Effort de pression du copeau sur l'outil.

Au cours d'essais successifs en conservant à chaque fois toutes les variables identiques sauf V_c et T . Taylor a observé que les durées de coupe T correspondantes à des vitesses de coupe V_c différentes donnent des points alignés qui forment une droite inclinée représentative de la forme :

$$V_c.T^n = C^{st} \quad \text{Loi de Taylor} \quad (\text{I-9})$$

La figure (I-14) présente le graphe de la fonction $\log T = f(\log V_c)$ qui représente la relation entre la durée de coupe et la vitesse de coupe. Sur ce graphe, on remarque qu'à la vitesse de coupe V_{c1} correspond une durée de coupe T_1 et à la vitesse V_{c2} une durée T_2 pour une même valeur de l'usure frontale.

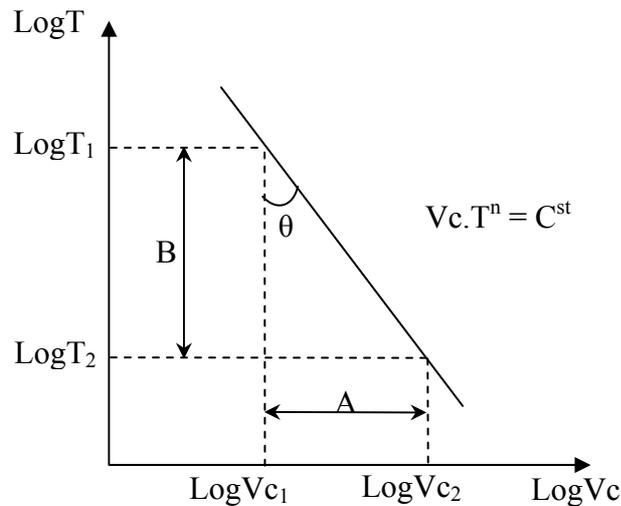


Figure I-14 : Présentation de la durée de coupe en fonction de la vitesse de coupe.

L'inclinaison de la pente est donnée par la tangente de l'angle θ ,

$$\tan g \theta = \frac{A}{B} = n$$

nous aurons :

$$V_{c1}.T_1^n = V_{c2}.T_2^n = C^{st} \quad (\text{I-10})$$

d'où :

$$\log V_{c1} + n \log T_1 = \log V_{c2} + n \log T_2 = C^{st}$$

et

$$n = \frac{\log V_{c2} - \log V_{c1}}{\log T_2 - \log T_1} \quad (\text{I-11})$$

La pente n de la droite peut varier en fonction des paramètres suivants ; profondeur de passe, avance, matériau usiné et matériau constituant de l'outil.

En pratique, elle ne s'écarte pas ou peut des valeurs résumées dans le tableau suivant [15] :

Matériau constituant de l'outil	Valeur de la pente n
Outil en acier de coupe rapide	0.1 – 0.125
Outil en carbure métallique	0.2 – 0.3
Outil en céramique	0.4 – 0.5

I.4.2.2. D'autres modèles de la durée de vie des outils :

Les travaux de Taylor forment une base de recherche sur le problème de la durée de vie des outils de coupe. Plusieurs chercheurs ont développé d'autres modèles en ajoutant l'influence des paramètres négligés dans le modèle de Taylor.

- **Modèle du commandant Denis :**

Quelque temps après Taylor, le commandant Denis s'est intéressé à des essais sur le débit de copeau des outils.

Il a sorti par les conclusions suivantes :

Toutes les autres conditions de coupe restant les mêmes, le débit de copeau varie avec la vitesse de coupe.

Le débit de copeau maximal de l'outil conserve la même valeur lorsque la section de copeau varie seulement si l'avance f , la profondeur de passe dc et la vitesse de moindre usure V_{mu} restent liés par la relation :

$$f_1^2 . dc_1 . V_{mu1}^3 = f_2^2 . dc_2 . V_{mu2}^3 = C^{st} \quad \text{Loi du commandant Denis} \quad (I-11)$$

- **Modèle de Gilbert :**

Ce modèle complète le modèle de Taylor en introduisant l'influence de l'avance et de la profondeur de passe sur la durée de vie de l'outil.

$$T = C . f^x . dc^y . Vc^n \quad \text{Modèle de Gilbert} \quad (I-12)$$

Où C est un constant dépendant du type du matériau à usiner, nature de l'outil de coupe, etc, et x, y, n sont des exposants qui dépendent de la nature de l'outil de coupe.

- **Modèle de König-Depieureux :**

Ce modèle présente l'avantage de prendre compte des résultats expérimentaux d'une manière plus précise que les modèles précédents, mais son établissement est un peu délicat et nécessite de moyens de calcul très performants.

Modèle générale :

$$T = \text{Exp}(-\alpha.Vc^\gamma - \gamma.f^\mu - \delta.dc^\lambda) \quad (\text{I-13})$$

Modèle simplifié :

$$T = \text{Exp}(-\alpha.Vc^\gamma + \beta) \quad (\text{I-14})$$

Avec

$$\beta = -\gamma.f^\mu - \delta.dc^\lambda = C^{st}.$$

Passons à la forme logarithmique, nous trouvons :

$$\log T = -\alpha.Vc^\gamma + \beta \quad (\text{I-15})$$

I.5. Discussion :

Les efforts de compréhension des procédés de coupe et des mécanismes endommageant des outils contribuent aux progrès des matériaux d'outils et matériaux usinés. Ils doivent aussi permettre un choix optimisé des conditions de coupe pour arriver à une exploitation meilleure des machines-outils et une utilisation correcte des outils de coupe. Pendant très longtemps l'homme de l'art a choisi ses paramètres de coupe par expérience. Une approche très rigoureuse est devenue nécessaire.

Des outils modernes tels que les nitrures de bore cubiques CBN coûtent environ dix fois plus cher que plaquettes en carbure revêtues de nitrure de titane ; utilisés à de très grandes vitesses de coupe, ils réduisent considérablement le temps de production mais ils peuvent multiplier le coût des pièces réalisées [11].

Les matières constituant les pièces usinées ont été choisies en fonction de la destination finale de ces pièces.

Mais la constitution d'un acier, par exemple (structure, éléments d'addition) affecte son usinabilité.

De nombreux métaux dits « à usinabilité améliorée » ont été développés pour arriver à la fois à diminuer le temps de coupe (augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance), réduire les temps morts (changements d'outils moins fréquents) et améliorer la qualité d'usinage (rugosité plus faible), tout en conservant les caractéristiques fonctionnelles de la pièce fabriquée [3].

Une assistance par ordinateur aux choix des paramètres de coupe est très souhaitable, car il faut prendre en compte non seulement le couple outil-matière usinée, mais aussi les particularités de la machine-outil, des outillages et de la géométrie de la pièce usinée. Le travail nécessaire pour compléter cette mission a besoin de bases de données très riches. Si des normes existaient, en plus grand nombre pour codifier le procédé de coupe, les bases existantes ou en cours de création seraient cohérentes et, par conséquent, additives.

Chapitre II

ALGORITHMES ÉVOLUTIONNAIRES

Sommaire

II.1 Introduction	27
II.2 Algorithme évolutionnaire	27
II.3 Principes généraux	28
II.4 Algorithme génétique	30
II.4.1 Principes généraux	30
II.4.2 Représentation	30
II.4.3 Evolution	31
II.4.3.1 Sélection	31
II.4.3.2 Recombinaison	32
II.4.3.3 Mutation	32
II.5 Algorithme à essaim de particules	33
II.5.1 Principes généraux	33
II.5.2 Représentation	34
II.5.3 Evolution	34
II.6 Notre choix	36

II.1. Introduction :

L'évolution biologique a engendré des systèmes vivants extrêmement complexes. Elle est le fruit d'une alternation progressive et continue des êtres vivants au cours des générations et s'opère en deux étapes : la sélection et la reproduction.

- La sélection est le mécanisme central qui opère au niveau des populations, en choisissant les individus les plus meilleurs selon leurs capacités et leur adaptation avec l'environnement.
- La reproduction implique une mémoire : l'hérédité, sous la forme des gènes. Ce matériel héréditaire subit, au niveau moléculaire, des modifications constantes par mutations et recombinaisons, aboutissant aussi à une très grande diversité dans la génération qui suit.

Ces principes, présentés pour la première fois par Darwin, ont inspiré bien plus tard les chercheurs en informatique. Ils ont donné naissance à une classe d'algorithmes regroupés sous le nom d'algorithmes évolutionnaires (Evolutionary Algorithms EA). Par cette première étape, la recherche en optimisation se dirige vers la simulation de la nature dans ces diverses progressions.

II.2. Algorithme évolutionnaire :

Il existe une catégorie de problèmes pour lesquels, voire impossible, de trouver une solution en un temps limité. Il est alors utile de trouver une technique permettant la localisation rapide des solutions sous-optimales, sachant que l'espace de recherche à une taille et une complexité suffisamment importante pour éliminer toute garantie d'optimalité.

Pour cela, un système capable de s'auto-modifier au cours du temps, tout en améliorant ses performances dans l'accomplissement des tâches qui lui sont confiées, semble ouvrir la voie à une recherche intéressante.

Les EA sont basés sur des principes simples. En effet peu de connaissances sur la manière de résoudre ces problèmes sont nécessaires, même si certaines peuvent être exploitées afin de rendre plus efficace l'évolution (en effet, il n'est pas réaliste d'espérer obtenir une méthode d'optimisation raisonnablement efficace sans aucune connaissance sur le domaine à traiter). C'est pourquoi, dans de nombreux domaines, les chercheurs ont été amenés à s'y intéresser.

Un certain nombre de travaux ont porté sur l'optimisation des fonctions mathématiques complexes telles que proposées dans [21]. Les EA ont été appliqués à

différents problèmes issus de la recherche opérationnelle : l'optimisation des gains des PID (proportional-integral-derivative) [22], l'identification des paramètres des moteurs électriques [20], etc.

On trouve aussi des applications en robotique pour l'optimisation des trajectoires ou l'évitement des obstacles, en biochimie [4], en électrotechnique [25], [23] et en magnétique [1].

Par ailleurs, pour améliorer les performances des algorithmes, divers travaux comparatifs ont porté sur les différentes méthodes des EA, citons ici les travaux de G.Venter et al [12] et S.He et al [21]. Ils permettent entre autres de choisir un bon ensemble de particules -positions- de la génération initiale avec de bonnes constantes d'algorithme, ce qui permet non seulement d'améliorer la vitesse de convergence, mais aussi d'éviter de les faire converger vers des états correspondant à des minima locaux qui ne donnerait pas des solutions optimales.

Enfin, un certain nombre de travaux ont été effectués sur l'application de ces algorithmes dans la mécanique. Concernant le domaine d'usinage, il existe peu d'applications, nous citons quelques unes ci-dessous.

M.Assas et M.Djennane [17] ont appliqué l'algorithme génétique GA dans l'optimisation des conditions d'usinage à critère combiné. Dans ce travail, et par une comparaison des résultats obtenus par ces algorithmes avec celle de la méthode du simplexe et celle de J.S.Agapiou [14], ils ont montré l'avantage des GA par rapport à ces méthodes.

Dans le travail de V.Tandon et al [28], ils ont résolu le problème de minimisation de coût de production d'une simple passe en fraisage par l'algorithme à essaim de particules PSO. Cette application montre l'efficacité de cet algorithme, en le prenant seul.

Bien qu'aucune étude comparative entre les différentes méthodes des calculs évolutionnaires n'ait été réalisée, ces travaux fournissent une base théorique solide. On se rapproche alors de l'adaptation totale de ces algorithmes à l'optimisation des conditions de coupe.

A la suite de ce chapitre, nous représentons les principes généraux des systèmes adaptatifs basés sur les EA, ainsi que les méthodes qui en découlent.

II.3. Principes généraux :

Les EA sont une classe d'algorithmes d'optimisation par recherche probabiliste basés sur le modèle de l'évolution naturelle. Ils reposent sur deux principes d'exploitation et de sélection appliqués à une population (groupe) de solutions initiale. Dans ces deux principes, le hasard joue souvent le rôle du moteur générateur de la diversité.

La plupart des problèmes peuvent être résolus par une méthode de type recherche locale. Partant d'une configuration de position initiale, on cherche la meilleure solution dans le voisinage de cette configuration. Cette solution est optimale localement mais peut ne pas correspondre à un optimal global car il est possible qu'il existe une meilleure solution qui n'est pas dans le voisinage de la configuration initiale.

Les EA ont montré leur capacité à éviter la convergence vers des optima locaux, aussi bien que lorsqu'ils sont combinés avec des méthodes de recherche locale que lorsqu'ils sont seuls.

Quelque soit le type de problème à résoudre les EA opèrent selon les principes suivants ; la population est initialisée de façon dépendante du problème à résoudre, puis évoluée de génération à une autre à l'aide d'opérateurs de sélection, de recombinaison, de mutation ou de déplacement. Les facteurs à optimiser jouent le rôle d'évaluation des individus en leur attribuant une performance. Cette valeur favorisera la sélection des meilleurs individus, en vue, après reproduction (opérée par la mutation et/ou recombinaison ou par la déplacement), d'améliorer les performances globales ou individuelles de la population (groupe).

Plusieurs types d'évolution ont été développés, donnant naissance à trois grandes tendances ; les algorithmes génétiques (ou Genetic Algorithms GA), les stratégies d'évolution (ou Evolution Strategies ES) et l'optimisation par essaim de particules (ou Particle Swarm Optimization PSO). De ces trois méthodes classiques ont dérivés différentes techniques combinant les méthodes d'évolution les unes avec les autres, impossible à classer dans l'une des trois familles citées ci-dessus, elles sont néanmoins considérées comme des EA.

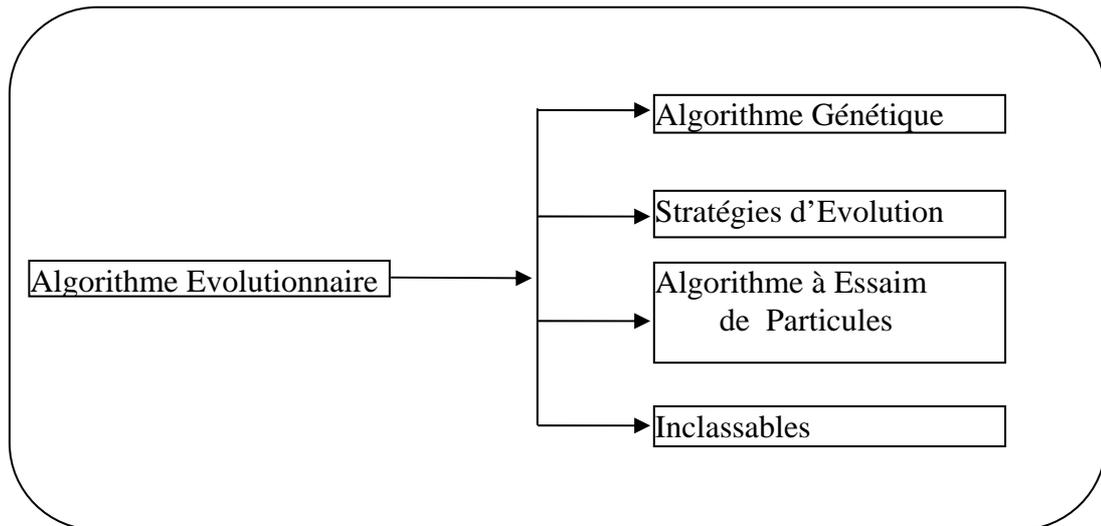


Figure II-1 : Différentes branches des algorithmes évolutionnaires.

Dans les sections suivantes, nous nous intéresserons à deux de ces méthodes et nous décrirons les particularités des GA et du PSO, méthodes que nous allons les comparer ensuite.

II.4. Algorithme génétique:

II.4.1. Principes généraux :

Développés dans les années 70 avec le travail de J.H.Holland [13] puis approfondis par D.E.Goldberg [8], les GA sont certainement la branche la plus utilisée des EA. La particularité de ces algorithmes est le fait qu'ils font évoluer des populations d'individus codés par une chaîne binaire. Ils utilisent les opérateurs de mutation et de recombinaison de différents types.

II.4.2. Représentation :

La représentation des individus est basée sur le codage binaire de l'information. La difficulté de cette représentation est de choisir le codage approprié. Z.Michalewicz [30] suggère de trouver une représentation adaptée à l'espace de recherche associé au problème à optimiser et de choisir des opérateurs génétiques adaptés à cette représentation. Dans une telle représentation, deux génotypes donnant des solutions proches doivent différer de peu dans leur représentation. Ce n'est pas vraiment le cas dans la représentation binaire classique. On

peut parler des falaises de Hamming traduisant le passage du nombre 7 (0111) au nombre 8 (1000) en quatre mutations. Différentes possibilités ont été proposées, comme le codage de Gray proposant (0100) pour 7 et (1100) pour 8 ou l'adaptation de la probabilité de mutation des gènes en fonction de leur position dans le génotype.

II.4.3. Evolution :

L'évolution de la population se fait à l'aide des opérateurs de sélection par roulette [8], la mutation binaire et de recombinaison. Les GA favorisent la recombinaison plutôt que la mutation, en donnant de forts taux de recombinaison et de faibles taux de mutation.

II.4.3.1. Sélection :

La sélection proposée par D.E.Goldberg [8] consiste à sélectionner les individus proportionnellement à leur performance. Un individu ayant une forte valeur a alors plus de chances d'être sélectionné qu'un individu de faible valeur. La figure (II-2) représente sur un disque l'ensemble des individus et leur répartition selon leur performance.

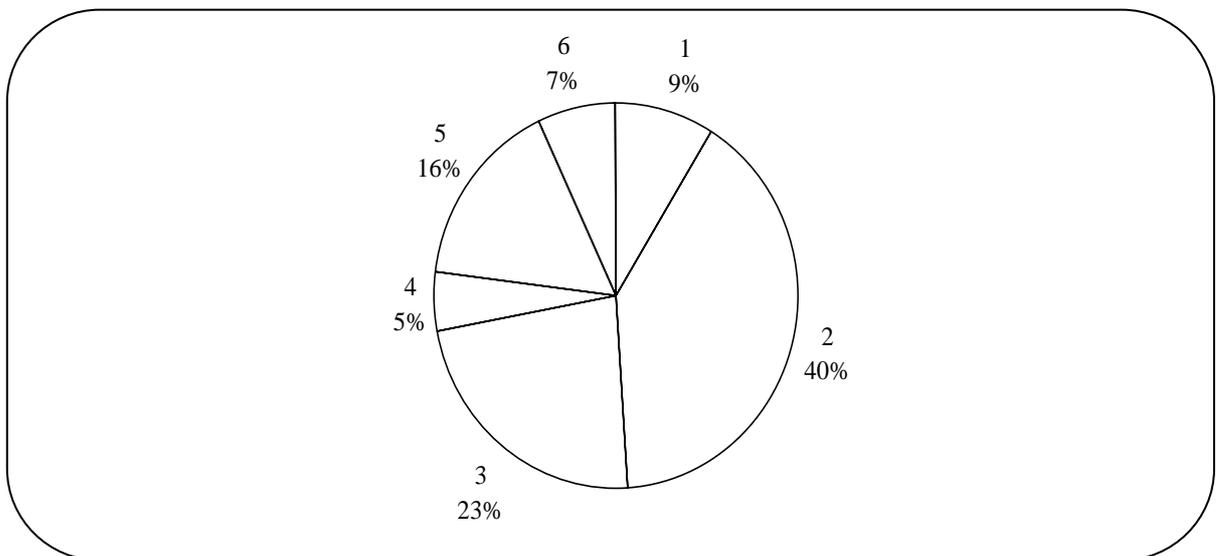


Figure II-2 : Modèle de la roulette.
Représentation d'une population de 6 individus.

Si l'on considère la somme des performances de la population (le disque entier), la performance de l'individu 1 représente 9 % de la somme, l'individu 2 a 40 % de la somme, etc. Ce qui équivaut à dire que l'individu 1 a 9 % de chance d'être sélectionné, l'individu 2 a 40 %.

II.4.3.2. Recombinaison :

La recombinaison consiste à sélectionner aléatoirement une position de césure (locus) et de permuter les parties droites des deux parents. La figure (II-3) nous donne un exemple de recombinaison.

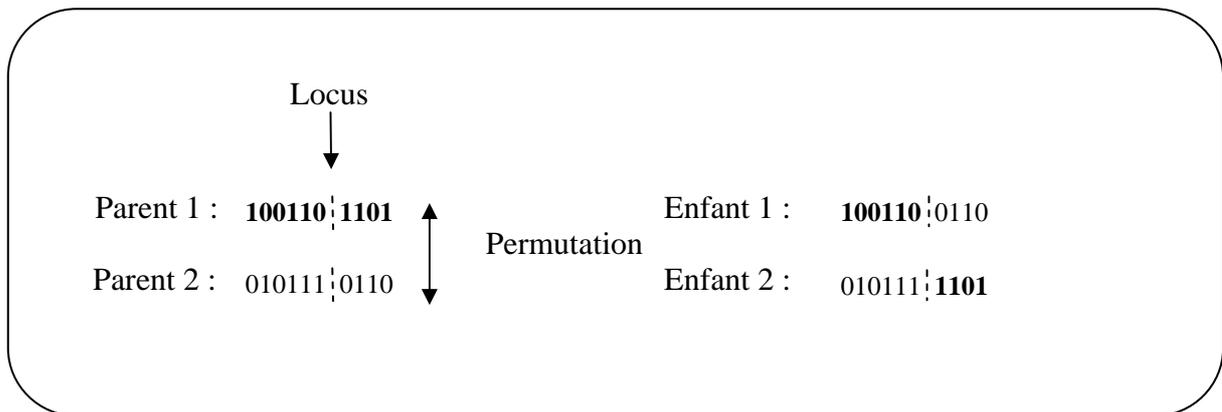


Figure II-3 : Opérateur de recombinaison.

D'autres types de recombinaison ont été proposés, la recombinaison :

- en plusieurs points, qui consiste à sélectionner plusieurs locus et à permuter les différentes parties de la même manière que s'il y avait un seul point de césure,
- discrète, qui consiste à permuter en moyenne une fois sur deux les éléments de génotype,
- intermédiaire, qui propose de remplacer le gène de l'individu enfant par une combinaison linéaire des gènes des deux parents,
- géométrique, qui prend la racine carrée de la multiplication des deux gènes des parents.

Cette liste n'est cependant pas exhaustive et il est possible de trouver des travaux sur l'élaboration d'autres recombinaisons.

II.4.3.3. Mutation :

La mutation consiste à prendre des gènes aléatoires dans le génotype et à les altérer selon leur type. Un gène binaire (i) est muté en (non i). La figure (4) nous donne un exemple de mutation.

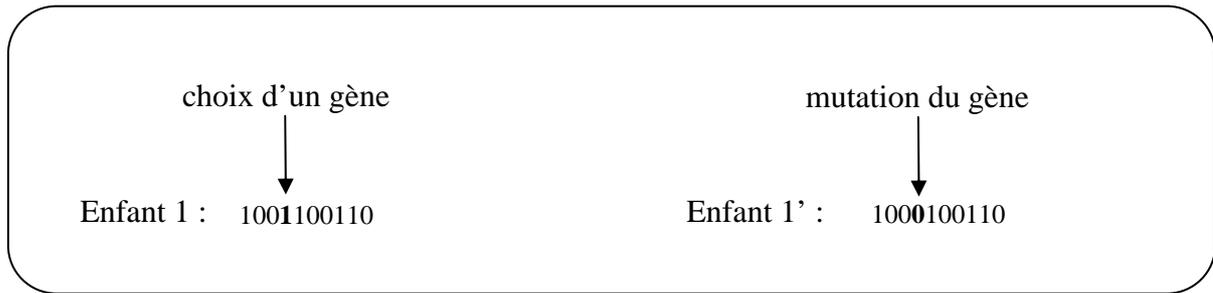


Figure II-4 : Opérateur de mutation.

II.5. Algorithme à essaim de particules :

II.5.1. Principes généraux :

Les algorithmes d'optimisation par essaim de particules (PSO) ont été introduits en 1995 par J.Kennedy et R.Eberhart comme une alternative aux algorithmes génétiques standard. Ces algorithmes sont inspirés des essaim d'insectes (ou des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. En effet, tout comme ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture ou éviter les prédateurs, les algorithmes à essaim de particules recherchent des solutions pour un problème d'optimisation. Les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim.

Dans cet algorithme, une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontrée, et en fonction de la meilleure position trouvée par tout le groupe. Les nouvelles vitesses et directions de la particule seront définies en fonction de trois tendances ; la propension à suivre son propre chemin, sa tendance à revenir vers sa meilleure position atteinte et sa tendance à aller vers la meilleure position trouvée par le groupe. Les algorithmes à essaim de particules peuvent s'appliquer aussi bien à des données discrètes qu'à des données continues.

Les algorithmes à essaim de particules ont été utilisés pour réaliser différentes tâches d'extraction de connaissances. Dans le domaine chimique, une étude proposée par C.O.Claudia et al [7] présente l'utilisation de l'algorithme à essaim de particules pour l'analyse dynamique des processus chimiques. En électronique, S.P.Ghoshal [22] présente dans son étude l'optimisation des gains de PID par essaim de particules et en électrotechnique, X.Wu et al [29] présentent une étude sur l'optimisation de l'emplacement des condensateurs en utilisant le PSO. Nous citons aussi un domaine très intéressant, l'industrie pharmaceutique

où Q.Shen et al [19] ont réalisé une étude sur l'optimisation des ingrédients pour minimiser les effets secondaires. Dans le cadre de l'extraction de règle de classification, les PSO ont été comparés aux algorithmes génétiques. En plus, des études approfondies ont été réalisées sur les PSO comme celle présentées par S.He et al [21], cette étude est basée sur une comparaison entre les différentes variantes du PSO par l'application de ces algorithmes sur un ensemble de fonctions.

II.5.2. Représentation :

Tout comme les GA, les algorithmes à essaim de particules débutent par une population initiale des individus -appelée en PSO, essaim-, mais la représentation des individus -particules- est plus simple que celle en GA. En PSO, l'essaim est représenté comme un groupe de particules initialisés aléatoirement par des positions dans le domaine de recherche et par des vitesses. La tâche essentielle confiée aux particules de l'essaim est de faire balayer le domaine des solutions faisables en cherchant la meilleure position qui est la solution optimale. Donc, les particules de chaque génération sont les mêmes en changeant seulement leurs caractéristiques, position et vitesse.

II.5.3. Evolution :

La reproduction des populations en PSO est faite toujours après l'évaluation des individus -particules- de la présente essaim et la comparaison des valeurs pour chaque particule. Donc, on ne parle pas ici de la recombinaison ou de la mutation.

La fondation du PSO est basée sur l'hypothèse de partage sociale de l'information qui offre un avantage évolutionnaire à cet algorithme. Le modèle de l'algorithme du PSO est basé sur les deux facteurs suivants [21] :

- La mémoire autobiographique, qui se rappelle la meilleure position (P_{best_i}) rencontrée par chacun des particules.
- L'information annoncée, qui est la meilleure solution (P_{best_g}) trouvée par l'essaim.

Par conséquent, le partage d'information sur les particules de l'essaim est réalisé en utilisant la publication de l'information actuelle de la position du (P_{best_g}). La figure (II-5) montre l'intérêt de chaque particule de la position du (P_{best_g}).

Il n'y a aucune information mise en commun entre les particules sauf que le (P_{best_g}) l'annonce aux autres. Par conséquent, l'essaim peut perdre la diversité et plus probablement

l'erreur de la recherche autour des minima locaux peut commiser trop tôt dans la recherche du minimum globale.

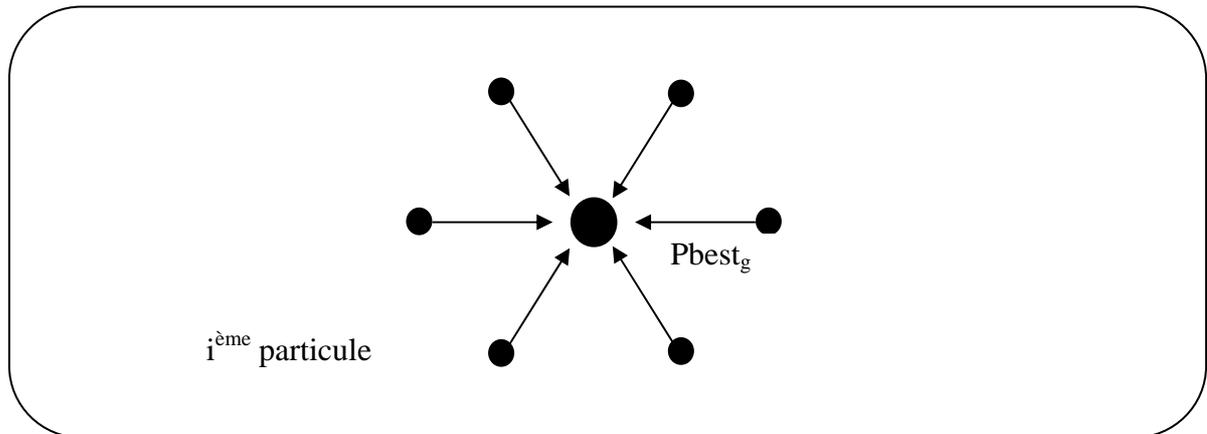


Figure II-5 : Interaction entre les particules et la meilleure solution ($Pbest_g$).

A chaque génération et après la sélection, les vitesses de déplacement des particules doivent être ajustées par l'équation standard suivante :

$$V_i^{(k+1)} = w.V_i^{(k)} + c_1.r_1.(Pbest_i - X_i^{(k)}) + c_2.r_2.(Pbest_g - X_i^{(k)}) \quad (II-1)$$

où ; r_1 et r_2 sont des constantes aléatoires dans l'intervalle (0, 1),

w est une constante d'inertie initialisés dans l'intervalle (0, 1),

et les variables c_1 et c_2 sont les constantes d'accélération, ils ont le rôle de contrôler le mouvement des particules à chaque itération.

Le premier terme de cette équation montre la tendance de la particule à suivre son chemin, le deuxième montre sa tendance à revenir vers la meilleure position qu'elle a rencontré et le troisième terme indique sa tendance à aller vers la meilleure solution trouvée par l'essaim.

Après l'ajustement des vitesses, chaque particule doit effectuer un déplacement pour atteindre sa nouvelle position selon l'équation suivante :

$$X_i^{(k+1)} = X_i^{(k)} + V_i^{(k+1)} \quad (II-2)$$

On peut trouver d'autres variantes de l'algorithme du PSO, mais la seule différence entre ces variantes est la forme de l'équation d'ajustement des vitesses.

Deux autres variantes sont présentées par S.He et al [21]. La première est l'approche du facteur de constriction PSO (CPSO), qui a été proposé pour la première fois par Clerc et Kennedy en 2002. Les vitesses en CPSO sont ajustées par l'équation suivante :

$$V_i^{(k+1)} = \chi \cdot [V_i^{(k)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_i - X_i^{(k)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (Pbest_g - X_i^{(k)})] \quad (\text{II-3})$$

où ; χ est appelé le facteur de constriction, obtenu par :

$$\chi = 2 / \left| 2 - \varphi + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|$$

où ;

$$\varphi = c_1 + c_2 ; \varphi > 4.$$

Le CPSO peut assurer la convergence des procédures de recherche et peut produire des solutions plus meilleures que le PSO standard.

La deuxième variante est le PSO avec rassemblement passif (PSO with passive congregation) (PSOPC). Dans cette variante les vitesses sont ajustées par l'équation suivante :

$$V_i^{(k+1)} = w \cdot V_i^{(k)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_i - X_i^{(k)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (Pbest_g - X_i^{(k)}) + c_3 \cdot r_3 \cdot (R_i^{(k)} - X_i^{(k)}) \quad (\text{II-4})$$

où ; R_i est une particule choisie aléatoirement à partir de l'essaim.

La figure (II-6) montre le mouvement effectuée par les particules à chaque itération en PSOPC.

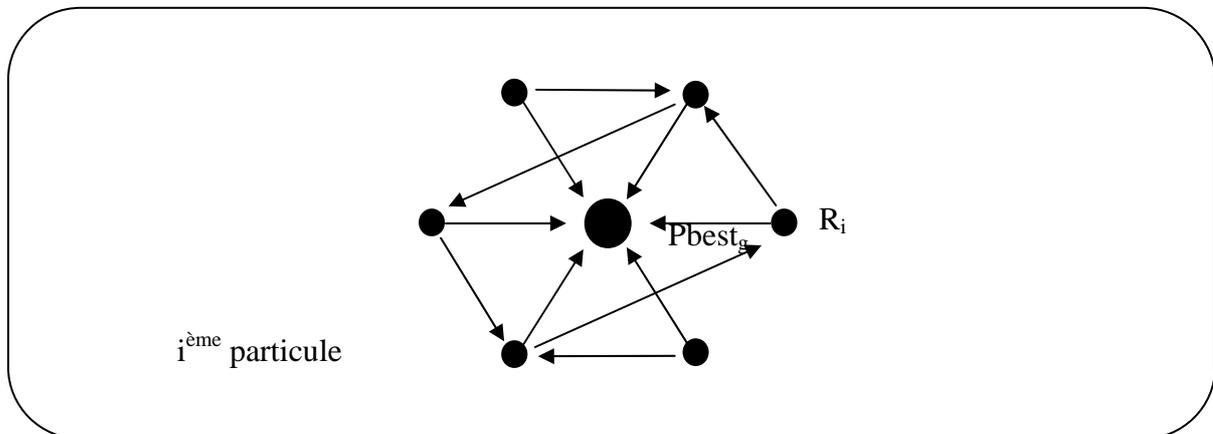


Figure II-6 : Interaction des particules avec rassemblement passive.

De la forme de l'équation d'ajustement des vitesses, et de la figure, on voit une quatrième tendance dans le mouvement des particules qui est la direction vers une particule voisine dans l'essaim.

II.6. Notre choix :

Le calcul évolutionnaire comporte une variété de méthodes comprenant des paradigmes d'optimisation qui sont basés sur des mécanismes d'évolution naturelles.

Tandis que les EA fournissent beaucoup de caractéristiques qui les font les méthodes de choix dans notre situation de problème, les motifs les plus importants sont ; premièrement, l'utilisation des informations directes de la fonction-objectif au lieu des dérivées fonctionnelles ou d'autres connaissances relatives. Cette caractéristique est parfaitement convenable pour notre problème puisque nous n'avons pas une représentation explicite du modèle de processus et par conséquent la dérivée, etc. n'est pas également connue.

Deuxièmement, ils emploient des règles de transitions probabilistes plutôt que déterministes. Ceci surmonte le problème de convergence vers des optima locaux avec les règles déterministes. En outre, depuis le départ par un ensemble divers de points, beaucoup d'optimums peuvent être explorés efficacement, en baissant la probabilité de convergence vers des optima locaux.

Dans les sections précédentes, nous avons présentés deux méthodes des EA. Nous avons présentés les principes généraux afin d'étudier les caractéristiques. Mais il existe un nombre important de méthodes dérivées de ces principes classiques. Sans même élaborer d'autres manières de représentation des individus ou le type d'évolution. Il n'existe pas de règles concernant le choix d'une stratégie plutôt qu'une autre. Si les GA sont au départ les algorithmes les plus utilisés parmi les EA, dans plusieurs études, les PSO donnent des résultats plus performants que celles des GA.

L'optimisation par essaim de particules est un concept très simple, et ces paradigmes sont mis en application dans quelques lignes de code machine. Il exige seulement des opérateurs mathématiques primitifs, et des conditions informatiques peu coûteuses en terme de mémoire et de vitesse. Ces caractéristiques sont d'immense valeur à la situation d'application actuelle.

Le PSO a été identifié comme calcul évolutionnaire et a des dispositifs de GA et d'ES. Il est semblable à un GA parce que le système est initialisé par une population de solutions aléatoires. Cependant, à la différence d'un GA chaque particule de la population est également assigné par une vitesse, en effet, il peut se déplacer sur l'hyperespace des solutions. Donc, il est possible de chercher simultanément une solution optimale dans des dimensions multiples.

A partir de ces avantages théoriques, nous avons choisis d'appliquer l'algorithme du PSO sur un problème déjà résolu par un algorithme génétique afin d'étudier les différences existants entre ces deux méthodes, ainsi que les avantages et les inconvénients (s'ils existent) des EA par rapport aux autres méthodes.

Chapitre III

OPTIMISATION MULTIOBJECTIF DES CONDITIONS DE COUPE

Sommaire

III.1 Problème d'optimisation	38
III.1.1 Critères d'optimisation	40
III.1.1.1 Temps de production	40
III.1.1.2 Coût de production	41
III.1.2 Contraintes d'optimisation	42
III.2 Optimisation mono-objectif	43
III.3 Optimisation multiobjectif	44
III.3.1 Les méthode d'agrégation des objectifs	45
III.3.2 L'approche par ε-contraintes	46
III.3.3 L'approche Min-Max	47
III.3.4 Le but à atteindre	47
III.4 Modèle d'optimisation retenu	48

III.1. Problème d'optimisation :

D'après l'étude du processus de tournage et les phénomènes relatifs au phénomène principal de coupe tels que ; le mécanisme de formation de copeau et les mécanismes endommageant des outils, nous pouvons schématiser le processus de coupe comme suit :

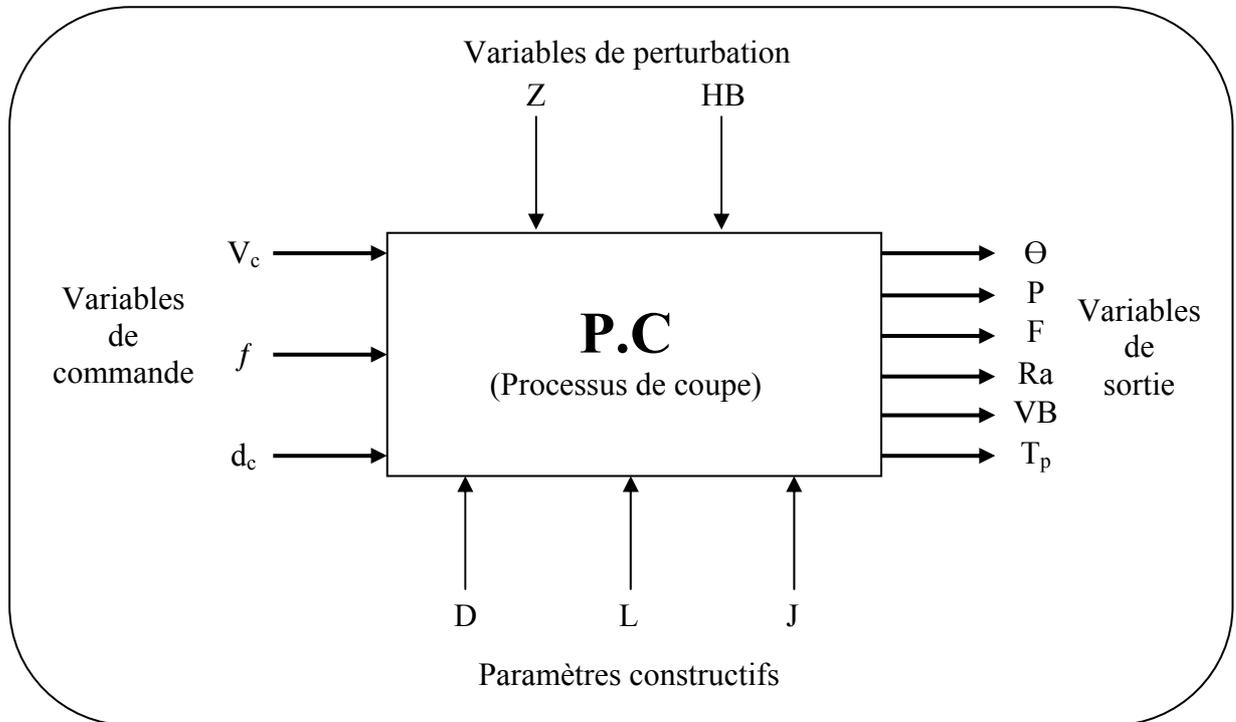


Figure III-1 : Schématisation d'un processus de coupe.

- | | |
|--|-----------------------------------|
| Θ : paramètres économiques (coût et temps de production). | F : effort de coupe. |
| P : puissance absorbée par la coupe. | Ra : rugosité de surface. |
| T_p : température d'interface (outil-matière). | VB : usure de l'outil. |
| J : rigidité du système de montage. | D : diamètre de coupe. |
| L : longueur de coupe. | HB : dureté de la pièce à usiner. |
| Z : diamètre initial (de la brute ou de l'ébauche). | d_c : profondeur de passe. |
| V_c : vitesse de coupe. | f : avance par tour. |

La recherche des meilleures conditions de coupe en tournage amène à considérer un grand nombre de facteurs qui sont classés selon la figure (III-1) en quatre groupes :

- Paramètres constructives : (diamètre de coupe, longueur de coupe et rigidité du système de montage) ces paramètres sont généralement imposés par le constructeur. Elles sont déterminées à partir du rôle fonctionnelle de la pièce (ou la surface) usinée.

- Variables de perturbation : (diamètre initial et dureté de la brute ou l'ébauche) ces facteurs ne sont pas facilement mesurables et leurs effets sont souvent négligeables dans la modélisation de coupe.
- Variables de commande : (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) ce sont presque les seuls facteurs qu'on peut les varier directement. Ils ont des limitations pour chaque machine-outil ainsi qu'une influence directe sur les variables de sortie du processus de coupe.
- Variables de sortie : (coût et temps de production, puissance absorbée par la coupe, effort de coupe, rugosité de surface, usure de l'outil et température de l'interface outil-copeau) une partie de ces paramètres est le fruit du processus de coupe tel que Ra (la rugosité de surface usinée) et θ (le coût et le temps de production). Cette partie est l'objectif qu'on cherche à améliorer.

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

- La vitesse de coupe V_c en (m/min).
- L'avance par tour f en (mm/tr).
- Le profondeur de passe d_c en (mm).

Le problème d'optimisation des conditions de coupe consiste à déterminer les valeurs des variables de coupe (V_c , f et d_c) pour chaque opération élémentaire d'usinage en prenant en compte les limites de performances des éléments de la cellule élémentaire d'usinage (C.E.U) qui se traduisent par des contraintes établies à partir de la lois de coupe et qui font intervenir les variables de coupe avec lesquelles le domaine des solutions réalisables est borné. D'une manière générale, la détermination des paramètres de coupe nécessite une bonne connaissance des facteurs d'incidence relatifs au couple outil-matière, à l'opération d'usinage et à l'environnement [18].

III.1.1. Critères d'optimisation :

L'intérêt de l'optimisation des conditions de coupe réside dans l'amélioration de certains critères de jugement économiques et techniques de l'usinage tels que le coût de production, la productivité (par minimisation du temps de production ou maximisation du débit de copeau) [5] [16], la durée de vie des outils de coupe [24] et dans des rares études l'état de surface produite [26].

L'analyse de la relation entre ces critères et les conditions de coupe conduit aux conclusions suivantes : plus les conditions de coupe sont réduits, plus les temps nécessaires à l'exécution des opérations sont élevés et par conséquent le coût de production est élevé. L'augmentation des conditions de coupe provoque une usure rapide des outils de coupe, d'où leur changement assez fréquent conduit à l'augmentation du temps et du coût de production [17]. Elle peut même conduire à la détérioration des surfaces usinées.

Les nombreuses études antérieures ont montré que la satisfaction de plusieurs critères en même temps est en manière générale difficilement réalisable, par fois même impossible vu que certains critères sont très souvent concurrents (la minimisation du temps de production par l'utilisation des régimes de coupe élevés conduit à l'augmentation du coût de production par suite à l'usure des outils, de même l'augmentation de la productivité conduit au non respect de la précision d'usinage). C'est pour cela, les critères d'optimisation sont souvent variés selon les objectifs de production recherchés.

III.1.1.1. Temps de production :

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

$$T_U = t_m + t_{cs} \left(\frac{t_m}{T} \right) + t_R + t_h \quad (\text{III-1})$$

Où t_m : est le temps machine.

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

T : la durée de vie d'une arête de coupe.

t_R : le temps de retour rapide de l'outil.

t_h : le temps montage et de démontage de la pièce.

$$t_m = \frac{\Pi.D.L}{1000.V_c.f} \quad (\text{en chariotage}) \quad (\text{III-2})$$

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

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

$$T = K^{1/a_3}.V_c^{-1/a_3}.f^{-a_1/a_3}.d_c^{-a_2/a_3} \quad (\text{III-3})$$

Où a_1 , a_2 et a_3 sont des exposants, K est un constant.

En remplaçant t_m et T par leurs expressions respectivement (III-2) et (III-3) dans l'équation (III-1) et en posant :

$$A = \frac{\Pi.D.L}{1000}$$

On obtient le temps de production sous la forme suivante :

$$T_U = A.V_c^{-1}.f^{-1} + A.V_c^{(1-a_3)/a_3}.f^{(a_1-a_3)/a_3}.d_c^{(a_2/a_3)}.K^{(-1/a_3)}.t_{cs} + t_R + t_h \quad (\text{III-4})$$

III.1.1.2. Coût de production :

Le coût de production par pièce pour une opération d'usinage est la somme des coûts pour l'usinage, l'outillage et les temps de changement d'outil, du retour rapide de l'outil et du montage et démontage de la pièce.

$$C_U = C_0.t_m + (t_m/T).(C_0.t_{cs} + C_t) + C_0.(t_R + t_h) \quad (\text{III-5})$$

Où C_0 est le coût machine en (\$/min) et C_t est le coût d'une arrête de coupe en (\$/arrête).

En remplaçant t_m et T par leurs expressions respectives (III-2) et (III-3) dans l'équation (III-5) et en posant :

$$A = \frac{\Pi.D.L}{1000}$$

On obtient le coût de production sous la forme suivante :

$$C_U = C_0 \cdot A \cdot V_c^{-1} \cdot f^{-1} + A \cdot V_c^{(1-a_3)/a_3} \cdot f^{(a_1-a_3)/a_3} \cdot d_c^{(a_2/a_3)} \cdot K^{(-1/a_3)} \cdot (C_0 \cdot t_{cs} + C_t) + C_0 \cdot (t_R + t_h) \quad (\text{III-6})$$

III.1.2. Contraintes d'optimisation :

En connaissant les limites des éléments de la C.E.U. et les lois de coupe, nous pouvons formuler les contraintes par des égalités et des inégalités fonctions des variables de coupe et des constantes de la C.E.U.. Dans ce travail, nous considérons les limitations qui suivent :

- L'avance f doit être comprise entre deux valeurs extrêmes programmables sur la machine-outil ; soit :

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

- De même, la profondeur de passe doit être comprise entre deux extrêmes $d_{c\min}$ et $d_{c\max}$; soit :

$$d_{c\min} \leq d_c \leq d_{c\max} \quad (\text{III-8})$$

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

$$V_{c\min} \leq V_c \leq V_{c\max} \quad (\text{III-9})$$

Le processus de tournage est variable dans le temps par un changement des paramètres de coupe tels que l'effort de coupe, la température à l'interface outil-matière, le niveau des vibrations ou l'état de l'outil qui change sous l'effet de l'usure. Pour avoir une optimisation globale du processus de tournage, les contraintes liées à la physique du processus de coupe doivent être pris en considération.

- Limitation sur la puissance maximale admise par la machine-outil :

$$0.0373 \cdot V_c^{0.91} \cdot f^{0.78} \cdot d_c^{0.75} \leq P_{\max} \quad (\text{III-10})$$

- Limitation sur l'état de surface :

$$14.785 \cdot V_c^{-1.52} \cdot f^{1.004} \cdot d_c^{0.25} \leq Ra_{\max} \quad (\text{III-11})$$

- Limitation sur la température de coupe :

$$74.96 \cdot V_c^{0.4} \cdot f^{0.2} \cdot d_c^{0.105} - 17.8 \leq \theta_{\max} \quad (\text{III-12})$$

- Limitation sur l'effort de coupe (en relation avec la déflexion outil-pièce, rupture de l'outil, rigidité du porte-outil et le broutement) :

$$844.V_c^{-0.1013} . f^{0.725} . d_c^{0.75} \leq F_{\max} \quad (\text{III-13})$$

Les constantes et les coefficients des modèles mathématiques des contraintes ci-dessus et de la durée de vie de l'outil sont obtenus expérimentalement par la méthode de planification des essais multi-factorielle [14]. Ces modèles ont été utilisés par la suite dans les travaux de M.Assas et M.Djennane [17].

III.2. Optimisation mono-objectif :

Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver une solution qui minimise ou maximise un critère particulier. Dans la plupart des cas, l'optimum découvert n'est pas unique. Ainsi il existe un ensemble de solutions minimisant ou maximisant le critère considéré. Un problème d'optimisation mono-objectif est souvent donné sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Minimiser} & f(\vec{x}) \quad (\text{fonction à optimiser ou fonction - objectif}) \\ \text{tel que} & \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \quad (\text{q contraintes à satisfaire}) \\ \text{avec} & \vec{x} \in R^n, \vec{g}(\vec{x}) \in R^q \end{array} \right. \quad (\text{III-14})$$

Dans cette formulation l'ensemble des contraintes du problème est écrit avec la fonction-objectif (ou la fonction à optimiser).

Le critère d'optimisation est choisi selon l'objectif de production et l'importance technique et économique des critères de jugement existant. A ce propos, nous citons l'étude présentée par M. Brahim et K. Haddouche [18] qui a fixé l'objectif d'optimisation des paramètres de coupe en tournage à l'amélioration de la productivité. Ils ont donc traité le sujet en deux problèmes : a- maximisation du débit de copeau, b- minimisation du temps de production. Du même que le travail de B. Y. Lee et Y. S. Tarn [6] qui traite le problème d'optimisation des conditions de coupe par deux procédures : a- minimisation du temps de production, b- minimisation du coût de production. Dans ces deux travaux, le problème est traité séparément avec l'un des deux critères considérés sans contrôler le deuxième. Nous pouvons donc considérer chaque procédé de maximisation ou de minimisation de l'un des deux critères comme un problème d'optimisation.

III.3. Optimisation multiobjectif :

La plupart des problèmes d'optimisation réels sont décrits à l'aide de plusieurs objectifs ou critères souvent contradictoires devant être optimisés simultanément. Alors que, pour les problèmes n'incluant qu'un seul objectif l'optimum recherché est clairement défini, celui-ci reste à formaliser pour les problèmes d'optimisation multiobjectifs. En effet, pour un problème à deux objectifs contradictoires, la solution optimale recherchée est un ensemble de points correspondant aux meilleurs compromis possibles pour résoudre notre problème.

Prenons notre cas de problème. Le régime de coupe recherché est celui qui permet la réalisation de l'opération de tournage en un temps minimal et avec un coût moins chère, mais ce régime idéal n'existe pas en réalité. Nous allons donc devoir identifier les meilleurs compromis possibles correspondants à nos capacités.

Les problèmes d'optimisation multiobjectifs sont une généralisation à n fonction-objectifs des problèmes classiques (mono-objectif). Ils sont définis comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Minimiser} & \vec{f}(\vec{x}) \quad (\text{m fonctions à optimiser}) \\ \text{tel que} & \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \quad (\text{q contraintes à satisfaire}) \\ \text{avec} & \vec{x} \in R^n, \vec{f}(\vec{x}) \in R^m, \vec{g}(\vec{x}) \in R^q \end{array} \right. \quad (\text{III-15})$$

D'après cette définition, il est clair que l'optimum n'est plus une simple valeur comme pour les problèmes à un objectif, mais un ensemble de points ou de positions, appelé l'ensemble des meilleurs compromis ou le front de Pareto.

Un grand nombre d'approches existent pour résoudre les problèmes multiobjectifs. Certaines utilisent des connaissances du problème pour fixer des préférences sur les critères et ainsi contourner l'aspect multicritère du problème. D'autres mettent tous les critères au même niveau d'importance.

Parmi toutes ces approches, il faut distinguer deux catégories : les approches non Pareto et les approches Pareto. Les approches non Pareto ne traitent pas le problème comme un véritable problème multiobjectif. Elles cherchent à ramener le problème à un ou plusieurs problèmes mono-objectifs. Par opposition aux méthodes non Pareto, les approches Pareto ne transforment pas les objectifs du problème, ceux-ci sont traités sans aucune distinction pendant la résolution [27].

Dans cette section, nous allons décrire les principales approches non Pareto et commenter leurs avantages et leurs inconvénients.

III.3.1. Les méthodes d'agrégation des objectifs :

L'approche d'agrégation des objectifs est la méthode la plus utilisée dans la résolution des problèmes d'optimisation multiobjectif. Elle consiste à transformer le problème multiobjectif initial en un problème à un objectif en agrégeant les différents critères sous la forme d'une somme pondérée :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Minimiser} & f_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot f_i(\vec{x}) \\ \text{tel que} & \vec{g}(\vec{x}) \leq \vec{0} \\ \text{avec} & \vec{x} \in R^n, \vec{f}(\vec{x}) \in R^m, \vec{g}(\vec{x}) \in R^q \end{array} \right. \quad (\text{III-16})$$

Les α_i , appelées poids, peuvent être normalisés sans perte de généralité : $\sum \alpha_i = 1$.

Il est clair que la résolution d'un problème pour un vecteur de poids $\vec{\alpha}$ fixé ne permet de calculer que quelques solutions optimales. Pour obtenir un ensemble contenant un grand nombre de solutions optimales, il faut résoudre plusieurs fois le problème en changeant à chaque fois les valeurs de α_i . Les valeurs α_i peuvent être aussi choisies selon l'importance de chaque critère d'optimisation.

Nous pouvons trouver d'autres manières d'agréger les objectifs telle que la méthode utilisée par U.Zuperl et F.Cus [26]. Ils ont écrit la fonction-objectif sous la forme du produit suivant :

$$f(\vec{x}) = \prod_i f_i(\vec{x})^{\alpha_i} \quad (\text{III-17})$$

La première manière d'agrégation des objectifs est la plus utilisée vue à ça simplicité.

Cette approche a l'avantage évident de pouvoir réutiliser tous les algorithmes classiques dédiés aux problèmes d'optimisation à un seul objectif. C'est souvent la première approche adoptée lorsqu'un chercheur se retrouve devant un nouveau problème mutiobjectif.

Cependant cette approche a aussi un inconvénient important dû au fait que pour avoir un ensemble de points bien répartis sur l'ensemble des meilleurs compromis, les différentes valeurs α_i doivent être choisis judicieusement. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance du problème.

III.3.2. L'approche par ε -contrainte :

Une autre façon de transformer un problème d'optimisation multiobjectif en un problème simple objectif est de convertir $m-1$ de m des objectifs du problème en contraintes et d'optimiser séparément l'objectif restant. Le problème peut être reformulé de la manière suivante :

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimiser} & f_i(\vec{x}) \\
 \text{tel que} & f_1(\vec{x}) \leq \varepsilon_1 \\
 & \cdot \\
 & \cdot \\
 & f_{i-1}(\vec{x}) \leq \varepsilon_{i-1} \\
 & f_{i+1}(\vec{x}) \leq \varepsilon_{i+1} \\
 & \cdot \\
 & \cdot \\
 & f_m(\vec{x}) \leq \varepsilon_m \\
 \text{et que} & \vec{g}(\vec{x}) \leq \vec{0} \\
 \text{avec} & \vec{x} \in R^n, \vec{f}(\vec{x}) \in R^m, \vec{g}(\vec{x}) \in R^q
 \end{array} \tag{III-18}$$

L'approche par ε -contrainte doit aussi être appliquée plusieurs fois en faisant varier les valeurs de ε_i pour trouver un ensemble de points optimaux.

Cette approche a l'avantage par rapport à la précédente d'être capable de trouver un ensemble de points bien réparti sur la surface de compromis. Il est clair que la manière de transformation du problème diminue le domaine des solutions faisables en transformant les objectifs en contraintes. Ensuite, le processus d'optimisation trouve le point optimal sur l'objectif restant.

L'inconvénient de cette approche réside dans le fait qu'il faille lancer un grand nombre de fois le processus de résolution. De plus, pour obtenir des points intéressants et bien répartis sur la surface de compromis, les valeurs ε_i doivent être choisis judicieusement. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance de problème.

III.3.3. L'approche Min-Max :

Cette approche consiste à transformer le problème multiobjectif en un problème à un seul objectif où l'on cherche à minimiser l'écart relatif par rapport à un point de référence appelé but, fixé par la méthode ou le décideur. Il existe plusieurs manières de caractériser la distance entre un point de référence (le but) et un autre, notamment à l'aide de normes. Une norme est définie de la manière suivante :

$$L_r(\vec{f}(\vec{x})) = \left[\sum_{i=1}^m \left| B_i - f_i(\vec{x}) \right|^r \right]^{\frac{1}{r}} \quad (\text{III-19})$$

Les principales normes utilisées sont :

$$L_1 = \sum_{i=1}^m \left| B_i - f_i(\vec{x}) \right|, \quad \text{la distance classique}$$

et la norme

$$L_\infty = \max_{i \in \{1, \dots, m\}} \left(B_i - f_i(\vec{x}) \right).$$

C'est cette dernière qui est utilisée dans l'approche Min-Max appelée aussi approche de Tchebychev [27]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Minimiser} & \max_{i \in \{1, \dots, m\}} \left(B_i - f_i(\vec{x}) \right) \\ \text{tel que} & \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\ \text{avec} & \vec{x} \in R^n, \vec{f}(\vec{x}) \in R^m, \vec{g}(\vec{x}) \in R^q \end{array} \right. \quad (\text{III-20})$$

Dans cette approche, le point de référence joue un rôle fondamental. S'il est mal choisi, la recherche peut s'avérer être très laborieuse. Les méthodes de résolution implémentant cette approche utilisent souvent le point idéal comme point de référence. Ce point idéal évolue donc en fonction de la recherche. En effet, plus on se rapproche de la surface de compromis, plus le point de référence se rapprochera du point idéal du problème.

III.3.4. Le but à atteindre :

Cette approche, comme celle de min-max, utilise un point de référence pour guider la recherche. Mais elle introduit aussi une direction de la recherche, si bien que le processus de résolution devra suivre cette direction. A la différence de l'approche min-max, qui utilise des

normes pour formaliser la distance au point de référence, l'approche du but à atteindre utilise des contraintes, à l'instar de l'approche ε -contrainte, pour déterminer la position le point de référence (aussi appelé le but). L'écart par rapport à ce but est contrôlé grâce à la variable λ introduite à cet effet :

$$\begin{array}{l}
 \text{Minimiser} \quad \lambda \\
 \text{tel que} \quad f_1(\vec{x}) - \alpha_1 \cdot \lambda \leq B_1 \\
 \quad \quad \quad \cdot \\
 \quad \quad \quad \cdot \\
 \quad \quad \quad f_m(\vec{x}) - \alpha_m \cdot \lambda \leq B_m \\
 \text{et que} \quad \quad \quad \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\
 \text{avec} \quad \vec{x} \in R^n, \vec{f}(\vec{x}) \in R^m, \vec{g}(\vec{x}) \in R^q
 \end{array} \tag{III-21}$$

Ainsi en minimisant λ et en vérifiant toutes les contraintes, la recherche va s'orienter vers le but B et s'arrêter sur un point faisant partie de la surface de compromis.

Cependant, cette approche, comme les précédentes, doit être itérée plusieurs fois dans le but d'obtenir un ensemble de points optimaux. Les paramètres α_i et B_i doivent être bien choisis par l'utilisateur. Bien que ces paramètres permettent une grande flexibilité de la recherche (orientation et but), s'ils sont mal choisis, ils peuvent, dans certains cas extrêmes, donner des résultats non cohérents.

III.4. Modèle d'optimisation retenu :

L'optimisation multicritère des conditions de coupe a pour objectif de minimiser ou maximiser plusieurs fonction-objectifs simultanément, en respectant les contraintes du problème. Dans ce travail, nous allons minimiser le coût et le temps de production, qui sont en vérité des combinaisons de deux facteurs très importants en usinage: le temps machine t_m qui est le temps réel d'enlèvement de matière et la durée de vie de l'outil T qui représente l'influence du phénomène de l'usure des outils sur le processus de coupe.

Afin de pouvoir traiter ce problème, nous avons présenté les principaux approches de résolution des problèmes d'optimisation multiobjectif. Toutes ces approches transforment un problème d'optimisation multiobjectif en un ou plusieurs problèmes à un seul objectif. Que ce soit sous la forme d'une somme pondérée, ou sous la forme d'une distance à un but, cette transformation permet d'utiliser facilement les méthodes issues de l'optimisation à un objectif.

Mais l'inconvénient de ces méthodes est qu'il faut relancer plusieurs fois les algorithmes de résolution avec des valeurs différentes de certains paramètres (point de référence, vecteur de poids ou valeur de l'écart) pour obtenir plusieurs points distincts de la surface de compromis, sauf que la méthode d'agrégation des objectifs sous la forme d'une somme pondérée donne la possibilité de choisir les poids des objectifs directement selon leur importance.

Notre objectif sera résumé dans le problème de minimisation d'une fonction-objectif sous la forme d'une somme pondérée du temps et du coût de production, en prenant en compte les limitations (III-7), (III-8) et (III-9), et les contraintes liées à la physique (III-10), (III-11), (III-12) et (III-13). En utilisant le système (III-16), le problème sera formulé comme suit :

$$\begin{array}{l}
 \text{Minimiser} \quad Y = \alpha_1.Cu + \alpha_2.Tu \\
 \text{tel que} \quad f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \\
 \quad \quad \quad d_{c \min} \leq d_c \leq d_{c \max} \\
 \quad \quad \quad V_{c \min} \leq V_c \leq V_{c \max} \\
 \text{et que} \quad 0.0373.V_c^{0.91} .f^{0.78} .d_c^{0.75} \leq HP_{\max} \\
 \quad \quad \quad 14.785.V_c^{-1.52} .f^{1.004} .d_c^{0.25} \leq SR_{\max} \\
 \quad \quad \quad 74.96.V_c^{0.4} .f^{0.2} .d_c^{0.105} - 17.8 \leq \theta_{\max} \\
 \quad \quad \quad 844.V_c^{-0.1013} .f^{0.725} .d_c^{0.75} \leq F_{\max}
 \end{array} \tag{III-22}$$

Chapitre IV

OPTIMISATION PAR ESSAIM DE PARTICULES

Sommaire

IV. Introduction	50
IV.2 Algorithme à essaim de particules standard (PSO)	51
IV.3 Algorithme à essaim de particules avec rassemblement passif (PSOPC)	52
IV.4 Optimisation par essaim de particules	54
IV.4.1 Méthode de pénalité	54
IV.4.1.1 Fonction de pénalité intérieure	55
IV.4.1.2 Fonction de pénalité extérieure	56
IV.4.2 Application d'algorithme à essaim de particules	56

IV.1. Introduction :

Un certain nombre des scientifiques ont créés des simulations sur ordinateur de diverses interprétations du mouvement des organisations dans les essaims d'insectes ou les nuées d'oiseaux. Heppner, un zoologiste, était intéressé à découvrir les règles fondamentales qui ont permis à un grand nombre d'oiseaux de s'assembler synchroniquement, souvent changeant la direction soudainement, dispersant et regroupant. Ce scientifique a eu l'idée que le modèle de simulation doit être fondé sur la manipulation des distances interindividuelles ; c'est-à-dire, le comportement du groupe a été pensé pour être une fonction des efforts des oiseaux de maintenir une distance optimale entre eux-mêmes et leurs voisins.

Dans la théorie au moins, les différents membres du groupe peuvent profiter des découvertes et de l'expérience précédente de tous les autres membres du groupe pendant la recherche de la nourriture. Cette relation suggère que le partage social de l'information entre les membres offre un avantage évolutif : Cette hypothèse était fondamentale au développement de l'optimisation par essaim de particules. Un motif pour développer la simulation devait modéliser le comportement social humain qui est naturellement non identique aux comportements d'insectes ou d'oiseaux. Une différence importante est son abstraction.

Les oiseaux et les insectes ajustent leur mouvement physique pour éviter les prédateurs, optimisent des paramètres environnementaux tels que la température, etc. Les humains ajustent non seulement le mouvement physique mais les variables cognitives ou empiriques aussi bien. C'est une distinction importante en terme de concevoir une simulation pour au moins une raison évidente : collision. Deux individus peuvent tenir les attitudes et la croyance identiques sans se rencontrer, mais deux oiseaux ne peuvent pas occuper la même position dans l'espace sans se heurter.

Semblable à d'autres algorithmes basés sur le principe de recherche par groupe (population), tel que les algorithmes évolutionnaires, le PSO peut résoudre une variété de problèmes d'optimisation difficiles. Il a montré une convergence plus rapide que d'autres algorithmes. Un autre avantage du PSO est qu'il a très peu de paramètres à ajuster, qui le rend particulièrement facile à mettre en application.

Les biologistes ont proposés quatre types de mécanismes biologiques par lesquels les animaux peuvent se réunir en groupes ; agrégation passive, agrégation active, rassemblement passif et rassemblement actif. Il y a des différents mécanismes de partage de l'information à l'intérieur des groupes. On a constaté après que le modèle passif de rassemblement convient pour être incorporé dans le modèle de PSO.

Dans ce travail, nous allons examiner deux différentes variantes du PSO.

IV.2. Algorithme à essaim de particules standard (PSO) :

Dans cette variante la $i^{\text{ième}}$ particule de la génération est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- 1- Une position actuelle dans l'hyperespace de recherche.

$$X_i^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k, \dots, x_N^k) \quad (\text{IV-1})$$

Avec : $x_{\min} \leq x_n^k \leq x_{\max}$, $1 \leq n \leq N$.

Où : x_{\min} , x_{\max} sont les limitations de l'espace de recherche.

N est la dimension de l'espace.

- 2- Une vitesse actuelle.

$$V_i^k = (v_1^k, v_2^k, \dots, v_n^k, \dots, v_N^k) \quad (\text{IV-2})$$

En chaque itération, l'essaim est mise à jour par les équations (II-1) en utilisant un facteur adaptatif d'inertie w^k [2].

$$V_i^{k+1} = w^k \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_i - X_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (Pbest_g - X_i^k) \quad (\text{IV-3})$$

Avec ; $w^k = w_{\max} - \left(\frac{w_{\max} - w_{\min}}{M} \right) \cdot k$

La nouvelle position sera calculée par l'équation (II-2)

$$\text{Et} \quad X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (\text{IV-4})$$

où : $Pbest_i$ est la meilleure position trouvée par la $i^{\text{ième}}$ particule, donnée par :

$$Pbest_i = \begin{cases} Pbest_i & \text{si } f(X_i) \geq Pbest_i \\ X_i & \text{si } f(X_i) < Pbest_i \end{cases}$$

$Pbest_g$ est la meilleure solution trouvée par l'essaim, donnée par :

$$Pbest_g \in \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_M\}$$

$$f(Pbest_g) = \min\{f(X_1), f(X_2), \dots, f(X_i), \dots, f(X_M)\}$$

Où f est la fonction-objectif, M est le nombre total des particules dans l'essaim,

r_1, r_2 sont des éléments d'ordre aléatoire entre 0 et 1, w est un paramètre d'inertie initialisé en général dans la gamme [0,1].

c_1, c_2 sont des constantes d'accélération qui commandent à quelle distance une particule se déplace en une simple itération.

IV.3. Algorithme à essaim de particules avec rassemblement passif (PSOPC):

L'algorithme du PSO est inspiré par les comportements sociaux des animaux, plus particulièrement, l'agrégation des oiseaux s'assemblant, des poissons s'instruisant, ou l'essaimage des insectes.

Chacune de ces groupes a des intégrités spatio-temporelles stables du groupe d'organisation. Le groupe se déplace constamment dans l'ensemble sans perdre la forme et la densité. Les biologistes ont proposé des modèles mathématiques de la structure spatiale des groupes pour montrer comment les animaux s'organisent. Dans ces modèles, l'agrégation se rapporte par fois à grouper des organisations par des forces non-sociales, externes, physiques. Il y a deux types d'agrégation : agrégation passive et active. L'agrégation passive est un groupement passif par des processus physiques. Un exemple de ce type est l'agrégation dense du plancton dans l'eau ouvert, en laquelle le plancton ne sont pas attirés activement à l'agrégation mais sont transportés passivement par l'intermédiaire des forces physiques telles que les courants d'eau. L'agrégation active est de se grouper par la ressource attrayante, comme la nourriture, où chaque membre du groupe est recruté à un endroit spécifique activement. Le rassemblement, qui est différent de l'agrégation, est de se grouper par des forces sociales, où la source d'attraction est le groupe lui-même. Le rassemblement peut être classifié en deux types : passif et social. Le rassemblement passif est une attraction d'un individu à d'autres membres du groupe mais où il n'y a aucun affichage du comportement social. Les rassemblements sociaux se produisent habituellement dans les groupes où les membres sont connexes (parfois fortement reliés). Une variété de comportements interindividuels existe dans les rassemblements sociaux, rendant le transfert actif de

l'information nécessaire. Par exemple, les fourmis utilisent leurs antennes pour transférer les informations d'identité de l'individu ou l'endroit des ressources.

D'après les définitions ci-dessus, le troisième terme de l'équation (IV-3) ; $c_2 \cdot r_2 \cdot (Pbest_g^k - X_i^k)$ peut être classé en tant qu'agrégation active ou rassemblement passif. Mais puisque $Pbest_g$ est la meilleure solution que l'essaim a trouvée jusqu'ici, il peut être considéré comme l'endroit de la nourriture et nous pouvons le classer en tant qu'agrégation active.

On a découvert que dans les espaces où les rassemblements sont bien-définis, tels que les bancs de poissons, les individus peuvent montrer une basse fidélité au groupe parce que les rassemblements peuvent se composer des individus avec peu de relations génétiques entre eux. Les bancs de poissons sont considérés comme des troupes égoïstes [21], dans ce cas chaque individu essaye de profiter rapidement de la vie de groupe, indépendamment du destin des voisins. Dans ces rassemblements l'information peut être transférée passivement plutôt qu'activement. Pour cela les rassemblements peuvent être désignés sous le nom de rassemblement passif. Puisque le PSO est inspiré par les bancs de poissons, il est donc normal de se demander si un modèle passif de rassemblement pourrait être utilisé pour augmenter les performances du PSO. Dans cette étude nous ne proposerons pas d'autres modèles tels que l'agrégation passive, parce que l'essaim n'est pas agrégé passivement par l'intermédiaire des processus physiques. Et le rassemblement social se produit habituellement dans les groupes où la fidélité est haute. Les rassemblements sociaux ont fréquemment montré une division de travail. Dans les colonies sociales d'insectes, telle qu'une colonie de fourmis, de grandes tâches sont accomplies collectivement par des groupes d'individus spécialisés, ce qui est plus efficace que l'exécution de ces tâches par des individus non spécialisés. Le concept de division de travail peut être utilisé par le groupement et l'analyse des données.

Les membres du groupe peuvent réagir en dehors de la détection directe des signaux entrants de l'environnement, parce qu'ils peuvent obtenir l'information nécessaire de leurs voisins. Les individus ont besoin donc de surveiller leur environnement immédiat, telle que la position et la vitesse de leurs voisins. Par conséquent, chaque individu dans une agrégation a une multitude d'informations des autres membres du groupe, cela peut réduire au minimum la chance de la détection manquée de l'information et l'interprétation incorrecte. Un tel transfert peut être utilisé dans le modèle du rassemblement passif. Inspiré par ce résultat, et pour garder le modèle simple du PSO, nous proposons d'étudier un modèle de PSO avec rassemblement

passif, dont la présentation en formule en utilisant un facteur adaptatif d'inertie w^k dans l'équation (II-4) est :

$$V_i^{k+1} = w^k \cdot V_i^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (Pbest_i - X_i^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (Pbest_g^k - X_i^k) + c_3 \cdot r_3 \cdot (R_i^k - X_i^k) \quad (IV-5)$$

Le quatrième terme montre une quatrième tendance vers la particule la plus proche de l'essaim.

où ; R_i^k est la position de la particule la plus proche parmi les particules de l'essaim, c_3 est le coefficient de rassemblement, et r_3 est une constante aléatoire entre 0 et 1.

IV.4. Optimisation par essaim de particules :

Un problème important dans l'application des EC est la construction d'une fonction-objectif qui résume en juste proportion la nature du problème. Dans notre cas les difficultés de construction de la fonction-objectif réside uniquement dans la modélisation du problème parce que le PSO est conçu pour la résolution des problèmes non linéaires.

Ici nous sommes confrontés à une fonction non-linéaire avec un ensemble de contraintes d'inégalité qui peuvent être fortement non-linéaire. La présence de ces contraintes dans la programmation non-linéaire crée des problèmes additionnels pour trouver le minimum. Certains des plus importants sont :

1. Les contraintes définissent une région admissible, qui doit être non vide pour l'optimisation d'un problème existant.
2. Un problème de minimisation avec contraintes peut avoir un minimum local même si le problème sans contraintes correspondant n'a pas un minimum local.
3. Aucun des minimums locaux du problème avec contraintes peut ne pas correspondre au minimum global du problème sans contraintes.

IV.4.1. Méthode de pénalité :

L'approche de pénalité appartient à une classe des méthodes de résolution des problèmes d'optimisation non-linéaires avec contraintes. Le concept de base de ces méthodes est de ramener le problème original avec contraintes à un problème sans contraintes en ajoutant une fonction de pénalité à la fonction-objectif du problème initial qui dépend -d'une certaine manière logique- de la valeur des contraintes.

On a deux types principaux de méthodes de pénalisation : fonction de pénalité intérieure, dans laquelle on applique une sanction pour approcher la frontière d'une contrainte d'inégalité, et la fonction de pénalité extérieure qui impose une pénalité pour la violation des contraintes.

IV.4.1.1. Fonction de pénalité intérieure :

Cette méthode crée un ordre de fonctions dérivables modifiées sans contraintes dont les minimums convergent à la solution optimale du problème avec contraintes dans la limite. Considérons le problème avec contraintes d'inégalité suivant :

$$\left| \begin{array}{ll} \text{Minimiser} & f(x) \\ \text{sous} & C(x) \geq 0 \end{array} \right. \quad (\text{IV-6})$$

Où $C(x)$ est un vecteur de m dimension dont $C_j(x)$ est le $j^{\text{ième}}$ composant.

La nouvelle fonction à minimiser est :

$$\Pi(x, \mu) = f(x) - \mu \sum_{j=1}^m \Phi[C_j(x)] \quad (\text{IV-7})$$

Où

Φ est la fonction de barrière,

μ est le paramètre de pénalisation.

Il y a plusieurs fonctions de barrière, les plus importantes sont :

- Fonction de pénalisation logarithmique ;

$$\Phi[C_j(x)] = \log[C_j(x)]$$

la fonction à minimiser est définie comme suiv.

$$\Pi(x, \mu) = f(x) - \mu \sum_{j=1}^m \log[C_j(x)] \quad (\text{IV-8})$$

- Fonction de barrière inverse ;

La nouvelle fonction à minimiser est définie par :

$$\Pi(x, \mu) = f(x) - \mu \sum_{j=1}^m \frac{1}{C_j(x)} \quad (\text{IV-9})$$

Donc

$$\Phi[C_j(x)] = \frac{1}{C_j(x)}$$

IV.4.1.2. Fonction de pénalité extérieure :

La fonction-objectif est définie par la somme de la fonction originale plus un terme pour chaque contrainte qui est positif quand la contrainte est violée et nul dans l'autre cas. Donc la valeur de la fonction-objectif originale reste exacte quand les contraintes seront respectées. Cette caractéristique donne l'avantage à la fonction de pénalité extérieure et la rend la fonction de choix pour notre travail.

La définition de la fonction de pénalité extérieure nous mène au choix de la fonction suivante :

$$\Phi[C_j(x)] = [\min\{0, C_j(x)\}]^2 \quad (\text{IV-10})$$

Où $C_j(x)$ présente la contrainte d'inégalité $C_j(x) \geq 0$.

La nouvelle fonction à minimiser sera :

$$\Pi(x) = f(x) + \sum_{j=1}^m \Phi[C_j(x)] \quad (\text{IV-11})$$

IV.4.2. Application d'algorithme à essaim de particules :

L'application de l'algorithme du PSO comprend les étapes suivantes :

1. Initialisation de l'essaim de particules avec des positions aléatoires et des vitesses dans deux dimensions, vitesse de coupe et avance.
Ceci constitue la première génération.
2. Evaluation de la fonction-objectif en fonction des deux variables, vitesse de coupe et avance.
3. Comparaison de l'évaluation de chaque particule de l'essaim avec la meilleure position trouvée par la même particule ($Pbest_i$).

Si la valeur courante est inférieure à la valeur du $Pbest_i$ (c'est-à-dire, la particule a réalisée une nouvelle meilleure position personnelle), alors ; la valeur de $Pbest_i$ sera égale à la valeur courante et $Pbest_i$ sera égale à la position courante.

4. Comparaison de l'évaluation avec la meilleure solution trouvée par l'essaim ($Pbest_g$).

Si la valeur courante est inférieure à la valeur de $Pbest_g$ (c'est-à-dire, l'essaim a réalisée une nouvelle meilleure solution), alors ; la valeur de $Pbest_g$ sera égale à la valeur courante et $Pbest_g$ sera égale à la position actuelle de cette particule.

Pour l'évolution les deux variantes de l'algorithme à essaim de particules (PSO standard et PSOPC) se diffèrent.

- En PSO standard :

5. Calcul des nouvelles vitesses et positions par les équations (IV-3) et (IV-4).

6. Retour à l'étape 2 si le critère d'arrêt n'est pas satisfait.

- En PSOPC :

5. Recherche de la particule la plus proche (R_i).

6. Calcul des nouvelles vitesses et positions par les équations (IV-5) et (IV-4).

7. Retour à l'étape 2 si le d'arrêt n'est pas satisfait.

Notons que dans l'étape (5) en PSO, (6) en PSOPC la particule maintient une partie de la vitesse qui l'a apportée à la position actuelle. Ce but est réalisé par un facteur adaptatif d'inertie w pour assurer la convergence rapide du programme.

Le procédé est également illustré par l'organigramme de la figure (IV-1).

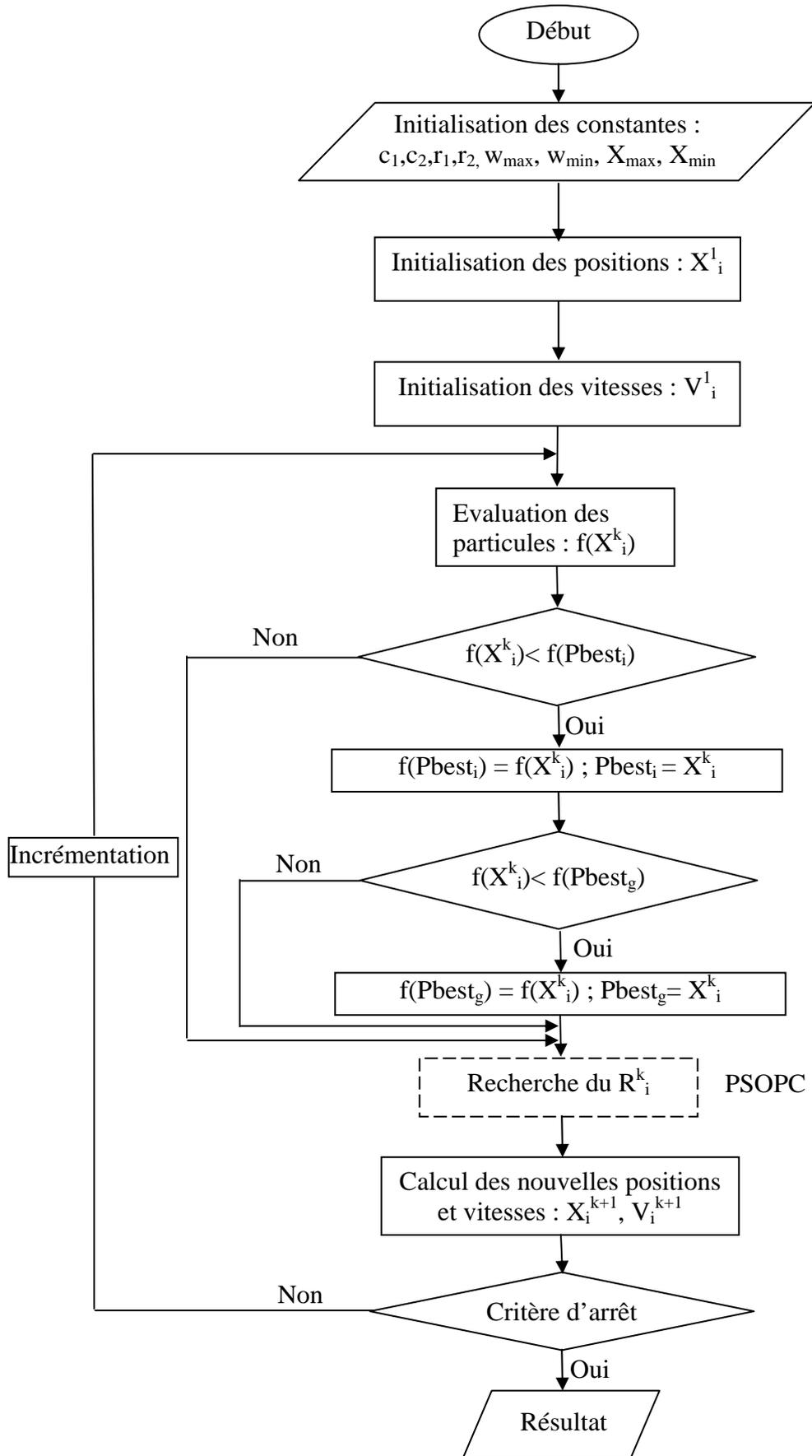


Figure IV-1 : Organigramme de l’algorithme à essaim de particules

Chapitre V

APPLICATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Sommaire

V.1 Cas d'application	59
V.2 Résultats	60
V.3 Discussion et interprétation des résultats	62

V.1. Cas d'application :

Afin d'étudier les avantages et les inconvénients de l'algorithme à essaim de particules PSO par rapport à l'algorithme génétique GA, ainsi que les améliorations apportées par le calcul évolutionnaire à l'optimisation des conditions de coupe, nous avons pris comme exemple d'application celui traité par J.S.Agapiou [14] en utilisant la méthode du gradient MG et résolu ensuite par M .Assas et M .Djennane [17] en utilisant l'algorithme génétique GA.

Les paramètres utilisés pour l'application numérique sont mentionnés dans le tableau (V-1) avec une répartition de l'opération en quatre passes. Les profondeurs de passes sont déterminées par la méthode de programmation géométrique [17]:

$$d_{c1} = 1.27mm. ; d_{c2} = 2.54mm. ; d_{c3} = 3.81mm. ; d_{c4} = 5.08mm..$$

Paramètre	Val	Paramètre	Val	Paramètre	Val	Paramètre	Val
L [mm]	203	f_{\max} [mm/tr]	0.762	t_R [min/passe]	0.13	a_3	0.25
D [mm]	152	SF_{\max} [μm]	2	t_h [min/pièce]	1.5	K	193.3
$V_{c\min}$ [m/min]	30	SR_{\max} [μm]	8	θ_{\max} [$^{\circ}C$]	500	t_{cs} [min/arête]	0.5
$V_{c\max}$ [m/min]	200	HP_{\max} [kW]	5	a_1	0.29	C_0 [\$/min]	0.1
f_{\min} [mm/tr]	0.254	F_{\max} [N]	1100	a_2	0.35	C_t [\$/arête]	0.5

Tableau V-1 : Paramètres d'usinage [14].

En remplaçant les données du tableau (V-1) dans les équations (III-4) et (III-6) et en enlevant les termes constants, nous trouvons :

$$Tu = 96.936/V_c \cdot f + 3.4716 \cdot 10^{-8} \cdot V_c^3 \cdot f^{0.16} \cdot d_c^{1.4} \quad (V-1)$$

et

$$Cu = 9.693/V_c \cdot f + 3.8187 \cdot 10^{-8} \cdot V_c^3 \cdot f^{0.16} \cdot d_c^{1.4} \quad (V-2)$$

En fixant les facteurs de poids selon l'importance économique α_1 et α_2 respectivement à 0.8 (80%) et 0.2 (20%), notre problème sera :

$$\begin{array}{l}
 \text{Minimiser} \quad Y = 0.8.Cu + 0.2.Tu \\
 \text{telque} \quad 0.254 \leq f \leq 0.762 \\
 \quad 30 \leq V_c \leq 200 \\
 \quad 0.0373.V_c^{0.91} .f^{0.78} .d_c^{0.75} \leq 5 \\
 \quad 14.785.V_c^{-1.52} .f^{1.004} .d_c^{0.25} \leq 8 \\
 \quad 74.96.V_c^{0.4} .f^{0.2} .d_c^{0.105} - 17.8 \leq 500 \\
 \quad 844.V_c^{-0.1013} .f^{0.725} .d_c^{0.75} \leq 1100
 \end{array} \tag{V-3}$$

V.2. Résultats :

Pour la résolution de ce problème, nous avons utilisé les deux variantes de l'algorithme à essaim de particules (PSO, PSOPC) implémentées en langage Matlab. Les paramètres de ces deux programmes sont donnés par le tableau (V-2).

Par l'application répétitive de ces programmes nous avons remarqué que le nombre d'itérations (générations) nécessaire pour trouver la solution optimale ne dépasse pas les 35 itérations. C'est pour cela que nous avons fixé le nombre maximal d'itérations à 35.

Méthode	Taille de l'essaim	Nbr d'itérations	(w_{\min}, w_{\max})	(c_1, c_2, c_3)	(r_1, r_2, r_3)
PSO	50	35	(0.9, 0.4)	(2, 2, /)	(0.1, 0.1, /)
PSOPC	50	35	(0.9, 0.4)	(2, 2, 1)	(0.1, 0.1, 0.01)

Tableau V-2: Paramètres des programmes.

La figure (V-1) représente l'évolution des générations en PSO pour un profondeur de passe $d_c = 1.27mm$. Dans cette simulation, nous pouvons voir le déplacement collectif des particules de l'essaim en balayant le domaine faisable des conditions de coupe pour trouver la solution optimale. Les particules normales sont présentées par (*) et la meilleure particule est présentée par (°).

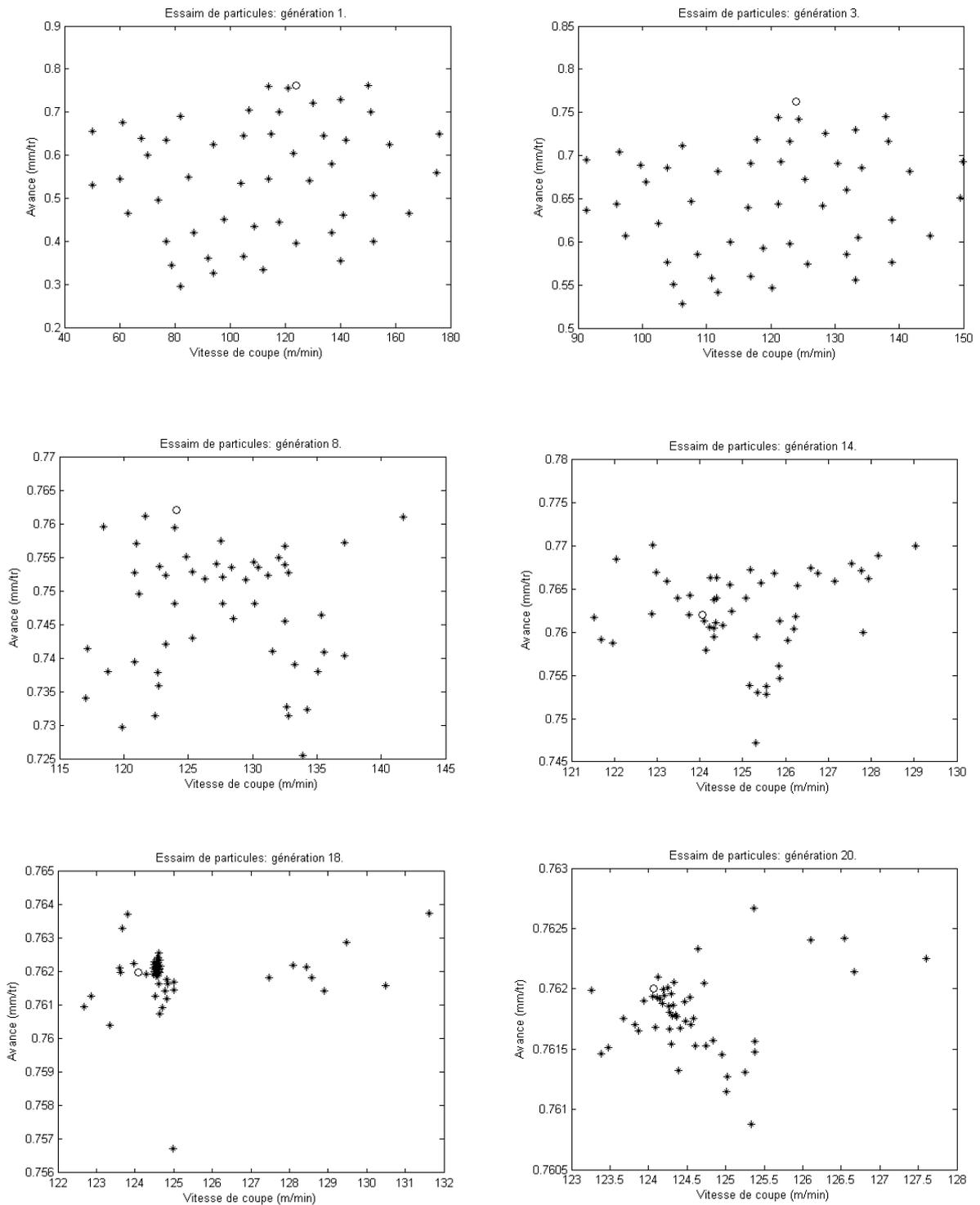


Figure V-1 : Simulation du PSO.
 ($d_c = 1.27mm$)

Les résultats trouvés en utilisant le PSO et le PSOPC sont mentionnés respectivement dans les tableaux (V-3) et (V-4) avec le nombre effectif des générations.

d_c (mm)	V_c (m/min)	f (mm/tr)	Cu (\$)	Tu (min)	N° Gén
1.27	124.02	0.762	0.363	2.744	20
2.54	122.58	0.641	0.527	3.082	34
3.81	115.46	0.529	0.666	3.529	33
5.08	109.40	0.454	0.786	3.969	27

Tableau V-3 : Résultats trouvés par le programme du PSO.

d_c (mm)	V_c (m/min)	f (mm/tr)	Cu (\$)	Tu (min)	N° Gén
1.27	127.47	0.761	0.368	2.724	4
2.54	122.44	0.639	0.527	3.087	15
3.81	116.56	0.537	0.673	3.502	19
5.08	110.03	0.457	0.792	3.951	4

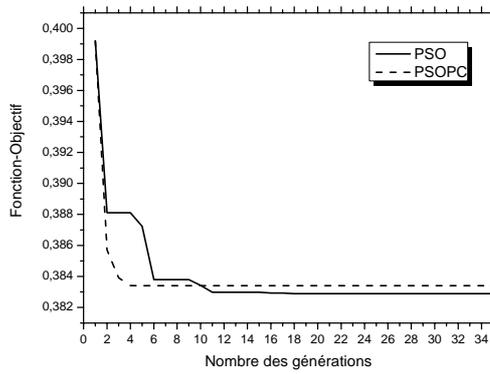
Tableau V-4 : Résultats trouvés par le programme du PSOPC.

V.3. Discussion et interprétation des résultats :

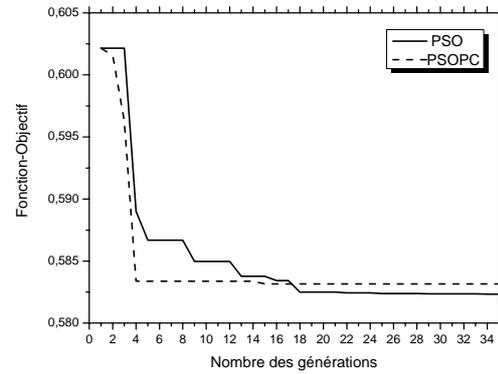
A partir des tableaux (V-3) et (V-4), nous avons tracé des courbes des valeurs de la fonction-objectif au cours de l'évolution des générations pour les deux programmes du PSO et du PSOPC, figure (V-2).

La comparaison des deux courbes de chaque graphe de la figure, nous permet de constater que la convergence du programme de PSOPC est plus rapide par rapport à celle du programme de PSO. Cette convergence montre l'influence positive du rassemblement passif sur le temps de la recherche des solutions optimales. Ainsi nous pouvons dire que le rapprochement des particules au cours de l'évolution de l'essaim conduit à un regroupement plus rapide.

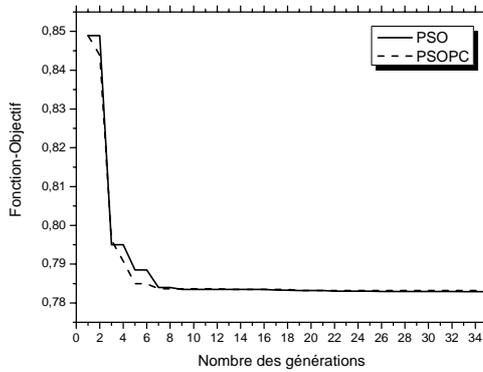
Mais ce rassemblement a un effet négatif sur l'aspect de la diversité des solutions optimales ce qui justifié la fiabilité des résultats trouvées par la méthode du PSO en comparaison avec celle du PSOPC.



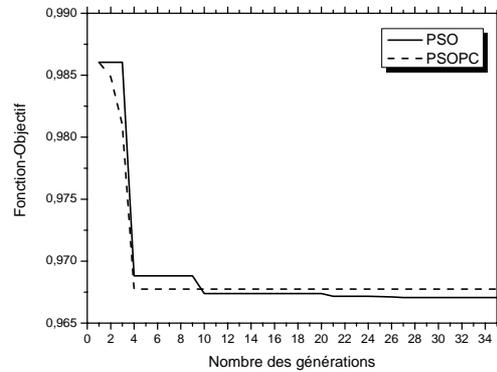
a- $d_c = 1.27mm$.



b- $d_c = 2.54mm$.



c- $d_c = 3.81mm$.



d- $d_c = 5.08mm$.

Figure V-2 : Les graphes de la fonction-objectif en fonction du nombre de générations.

Les résultats trouvés par la méthode du gradient [14] et celles trouvées par l'algorithme génétique [17] sont mentionnées respectivement dans les tableaux (V-5) et (V-6).

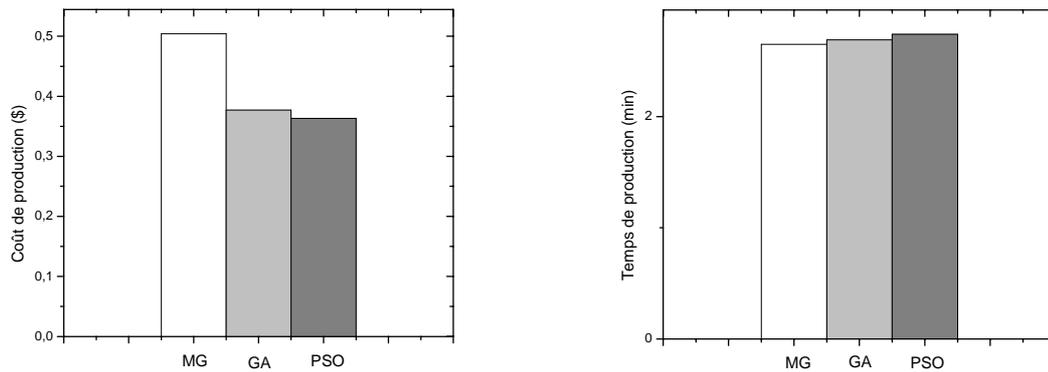
d_c (mm)	V_{opc} (m/min)	V_{opt} (m/min)	f (mm/tr)	Cu (\$)	Tu (min)
1.27	177	173	0.71	0.504	2.65
2.54	149	145	0.56	0.675	3.18
3.81	137	134	0.46	0.850	3.68
5.08	131	128	0.38	1.032	4.23

Tableau V-5 : Résultats trouvés la méthode du gradient [14].

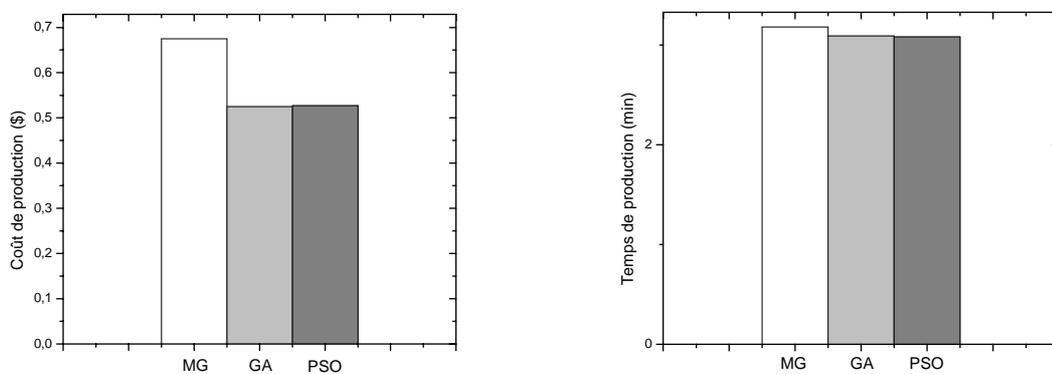
d_c (mm)	V_c (m/min)	f (mm/tr)	C_u (\\$)	T_u (min)
1.27	132.55	0.762	0.377	2.69
2.54	122	0.634	0.525	3.09
3.81	115.08	0.507	0.667	3.59
5.08	107.84	0.444	0.773	4.02

Tableau V-6 : Résultats trouvés par l'algorithme génétique [17].

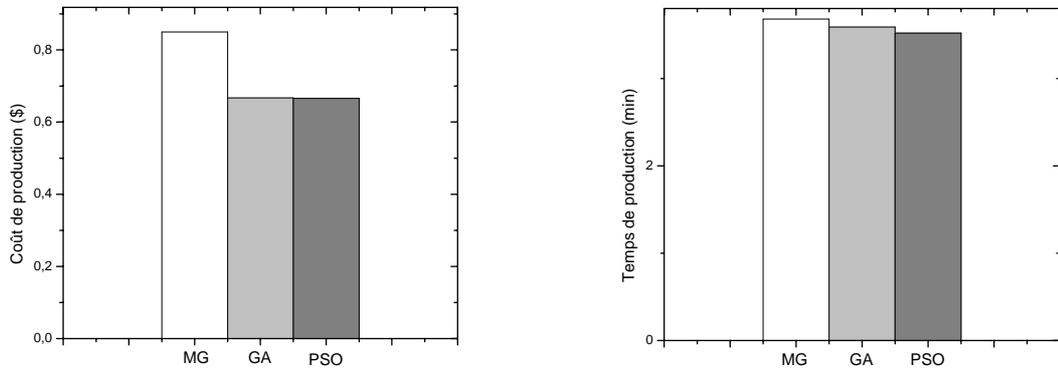
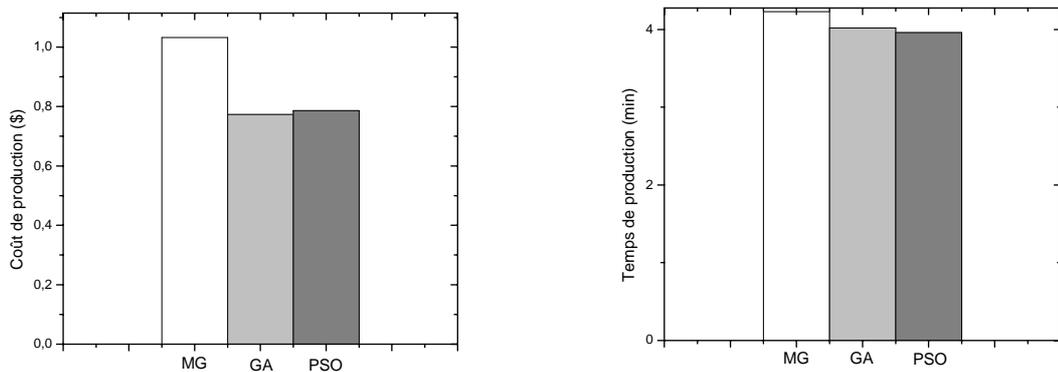
La figure (V-3) représente les courbes comparatives des valeurs du coût et du temps de production trouvées par les trois méthodes de résolution utilisées : la méthode du gradient MG, l'algorithme génétique GA et l'algorithme à essaim de particules PSO pour chaque passe.



a- $d_c = 1.27$ mm.



b- $d_c = 2.54$ mm.

c- $d_c = 3.81$ mm.d- $d_c = 5.08$ mm.**Figure V-3:** Présentation graphique des coûts et temps de production.

Dans les figures (V-3, b), (V-3, c) et (V-3, d) nous constatons une diminution du coût et du temps de production résultats des méthodes évolutionnaires, sauf dans la figure (V-3, a) que nous remarquons une légère augmentation dans le temps de production. Nous pouvons donc constater que le calcul évolutionnaire a apporté une nette amélioration pour la résolution des problèmes d'optimisation multiobjectifs non-linéaires.

Cette amélioration est expliquée par l'effet probabiliste du calcul évolutionnaire qui mène à une très grande diversité des solutions optimales du problème.

En comparant les résultats trouvés par le PSO avec celles trouvés par le GA, nous remarquons que le temps de production est diminué par un tau qui arrive à 2% avec une légère augmentation dans du coût de production et ça pour les trois dernières passes (2.54 mm, 3.81 mm et 5.08 mm) figure : (V-3, b), (V-3, c) et (V-3, d). Dans la première passe (1.27 mm) figure (V-3, a), nous trouvons une diminution de 3.71% dans le coût de production avec une augmentation de 1.85% dans le temps de production.

Toutes ces remarques nous mènent à considérer un autre critère de jugement. Prenons le critère du taux de profit [9]. Ce critère est formulé comme suit :

$$\text{Pr} = \frac{S - Cu}{Tu}$$

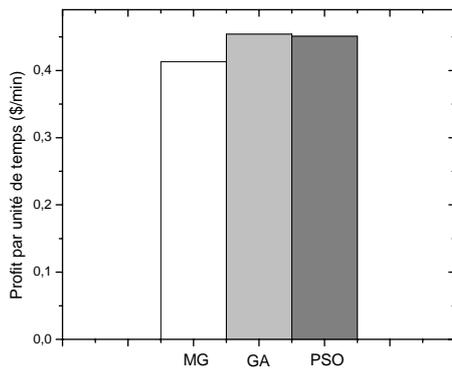
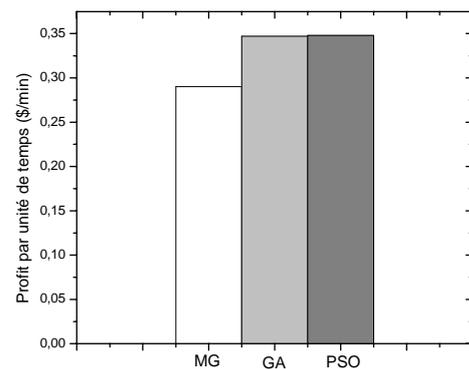
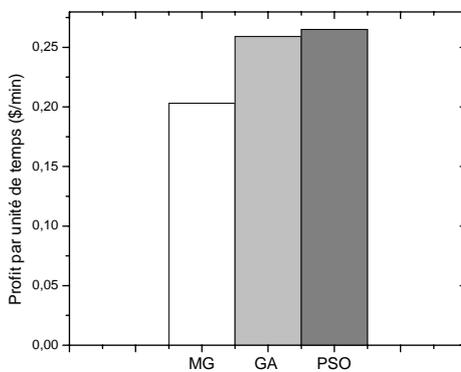
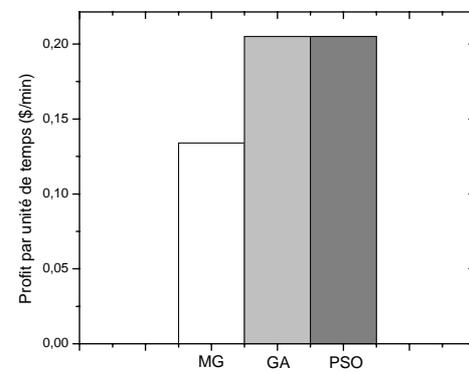
où Pr est le taux profit et S est le prix de vente.

Calculons maintenant les taux de profit de chaque passe pour les résultats des trois méthodes avec : $S = 1.6$ \$.

d_c [mm]	1.27	2.54	3.81	5.08
PSO	0.451	0.348	0.265	0.205
GA	0.454	0.347	0.259	0.205
MG	0.413	0.290	0.203	0.134

Tableau V-7 : Taux de profit [\$/min].

D'après les données du tableau (V-7), nous traçons des courbes comparatives pour les taux profit trouvés par les trois méthodes de résolution (PSO, GA et MG) figure (V-4).

**a-** $d_c = 1.27$ mm.**b-** $d_c = 2.54$ mm.**c-** $d_c = 3.81$ mm.**d-** $d_c = 5.08$ mm.**Figure V-4:** Présentation graphique du taux profit.

Nous trouvons dans les graphes de la figure (V-4) que les taux de profit trouvés à partir des résultats du PSO sont relativement élevés par rapport à celles du GA et MG, ce qui permet de faire la conclusion suivante :

Sans citer les avantages théoriques de la méthode d'optimisation par essaim de particules PSO (plus simple, facile à implémenter, moins coûteuse en terme d'espace mémoire et de vitesse, etc), cette méthode nous donne de bon résultat par rapport à la méthode des algorithmes génétiques GA et la méthode du gradient MG.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenté de travailler aux frontières de deux domaines très différents que sont l'optimisation des conditions de coupe et les algorithmes évolutionnaires. 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. L'idée était de s'inspirer des capacités des animaux vivant en groupes à se déplacer ensemble en balayant un espace pour améliorer leur efficacité, dans la recherche des endroits de la nourriture ou l'évitement des prédateurs. Dans le cadre de la modélisation du procédé de coupe, nous avons considéré un modèle d'optimisation multi-objectif avec un ensemble de contraintes qui représente les plus importants paramètres à satisfaire.

Dans les groupes des animaux, les différents membres peuvent coordonner leurs mouvements en se regroupant ou se dispersant. Ils sont aussi capables de remettre à jour leurs connaissances sur l'espace de recherche en profitant de l'expérience des autres membres de groupe. Ils ont donc capables de changer la direction de la recherche à tout moment. Partant de ces capacités, nous avons espéré de développer un programme qui permet d'améliorer la recherche des solutions optimales pour notre problème en évitant la convergence vers les optima locaux.

Ce que nous avons fait...

Dans un premier temps, nous avons étudié les différents facteurs influents sur le déroulement et les résultats d'un procédé de tournage afin de choisir un modèle d'optimisation des conditions de coupe en minimisant le coût et le temps de production simultanément. En étudiant les approches élaborées pour le traitement des problèmes d'optimisation multicritère, nous avons déterminé la méthode la plus adéquate pour la

résolution de notre problème qui est la méthode d'agrégation des objectifs sous la forme d'une somme pondérée. Cette méthode a montré une très bonne simplicité d'application et elle a donné la possibilité de fixer les poids de chaque objectif selon son importance technique et économique. Ainsi, ce choix nous a permis de comparer nos résultats avec ceux trouvés par J.S. Agapiou afin de présenter les améliorations apportées par les algorithmes évolutionnaires.

Dans un second temps, nous avons étudié l'un des plus récents algorithmes des EA, qui est l'algorithme à essaim de particules en deux variantes, standard PSO et avec rassemblement passif PSOPC. Ainsi, les programmes des deux variantes ont été développés en langage Matlab. L'application de ces deux programmes sur une opération de chariotage a montré une très bonne convergence du PSOPC par rapport au PSO avec une fiabilité plus ou moins meilleure des résultats du PSO. Due à la sensibilité du problème d'optimisation des conditions de coupe, nous avons constaté que le PSO standard est plus meilleur même si le temps de calcul de ce programme est plus long en comparant avec celui du PSOPC.

D'après la comparaison des résultats trouvés par le PSO et le GA avec celles du MG, nous pouvons constater que les méthodes évolutionnaires ont apporté une nette amélioration à la résolution des problèmes d'optimisation multicritère des conditions de coupe.

En ce qui concerne les EA, la comparaison des résultats des deux algorithmes évolutionnaires PSO et GA par les critères coût et temps de production n'était pas suffisante ce qui nous mène à considérer un troisième critère de jugement, le taux de profit. Après le calcul des taux de profit des quatre passes pour chaque méthode, nous avons trouvé que les résultats du PSO sont sensiblement élevés par rapport à ceux du GA.

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

Ce que nous n'avons pas fait...

Dans ce présent travail, le nombre des variables d'optimisation a été limité, nous avons travaillé uniquement avec l'avance et la vitesse de coupe. Par exemple, la profondeur de passe n'a pas été parmi les conditions à optimiser, elle a été déterminée par un autre procédé de calcul. Ainsi, l'approche de résolution des problèmes multicritère a été choisie par une analyse purement théorique.

Pour l'élargissement de ce travail, nous pouvons considérer un modèle d'optimisation des conditions de coupe avec les trois variables (profondeur de passe, avance par tour et

vitesse de coupe) pour une passe de finition en minimisant le coût et le temps de production. Ce modèle devra être résolu par la méthode de PSO combiné avec deux ou trois approches de résolution des problèmes multicritère (spécialement les méthodes, d'agrégation des objectifs et par ϵ -contrainte).

Si tout cela était fait...

Nous aurons les intérêts suivants :

Pour la partie modélisation, tous les variables de commande (chapitre III) seront maîtrisés et la rugosité de surface produite par une passe de finition sera plus respectée, ainsi la durée de vie de l'outil sera plus longue pour les passes d'ébauche.

Contrairement aux autres méthodes de calcul évolutionnaire, le PSO travail avec les approches non Pareto pour la résolution des problèmes d'optimisation multicritère. Il a donc besoin de traduire le problème en une seule fonction-objectif. De ce fait, il sera plus utile de combiner cet algorithme avec plusieurs approches afin de trouver l'approche la plus adéquate.

Références:

- [1] A.A.Adly, S.K.Abd-El-Hafid. Field Computation in Non-linear Magnetic Media Using Particle Swarm Optimization. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*. Vol 272-276. pp 690-692. 2004.
- [2] A.Chatterjee, P.Siarry. Nonlinear Inertia Weight Variation for Dynamic Adaptation in Particle Swarm Optimization. *Computers & Operation Research*. 2004.
- [3] A.Passeron. Tournage. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [4] A.R.Cockshott, B.E.Hartman. Improving the Fermentation Medium for Echinocandin B Production part II: Particle Swarm Optimization. *Process Biochemistry*. Vol 36. pp 661-669. 2001.
- [5] B.Arezoo, K.Ridgway, A.M.Al-Ahmari. Selection of Cutting Tools and Conditions of Machining Operations Using an Expert System. *Computers in Industry*. Vol 42. pp 43-58. 2000.
- [6] B.Y.Lee, Y.S.Tarn. Cutting –Parameter Selection for Maximizing Production Rate or Minimizing Production Cost in Multistage Turning Operations. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol 105. pp 61-66. 2000.
- [7] C.O.Oorique, E.C.Biscaia, Jr.J.C.Pinto. The Use of Particle Swarm Optimization for Dynamical Analysis in Chemical Processes. *Computers and Chemical Engineering*. Vol 26. pp 1783-1793. 2002.
- [8] D.E.Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison Wensley, Massachusetts, 1989.
- [9] D.Shabtay, M.Kaspi. Optimization of Machining Economics Problem Under the Failure Replacement Strategy. *International Journal of Production Economics*. Vol 80. pp 213-230. 2002.
- [10] E.Felder. *Procédés d'Usinage*. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [11] F.Leroy. *Endommagement des Outils de Coupe*. *Techniques de l'Ingénieur*.

-
- [12] G.Venter, R.T.Haftka, J.Sobieszezanski-Sobieski. Robust Design Using Particle Swarm and Genetic Algorithm Optimization. NASA Langley Research Center, USA.
- [13] J.H.Holland. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [14] J.S.Agapiou. The Optimization of Machining Operations Based on a Combined Criterion, Part 1 : The Use of Combined Objectives in Single-Pass Operations. Journal of Engineering for Industry. Vol 114. pp 500-507. November 1992.
- [15] J.Vergnas. Usinage Technologie et Pratique, Génie Mécanique, Dunod. 1982.
- [16] J.Wang, T.Kuriyagawa, X.P.Wei, D.M.Guo. Optimization of Cutting Conditions for Single Pass Turning Operations Using a Deterministic Approach. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol 42. pp 1023-1033. 2002.
- [17] M.Assas, M.Djennane. Optimisation des Conditions de Coupe Basée sur Critère Combiné par la Méthode des Algorithmes Génétiques. 16^{ème} Congrès Français de Mécanique, Nice, 1-5 septembre 2003.
- [18] M.Brahim, K.Haddouche. Optimisation Non Linéaire des Paramètres de Coupe en Tournage. 1^{er} congré International de Mécanique, Constantine, Algérie, le 14,15 & 16 Décembre 2002.
- [19] Q.Shen, J.Jiang, C.Jiao, G.Shen, R.Yu. Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Variable Selection in MLR and PLS Modeling: QSAR Studies of Antagonists of Angiotensin II Antagonists. European Journal of Pharmaceutical Sciences. Vol 22. pp 145-152. 2004.
- [20] R.K.Ursem, P.Vadstrup. Parameter Identification of Induction Motors Using Stochastic Optimization Algorithms. Applied Soft Computing. Vol 4. pp 49-64. 2004.
- [21] S.He, Q.H.Wu, J.Y.Wen, J.R.Saunders, R.C.Paton. A Particle Swarm Optimiser with Passive Congregation. Biosystems. 2004.

- [22] S.P.Ghoshal. Optimization of PID Gains by Particle Swarm Optimizations in Fuzzy Based Automatic Control. *Electric Power Systems Research*. Vol 72. pp 203-212. 2004.
- [23] S.Kannan, S.Mary Raja Slochanal, P.Subbaraj, N.Prasad Padhy. Application of Particle Swarm Technique and its Variants to Generation Expansion Planning Problem. *Electric Power Systems Research*. Vol 70. pp 203-210. 2004.
- [24] S.K.Choudhury, I.V.K.Appa Rao. Optimization of Cutting Parameters for Maximizing Tool Life. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol 39. pp 343-353. 1999.
- [25] T.Aruldoss Albert Victoire, A.Ebenezer. Hybrid PSO-SQR for Economic Dispatch with Valve-point Effect. *Electric Power Systems Research*. Vol 71. pp 51-59. 2004.
- [26] U.Zuperl, F.Cus. Optimization of Cutting Conditions During Cutting by Using Neural Networks. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. Vol 19. pp189-199. 2003.
- [27] V.Barichard. *Approches Hybrides pour les Problèmes Multiobjectifs*. Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale d'Angers. 2003.
- [28] V.Tandon, H.El-Mounayri, H.Kishawy. NC End Milling Using Evolutionary Computation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol 42. pp 595.605. 2002.
- [29] X.Yu, X.Xiong, Y.Wu. a PSO-based Approach to Optimal Capacitor Placement with Harmonic Distortion Consideration. *Electric Power Systems Research*. Vol 71. pp 27-33. 2004.
- [30] Z.Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Ed Springer-Verlag. 1996.

ملخص:

هذا البحث يناقش مشكلة التصنيع من الناحية التقنية و الاقتصادية لإيجاد الشروط المثالية للتشغيل و التي تضمن تكلفة إنتاج منخفضة نسبيًا و استغلالًا جيدًا لوسائل الإنتاج المتوفرة. و في هذا الصدد قمنا بدراسة مختلف طرق البحث التطورية المستخدمة في حل مسائل الأمثلية و استغلال أحدثها ألا و هي البحث بسررب النقاط. من أهم طرق التشغيل في الصناعة الميكانيكية الخراطة. و لوضع شروط التشغيل التي تضمن أقل تكلفة و وقت ممكنين لإنتاج قطعة ميكانيكية تحت مجموعة عوائق تمثل أهم الشروط التقنية الواجب إشباعها، قمنا بدراسة العديد من طرق حل المسائل المتعددة الأهداف. هذه الدراسة أظهرت أن طريقة جمع الأهداف في دالة هدف واحدة هي الأنسب لمشكلتنا و الأكثر تلائمًا مع تقنية البحث بسررب النقاط و ذلك لبساطة استعمالها و لإمكانية وضع وزن كل هدف في الدالة حسب أهميته التقنية و الاقتصادية. بعد كل هذا وضعنا برنامجين لكل من لوغاريتمية البحث بسررب النقاط العادية و التي تستعمل الجمع المسبق للنقاط. هذان البرنامجان أبديا فعالية عالية في تحسين وقت و تكلفة القيام بعملية الخراطة و في زمن حساب قياسي بالنسبة للطرق التطورية الأخرى. بعد هذا العمل يمكننا أن نقول أن تقنية البحث بسررب النقاط أعطت تحسين واضح في حل مسائل الأمثلية و بتقارب جيد.

Résumé :

Dans ce travail, une nouvelle technique évolutionnaire, l'optimisation par essaim de particules, est introduit pour la résolution du problème d'optimisation des conditions de coupe. En étudiant les différentes méthodes de résolution des problèmes d'optimisation multiobjectif non-Pareto, l'approche d'agrégation des objectifs montre une très bonne efficacité avec une simplicité d'application. Cette méthode est parue la plus adéquate pour notre situation de problème. Afin de minimiser le temps et le coût de production simultanément, sous un ensemble de contraintes qui présente globalement les plus importants paramètres à satisfaire, nous avons utilisé les deux variantes de l'algorithme à essaim de particules : standard (PSO) et avec rassemblement passif (PSOPC). Implémentées et appliquées sur une opération de tournage, ces deux variantes ont diminué avec efficacité le temps et le coût de réalisation d'une opération de chariotage (tournage) dans un temps de calcul très réduit. Nous pouvons dire que les algorithmes à essaim de particules ont apporté une nette amélioration à la résolution des problèmes d'optimisation non-linéaire avec une très bonne convergence.

Abstract:

In this work, a new evolutionary technique, particle swarm optimization, is introduced for the resolution of the problem of cutting conditions optimization. By studying the various methods of resolution of the multi-criterion optimization problems, the aggregation of objectives approach shows a very good efficient with a simplicity of application. This method is appeared most adequate for our problem situation. In order to minimize the production rate and the production cost simultaneously, under a set of constraints which presents the most significant parameters to be satisfied, we used the two variants of the particle swarm algorithm: standard (PSO) and with passive congregation (PSOPC). Implemented and applied to a turning operation, these two variants efficiently decreased the production rate and the production cost of realization of a turning operation in a much reduced computing time. We can say that the particle swarm algorithms give clear improvement to the resolution of the non-linear optimization problems with a very good convergence.