

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA - BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département Génie Mécanique

Laboratoire de Mécanique des Solides et Systèmes



## Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière** : Electromécanique

**Spécialité** : Mécatronique

### THEME

Optimisation des processus d'usinage des pièces par les  
algorithmes bio-inspirés

Présenté par :

Tiar Maissa

Tamazirt Imene

Promoteur : Dr. M. A. Mellal

Co-promoteur : Dr. S. Alem

**Promotion : 2018-2019**

## Résumés

La fabrication des pièces pour les systèmes mécatroniques nécessite divers processus d'usinage. De nos jours, l'usinage implique des technologies de pointe afin d'aboutir à de meilleurs critères de performance des procédés.

L'objectif de ce présent travail est d'optimiser quatre processus d'usinage : perçage, rectification, électroérosion par fil, et jet d'eau à haute pression. Deux algorithmes bio-inspirés de l'intelligence artificielle sont implémentés afin de résoudre ces problèmes : Particle Swarm Optimization (PSO) et Flower Pollination Algorithm (FPA). Une fonction de pénalité est introduite pour la maîtrise des contraintes. Les résultats obtenus comparent les performances des deux algorithmes.

**Mots clés :** Fabrication, Usinage, Optimisation, Algorithmes bio-inspirés, Intelligence artificielle.

## Abstract

The manufacture of parts for mechatronic systems requires various machining processes. Nowadays, machining implies advanced technologies in order to achieve better process performance criteria.

The aim of the present work is to optimize four machining processes: drilling, grinding, wire EDM, and high-pressure water jet. Two bio-inspired algorithms of artificial intelligence are implemented for solving these problems: Particle Swarm Optimization (PSO) and Flower Pollination Algorithm (FPA). A penalty function is introduced to handle the constraints. The results obtained compare the performances of both algorithms.

**Keywords:** Manufacturing, Machining, Optimization, Bio-inspired algorithms, Artificial intelligence.

## ملخص

يتطلب تصنيع أجزاء أنظمة الميكاترونك عمليات تشغيل مختلفة. في الوقت الحاضر، تتضمن الآلات تقنيات متطورة من أجل تحقيق معايير أداء أفضل للعمليات. الهدف من هذا العمل هو تحسين أربع عمليات تصنيع: الحفر، الطحن، سلك التنظيم الإداري، ارتفاع ضغط المياه النفاثة. يتم تطبيق خوارزميتين مستوحاة من الذكاء الاصطناعي لحل هذه المشكلات: الجسيمات سرب الأمثل (PSO) وخوارزمية التلقيح الزهري (FPA). يتم تقديم وظيفة جزائية للسيطرة على القيود. تقارن النتائج التي تم الحصول عليها بين أداء الخوارزميات.

**الكلمات المفتاحية:** تصنيع، عمليات التصنيع، التحسين، الخوارزميات المستوحاة من الحيوية، الذكاء الاصطناعي.

# *Remerciements*

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu Dieu qui nous a donné la force et la patience pour achever ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre Promoteur Dr. Mohamed Arezki Mellal qui nous a proposé ce thème et qui a accepté de nous encadrer. Nous sommes reconnaissantes pour ses orientations et sa disponibilité et ses conseils. Nous remercions le Dr. S. Alem pour ses conseils et son accompagnement.

Nombreuses sont les personnes qui, par leurs suggestions, leurs aides et leurs encouragements ont contribué à la réalisation de ce travail, de près ou de loin. Nous tenons à leur exprimer notre profonde gratitude.

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail à :

**Mes parents.** Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.

**Mes chers frères :** Aimene, Mohamed Taher, Nouredinne et leurs petites familles.

**Mes chères sœurs,** spécialement Samia.

**Ma grande famille** Tiar et Khouidam.

**Mon binôme** Imene Tamazirt.

**Mes amis proches :** Mustapha, Amina, Abd El Hak, Idris Zakaria, Manel, Maria, Salima.

**Tous mes camarades** du groupe MMTR-17, spécialement Chahinez, Meriem, Marwa, Ikram, Abir, Celia, Roumaissa.

**Et mes amis :** Sidahmed, Abdou, Ryma, Hanane, Soumia, ElDjouher, Hakim, Soulimane.

**Tous ceux qui m'ont aidé** de loin ou de près, spécialement Mecatro-Club, Yazid, Maroua, Redouane et Ami Mourad.

*Maissa Tiar*

# *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.

Mes chers frères et ma chère sœur Amira.

Mon binôme Maissa Tiar.

Mes chères amies.

Tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

*Imene Tamazirt*

# Sommaire

# Sommaire

---

## Sommaire

Liste des figures .....	IV
Liste des tableaux .....	VI
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Généralités sur l'usinage

I.1 Introduction.....	2
I.2 Généralités sur l'usinage .....	2
I.3 Types d'usinages.....	3
I.3.1 Usinages conventionnels .....	3
I.3.1.1 Tournage .....	3
I.3.1.2 Fraisage.....	7
I.3.1.3 Perçage.....	9
I.3.1.4 Rectification .....	11
I.3.2 Usinage non conventionnelle (moderne) .....	12
I.3.2.1 Ultrason.....	12
I.3.2.1 Jet d'eau à haute pression .....	13
I.3.2.2 Jet d'eaux .....	13
I.3.2.3 Jet abrasif .....	13
I.3.2.4 Jet d'eau abrasif(AWJM).....	13
I.3.2.5 Laser .....	13
I.3.2.6 Electrochimique (ESM) .....	14
I.3.2.7 Electroérosion(EDM) .....	15
I.3.3 Usinage à grande vitesse (UGV) .....	17
I.3.4 CNC (commande numérique par ordinateur).....	18

# Sommaire

---

I.4 Critères de performance.....	18
I.5 Etat de l’art sur l’optimisation des processus d’usinage .....	19
I.6 Conclusion .....	21

## Chapitre II : Etat de l’art sur l’usinage

II.1 Introduction .....	22
II.2 Définition.....	22
II.3 Types d’optimisation.....	23
II.3.1 Optimisation mono-objective.....	23
II.3.2 Optimisation multi-objectif.....	23
II.3.2.1 Somme pondérée.....	23
II.3.2.2 Pareto optimal .....	24
II.4 Maitrise les contraintes.....	24
II.4.1 Méthodes basées sur le concept de pénalité.....	24
II.4.2 Recherche des solutions faisables .....	24
II.4.3 Méthodes hybrides .....	24
II.5 Types de résolution.....	24
II.5.1 Méthodes conventionnelles.....	25
II.5.2 Méthodes non conventionnelles .....	25
II.5.2.1 Heuristiques .....	25
II.5.2.2 Métaheuristiques .....	25
II.6 Algorithms bio-inspirés.....	25
II.6.1 Algorithme de la huppe heuristique (HH).....	25
II.6.2 Algorithme de pollinisation des fleurs (FPA) .....	26
II.6.3 Cuckoo optimization algorithm (COA) .....	28
II.6.4 Algorithme d’essaim particulaire (PSO).....	28

# Sommaire

---

II.7 Conclusion.....	30
----------------------	----

## **Chapitre III : Optimisation des processus d'usinage**

III.1 Introduction .....	31
III.2 Description des problèmes .....	31
III.2.1 Optimisation du perçage (application 1) .....	31
III.2.2 Optimisation de rectifieuse (application 2) .....	32
III.2.3 Optimisation de l'usinage à jet d'eau en haute pression (application 3).....	32
III.2.4 Optimisation de l'électroérosion par fil (application 4) .....	33
III.3 Solutions proposées .....	35
III.3.1 Particule Swarm optimisation (PSO) .....	35
III.3.2 Flower Pollination Algorithm (FPA) .....	35
III.4 Résultats et commentaires.....	39
III.4.1 Application 1.....	39
III.4.2 Application 2.....	41
III.4.3 Application 3.....	49
III.4.4 Application 4.....	52
III.5 Conclusion.....	55
Conclusion générale .....	56
Bibliographie.....	VIII

Liste des figures

**Figure I.1** : Schéma des différents types d'usinages. ....3

**Figure I.2** : Dispositif de tournage. ....4

**Figure I.3** : Procédure de tournage. ....4

**Figure I.4** : Eléments de coupe. ....5

**Figure I.5** : Angles de coupe. ....5

**Figure I.6** : Condition de coupe. ....6

**Figure I.7** : Vitesse de coupe. ....6

**Figure I.8** : Vitesse d'avance. ....7

**Figure I.9** : Dispositif de la fraiseuse. ....8

**Figure I.10** : Perceuse. ....10

**Figure I.11** : Opération de perçage. ....10

**Figure I.12** : Dispositif de rectifieuse .....11

**Figure I.13** : Principe de l'étincelage. ....16

**Figure I.14** : principe de l'électroérosion par fil. .... 17

**Figure III.1** : Organigramme du PSO implémenté. ....37

**Figure III.2** : Organigramme du FPA implémenté. ....38

**Figure III.3** : Convergence de la meilleure valeur (PSO, application 1). ....40

**Figure III.4** : Convergence de la meilleure valeur (FPA, application 1). ....41

**Figure III.5** : Valeurs optimales de  $Ra$  (application 1). ....41

**Figure III.6** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par PSO ( $SR_{max}=0.3$  et  $ND_{max}=11$ ) .....42

**Figure III.7** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par PSO ( $SR_{max}=0,35$  et  $ND_{max}=11$ ) ..... 43

**Figure III.8** : Convergence de la meilleure valeur (PSO, application 1). ....44

**Figure III.9** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par FPA ( $SR_{max}=0,3$  et  $ND_{max}=11$ ). ....45

**Figure III.10** : Valeurs optimales de MRR pour ( $SR_{max}=0,3$  et  $ND_{max}=11$ ). ....45

**Figure III.11** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par FPA ( $SR_{max}=0,35$  et  $ND_{max}=11$ ). ....46

**Figure III.12** : Valeurs optimales de MRR pour ( $SR_{max}=0,35$  et  $ND_{max}=11$ ). ....46

**Figure III.13** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par FPA avec ( $SR_{max}= 0,4$  et  $ND_{max}=11$ ). ....47

## Liste des figures

---

<b>Figure III.14</b> : Valeurs optimales de MRR pour (SRmax=0,4 et NDmax=11). .....	47
<b>Figure III.15</b> : Convergence de la meilleure valeur de MRR (PSO, application 3). .....	50
<b>Figure III.16</b> : Convergence de la meilleure valeur de MRR (FPA, application 3). .....	51
<b>Figure III.17</b> : Valeurs optimales de MRR par PSO, FPA et la littérature. ....	51
<b>Figure III.18</b> : Convergence de la meilleure valeur de la fonctionne objectif Z (Application 4, PSO). .....	53
<b>Figure III.19</b> : Convergence de la meilleure valeur de la fonctionne objective Z (application 4, FPA). .....	54
<b>Figure III.20</b> : Valeurs optimales de la fonction objectif Z par (PSO, FPA). .....	54

### Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Processus d'étincelage comprend 6 phases. ....	16
<b>Tableau I.2</b> : Présente un résumé de l'état de l'art. ....	21
<b>Tableau II.1</b> : Quelques algorithmes de l'intelligence artificielle. ....	29
<b>Tableau III.1</b> : Paramètres d'usinage de l'application 1. ....	31
<b>Tableau III.2</b> : Paramètres d'usinage de l'application 2. ....	32
<b>Tableau III.3</b> : Paramètres d'usinage de l'application 3. ....	32
<b>Tableau III.4</b> : Données du procédé de l'application 3. ....	33
<b>Tableau III.5</b> : Paramètres d'usinage de l'application 4. ....	34
<b>Tableau III.6</b> : Résultats de PSO (application 1). ....	39
<b>Tableau III.7</b> : Mauvaise, meilleure, et moyenne de la fonction objectif et l'écart type (PSO, application 1). ....	39
<b>Tableau III.8</b> : Résultats de FPA (application 1). ....	40
<b>Tableau III.9</b> : Mauvaise, meilleure, et la moyenne de la fonction objective et l'écart type (FPA, application 1). ....	40
<b>Tableau III.10</b> : Comparaison des résultats (application 1). ....	41
<b>Tableau III.11</b> : Résultats de PSO ( SRmax=0,3 et NDmax=11). ....	42
<b>Tableau III.12</b> : Résultats de PSO (SRmax=0,35 et NDmax=11). ....	43
<b>Tableau III.13</b> : Résultats de PSO (SRmax=0,4 et NDmax=11). ....	44
<b>Tableau III.14</b> : Mauvaise, moyenne et meilleure valeur de MRR (PSO, application 2) ....	44
<b>Tableau III.15</b> : Résultats de FPA (SRmax=0,3 et NDmax=11). ....	45
<b>Tableau III.16</b> : Résultats de FPA (SRmax=0,35 et NDmax=11). ....	46
<b>Tableau III.17</b> : Résultats de FPA (SRmax=0,4 et NDmax=11). ....	47
<b>Tableau III.18</b> : Mauvaise, moyenne et la meilleure valeur de MRR ....	48
<b>Tableau III.19</b> : Contraintes de PSO, FPA (application 2) ....	48
<b>Tableau III.20</b> : Comparaison des résultats (SRmax= 0,3 ; 0,35 ;0 ,4 et NDmax=11) ....	49
<b>Tableau III.21</b> : Résultats de PSO (application 3). ....	49
<b>Tableau III.22</b> : Résultats de FPA (application 3). ....	50
<b>Tableau III.23</b> : Valeur de MRR et l'écart type pour PSO et FPA. ....	51
<b>Tableau III.24</b> : Comparaison des résultats de PSO, FPA et la littérature. ....	51
<b>Tableau III.25</b> : Résultats de PSO (application 4). ....	52

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau III.26</b> : Résultats de PSO (suite III.25).....	52
<b>Tableau III.27</b> : Résultats de FPA (application 4).....	53
<b>Tableau III.28</b> : Résultats de FPA (suite III.27).....	53
<b>Tableau III.29</b> : Valeurs de la fonction objective Z et l'écart type. ....	54
<b>Tableau III.30</b> : Comparaison des valeurs de PSO et FPA.....	54

# **Introduction générale**

### Introduction générale

L'industrie dépend d'une façon ou une autre de la conception assistée par ordinateur ou CAO et la fabrication (FOA) des pièces (usinage). La concurrence et le développement de tous les domaines (l'ingénierie, nucléaire, robotique, l'automobile, etc.) force les constructeurs à améliorer les performances de l'usinage.

Les systèmes mécatroniques peuvent réaliser un développement avantageux des pièces complexes, car la mécatronique inclue quatre disciplines (mécanique, électronique, informatique et automatique). Cette combinaison aide à renforcer la fonctionnalité des procédés.

Aujourd'hui, le développement technologique augmente d'une façon rapide donc il est primordial d'optimiser des procédés d'usinage, tel que : Le perçage, la rectification, jet d'eau à haute pression et l'électroérosion par fil.

L'objectif de ce travail est d'optimiser les critères de performance des procédés cités ci-dessous, en utilisant deux algorithmes bio-inspirés de l'intelligence artificielle afin de minimiser la rugosité ( $R_a$ ), et maximiser le taux d'enlèvement de la matière (MRR).

Ce mémoire est subdivisé comme suit :

- Chapitre I : Explique les deux types d'usinage avec leurs procédés, leur principe de fonctionnement, ainsi que leurs critères de performance en ajoutant un état de l'art sur l'optimisation de ces procédés.
- Chapitre II : Illustre un état de l'art sur l'optimisation dont le but est de connaître les différents types et méthodes de résolution des problèmes d'optimisation
- Chapitre III : Traite quatre problèmes des procédés : deux conventionnels (perçage, rectifieuse) et deux non conventionnels (électroérosion par fil, jet d'eau à haute pression).

# **Chapitre I**

## Généralités sur l'usinage

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter les processus d'usinage par enlèvement de matière avec ses deux types : Conventionnels appelés (classique ou traditionnel) et non conventionnels appelés (moderne ou avancé), ainsi que leurs principes de fonctionnement et les critères de performance de ces processus afin de montrer leur importance dans l'industrie en termes de production et qualité.

## I.2 Généralités sur l'usinage

L'usinage est un procédé industriel qui consiste à donner une forme finale avec des dimensions bien définies à une matière brute (solide) par enlèvement de matière, et ce en passant par des machines-outils qui effectuent des actions bien précises permettant d'aboutir à la réalisation de pièces conçues et désirées. Le choix du procédé d'obtention dépend de nombreux facteurs : Couple (matière-outil), matériaux des pièces, formes de la pièce, état de surface et précision, etc [1].

L'usinage par enlèvement de matière est le synonyme de l'enlèvement de copeau. Selon le type d'outil et la manière de travail, on peut faire deux classifications :

- **Copeau coupé** : C'est le résultat du travail d'un outil qui possède un ou plusieurs tranchants bien déterminés. Dans ce cas les copeaux dégagés sont visibles. On trouve ce type dans plusieurs processus, comme le tournage, fraisage, perçage, etc [2].
- **Copeau gratté** : Dans ce type, l'outil comporte un très grand nombre de tranchants de géométrie incertaine. Dans ce cas, les copeaux sont microscopiques. C'est le cas du travail à la meule ou à la lime [2].

Pour obtenir des pièces adéquates, l'opération d'usinage doit contenir deux éléments importants qui sont la machine et la matière. L'usinage est un domaine vaste qui contient plusieurs processus, on peut le diviser en deux grands types : usinage conventionnel tel que le tournage, le fraisage, le perçage, etc, et l'usinage non conventionnel comme le jet d'eau à haute pression, l'ultrason, l'électrochimie, etc (voir la figure I.1).



Figure I.1 : Schéma des différents types d'usinages.

### I.3 Types d'usinages

L'usinage par l'enlèvement de matière est divisé en deux grands types qui sont le conventionnel et le non conventionnel.

#### I.3.1 Usinages conventionnels

C'est l'un des types d'usinage par l'enlèvement de matière qui possède des processus traditionnels destiné à usiner des pièces simples avec des matériaux connus. Parmi ces processus, on présentera : tournage, fraisage, l'usinage par rectification, perçage.

##### I.3.1.1 Tournage

Le tournage est un procédé d'usinage et de fabrication mécanique permettant l'obtention des surfaces de révolution extérieures et/ou intérieures, des surfaces planes, coniques, filetage, ainsi que d'autres, par un enlèvement de matière (coupe) mettant en jeu des outils à arête unique, sur une machine nommée tour.

Cette machine est une machine-outil consiste en un dispositif (voire la figure I.2) qui permet l'obtention des pièces de révolutions, hélicoïdales et arbres. Un mandrin qui met en rotation par le moteur de broche sur lequel on fixe la pièce, et l'outil qui peut se déplacer en translation suivant deux directions perpendiculaires entre elles appartiennent à un plan auquel l'axe de la broche est parallèle. Le premier mouvement de translation est parallèle à l'axe de la broche. Le deuxième mouvement de translation est perpendiculaire à l'axe de la broche [1].

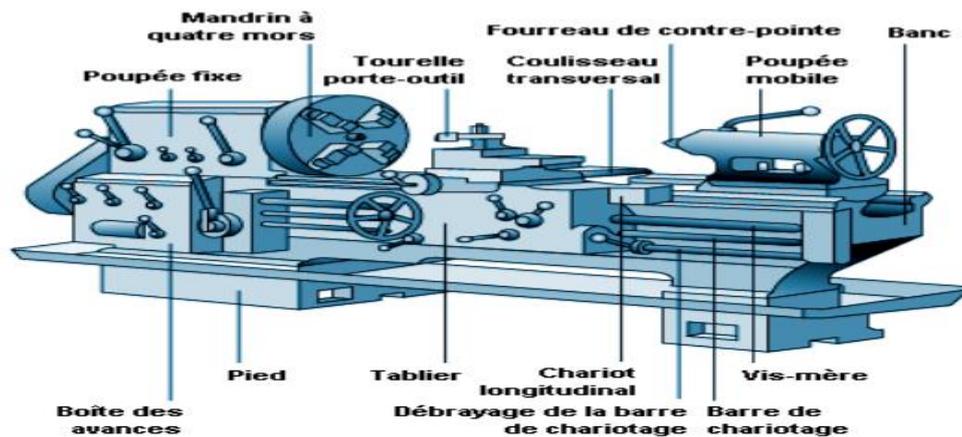


Figure I.2 : Dispositif de tournage.

Pour avoir les surfaces de révolution dans un tour conventionnel, il faut appliquer deux mouvements nécessaires :

Un mouvement circulaire continu rapide donné par la rotation de la pièce à usiner appelée mouvement de coupe  $M_c$ , et un mouvement d'avance  $M_f$  ( $M_a$ ) généralement rectiligne uniforme lent généré par translation de l'outil qui coupe la matière. Aussi, un troisième mouvement de translation appelé aussi mouvement de pénétration  $M_p$  qui est nécessaire pour le réglage de la position de l'outil [1].

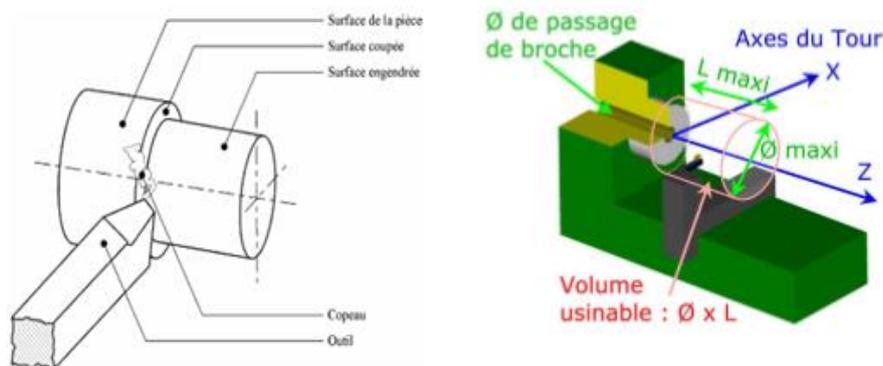


Figure I.3 : Procédure de tournage.

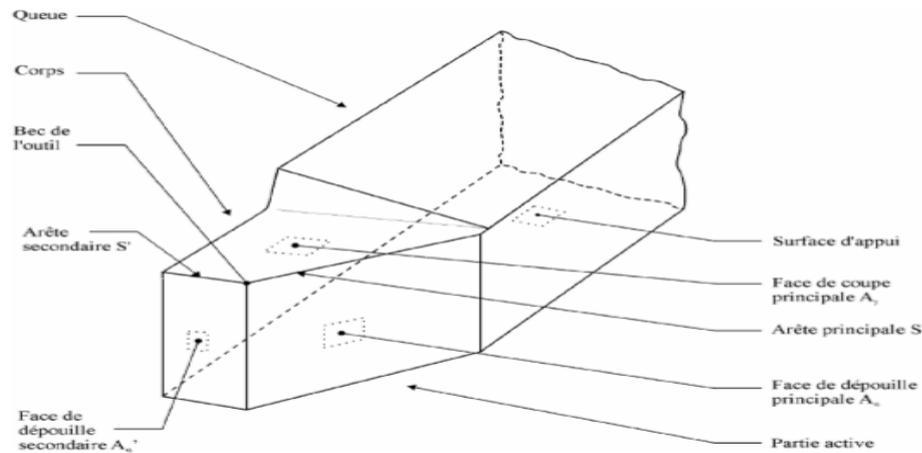
#### ➤ Différents types des opérations

Le tour permet de faire plusieurs opérations telles que : le chariotage, dressage, alésage, perçage, rainurage, chanfreinage, tronçonnage et filetage [3].

#### ➤ Outil de coupe

L'outil de coupe a un corps et une queue. Le corps c'est la partie de l'outil portant les

éléments coupants ou les plaquettes. La queue c'est la partie par laquelle celui-ci est maintenu. La partie active de l'outil (l'arête de coupe) est la partie la plus importante qui fait l'opération de coupe. Il a un grand nombre de propriétés spécifiques, telles que : dureté, ténacité, neutralité chimique et stabilité chimique [3].

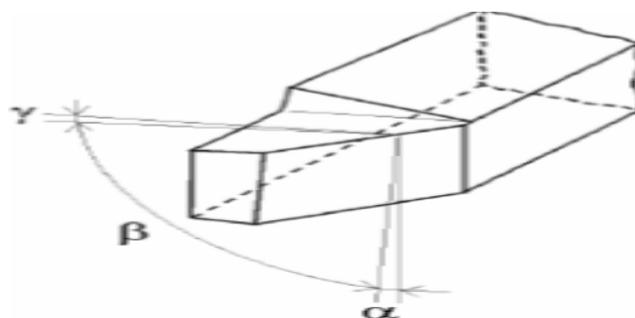


**Figure I.4 :** Eléments de coupe.

Les outils de coupes peuvent être en plusieurs matières, telles que : acier rapide supérieure ASR (HSS), carbure, céramique, céramique-métal, nitrure de bore cubique (CBN) et diamant. Les matériaux les plus utilisés sont l'acier rapide supérieur et le carbure [1],[3]. Le choix des matériaux dépend de l'utilisation, de la pièce qui convient avec, de la vitesse de coupe, et de température maximale [1]. On appelle une arête un bord de la face de coupe destiné à l'enlèvement de matière. Le contact entre cette arête et la pièce à usiner donne trois angles principaux :

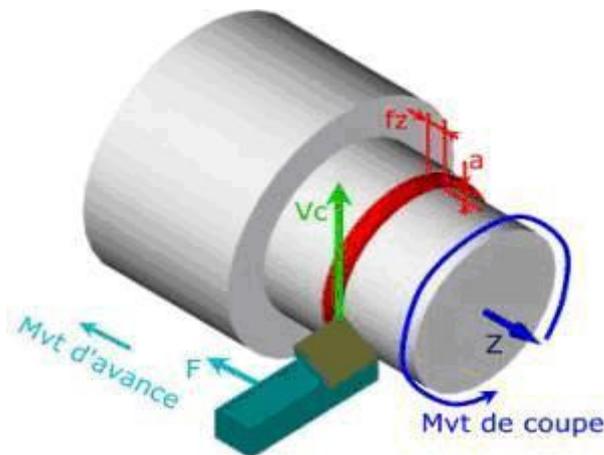
L'angle de dépouille  $\alpha$ , l'angle de coupe  $\gamma$ , l'angle du taillant  $\beta$ . La somme de ces trois angles est toujours égale à  $90^\circ$ .

$\alpha + \gamma + \beta = 90^\circ$ . Dans le cas où on a  $\alpha + \beta > 90^\circ$ , coupe est négative  $\gamma(-)$ .



**Figure I.5 :** Angles de coupe.

➤ Conditions de coupe en tournage



**Figure I.6 :** Condition de coupe.

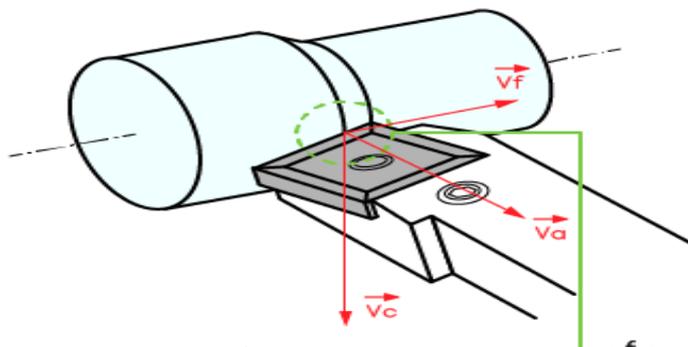
Pour une opération de tournage, les paramètres de coupe sont les suivants :

- **Vitesse de coupe**

La pièce est entraînée sur le tour à une certaine vitesse en  $\omega$  rad/s (soit  $N$  est tr / min). Cette vitesse angulaire étant communiquée par la broche de la machine via le porte-pièce. Compte tenu du diamètre de la pièce au point d'usinage situé sur un diamètre  $D$ , la vitesse relative de la pièce en ce point par rapport à l'outil (supposé fixe par rapport à la machine) est donnée par :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (I.1)$$

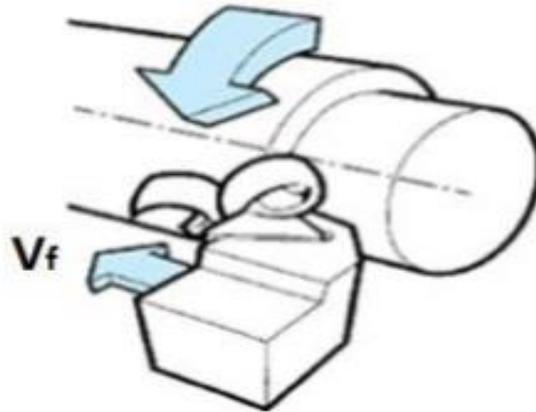
où  $V_c$  est la vitesse de coupe (m/min),  $D$  est le diamètre de la pièce (mm) et  $N$  est la fréquence de rotation (tr/min)



**Figure I.7 :** Vitesse de coupe.

- **Vitesse d'avance  $V_f$  et l'avance par tour  $f$**

La vitesse d'avance  $V_f$  (mm/min) est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour  $f$  (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent [3].



**Figure I.8 :** Vitesse d'avance.

Elle est calculée par la formule suivante :

$$V_f = f \times N \quad (I.2)$$

où  $V_f$  est la vitesse d'avance (mm/min),  $f$  est l'avance (mm) et  $N$  est la fréquence de rotation (tr/min)[3] .

### I.3.1.2 Fraisage

Le fraisage est un processus d'usinage par une machine-outil appelée fraiseuse (voir la figure I.9). L'outil appelé fraise est animé d'un mouvement de rotation, pour réaliser des pièces prismatiques ou des profils spéciaux, tels que les hélices, les cames, les roues dentées, etc. Il est nécessaire d'appliquer les mouvements suivants :

Un mouvement de rotation découpé autour de son axe à l'outil, un mouvement d'avance de la pièce qui se déplace dans un chariot suivant trois axes (nommé mouvement dans l'espace), et un mouvement de pénétration donné à la pièce (dans certaines machine-outil) [1]. Cette machine consiste en un dispositif qui permet l'obtention des pièces. Les pièces sont fixées dans un l'étau. L'outil mis en rotation par le moteur de branche, il suit une trajectoire avec la pièce [4].

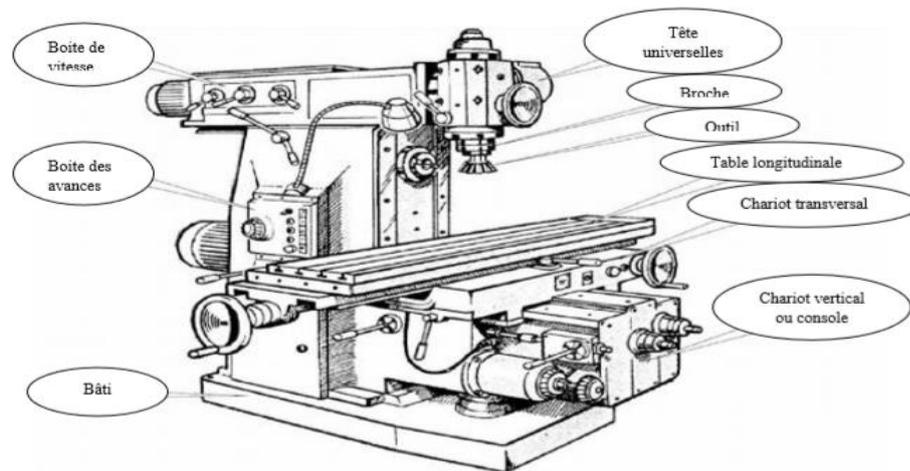


Figure I.9 : Dispositive de la fraiseuse.

### ➤ Différents types d'opérations

Surfaçage, épaulement, profilage, rainurage, et usinage de proches [1].

### ➤ Outils de coupe

Une fraise a la forme d'un solide de révolution qui porte plusieurs dents pour tranchants multiples. Elle est caractérisée par : sa taille est le nombre d'arrêtes (1T, 2T, 3T) et sa forme (cylindrique conique), sa denture (hélicoïdale à droite, hélicoïdale à gauche, à double hélice alternées, droite), son nombre de dents et sa dimension.

L'outil est muni d'une arrête coupante, il en résulte l'enlèvement de copeaux. La matière de fraise peut être : en acier rapide, carbure, etc. Les outils en carbure sont en deux types : plaquettes brassées ou amovibles [1].

### ➤ Conditions de coupe

En fraisage, les paramètres de coupe sont les suivants :

#### • Vitesse de coupe

Les paramètres sont identiques au tournage (section I.3.1.1) sauf que  $D$  est le diamètre de la fraise. Donne par la formule suivante :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (I.3)$$

où  $V_c$  est la vitesse de broche en (m/min),  $N$  est le nombre de tours de l'outil de fraisage (tr/min),  $D$  est le diamètre de la fraise en (mm)

- **La vitesse d'avance - Avance par tour - Avance par dent**

Il y a trois types d'avance, ces derniers dépendent de l'élément qu'on a besoin de calculer leur vitesse. La vitesse d'avance (mm/min), on parle également ici d'avance de la table. L'avance par tour (mm/tr), permet de calculer l'avance et de déterminer l'aptitude d'une fraise à surfacer et travailler en finition. L'avance par dent (mm/dent) est indiquée à la distance linéaire parcourue par l'outil, alors qu'une certaine dent est engagée [4].

Elle est calculée par la formule suivante :

$$V_f = N \times f = N \times z \times f_z \quad (I.4)$$

où  $V_f$  est la vitesse d'avance en (mm/min),  $f$  est l'avance (mm) ,  $N$  est la fréquence de rotation (tr/min),  $z$  est le nombre de dents et  $f_z$  est l'avance par dent en (mm/dent).

### I.3.1.3 Perçage

C'est un procédé d'usinage par enlèvement de matière qui permet de réaliser des trous (borgnes, ou débouchant) avec des outils coupant nommée foret sur des machines appelées perceuses (voir la figure I.10). La pièce usinée est fixée dans un étau, deux mouvements doivent être appliqués pour enlever la matière, un mouvement de coupe ( $V_c$ ) obtenu par rotation du foret emmanché dans la broche, et un mouvement d'avance ( $f$ ) obtenu par le déplacement du foret ou bien le déplacement de la pièce. Le perçage est un procédé d'usinage réalisable par perceuse mais également sur des machines-outils, telles que des tours, fraiseuses ou centre d'usinage. Le déplacement de l'outil est réalisé selon l'axe longitudinal de la machine si on travaille sur un tour, et selon l'axe vertical si on utilise une perceuse à colonne, le perçage est une forme de fraisage dans ce cas, l'outil appelée fraise à percer, formé de deux plaquettes se chevauchant au centre pour plonger dans la matière [1],[5].

#### ➤ Outil de coupe

Nommé foret comporte trois arrêtes dont les deux lèvres frontales provoquent la formation du copeau (voir la figure I.11). Le foret le plus couramment utilisé est en ARS, il peut être revêtu d'une couche de carbure.



Figure I.10 : Perceuse.

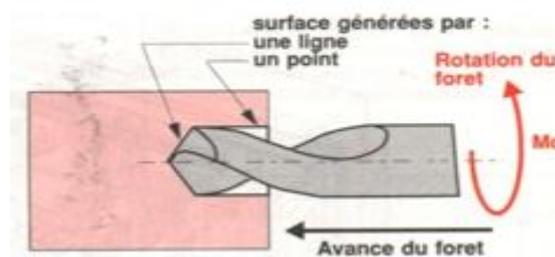


Figure I.11 : Opération de perçage.

➤ **Différents types d'opérations**

Les principales opérations de perçage sont : pointage, perçage, chan freinage, alésage, lamage, taraudage. Chaque opération ayant un outil de coupe spécial.

➤ **Condition de coupe**

En perçage, les paramètres de coupe sont les suivants :

- **Vitesse de coupe**

Les paramètres sont identiques au fraisage (section I.3.1.2).

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont liés par la formule suivante :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (I5)$$

où  $V_c$  est la vitesse de broche en (m/min),  $N$  est le nombre de tours de l'outil de fraisage (tr /min),  $D$  est le diamètre de la foret en (mm).

- **Vitesse d'avance**

Les paramètres sont liés par la formule suivante :

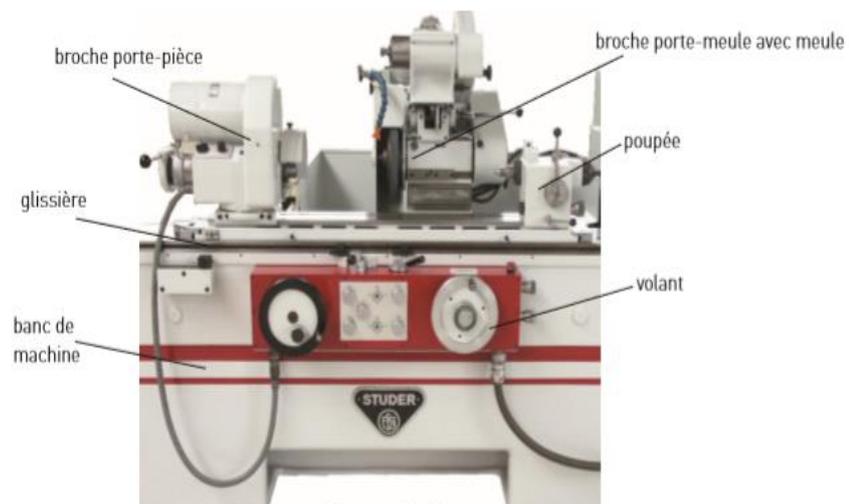
$$V_f = n \times f \quad (I.6)$$

où  $V_f$  est la vitesse d'avance en mm/min,  $f$  est l'avance par tour (mm/tr) et  $n$  est le nombre de tour de la branche (tr/min).

#### I.3.1.4 Rectification

L'usinage par abrasion est un processus de fabrication par enlèvement de la matière sous forme de copeau minuscule arraché par un grand nombre de grain abrasif. Cette technique est utilisée pour : usinage des matériaux dur, tels que les aciers traités, les céramiques les verres, etc, affutage des outils, et sans les travaux de finition après tournage et fraisage, etc, pour réaliser une bonne surface et bonne pression géométrique et dimensionnelle. Le procédé le plus utilisé est la rectification.

La rectification est un procédé d'usinage par abrasion d'une pièce cylindrique ou prismatique. Sur une machine-outil nommée rectifieuse (voir la figure I.12), l'outil consiste à enlever la matière sous forme de copeaux minuscules arrachés par les arêtes vives d'un grain d'abrasif, appelé meule. La meule et la surface de révolution sont toujours en rotation. Pour usiner les pièces sur une rectifieuse, il faut appliquer les mouvements suivants: un mouvement de coupe animé par la meule noté  $M_{cm}$  ou  $M_{cp}$  un mouvement d'avance (mouvement de va et vient de la pièce) noté  $M_f$  et le mouvement de pénétration radial  $M_a$  [1].



**Figure I.12** : Dispositive de rectifieuse.

### ➤ Condition de coupe

Dans la rectification, les paramètres de coupe sont les suivants :

- **Vitesse de coupe**

La vitesse de broche, le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe sont liés par la formule suivante :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000 \times 60} \quad (I.6)$$

où  $V_c$  est la vitesse de coupe en (m/ses),  $n$  est la fréquence de rotation ( $\text{min}^{-1}$ ),  $D$  est le diamètre de la meule en (mm) et 60 conversion de minutes en secondes.

### I.3.2 Usinage non conventionnelle (moderne)

Avec le développement de l'industrie dans les différents secteurs : l'usinage de matériaux plus en plus dur avec une précision élevée et l'usinage des pièces de forme complexes, l'usinage conventionnelle (traditionnel) était limité et ayant plusieurs difficultés comme la difficulté d'usinage des pièces fragiles et de dureté élevée, de petites dimensions, ainsi que le temps, etc. Tout cela nécessite a utilisé d'autres procédés d'usinage, sont les procédés non-conventionnelles (modern ou bien avancé). La première utilisation de ces procédés dans l'industrie date de 1950. Les procédés non conventionnels sont les techniques d'usinage autres que la coupe et la rectification pour lesquelles l'énergie est fournie différemment, par un mode autre qu'une action mécanique transmise par contact direct et effort entre un outil et la pièce. Les procédés d'usinage modernes ne nécessitent pratiquement aucun effort de coupe, mais leurs débits de matière enlevée est très faible comparativement au dédit de l'usinage traditionnel [6],[7].

Parmi ces procédés nous distinguons les suivants.

#### I.3.2.1 Ultrason

L'usinage par ultrasons est un mode de travail dans lequel l'enlèvement de matière s'effectue par l'action de vibrations, avec une haute fréquence électrique qui est convertie en vibrations mécaniques. Ces vibrations mécaniques sont transmises en graines abrasives. Cette méthode consiste à projeter des particules abrasives très dures sur la pièce à usiner, à l'aide d'une sonotrode, vibrant à fréquence ultrasonore. C'est l'outil de coupe qui excité avec une fréquence de l'ordre de 15 à 20 KHz et une

amplitude d'environ 10 à 20  $\mu\text{m}$  suivant la direction axiale, radiale ou tangentielle [7], [8],[9] .

### **I.3.2.1 Jet d'eau à haute pression**

Ce procédé consiste à projeter un jet d'eau de plusieurs centaines de bars entre la face de coupe de l'outil et le copeau. Le jet forme ainsi une interface entre le copeau et l'outil. Le découpage au jet d'eau est un procédé de fabrication qui utilise un jet d'eau hyperbare pour découper la matière (plastique, organique, métallique, composite...) [6] ,[9].

### **I.3.2.2 Jet d'eaux**

Ce procédé utilise l'énergie de haute pression d'eau pour la précision de coupe pour certains matériaux comme le kevlar, asbeste, graphie et verre époxy des matériaux tendres. La base de coupe dans ce procédé est 0.08 (mm) à 0.30 (mm) [9].

### **I.3.2.3 Jet abrasif**

Ce procédé utilise la vitesse de jet des particules abrasives pour les matériaux ductiles, brettèle, métal, alliages, céramique et les semi-conducteurs. Il est utilisé pour la finition, ébrouage, nettoyage, séparation des pièces, coupe des matériaux durs, céramique et les pierres [8] .

### **I.3.2.4 Jet d'eau abrasif (AWJM)**

Ce procédé a utilisé une haute vitesse d'eau et une combine avec des particules abrasives. Il est très utilisé pour le découpage des différents types de matériaux tels que le bronze, tungstène carbure acier composé, titan, graphite et céramiques.

Le choix des particules abrasifs est caractérisés par : leur dureté, leur dimension granulométrie, composition de la matière et leur forme [6], [8] , [9].

### **I.3.2.5 Laser**

C'est un procédé thermique sans contact entre l'outil et la pièce à usiner, utilisé pour le découpage (séparation des matériaux). L'outil est une tête de découpe, le laser est focalisé par lentille, au travers d'une buse dans laquelle arrive un gaz d'assistance coaxial au faisceau. Le faisceau laser focalisé avec un éclairement de 106 à 108  $\text{W}/\text{cm}^2$  rencontre la surface, le matériau fond très localement et s'évapore partiellement. Ensuite, le matériau est expulsé au moyen d'un débit de gaz propulsé à travers celui-ci. Le jet de gaz combiné à l'avance de la pièce (ou du faisceau) permet d'obtenir une

ligne de coupe. La découpe laser sous oxygène s'apparente à l'oxycoupage mais apporte une plus grande précision, et une coupe plus fine permettant de diminuer la zone affectée thermiquement.

Ce procédé ayant un domaine d'application très large et varié grâce à ces caractéristiques de découpage d'une large gamme des matériaux, à vitesse élevée, avec une grande souplesse d'utilisation, et de haute précision. On l'utilise pour le découpage de carton, bois, plastique, métaux, aluminium, cuivre, et aciers. Les types de laser diffèrent selon la matière à découper. On a trois types de lasers :

- Laser chimique (excimère) : provoque des réactions photochimiques avec une projection de photons sur la surface de la pièce. Cette opération dissipe une énergie suffisante pour rompre les liaisons atomiques.
- Lasers CO<sub>2</sub> : c'est le type le plus utilisé pour le découpage des aciers avec une épaisseur jusqu'à 15 à 20 (mm), avec une puissance de 500 à 200 (W), et des vitesses comprises entre 0,8 et 10 (m/min).
- Lasers ND-YAG : ils ont une longueur d'onde 10 fois plus faibles que les lasers CO<sub>2</sub> [6],[8].

#### **I.3.2.6 Electrochimique (ESM)**

C'est un procédé d'usinage moderne d'enlèvement de matière selon les lois de Faraday. C'est un moyen d'usinage très performant dans l'industrie. Ses principaux intérêts sont : l'usinage de matériaux conducteur de l'électricité quel que soient leur états de traitements [10].

L'ESM est un procédé d'usinage sans formation d'étincelles, la pièce polarisée positivement comme anode et l'outil polarisé négativement comme cathode avec une source de courant continu ou bien source d'impulsion. Le tout arrosé par une solution d'électrolyte du nitrate de sodium ou du chlore de sodium injectée sur les surfaces à usiner attirant les ions de métal (dissous) de la pièce. La charge entre la cathode et l'anode présente (inter électrode) circule à travers la solution d'électrolyte. La matière enlevée peut ensuite être éliminée par filtrage de la solution d'électrolyte sous forme d'hydroxyde métallique.

L'enlèvement de matière est exprimé par la loi de Faraday :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{F} \times \frac{A}{n} \times I \quad (\text{I.7})$$

où  $m$  est la masse de matière dissoute à l'anode,  $t$  est le temps de dissolution,  $F$  la constante de Faraday (96 500  $c$ ),  $A$  est la masse atomique de métal dissout,  $n$  est la valence et  $I$  est l'intensité du courant.

Ce procédé est utilisé pour les métaux à usiner qu'avec un enlèvement de matière sans contraintes mécaniques ou thermiques, des matériaux conducteurs d'électricité (Al, Cu, Fe, Ni, aciers) et les matériaux frittés, durs et difficiles à usiner, les formes irrégulières et complexe, perçage des trous, et l'usinage qui nécessite une précision [6].

### I.3.2.7 Electroérosion (EDM)

Appelée aussi un usinage par décharges électriques ou étincelles [7], est un procédé d'usinage à l'aide d'une électrode, pièce conductrice, fluide (isolant électrique) et l'électricité c-à-d, pour enlever la matière de la pièce à usiner en utilisant une décharge électrique. La pièce et l'électrode sont immergées dans un fluide, ce dernier nommé un diélectrique, qui est de l'eau dé-ionisée pour les machines de découpage EDM à fil, et du pétrole ou l'huile pour les machines EDM d'enfonçage.

Les fonctions de diélectrique sont abaissées la température dans la zone du travail et d'enlever les particules métalliques résiduelles et de permettre la création de l'étincelle.

Pour générer une étincelle entre deux électrodes (pièce / outil), on applique une tension supérieure à la tension de claquage gap dans l'espace électrode-pièce. Cette tension de claquage dépend d'une distance entre les deux électrodes là où la distance (pièce/outil) est la plus petite. Le champ électrique est plus intense donc le processus de décharge électrique va commencer et pouvoir de diélectrique et l'état de pollution du gap.

La construction du premier générateur pour la machine d'étincelage à utiliser 'circuit Lazarenko'. Ce dernier a été utilisé comme principe de générateur depuis longtemps (voir la figure I.13) [6].

où 1 : Pièce 2, Electrode, 3 : Bain, 4 : Résistance, 5 : Condensateur 6 : Etincelle

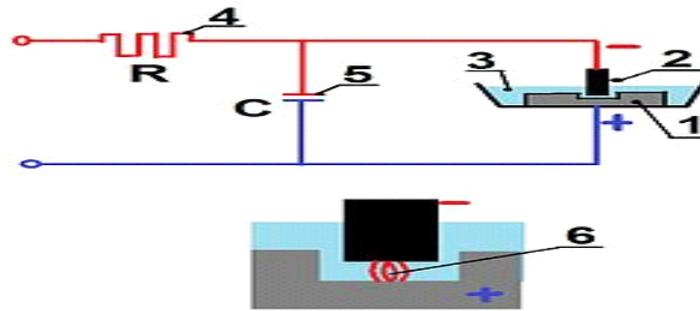


Figure I.13 : Principe de l'étincelage.

Tableau I.1: Processus d'étincelage comprend 6 phases.

Phase	Schéma
L'électrode s'approche vers la pièce. Les deux éléments sont sous tension	
Concentration du champ électrique vers le point où l'espace électrode le plus faible	
Création d'un canal ionisé entre l'électrode et la pièce	
Claquage de l'étincelle. La matière de la pièce fond localement, se consume. L'électrode subit une faible usure.	
Coupure du courant. Implosion de l'étincelle	
Evacuation des particules métalliques par un arrosage de diélectrique	

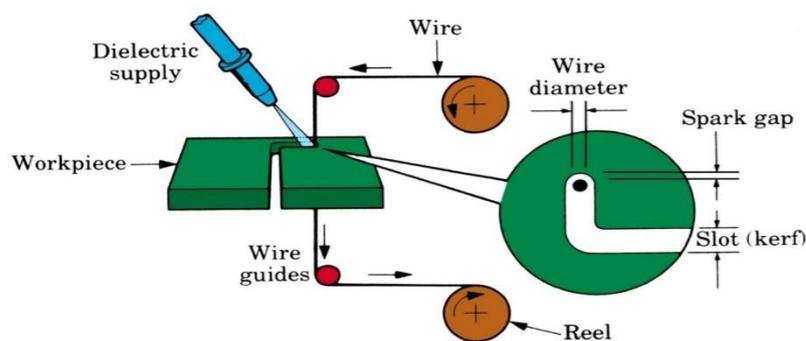
### ➤ Opération d'électroérosion

L'enfonçage (perçage, usinage d'empreintes de forme), découpage (tronçonnage avec lame, ou fil, ou ruban ou disque rotatif), rectification (intérieure, extérieure et plane).

### ➤ Types d'usinage par électroérosion

- **Électroérosion par enfonçage** : l'électrode reproduit une pièce complémentaire à la forme usiné.
- **Perçage rapide** : pour percer les matériaux durs on utilise une électrode tubulaire.
- **Électroérosion par fil** : WEDM est un procédé d'usinage moderne (non-conventionnel) utilisé pour la fabrication de formes et de géométries complexes en 3d capable d'usiner avec précision des pièces de différentes tailles ou duretés. La matière enlevée par une chaîne d'étincelles de la pièce.

Les composantes essentielles dans ce procédé sont : la pièce usiné (conductrice), l'outil qui est un fil de cuivre, tungstène, laiton, un liquide nommé diélectrique. Le mouvement d'électrode fil est contrôlé par un CNC pour avoir un 2d ou bien 3d forme avec une grande précision. WEDM convient bien avec l'usinage des complexes formes, les pièces automobiles, aéronautiques, et nucléaires [11].



**Figure I.14** : Principe de l'électroérosion par fil.

### I.3.3 Usinage à grande vitesse (UGV)

C'est un procédé d'enlèvement de matière avec une vitesse supérieure dans des conditions de coupe quatre à dix fois plus élevées que lors d'usinage conventionnel. Ces grandes vitesses (vitesses de broche et avances) engendrent des phénomènes physico-chimiques : un phénomène de coupe spécifique entre la pièce, l'outil et le copeau (la forme de copeau).

Ce phénomène de coupe est différent de l'usinage conventionnel, et un phénomène thermique. Grâce au frottement entre l'outil et l'interface de pièce une chaleur dégage. Dans ce procédé cette chaleur n'a pas le temps de se propager dans la pièce et l'outil, dont 80% s'évacue dans les copeaux et la pièce reste pratiquement à température ambiante. Dans l'usinage conventionnel l'opération de coupe prend plus de temps, la chaleur s'évacue dans les copeaux à 40% et également dans la pièce.

Quand la vitesse de coupe augmente, l'énergie spécifique (puissance électrique consommée par la machine divisée par le débit copeaux) de coupe baisse. UGV requiert une connaissance des méthodes d'usinage, outils, matières, conditions de coupe, programmation des trajectoires d'outils (FAO) sont autant de paramètres qu'il convient de prendre en compte pour faire l'investissement le mieux adapté. L'usinage à grande vitesse convient bien avec l'usinage de l'aéronautique, l'usinage dans la masse et la fabrication de moules pour la forge ou la fonderie [7],[12].

#### **I.3.4 CNC (commande numérique par ordinateur)**

C'est un procédé d'automatisation qui permet les déplacements des organes de la machine commandée. Elle est utilisée pour faire la commande des machines-outils soit conventionnel (classique) comme les tours, fraiseuses...etc. Ou les machines-outils non conventionnelles (avancé) comme WDEM (l'électroérosion par fil). Ce procédé consiste à faire un programme numérique à base de G-code obtenue à partir des axes de déplacement, des machines-outils concernées.

La CNC est divisée en deux architectures : CNC série et parallèle [13].

### **I.4 Critères de performance**

Les critères de performances sont des paramètres d'usinage (vitesse d'avance, vitesse de coupe, etc.) ou l'influence de ses paramètres sur rugosité, taux de l'enlèvement de la matière et la profondeur de passe, etc. Ces critères définissent la qualité et la performance des procédés d'usinage. Chaque procédé ayant des critères de performance spécifiques qui dépendent de leurs utilisations et leurs principes de fonctionnement. On va citer les critères qui sont hyperidés entre plusieurs procédés et les plus utilisés dans la littérature.

#### **➤ Taux d'enlèvement de matière MRR (Material Removal Rate)**

C'est la quantité de matière arrachée pendant une opération d'usinage à l'aide d'un outil de coupe [14].

➤ **Rugosité de surface ( $R_a$ )**

C'est un des critères de performance qui est classé principal à cause de sa grande influence sur la performance de coupe, et représenté dans le changement de l'état de surface de la pièce usinée et ainsi les différents défauts avec des différents ordres de grandeur, comme les stries et sillons dûs à l'avance de l'arrête coupant ou l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations à haute fréquence [3].

➤ **Vitesse de coupe ( $V_c$ )**

C'est l'un des critères de performance qui influe sur les autres critères. On a déjà mentionné en détail dans les procédés précédents.

➤ **Profondeur de passe**

C'est un critère de performance qui détermine les dimensions de la pièce brute après l'usinage. L'unité de profondeur de passe est le (mm) [1].

**Passe :** c'est la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage de l'outil.

➤ **Ouverct (OC)**

C'est un paramètre qui est produit par le chauffage de l'électrolyte, qui conduit à un flux de courant irrégulier ce qui entraîne une mauvaise précession dimensionnelle de la pièce à travailler[15].

## **I.5 Etat de l'art sur l'optimisation des processus d'usinage**

Mellal et williams en 2016 [9] : ont fait une étude pour optimiser les paramètres d'usinage d'une rectifieuse. L'objectif était de maximiser le taux d'enlèvement de matière à l'aide des algorithmes de l'intelligence artificielle : COA (cuckoo optimization algorithme), HH (hoopoe heuristic). Les résultats obtenus après la comparaison avec la littérature ont constaté que le COA convient bien avec la maximisation de taux d'enlèvement de matière

Kilickap et al en 2011 [9]: ont appliqué l'algorithme génétique (GA) pour l'optimisation de trois paramètres d'usinage de perçage : vitesse de coupe, vitesse d'avance, et l'environnement de coupe. Le but était de minimiser la rugosité. Par contre Rao et kalyanker (2012) ont utilisé l'enseignement de l'optimisation basé sur

l'apprentissage. Une étude de comparaison entre la valeur obtenue a été faite par Mellal et Williams, dont les résultats obtenus que le GA et plus performante en termes de la rugosité que les COA et HH.

Singh et Shukia [16] : Ont fait une évaluation de deux performances MRR (le de Taux d'enlèvement de matière) et OC (overcut) 'dans l'électrochimique. Cette évaluation à l'aide de l'algorithme BHA (Black Holes Algorithme). Dans le même procédé, Bhattacharya et Sorkhel ont optimisé ces performances en utilisant GJA (Gausse-Jordon Algorithm). Par contre Mukherjee et Chakroborty [16] ont résolu ce problème par trois algorithmes GA (génétique algorithme), ABC (artificial bee colony) et BOB (biogeography based optimization). D'après les résultats obtenus, on constate que l'algorithme BHA est meilleur par rapport aux autres algorithmes.

Jurkovic et al [17]: ont effectué des recherches pour étudier les paramètres de jet d'eau abrasif (AWJM) qui influencent sur l'état de surface  $R_a$ , tel que les effets du débit d'abrasive, la distance de séparation, vitesse de déplacement, l'épaisseur et le type d'abrasive (acier, Al, ..), à l'aide de la méthode de Taguchi. Les résultats ont confirmé que la distance de séparation (SOD), la pression d'eau et l'épaisseur ce n'a pas d'effet significatif sur la rugosité.

Kumar et Al [11] : ont examiné quatre paramètres de l'électroérosion par fil (Alc63/sicp composite) qui définissent sa performance, afin de déterminer leur influence sur le taux d'enlèvement de matière. Ces paramètres sont : le temps d'arrêt (TOFF), l'impulsion de temps (TON), la tension de gap et la vitesse du fil. Les résultats ont augmenté le volume de Sic est associé à une diminution de taux d'enlèvement de matière. Dans le même problème et le même but (optimiser le MRR), Kozak et Al ont donné une étude expérimentale sur les matériaux qui ont peu de conductivité. Leurs résultats ont montré que la résistance électrique entre la matière usinée et l'électrode changent avec la modification de la position de pince et ces changements produisent un changement dans le MRR.

Chan et Tsai [18]: ont optimisé les paramètres de performance du tournage pour minimiser le coût de production à l'aide de SA (Simulted Annealing) et PS (Pattern Search). Onwubolu et Kumalo ont fait une étude sur le même problème et le même but. Ils ont utilisé une méthode différente afin d'obtenir une solution. C'est l'algorithme génétique (GA). Les deux méthodes ont trouvé le même résultat : la force de coupe est

une constante de ( $5 \text{ kg m s}^{-2}$ ) donc elle est infaisable, sauf la première étude qui à optimiser les performances du processus.

**Tableau I.2:** Présente un résumé de l'état de l'art.

Référence	Processus	Objectifs	Techniques
[9]	Rectifieuse	Maximiser MRR	COA, HH
[9]	Perçage	Minimiser $R_a$	GA
[16]	Electrochimique	Maximiser MRR et minimiser OC	BHA
[17]	AWJM	Maximiser MRR	Taghuchi
[11]	Electroérosion par fil	Maximiser MRR	Etude expérimentale
[18]	Tour	Minimisé le cout de production	SA et PA. GA

## I.6 Conclusion

D'après la présentation des processus d'usinage conventionnels et non conventionnels, on a découvert le degré de leur importance dans l'industrie. Pour cela, il est nécessaire d'améliorer ces processus en les optimisent afin d'aboutir à de meilleures performances.

# **Chapitre II**

Etat de l'art sur l'usinage

## II.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, on a vu l'importance des processus d'usinage dans la production des différentes pièces utilisées dans divers domaines. Ces processus possèdent des problèmes au niveau de leur performance. Dans ce chapitre, on va présenter les méthodes de résolution qui sont utilisées dans la littérature pour optimiser ces problèmes et un état de l'art sur l'optimisation.

## II.2 Définition

L'optimisation est une méthode qui est explorée pour maximiser ou minimiser un ensemble de solutions d'un problème afin trouver la meilleure, c'est-à-dire, permettre plusieurs solutions du même problème. Le modèle mathématique doit sélectionner la meilleure solution, appelée solution optimale. Le problème d'optimisation est défini par la formule mathématique suivante [19] :

$$\text{Maximiser ou Minimiser } f_i(x), (i=1, 2 \dots I) \quad (\text{II.1})$$

Sous contraintes

$$h_i(x) = 0, (k=1, \dots K) \quad (\text{II.2})$$

$$g_l(x) \leq 0 \text{ ou } \geq 0, (l=1, 2 \dots L) \quad (\text{II.3})$$

$$x^L \leq x \leq x^U \quad (\text{II.4})$$

où  $f_i(x)$ ,  $h_j(x)$  et  $g_l(x)$  : sont les fonctions du vecteur de conception :

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (\text{II.5})$$

Les composantes  $x_i$  de  $x$  sont appelées variables de conception ou de décision, qui peuvent être réelles, entières ou binaires.  $f_i(x)$  est appelé fonction objectif,  $h_j(x)$  et  $g_l(x)$  sont les fonctions de contraintes d'inégalité et d'égalité avec  $x^L$  et  $x^U$  bornes géométrique[19].

Le problème de l'optimisation peut être classé selon plusieurs critères :

1. A base de l'existence des contraintes : qui peut être sans ou avec contraintes. Ces dernières peuvent être des bornes géométriques, égalités ou inégalités[20] .
2. Optimisation linéaire et non linéaire :

- ✓ Optimisation linéaire : La fonction objectif ou les contraintes (ou les deux) consiste une partie linéaire.
  - ✓ Optimisation non linéaire : la fonction objectif ou les contraintes (ou les deux) consiste une partie non linéaire [21].
3. Optimisation convexe et non convexe [22] : selon l'espace de recherche de solution

## II.3 Types d'optimisation

### II.3.1 Optimisation mono-objective

L'optimisation mono-objectif se compose d'une seule fonction pour résoudre un problème d'optimisation. Ces problèmes peuvent être mono ou multi variables qui sont définis comme suit [21] :

$$\min \text{ ou } \max f(x) \quad (\text{II.6})$$

### II.3.2 Optimisation multi-objectif

L'optimisation multi-objectif (multicritère) consiste à optimiser simultanément plusieurs fonctions objectif qui sont définies comme suit [23] :

$$F(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \quad (\text{II.7})$$

Le problème multi-objectif peut être traité par deux méthodes :

#### II.3.2.1 Somme pondérée

La méthode de la somme pondérée est la méthode la plus simple et connue dans le domaine de prise de décision multicritère. Il consiste à pondérer les critères du problème de décision multi-objectif avec des poids (ils sont des nombres réels), qui représentent l'intérêt de chaque critère dans le processus de décision une fois l'importance des différents critères quantifiée, la méthode choisit l'action qui minimise ou maximise la somme pondérée des critères. La méthode de somme pondérée est définie par [24], [25].

$$z = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x) \quad (\text{II.8})$$

où  $w_i$  sont les poids des objectifs.

### II.3.2.2 Pareto optimal

Pareto est une méthode qui sert à trouver les solutions réalisables dans le cas d'un problème d'optimisation multicritère. Afin d'appliquer cette méthode, il faut utiliser des relations telles que la relation de dominance qui veut dire qu'il n'existe qu'une seule solution optimale mais une solution pour chaque fonction objectif. L'individu non dominé lorsque aucun individu ne le domine, l'optimalité au sens de Pareto si  $\vec{x}$  est dominé par  $\vec{x}'$  [26].

## II.4 Maîtrise des contraintes

### II.4.1 Méthodes basées sur le concept de pénalité

La méthode de pénalité est la plus utilisée dans la pratique en raison de sa simplicité d'utilisation et sa efficacité pratique. Elle est utilisée pour éliminer les contraintes liées au problème d'optimisation, tout cela en associant une pénalité à la fonction objectif qui est sous une violation de contrainte, ce qui rend la fonction comme suivante :

$$\tilde{f}(x) = f(x) \pm p(x) \quad (\text{II.9})$$

où  $p(x)$  est la fonction de pénalité représentant le degré de la violation de contrainte.

### II.4.2 Recherche des solutions faisables

L'objectif de cette méthode est de ramener les échantillons infaisables dans le domaine réalisable [23].

### II.4.3 Méthodes hybrides

C'est des méthodes de la maîtrise des contraintes qui consistent à séparer les fonctions objectif des contraintes. Ces méthodes combinent l'algorithme génétique avec d'autres techniques de l'optimisation numérique et de l'intelligence artificielle.

Il existe des approches qui traitent les contraintes avec des méthodes d'optimisation déterminées pour des fonctions objectif qui ont des fonctions de contraintes dérivables. Par contre, il existe d'autres approches qui utilisent les techniques multi-objectif (somme pondérée et le modèle de co-evolution) pour résoudre ce problème [27].

## II.5 Types de résolution

La résolution des problèmes d'optimisation, est possible en appliquant de deux méthodes :

### **II.5.1 Méthodes conventionnelles**

C'est des méthodes exactes utilise des techniques mathématiques pour résoudre des problèmes d'optimisation qui permettront d'obtenir une valeur précise de la solution optimale [27].

### **II.5.2 Méthodes non conventionnelles**

#### **II.5.2.1 Heuristiques**

Pour un problème donné, l'utilisation des méthodes exactes n'est pas toujours possible en raison d'un certain nombre de contraintes, telles que le temps de calcul souvent long, la complexité des problèmes, ainsi que l'impossibilité dans certains cas. Pour maîtriser ces contraintes, les méthodes heuristiques sont utilisées.

Un algorithme heuristique est un algorithme qui donne rapidement une solution approchée et réalisable mais pas toujours optimale à un problème difficile d'optimisation. Cette méthode approximative est le contraire d'un algorithme exact qui donne une solution optimale pour un problème donné [28].

#### **II.5.2.2 Métaheuristiques**

Les métaheuristiques sont de nouvelles familles des algorithmes d'optimisation qui peuvent résoudre de grands problèmes d'optimisation où les méthodes classiques sont inefficaces.

Les métaheuristiques sont capables d'optimiser un problème complexe. Elles explorent l'espace de recherche efficacement pour donner une solution optimale [28]. Les algorithmes de l'intelligence artificielle sont inspirés de la nature, tel que la physique, la biologie de l'évolution (les algorithmes génétiques) ou l'éthologie (optimisation par essaim particulaire).

## **II.6 Algorithms bio-inspirés**

### **II.6.1 Algorithme de la huppe heuristique (HH)**

C'est un algorithme heuristique de l'intelligence artificielle, qui a été développé en 2012 par El-Dosoukey et Al [9]. Cet algorithme est inspiré du mode de vie des familles huppiniennes. A l'aide d'un sondage du sol, la huppe creuse dans les arbres ou les roches pour poser ses œufs dans les différentes régions qui possèdent les meilleures conditions nécessaires, telles que le bon lieu et la disponibilité de la nourriture (tous ce que convient avec leur mode de vie).

**Algorithme II.1** : Pseudo code général de la huppe heuristique

---

Déclaration des paramètres :  $N_{pop}$ ,  $N_i$ ,

Généré des solutions aléatoires

**Tant que**  $N \leq N_H$  **faire**

Effectuer le sondage de sol avec une valeur fixe de rayon de creusage ;

Effectuer un vol de lévy ;

Evaluer les valeurs de fitness ;

Evaluer les valeurs de remise en forme ;

Classer les valeurs de fitness ;

Identifie la meilleure valeur de fitness ;

**Fin tant que**

Afficher des résultats ;

---

**II.6.2 Algorithme de pollinisation des fleurs (FPA)**

L'algorithme de pollinisation des fleurs (FPA) a été développé par Xin-She Yang en 2012 [29], il est inspiré du processus des pollinisation des fleurs. La pollinisation déplace le grain de pollen de la partie mâle de la fleur jusqu'à l'ovule de la partie femelle. La pollinisation prend deux types, selon les mécanismes du transport : biotique et abiotique. Dans la pollinisation biotique, le pollen est transféré par des médiateurs comme les insectes, les chauves-souris, les oiseaux, et les abeilles, etc. Par contre, la pollinisation abiotique ne nécessite aucun animal pollinisateur (la pollinisation se fait par le vent et l'eau).

Il existe deux types de pollinisation : La pollinisation spontanée lorsque le pollen d'une fleur féconde la même fleur ou une fleur de la même région. Elle se produit si les gamètes masculins et féminins se trouvent dans la même fleur. La pollinisation croisée ou en travers se produit quand le pollen se déplace pour polliniser une autre fleur d'une autre région (abiotiques ou biotiques).

- Pollinisation globale c'est biotique et croisé.
- Pollinisation locale c'est l'autopollinisation abiotique.

**Algorithme II.2** : Pseudo code général du FPA.

---

Objectif min or max  $f(x)$ ,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$

Initialiser la population de n fleur/pollen gamètes avec des solutions aléatoires ;

Trouver la meilleure solution  $g^*$  dans la population initiale ;

Défini une probabilité de changement  $p \in [0,1]$  ;

t=0

**Tan que** (t<Ma \_Generation) **Faire**

**pour** i =1:n (pour toute n fleur dans la population)

**si**  $rand < p$  alors,

Dessiner un vecteur pas à pas (d-dimensionnel)"L "qui obéit à une distribution de Lévy ;

Pollinisation globale via  $x_i^{t+1} = x_i^t + L(g_* - x_i^t)$  ;

**Si No**

Tirer à partir d'une distribution uniforme en [0,1].

Choisir aléatoirement  $j$  et  $k$  parmi toutes les solutions ;

Effectuer la pollinisation locale via  $x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon(x_j^t - x_k^t)$  ;

**Fin Si**

Évaluer de nouvelles solutions ;

**Si** les nouvelles solutions sont meilleures, les mettre à jour dans la population ;

**Fin pour**

Trouver la meilleure solution actuelle  $g^*$  ;

t =t+1

**Fin Tant que**

---

### II.6.3 Cuckoo optimization algorithm (COA)

En 2011, Ramin Rajabioun a développé le COA [19]. Ce dernier a été inspiré du comportement de l'oiseau 'coucou' qui pond ses œufs dans des nids étrangers, appelés nids hôtes. Cet oiseau essaie d'imiter la couleur et le modèle d'œufs des oiseaux hôtes. Certains des œufs du coucou sont reconnus et sont jetés hors du nid hôte et les œufs qui ne sont pas jetés et cassés deviennent des poussins. Certains poussins sont morts à cause du manque de nourriture ou ils ont été reconnus par les oiseaux hôtes qui vont les expulsés hors du nid. Les poussins qui restent dans le nid deviennent des poussins matures qui commencent la saison de reproduction en migrant vers le meilleur habitat.

**Algorithme II.3** : Pseudo code générale du COA [19].

---

**Début**

Initialisation ;

**Pour** Itéra= Itér<sub>coucou</sub> **faire**

Calculez le ELR pour chaque coucou;

Détruire des œufs;

Évaluer l'habitat ;

Limiter le nombre de coucous;

Appliquez le regroupement et la migration de K-means,

**Fin pour** ;

Répétez les étapes jusqu'à ce que la condition de terminaison soit atteinte.

---

### II.6.4 Algorithme d'essaim particulaire (PSO)

L'optimisation par essaim de particule (PSO) a été inventée par James Kennedy & Russell C. Eberhart en 1995[19]. Elle est inspirée du mode de vie des animaux qui vivent en groupe comme des poissons et les oiseaux. L'essaim particulaire est une population d'agents nommée particule. Chaque particule est caractérisée par une position et une vitesse. Elle se déplace en cherchant un endroit optimal qui contient de meilleures conditions (position). Elle est capable de mémoriser la meilleure position trouvée dans leur parcours et la meilleure position atteinte par les particules 'voisines' (les autres

particules qui ont les meilleurs critères). La mise à jour de la position des particules est influencée par sa position précédente et par son déplacement actuel. La communication et l'échange d'information à l'intérieur de l'essaim définissent le vecteur de déplacement, où les particules sont influencées par le succès des autres particule voisine [30].

**Algorithme II.3** : Pseudo code générale du PSO [19].

---

Initialisation aléatoire de tout l'essaim ;  
 Répéter  
     Évaluer  $f(x_i)$  ;  
**Pour** chaque particule  $i$  *faire*  
     Mettre à jour les vitesses ;  
     Déplacez vers la nouvelle position ;  
     **Si**  $f(x_i) < f(p \text{ meilleur } i)$  **alors**  $p \text{ meilleur}_i = x_i$  ;  
     **Si**  $f(x_i) < f(g \text{ meilleur})$  **alors**  $g \text{ meilleur} = x_i$  ;  
     Mise à jour  $(x_i, v_i)$  ;  
**Fin Pour**  
**Mise à jour** Jusqu'au critère d'arrêt ;

---

Il existe de nombreux d'algorithmes bio-inspiré de l'intelligence artificielle, on ne peut pas cités tout. Dans ce travail on résume quelques algorithmes ainsi que leurs inspirations dans le tableau suivant :

**Tableau II.1** : Quelques algorithmes de l'intelligence artificielle.

Algorithme	Référence	Inventeur	Inspiration
ABC	[31]	D. Tpham et al	Comportement des abeilles.
ACO	[32]	M. Dorigo et en 1992	Inspirer de la société des Fourmis.
TLBO	[33]	Rao et al	Processus d'enseignement et d'apprentissage.
DE	[34]	Rainer Storn et Kenneth Price en 1995	Croisement des chromosomes aléatoire.
GWO	[35]	Mirjalili et al en 2014	Stratégie de chasse de loups gris.
SFLA	[36]	Eusuff et Lansey en 2015.	De la saute des grenouilles.

## **II.7 Conclusion**

D'après la présentation des méthodes de la résolution utilisées dans l'optimisation des problèmes dans l'usinage par enlèvement de matière (conventionnelle et non conventionnelle), on a constaté que les algorithmes les plus convenables pour résoudre ces problèmes sont les algorithmes bio-inspirés.

# **Chapitre III**

## Optimisation des processus d'usinage

### III.1 Introduction

Ce chapitre présente la partie d'application de notre travail. On utilisera deux algorithmes bio-inspirés, appelés aussi méthodes de l'intelligence artificielle ou méta-heuristiques : PSO et FPA, mentionnés dans le chapitre II. L'objectif est d'optimiser quatre procédés d'usinage par enlèvement de matière : deux procédés conventionnels (rectifieuse et perçage) et deux procédés non conventionnels (jet d'eau à haute pression et électroérosion par fil).

### III.2 Description des problèmes

#### III.2.1 Optimisation du perçage (application 1)

Le but de l'optimisation de ce processus est de minimiser la rugosité de la surface  $R_a$  [9]. Les paramètres d'usinage utilisés dans cette application sont mentionnés dans le tableau III.1.

**Tableau III.1** : Paramètres d'usinage de l'application 1.

Paramètres	Description	Unité	Nature
$A$	Vitesse coupe	m/min	Réelle
$B$	Vitesse d'avance	m/tr	Réelle
$C$	Environnement de coupe	-	Réelle

Fonction objectif :

$$\text{Minimiser } R_a (\mu m) = 4,115 - 0,82767A + 8,225B + 0,135C + 0,0538A^2 \quad (\text{III.1})$$

Limites des paramètres :

$$5 (\text{m/min}) \leq A \leq 15 (\text{m/min}) \quad (\text{III.2})$$

$$0.1 (\text{mm/tr}) \leq B \leq 0.3 (\text{mm/tr}) \quad (\text{III.3})$$

$$1 \leq C \leq 3 \quad (\text{III.4})$$

#### III.2.2 Optimisation de rectifieuse (application 2)

L'objectif de cette application est de maximiser le taux d'enlèvement de matière MRR ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ) sur une rectifieuse de céramique [9]. Les paramètres d'usinage utilisés dans cette application sont mentionnés dans le tableau III.2

**Tableau III.2 :** Paramètres d'usinage de l'application 2.

Paramètres	Description	Unité	Nature
$f_r$	Vitesse d'avance	m/min	Réelle
$d_c$	Profondeur coupe	$\mu\text{m}$	Réelle
$M$	Taille du grain	-	Réelle

Fonction objectif :

$$\text{Maximiser MMR (mm}^3/\text{s)} = (f_r) \times (d_c) \quad (\text{III.5})$$

Contraintes et limites :

$$0.145(d_c)^{0.1939} (f_r)^{0.7071} (M)^{-0.2343} \leq SR_{\max} \quad (\text{III.6})$$

$SR_{\max}$  est les valeurs maximales admissibles de rugosité de la surface.

où  $SR_{\max} = 0,3, 0,35$  ou  $0,4$  pour les expériences respectives.

$$29,67(d_c)^{0.4167} (f_r)^{-0.8333} \leq ND_{\max} \quad (\text{III.7})$$

$ND_{\max}$  est le nombre maximal admissibles de défauts mesures.

où  $ND_{\max} = 11$  pour les expériences respectives.

$$8.6 \text{ (m/min)} \leq f_r \leq 13.4 \text{ (m/min)} \quad (\text{III.8})$$

$$5 \text{ (}\mu\text{m)} \leq d_c \leq 30 \text{ (}\mu\text{m)} \quad (\text{III.9})$$

$$120 \leq M \leq 500 \quad (\text{III.10})$$

### III.2.3 Optimisation de l'usinage à jet d'eau en haute pression (application 3)

Cette application présente un problème d'optimisation d'usinage à jet d'eau en haute pression. L'objectif est de maximiser le taux d'enlèvement de matière MRR ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ) [9]. Les paramètres d'usinage utilisés dans cette application sont mentionnés dans le tableau III.3

**Tableau III.3 :** Paramètres d'usinage de l'application 3.

Paramètres	Description	Unité	Nature
$P_w$	Pression du jet d'eau à la sortie du bec	MPa	Réelle
$D_{wn}$	Diamètre de la buse à jet d'eau	mm	Réelle
$f_n$	Vitesse de rotation de la buse	mm/s	Réelle
$X$	Distance de sécurité	mm	Réelle

Fonction objectif

$$\text{Maximiser MRR (mm}^3/\text{s)} = \frac{0.297}{C_{fw}} d_{wn}^{1.5} f_n x^{0.5} \psi^{(2/3)} \left[ 1 - \frac{\sigma_{yw}}{2P_w \phi} \right] \left[ 1 - e^{-2256.76 \frac{C_{fw} P_w \phi}{\eta_w f_n}} \right] \quad (\text{III.11})$$

$$\text{où } \phi = \frac{2}{k} [0.5 - 0.57\psi + 0.2\psi^2], \psi = \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{P_w} \frac{\sigma_{cw} k}{2}} \right), k = \frac{x}{x_i}$$

Les données de ce procédé sont mentionnées dans le tableau III.4.

**Tableau III.4 :** Données du procédé de l'application 3.

Donnée	Description	Unité	Valeur
$P_{\max}$	Consommation d'énergie admissible	kw	50
$C_{fw}$	Coefficient de frottement pour le matériau de travail	-	0.005
$\eta_w$	Coefficient d'amortissement du matériau de travail	kg mm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	2357.3
$\sigma_{cw}$	Limite d'élasticité en compression du matériau de travail.	MPa	26.2
$\sigma_{yw}$	Limite d'élasticité en traction du matériau de travail	MPa	3.9
$x_i$	Longueur de la région initiale du jet d'eau	mm	20

Contraintes et limites :

La maximisation du MRR est soumise à la contrainte de consommation d'énergie :

$$1 - \frac{0.777 \times 10^{-1.5} d_{wn}^2 P_w^{1.5}}{P_{\max}} \geq 0 \quad (\text{III.12})$$

$$1(\text{MPa}) \leq P_w \leq 400(\text{MPa}) \quad (\text{III.13})$$

$$0.05(\text{mm}) \leq d_{wn} \leq 0.5(\text{mm}) \quad (\text{III.14})$$

$$1(\text{mm/s}) \leq f_n \leq 300(\text{mm/s}) \quad (\text{III.15})$$

$$2.5(\text{mm}) \leq x \leq 50(\text{mm}) \quad (\text{III.16})$$

### III.2.4 Optimisation de l'électroérosion par fil (application 4)

Le problème d'optimisation traité dans cette section est l'optimisation de l'électroérosion par fil (application 4)[37] C'est un problème multi-objectif qui est été résolu avec la méthode de Pareto dans la littérature [38] . Dans ce présent travail, nous

allons résoudre ce problème à l'aide de la méthode de la somme pondérée qui consiste à convertir un problème multi-objectif en un problème mono-objectif.

L'objectif de l'optimisation de ce procédé à l'aide de la méthode de la somme pondérée et de minimiser la fonction objectif globale ( $z$ ), en minimisant la rugosité de la surface ( $R_a$ ) tout en maximisant la vitesse de coupe ( $CV$ ), sur la machine d'électroérosion par fil. Les paramètres d'usinage utilisés sont mentionnés dans le tableau III.5.

**Tableau III.5 :** Paramètres d'usinage de l'application 4.

Paramètres	Description	Unité	Nature
$IAL$	Courant d'impulsion	Amp	Réelle
$T_B$	Temps de pulsation d'arrêt	$\mu s$	Réelle
$T_A$	Durée des impulsions	$\mu s$	Réelle
$A_j$	Servo référence tension moyenne	v	Réelle
$S$	Variation de vitesse du servo	mm/min	Réelle
$W_s$	Vitesse de fil	m/min	Réelle
$W_b$	Tension mécanique de fil	$Kg\ m\ s^{-2}$	Réelle
$Inj$	Pression d'injection	bar	Réelle

Fonctions objectif :

$$\begin{aligned} \text{Maximiser } CV(\text{mm/min}) = & 1.662 + 0.002375IAL - 0.0639T_B + 0.628 T_A \\ & - 0.01441 A_j + 0.008313 S - 0.001792 W_s \\ & - 0.673 W_b - 0.0294 Inj. \end{aligned} \quad (\text{III.17})$$

$$\begin{aligned} \text{Minimiser } R_a(\mu\text{m}) = & 2.017 - 0.01236IAL + 0.0075 T_B + 1.792 T_A \\ & - 0.006056 A_j + 0.01 S - 0.009583 W_s \\ & + 0.258 W_b - 0.0683 Inj \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

En utilisant la méthode de la somme pondérée, les objectifs décrites dans (III.17) et (III.18) s'écrivent de cette façon :

$$w_1 = w_2 = 0.5$$

$$z = -w_1CV + w_2R_a \quad (\text{III.19})$$

Limites des paramètres d'usinage :

$$8(\text{Amp}) \leq IAL \leq 16(\text{Amp}) \quad (\text{III.20})$$

$$4(\mu\text{s}) \leq T_B \leq 8(\mu\text{s}) \quad (\text{III.21})$$

$$0.6(\mu\text{s}) \leq T_A \leq 1.2(\mu\text{s}) \quad (\text{III.22})$$

$$30(\text{v}) \leq A_j \leq 60(\text{v}) \quad (\text{III.23})$$

$$4(\text{mm/min}) \leq S \leq 12(\text{mm/min}) \quad (\text{III.24})$$

$$4(\text{mm/min}) \leq W_S \leq 8(\text{mm/min}) \quad (\text{III.25})$$

$$0.8(\text{kg m s}^{-2}) \leq W_b \leq 1(\text{kg m s}^{-2}) \quad (\text{III.26})$$

$$2(\text{bar}) \leq Inj \leq 4(\text{bar}) \quad (\text{III.27})$$

### III.3 Solutions proposées

#### III.3.1 Particule Swarm optimisation (PSO)

Dans le chapitre II on a décrit, en détail les fondements de l'algorithme PSO. L'algorithme III.1 et la figure III.1 présentent le pseudo code et organigramme du PSO implémenté.

##### Algorithme III.1 : Pseudo code du PSO implémente

---

Déclaration des paramètres :  $N_{pop}, N_{it}$ .

Généré des solutions aléatoires ;

**Tant que**  $N \leq N_{it}$  **faire**

Evaluation de la fonction objectif : III.1, III.5, III.11, ou III.19 ;

Maîtrise des contraintes à l'aide de la fonction de pénalité ;

Position de la particule ( $i$ ) ;

Vitesse de la particule ( $i$ ) ;

Mise à jour des positions et des vitesses ;

Position et la vitesse de la meilleure particule ;

**Fin Tant que**

Affichage des résultats.

---

#### III.3.2 Flower Pollination Algorithm (FPA)

L'algorithme III.2 et la figure III.2 présente le pseudo code et l'organigramme du FPA implémenté.

**Algorithme III.2** : Pseudo code du FPA implémenté.

---

Déclaration des paramètres :  $N_{pop}$ ,  $N_{It}$ ,  $P$  ;

Généré des solutions aléatoires

**Tant que**  $N \leq N_{It}$  **Faire**

Evaluer la fonction objectif : III.1, III.5, III.11, ou III.19 ;

Maîtrise des contraintes ;

Pour  $i=1$  jusqu'à  $N_{pop}$  faire

**si**  $rand \leq P$  faire

        Globale pollination ;

    si non

        Locale pollination ;

    Fin Si

        Si  $globale \leq locale$  faire

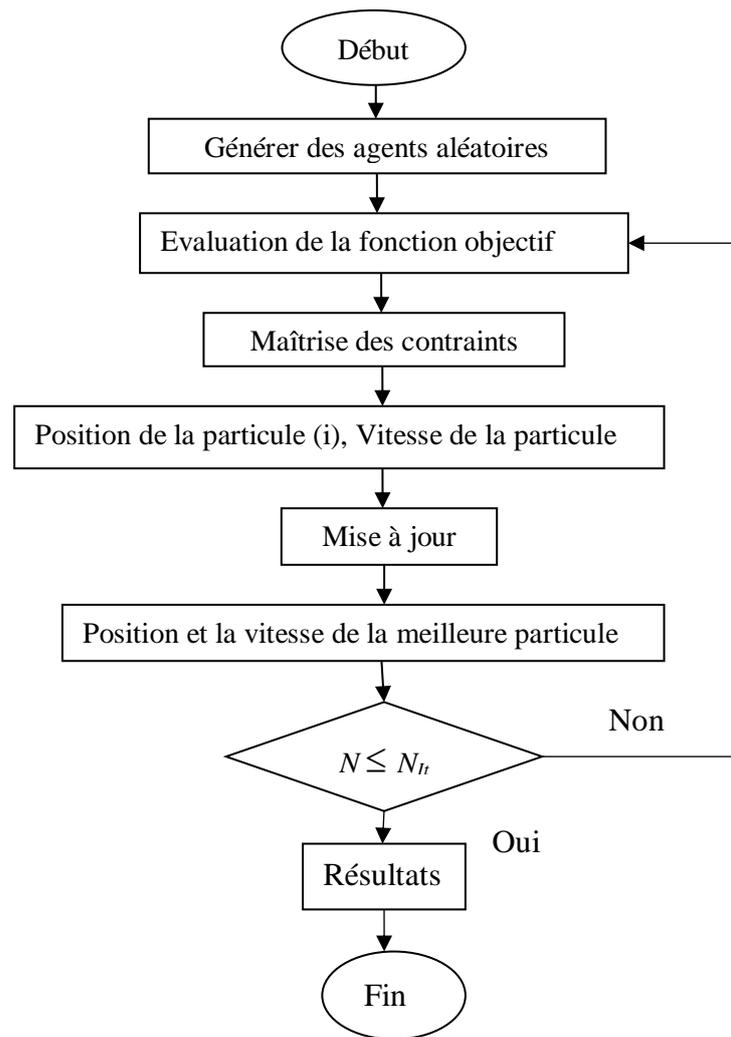
            Globale = locale

    Fin si

**Fin tant que**

Affichages des résultats.

---



**Figure III.1 :** Organigramme du PSO implémenté.

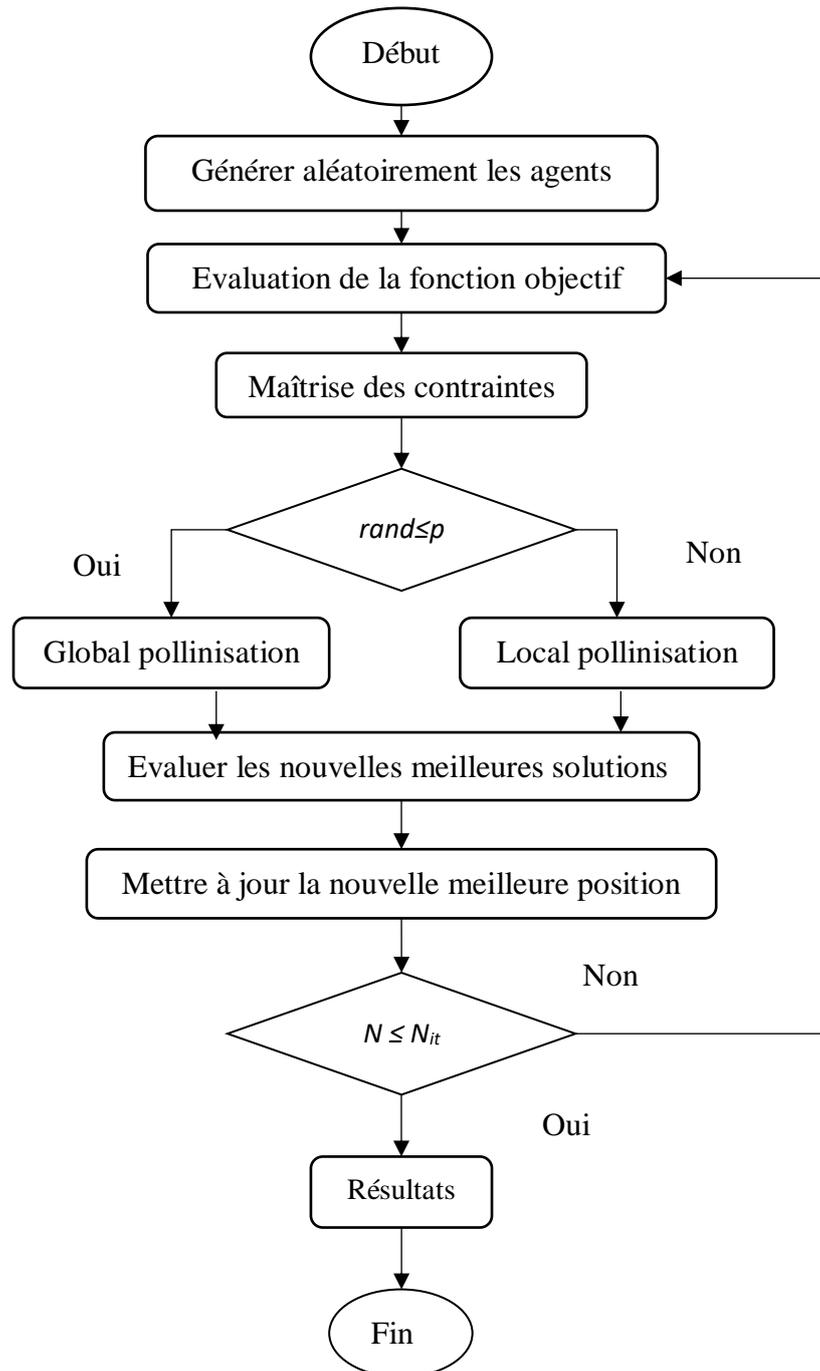


Figure III.2 : Organigramme du FPA implémenté.

### III.4 Résultats et commentaires

Les algorithmes III.1 et III.2 ont été programmé à l'aide de Matlab 2017 et exécutés sur un PC Intel ® Core™ (i7, 2.10, GHz), 4 Go de Ram, Windows 10, 64 bits.

Il est à noter que les 2 algorithmes ont été exécutés 10 fois chacun indépendamment dans toutes les applications, sauf dans la première (5 exécutions) car l'application est simple. Les meilleures valeurs sont en gras.

#### III.4.1 Application 1

Les tableaux III.6-9 représentent tous les résultats obtenus en appliquant PSO puis FPA, sachant que III.6-7 représentent les résultats de PSO et III.8-9 les résultats de FPA avec une taille de population  $N_{pop}=10$  et un nombre d'itérations  $I_t=20$ .

**Tableau III.6** : Résultats de PSO (application 1).

N°	$R_a$ (µm)	A (m/min) ; B (mm/tr) ; c	CPU (s)	NFE
1	<b>1,889242</b>	7,698983 ; 0,1 ; 1	0.712371	100
2	1,889275	7,6664 ; 0,1 ; 1	0.096607	180
3	1,891117	7,5053 ; 0,1 ; 1	0.121814	200
4	1,889539	7,682664 ; 0,1 ; 1	0.111151	180
5	1,935865	7,7845 ; 0,1 ; 1,3420	0.178925	200

Le tableau III.6 présente la meilleure valeur de  $R_a$  obtenue par PSO 1,889242 (µm) avec une consommation de temps 0.712371 s, et un nombre de fonctions d'évaluation NFE égale à 100. La valeur de l'écart type est  $\sigma = 0,0184416$ . La figure III.3 présente la convergence de la meilleure valeur de PSO. La valeur  $R_a$  se réduit jusqu'à 1,889242 (µm), puis commence à se stabiliser.

**Tableau III.7** : Mauvaise, meilleure, et moyenne de la fonction objectif et l'écart type (PSO, application 1).

$R_a$ (µm)			$\sigma$
Mauvaise	Moyenne	Meilleure	
1,935865	1,899007	1,889242	0,0184416

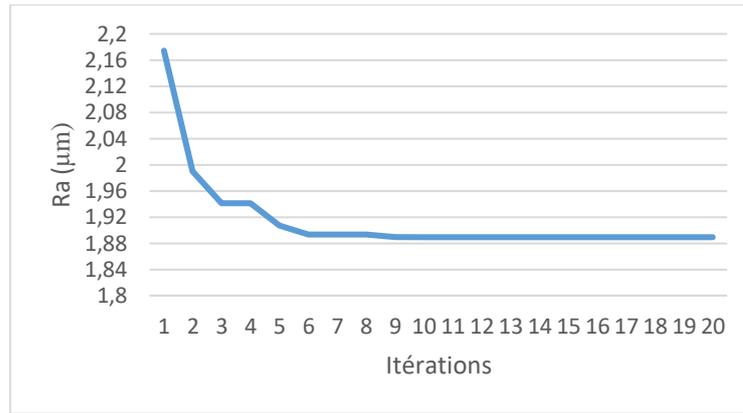


Figure III.3 : Convergence de la meilleure valeur (PSO, application 1).

Tableau III.8 : Résultats de FPA (application 1).

N°	$R_a$ (μm)	A (m /min) ; B (mm /tr) ; c	CPU (s)	NFE
1	1,990623	8,7570 ; 0,1 ; 1,2990	5,2433	180
2	<b>1,889778</b>	7,6979 ; 0,1 ; 1,0040	3,6220	10
3	1,895951	7,3925 ; 0,1 ; 1,0139	3,3417	130
4	1,922299	6,9082 ; 0,1 ; 1	2,6290	130
5	1,996666	6,95474 ; 0,1 ; 1,5791	3,5777	30

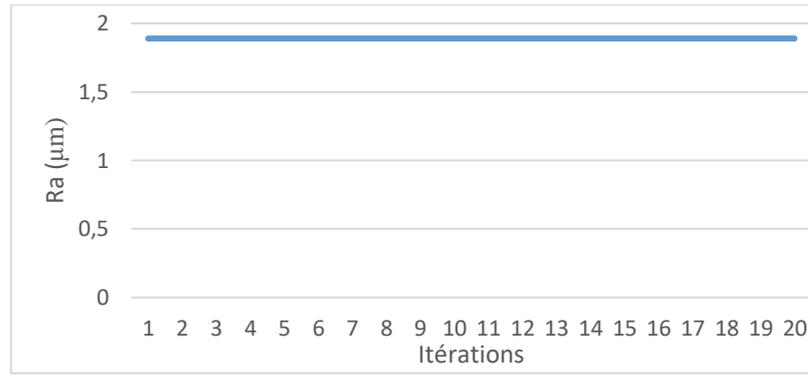
Tableau III.9 : Mauvaise, meilleure, et la moyenne de la fonction objective et l'écart type (FPA, application 1)

$R_a$ (μm)			$\sigma$
Mauvaise	Moyenne	Meilleur	
1,996666	1,939063	1,889778	0,045924

Le tableau III.8 présente la meilleure valeur obtenue par FPA  $R_a=1,889778$  (μm), avec une consommation de temps 3,6220 s, NFE égale à 10, et un  $\sigma$  égale à 0,045924.

On remarque que le temps consommé par l'algorithme FPA est plus élevé par rapport au temps consommé par PSO, car on a utilisé une commande pour sauvegarder les données dans chaque exécution qui prend plus de temps.

La figure III.4 présente la convergence prématurée de la meilleure valeur.

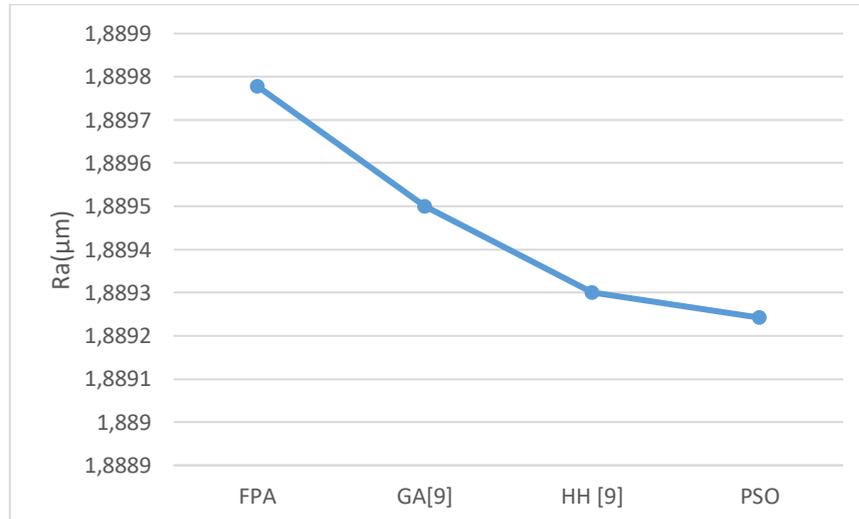


**Figure III.4 :** Convergence de la meilleure valeur (FPA, application 1).

**Tableau III.10 :** Comparaison des résultats (application 1).

Algorithme	$R_a$ (µm)	CPU (s)	NFE	$\sigma$
PSO	<b>1,889242</b>	<b>0,712371</b>	100	<b>0,0130</b>
FPA	1,889778	3,622041	10	0,0325
GA [9]	1,8895	-	2000	N/A
HH [9]	1.8893	-	1800	1.85E-16

Le tableau III.10 compare les résultats obtenus par PSO, FPA et la littérature (GA,HH) [9]. A partir de ce tableau on constate que la meilleure valeur obtenue est celle de PSO  $R_a = 1,889242(\mu\text{m})$ . La figure III.5 présente les valeurs optimales de  $R_a$ .



**Figure III.5 :** Valeurs optimales de  $R_a$  (application 1).

### III.4.2 Application 2

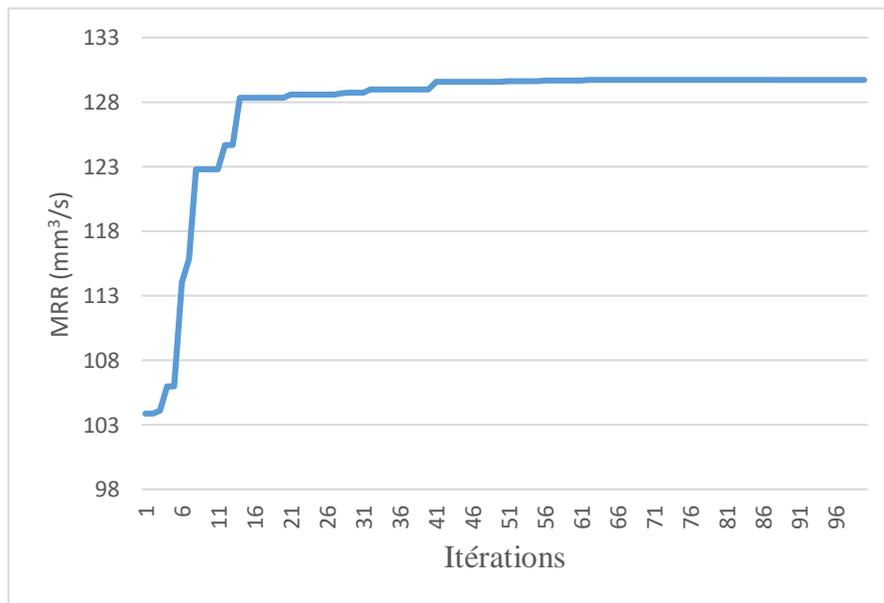
Les tableaux III.11-17 présentent tous les résultats obtenus dans les trois scénarios pour  $SR_{\max}$  (valeurs maximales admissibles de la rugosité des surfaces) et  $ND_{\max}$  (nombre de défauts), en appliquant PSO puis FPA, sachant que III.11-14 représente

les résultats de PSO et III.15-18 ceux FPA avec une taille de population  $N_{pop} = 50$  et un nombre d'itération  $I_t = 100$ .

**Tableau III.11** : Résultats de PSO ( SRmax=0,3 et NDmax=11).

N°	$f_r$ (m/min) ; $d_c$ (μm) ; $M$	MRR (mm <sup>3</sup> /s)	CPU(s)	NFE
1	11,1977 ; 11,5840 ; 500	129,714359	1,1191	4900
2	11,197674 ; 11,584202 ; 500	129,716088	1,1280	5000
3	11,197689 ; 11,584099 ; 500	129,715147	1,0798	4950
4	11,1977 ; 11,58412 ; 500	129,715041	0,9533	5000
5	11,1977 ; 11,58401 ; 500	129,714711	1,0314	4900
6	11,197663 ; 11,584195 ; 500	129,715912	1,2648	4850
7	11,197636 ; 11,584134 ; 499,99861	129,714919	1,1221	4950
8	11,197666 ; 11,584186 ; 499,9986	129,715845	0,9713	4950
9	11,197671 ; 11,584216 ; 500	<b>129,716149</b>	0,9365	4400
10	11,197666 ; 11,584188 ; 500	129,715864	0,8454	4950

Le tableau III.11 présente la meilleure valeur obtenue par PSO MRR=129,716149 (mm<sup>3</sup>/s) avec une consommation de temps 0,9365 s, et NFE égale à 4400. La Figure III.6 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue pour le premier scénario, la valeur MRR a été augmentée jusqu'à la meilleure valeur 129,716149mm<sup>3</sup>/s, puis commence à se stabiliser.

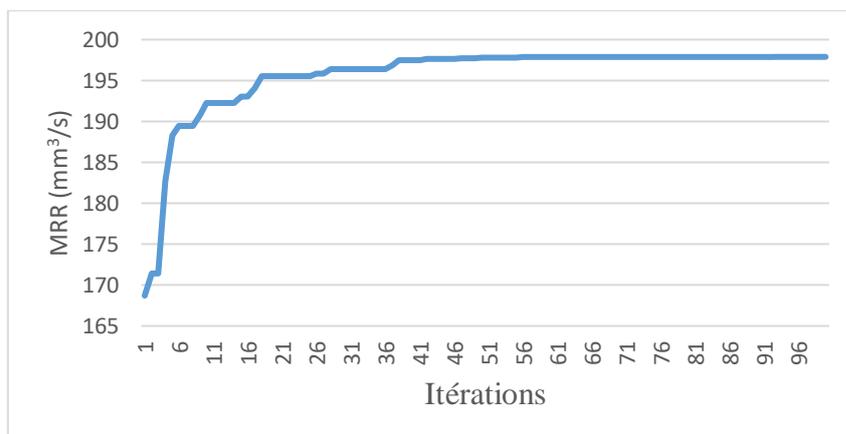


**Figure III.6** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par PSO (SRmax=0.3 et NDmax=11).

**Tableau III.12** : Résultats de PSO (SRmax=0,35 et NDmax=11).

N°	$f_r$ (m/min) ; $d_c$ ( $\mu$ m) ; $M$	MRR (mm <sup>3</sup> /s)	CPU(s)	NFE
1	12,890644 ;15,351283 ;500	197,887939	2,4159	4900
2	12,8906346 ;15,351236 ; 500	197,887182	1,1413	5000
3	12,890649 ;15,35126 ; 499,99968	197,887717	1,0720	4950
4	12,890648 15,351243 500	197,887474	0,9694	5000
5	12,890627 ;15,35127 ; 499,998745	197,887504	0,9681	4900
6	12,890641 ;15,351300 ;500	<b>197,888168</b>	1,0394	4850
7	12,890642 ;15,351301 ;500	197,888135	1,0877	4950
8	12,890598 ;15,351214 ;499,99517	197,886350	1,0620	4950
9	12,890640 ;15,35127 ; 499,999487	197,887707	1,0407	4400
10	12,890636 15,351231 ;499,999847	197,887153	1,0524	4950

Le tableau III.12 la meilleure valeur obtenue est MRR=197,888168 (mm<sup>3</sup>/s) avec une consommation de temps 1,0394 s, et NFE égale à 4650. La figure III.7 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue de MRR qui augmente jusqu'à la 197,88868mm<sup>3</sup>/s, puis commence à se stabiliser.

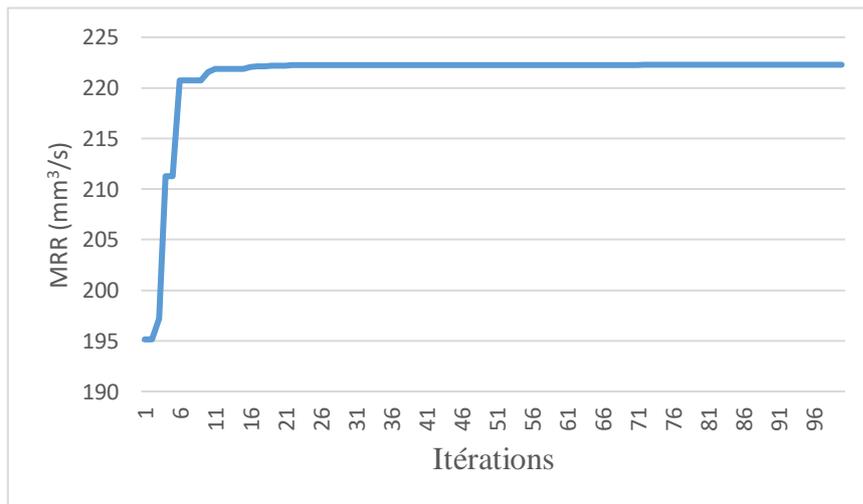
**Figure III.7** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par PSO (SRmax=0,35 et NDmax=11).

Le tableau III.13 présente la meilleure valeur obtenue de MRR est égale à 222,283371 mm<sup>3</sup>/s avec une consommation de temps 0,9941 s, et un NFE égale à 3850. La figure III.8 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue, de MRR qui a augmenté jusqu'à la meilleure valeur 222,283371 mm<sup>3</sup>/s, puis commence à se stabiliser.

Le tableau III.14 présente la mauvaise, moyenne et meilleure valeur obtenue de MRR. On constate que l'écart type du 1<sup>er</sup> scénario est égale à 6,076465E-04, 2<sup>ème</sup> scénario  $\sigma = 5,163348E-04$  et le 3<sup>ème</sup>  $\sigma = 1,220655E-06$ .

**Tableau III.13 :** Résultats de PSO (SRmax=0,4 et NDmax=11).

N°	<i>fr (m/min) ; dc (µm) ; M</i>	MRR (mm/s)	CPU(s)	NFE
1	13,4 ; 16,588311 ; 372,06452	222,283368	1,2420	4800
2	13,4 ; 16,588311 ; 374,833813	<b>222,283371</b>	0,9941	<b>3850</b>
3	13,4 ; 16,588311 ; 439,170558	222,283371	0,8710	4150
4	13,4 ; 16,588311 ; 392,155613	222,283371	0,9622	4450
5	13,4 ; 16,588311 ; 349,922426	222,283371	0,9732	4400
6	13,4 ; 16,58831 ; 397,721443	222,283369	0,8060	4250
7	13,4 ; 16,588311 ; 365,447314	222,283368	0,7499	4800
8	13,4 ; 16,588311 ; 361,532761	222,283370	0,9550	5000
9	13,4 ; 16,588311 ; 348,821660	222,283371	1,1350	5000
10	13,4 ; 16,588311 ; 409,640382	222,283371	0,9446	4750



**Figure III.8 :** Convergence de la meilleure valeur (PSO, application 1).

**Tableau III.14 :** Mauvaise, moyenne et meilleure valeur de MRR (PSO, application 2).

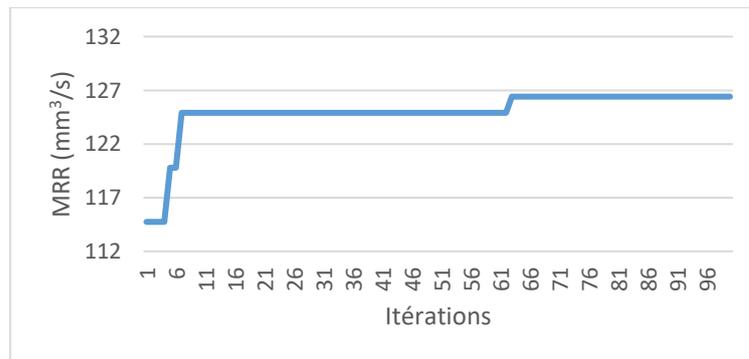
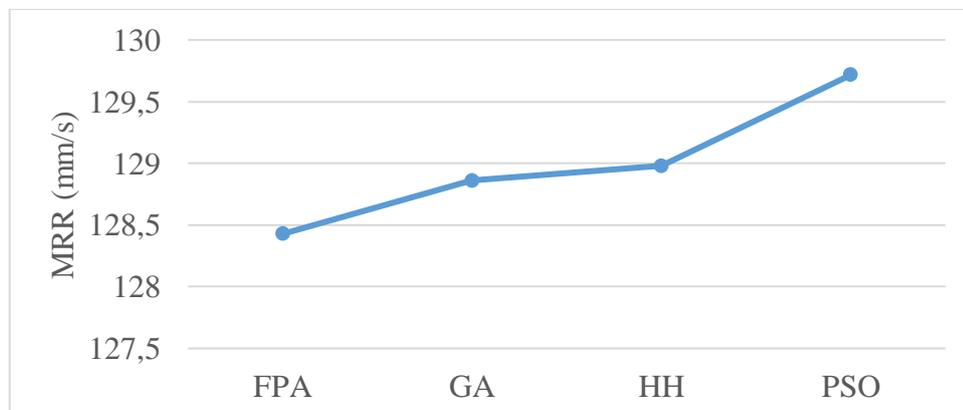
SR <sub>max</sub>	ND <sub>max</sub>	MRR			$\sigma$
		Mauvaise	Moyenne	Meilleure	
0,3	11	129,714359	129,715403	129,716149	6,076465E-04
0,35	11	197,886350	197,887532	197,888168	5,163348E-04
0,4	11	222,283368	222,283370	222,283371	1,220655E-06

**Tableau III.15:** Résultats de FPA (SR<sub>max</sub>=0,3 et ND<sub>max</sub>=11).

N°	$f_r$ (m/min) ; $d_c$ (μm) ; $M$	MRR (mm <sup>3</sup> /s)	CPU(s)	NFE
1	11,1688 ; 11,48678 ; 500	128,293842	12,0600	3600
2	11,13676 ; 11,3504 ; 494,9363	126,07475	11,1318	3150
3	11,160846 ; 11,506977 ; 500	<b>128,427606</b>	11,6856	4450
4	11,2579 ; 11,3 ; 500	127,551749	10,8475	3950
5	11,18744 ; 11,3784 ; 500	127,295648	10,7318	3250
6	11,15261 ; 11,4429 ; 500	127,618702	11,5898	4350
7	11,182089 ; 11,399352 ; 500	127,468580	14,6462	500
8	11,2091 ; 11,31963 ; 499,95	126,883436	12,5341	4400
9	11,1813 ; 11,2051 ; 499,4631	125,287402	11,7992	3900
10	11,1641 ; 11,4166 ; 499,8099	127,456476	13,6733	2750

Le tableau III.15 présente la meilleure valeur obtenue de MRR (128,427606 mm<sup>3</sup>/s) avec une consommation de temps 11,6856 s, et un NFE égale à 4450.

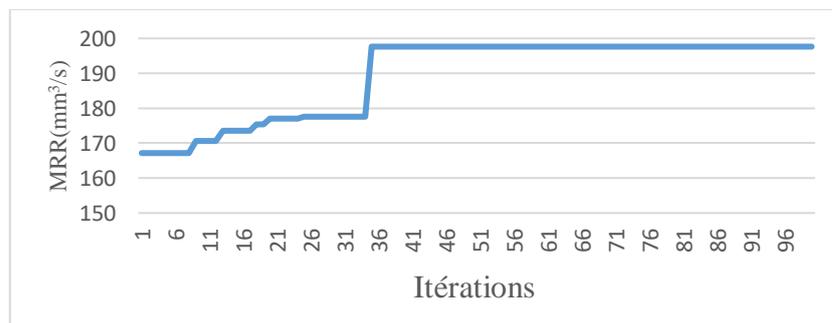
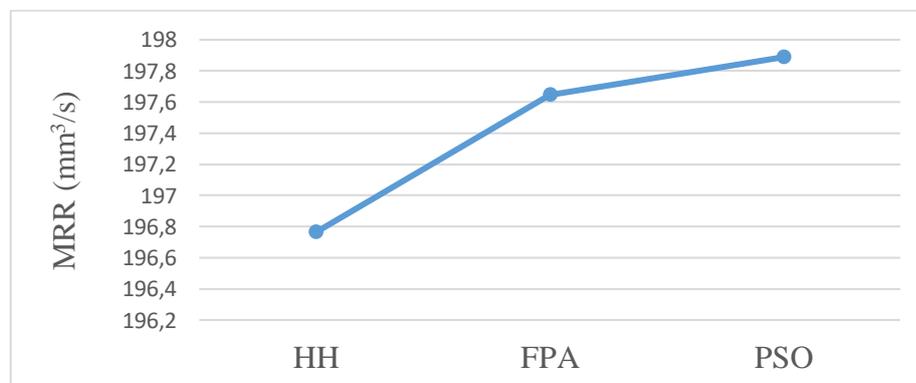
La figure III.9 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue, elle converge jusqu'à la meilleure valeur 128,427606 mm<sup>3</sup>/s. La figure III.10 présente les valeurs optimales de MRR obtenues par FPA, PSO, et la littérature (GA et HH) [9].

**Figure III.9 :** Convergence de la meilleure valeur de MRR par FPA (SR<sub>max</sub>=0,3 et ND<sub>max</sub>=11).**Figure III.10 :** Valeurs optimales de MRR pour (SR<sub>max</sub>=0,3 et ND<sub>max</sub>=11).

**Tableau III.16** : Résultats de FPA (SRmax=0,35 et NDmax=11).

N°	$f_r$ (m/min); $d_c$ ( $\mu$ m); $M$	MRR (mm <sup>3</sup> /s)	CPU(s)	NFE
1	12,9465 ; 15,11153 ; 500	195,629461	12,9515	5000
2	12,86597 ; 15,2066 ; 500	195,647943	14,2756	4350
3	12,9012 ; 15,1332 ; 499,5292	195,236686	15,0156	4550
4	12,9456 ; 15,1005 ; 500	195,485293	12,1670	4500
5	12,8928 ; 15,3469 ; 500	<b>197,645867</b>	11,8420	1750
6	12,8626 ; 15,1977 ; 491,4084	193,490121	11,9803	4450
7	12,8755 ; 15,2565 ; 497,81932	196,436386	13,2729	4350
8	12,8493 ; 15,2516 ; 500	195,973178	11,7067	4300
9	12,8909 ; 15,2983 ; 500	197,208029	14,7358	3350
10	12,8816 ; 15,2547 ; 499,5347	196,505722	12,0906	4600

Le tableau III.16 présente la meilleure valeur obtenue MRR=197,645867 mm<sup>3</sup>/s avec une consommation de temps 11,8420 s, et un NFE égale à 1750. La figure III.11 présente la convergence de la meilleure valeur de MRR obtenue, elle augmente jusqu'à la meilleure valeur 197,645867 mm<sup>3</sup>/s, puis se stabilise. La figure III.12 présente les valeurs optimales de MRR de FPA, PSO, et la littérature.

**Figure III.11** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par FPA (SRmax=0,35 et NDmax=11).**Figure III.12** : Valeurs optimales de MRR pour (SRmax=0,35 et NDmax=11).

**Tableau III.17** : Résultats de FPA (SRmax=0,4 et NDmax=11).

N°	$f_r$ (m/min); $d_c$ ( $\mu$ m); $M$	MRR (mm <sup>3</sup> /s)	CPU(s)	NFE
1	13,4 ; 16,5872 ; 459,45606	222,268293	13,7683	3900
2	13,4 ; 16,5846 ; 469,0119	222,234631	13,4665	4850
3	13,4 ; 16,5807 ; 478,0977	222,182275	13,3747	4800
4	13,4 ; 16,5640 ; 403,108	221,958378	13,3187	4900
5	13,4 ; 16,5876 ; 422,5024	222,274974	14,2655	1800
6	13,4 ; 16,5880 ; 500	<b>222,280378</b>	13,2181	3800
7	13,4 ; 16,5816 ; 424,8088	222,193456	14,7263	4700
8	13,4 ; 16,5858 ; 441,4301	222,250324	14,2740	3850
9	13,4 ; 16,5817 ; 384,0338	222,195613	13,9598	1350
10	13,4 ; 16,5876 ; 500	222,274004	13,5037	3400

Le tableau III.17 présente la meilleure valeur obtenue de MRR qui égale à 222,280378mm<sup>3</sup>/s avec une consommation de temps 13, 218171 s, et un NFE égale à 3800. La figure III.13 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue, elle augmente jusqu'à la meilleure 222,280378mm<sup>3</sup>/s, se stabilise. La figure III.14 présente les valeurs optimales de MRR en fonctions de FPA, PSO, et littérature : HH [9]

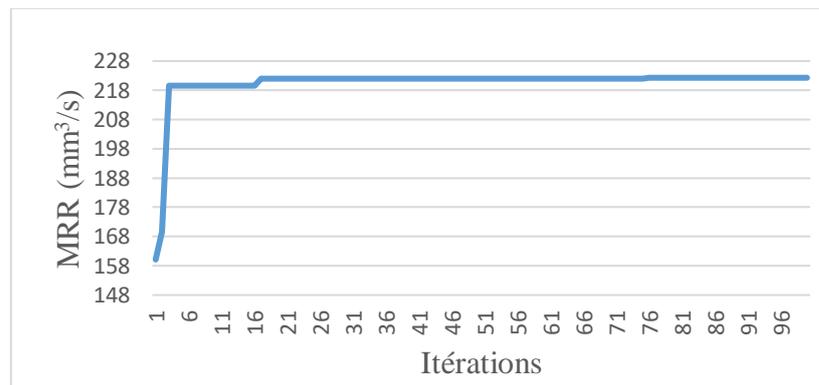
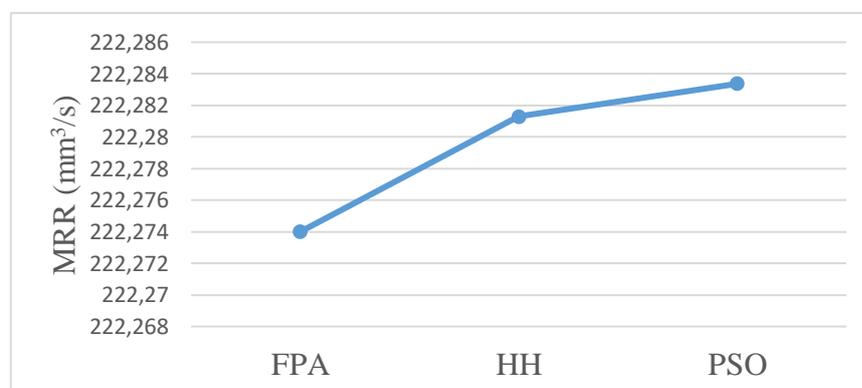
**Figure III.13** : Convergence de la meilleure valeur de MRR par FPA avec (SRmax=0,4 et NDmax=11).**Figure III.14** : Valeurs optimales de MRR pour (SRmax=0,4 et NDmax=11).

Tableau III.18 : Mauvaise, moyenne et la meilleure valeur de MRR

SR <sub>max</sub>	ND <sub>max</sub>	MRR (mm <sup>3</sup> /s)			σ
		Mauvaise	Moyenne	Meilleure	
0,3	11	125,287402	127,269091	128,427606	0,865344
0,35		193,490121	195,925868	197,645867	1,0940051
0,4		221,958378	222,211232	222,274004	0,091350

Le tableau III.18 représente la mauvaise, moyenne et meilleure valeur obtenue de MRR. On constate que l'écart type 1<sup>er</sup> scénario est égale à 0,865344, 2<sup>ème</sup> scénario  $\sigma = 1,0940051$  et le 3<sup>ème</sup>  $\sigma = 0,09135$ . Le tableau III.19 résume les valeurs des contraintes.

Tableau III.19: Contraintes de PSO, FPA (application 2).

N°	Scénario		Contraints PSO		Contraints FPA	
			SR <sub>max</sub>	ND <sub>max</sub>	SR <sub>max</sub>	ND <sub>max</sub>
1	0,3	11	0,2999	10,9998	0,2990	10,9850
	0,35		0,3499	10,9999	0,3500	10,8817
	0,4		0,3913	10,9999	0,3724	10,9996
2	0,3	11	0,2999	10,9999	0,2984	10,9566
	0,35		0,3499	10,9999	0,3489	10,9742
	0,4		0,3906	10,9999	0,3706	10,9989
3	0,3	11	0,2980	10,8455	0,2989	10,995
	0,35		0,3499	10,9999	0,3493	10,8860
	0,4		0,3764	10,9999	0,3689	10,9978
4	0,3	11	0,3000	10,9999	0,2978	10,9166
	0,35		0,3499	10,9999	0,3499	10,8860
	0,4		0,3865	10,9999	0,3839	10,9932
5	0,3	11	0,2999	10,9999	0,2988	10,9265
	0,35		0,3499	10,9999	0,3500	10,9971
	0,4		0,3970	10,9999	0,3798	10,9998
6	0,3	11	0,2999	10,9999	0,2984	10,9807
	0,35		0,3499	10,9999	0,3502	10,9739
	0,4		0,3852	10,9999	0,3651	10,9999
7	0,3	11	0,2999	10,9999	0,2987	10,9391
	0,35		0,3499	10,9999	0,3496	10,9824
	0,4		0,3939	10,9999	0,3793	10,9981
8	0,3	11	0,2999	10,9999	0,2988	10,8859
	0,35		0,3499	10,9999	0,3488	10,9996
	0,4		0,3937	10,9999	0,3759	10,9993
9	0,3	11	0,3000	10,9999	0,2978	10,8618
	0,35		0,3499	10,9999	0,3498	10,9840
	0,4		0,3973	10,9999	0,3884	10,9981
10	0,3	11	0,2999	10,9999	0,2985	10,9608
	0,35		0,3499	10,9999	0,3495	10,9775
	0,4		0,3826	10,9999	0,3651	10,998

Le tableau III.20 compare les résultats obtenus par PSO, FPA et la littérature (GA, HH) [9]. A partir de ce tableau, on constate que la meilleure valeur obtenue sont celles de PSO dans les trois cas : 1<sup>er</sup> cas MRR=129,716149 mm<sup>3</sup>/s, 2<sup>ème</sup> égale 197,888168 mm<sup>3</sup>/s, et le 3<sup>ème</sup> cas égale à 222,283371 mm<sup>3</sup>/s.

**Tableau III.20** : Comparaison des résultats (SRmax= 0,3 ; 0,35 ; 0,4 et NDmax=11).

SR <sub>max</sub>	ND <sub>max</sub>	Algorithmes	MRR (mm <sup>3</sup> /s)	NFE	$\sigma$
0,3	11	PSO	<b>129,716149</b>	4400	6,076465E-04
		FPA	128,427606	4450	0,865344
		GA [9]	128,8612	10000	1,0014
		HH [9]	128,984	11250	2,05E-16
0,35	11	PSO	<b>197,888168</b>	4650	5,163348E-04
		FPA	197,645867	1750	1,0940051
		HH [9]	196,7643	1400	6,29E-16
0,4	11	PSO	<b>222,283371</b>	3850	1.220655E-06
		FPA	222,274004	3800	0,091350
		HH [9]	222,2813	9600	2,00E-16

### III.4.3 Application 3

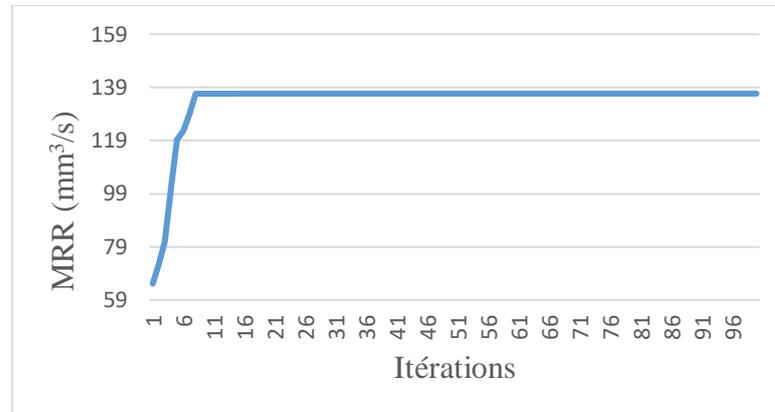
Les tableaux III.21 et 22 et illustrent tous les résultats obtenus en appliquant PSO puis FPA, sachant que III.21 représente les résultats de PSO et III.22 ceux de FPA. Pour voir comment ils changent, on applique trois scénarios  $N_{pop} = 50$  et un nombre d'itérations  $I_t = 100$ ,  $N_{pop} = 100$  et  $I_t = 200$  puis  $N_{pop} = 100$  et  $I_t = 1000$ . On constate que dans tous les scénarios, le taux d'enlèvement de matière (MRR) ne change pas donc on a présenté les valeurs du 1<sup>er</sup> scénario(car est plus petit).

**Tableau III.21** : Résultats de PSO (application 3).

N°	$P_w$ (MPa)	$d_{wn}$ (mm)	$f_n$ (mm/s)	$X$ (mm)	MRR (mm/s)	Contrainte	CPU (s)	NFE
1	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	1,5728	1100
2	400	0,5	300	2,5	<b>136,638066</b>	0,0172	1,2084	<b>750</b>
3	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	1,0521	1950
4	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	1,1334	1350
5	400	05	300	2,5	136,638066	0,0172	1,3286	2100
6	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	1,0066	1900
7	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	1,0745	1250
8	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	0,9928	1300
9	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	0,8935	2350
10	400	0,5	300	2,5	136,638066	0,0172	1,7168	900

Le tableau III.21 présente la meilleure valeur de MRR (PSO) obtenue 136,638066 mm<sup>3</sup>/s, avec une consommation de temps de 1,2084 s, et un NFE égale à 750.

La figure III.15 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue à 136,638066 mm<sup>3</sup>/s.



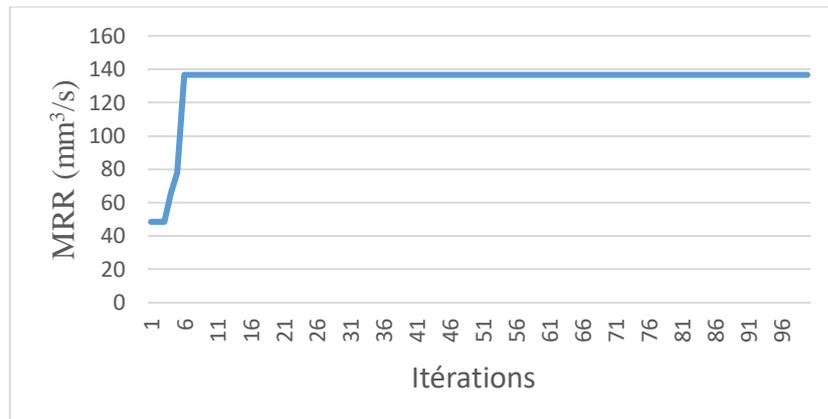
**Figure III.15** : Convergence de la meilleure valeur de MRR (PSO, application 3).

**Tableau III.22** : Résultats de FPA (application 3).

N°	$P_w$ (MPa)	$f_n$ (mm/s)	$X$ (mm)	MRR (mm <sup>3</sup> /s)	Contrainte	CPU (s)	NFE
1	400	300	2,5	136,638066	0,017164	14,399182	1250
2	400	300	2,5	136,638066	0,017164	14,459383	500
3	400	300	2,5	136,638066	0,017164	13,469266	600
4	400	300	2,5	136,638066	0,017164	16,260459	750
5	400	300	2,5	136,638066	0,017164	12,977961	2400
6	400	300	2,5	136,638066	0,017164	14,253828	1300
7	400	300	2,5	136,638066	0,017164	13,026149	1650
8	400	300	2,5	136,638066	0,017164	13,539344	450
9	400	300	2,5	<b>136,638066</b>	0,017164	14,214610	<b>300</b>
10	400	300	2,5	136,638066	0,017164	13,785987	1850

Le tableau III.22 présente la meilleure valeur de MRR obtenue à 136,638066 mm<sup>3</sup>/s, avec une consommation de temps de 14,214610 s, et un NFE égale à 300.

La figure III.16 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue, la valeur MRR augmente jusqu'à 136,638066 mm<sup>3</sup>/s, puis se stabilise.



**Figure III.16 :** Convergence de la meilleure valeur de MRR (FPA, application 3).

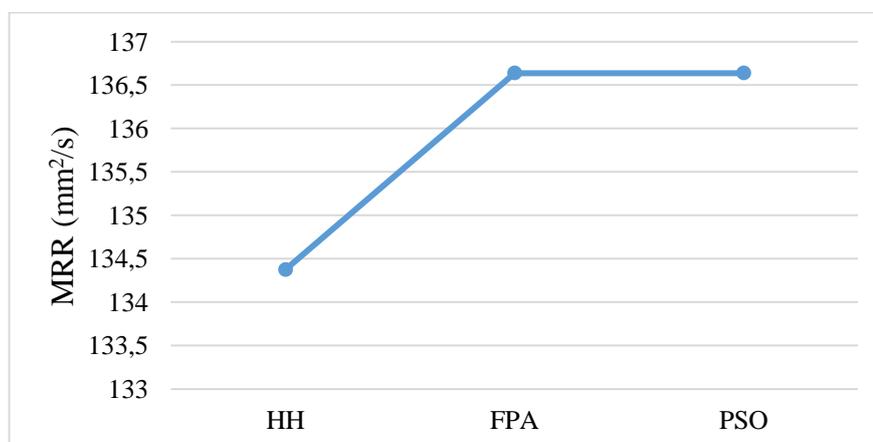
**Tableau III.23 :** Valeur de MRR et l'écart type pour PSO et FPA.

Algorithme	Meilleure	$\sigma$
PSO	136,638066	0
FPA	136,638066	0

**Tableau III.24 :** Comparaison des résultats de PSO, FPA et la littérature.

Algorithme	MRR (mm³/s)	NFE	$\sigma$
PSO	<b>136,638066</b>	750	0
FPA	<b>136,638066</b>	300	0
HH [9]	134.3757	1800	3.54E-6

Le tableau III.24 et la figure III.17 comparent les valeurs optimales obtenues par PSO, FPA, et celles de la littérature HH [9]. On constate que la valeur optimale correspond à PSO et FPA MRR=136,638066 (mm<sup>3</sup>/s).



**Figure III.17 :** Valeurs optimales de MRR par PSO, FPA et la littérature.

## III.4.4 Application 4

Les tableaux III.25-28 représentent tous les résultats obtenus en appliquant PSO puis FPA, sachant que III.25-26 représentent les résultats de PSO et III.27-28 ceux de FPA. Trois paramètres sont utilisés ( $N_{pop}=50$ ,  $I_t=100$ ) ; ( $N_{pop} = 100$ ,  $I_t=200$ ) puis ( $N_{pop} = 100$ ,  $I_t=1000$ ). On constate que dans les deux cas ( $N_{pop}=50$ ,  $I_t=100$ ) ; ( $N_{pop} = 100$ ,  $I_t=200$ ) la valeur de la fonction objectif change sauf par PSO, et dans le 1<sup>er</sup> cas, donc on présente les valeurs du 1<sup>er</sup> cas car la fonction objectif change par les deux algorithmes.

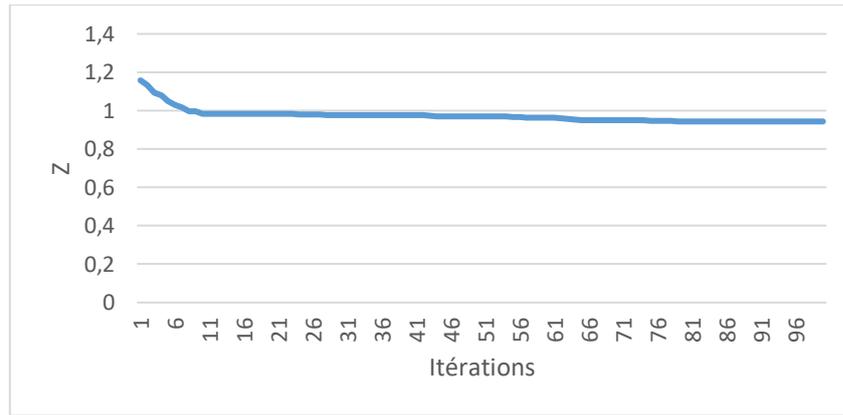
Tableau III.25 : Résultats de PSO (application 4).

N°	$I_{AL}$	$T_B$	$T_A$	$A_j$	$S$	$W_s$
1	15,99901	4	0,6	30	4,031130	8
2	15,999773	4,000335	0,6	30	4	7,999781
3	15,999628	4,000493	0,600018	30,000546	4	8
4	16	4	0,6	30	4	7,990465
5	16	4	0,600005	30,008039	4	7,999736
6	16	4,00020	0,600002	30,000065	4,001585	7,997909
7	16	4	0,6	30	4	7,999802
8	16	4	0,6	30	4	8
9	16	4	0,6	30	4	8
10	15,999758	4,000122	0,6	30,001361	4	8

Tableau III.26 : Résultats de PSO (suite III.25).

N°	$w_b$	$In_j$	$Z$	$CV (mm/min)$	$Ra (\mu m)$	CPU(s)	NFE
1	0,800022	3,999679	0,943790	0,752067	2,639647	1,5303	4900
2	0,8	3,999994	0,943754	0,751795	2,639304	1,0907	5000
3	0,800008	4	0,943777	0,751782	2,639335	1,1355	5000
4	0,8	4	0,943777	0,751833	2,639387	1,2857	4950
5	0,8	3,999890	0,943779	0,751707	2,639266	1,5304	5000
6	0,800022	4	0,943768	0,751805	2,639342	1,1344	5000
7	0,8	4	0,943740	0,751816	2,639298	1,5008	4900
8	0,800006	3,999613	0,943750	0,751823	2,639323	1,0237	5000
9	0,8	4	<b>0,943740</b>	0,751816	2,639296	1,1302	<b>4850</b>
10	0,800031	4	0,943766	0,751816	2,639296	1,1254	5000

Le tableau III.26 présente la meilleure valeur de  $Z= 0,943740$ , avec une consommation de temps de 1,1302 s, et un NFE égale à 4850. La figure III.18 présente la convergence de la meilleure valeur obtenue, la valeur de  $Z$  est réduite jusqu'à 0,9437, puis reste constante.



**Figure III.18 :** Convergence de la meilleure valeur de la fonction objective Z  
(Application 4, PSO).

**Tableau III.27:** Résultats de FPA (application 4).

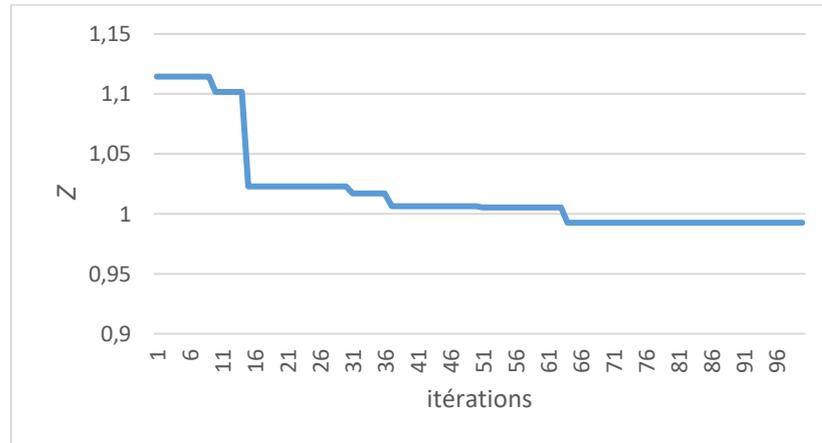
N°	$I_{AL}$	$T_B$	$T_A$	$A_j$	$S$	$W_s$
1	16	4	0,6	30	12	5,977954
2	16	4	0,6	30,375378	4	8
3	16	4	0,6	30	4	8
4	16	4	0,6	30	4	8
5	11,226542	4	0,6	30	4,510104	4,595258
6	16	4	0,6	31,223875	4	8
7	16	4	0,6	30	4	8
8	16	4	0,6	30	9,495587	8
9	15,859856	4	0,6	30	6,233202	8
10	16	4	0,6	30	4	8

**Tableau III.28 :** Résultats de FPA (suite III.27).

N°	$W_b$	$Inj$	$Z$	$CV$ (mm/min)	$Ra$ ( $\mu m$ )	CPU(s)	NFE
1	0,8	4	0,958365	0,755439	2,658673	14,9808	4100
2	0,8	4	0,945308	0,746407	2,637023	19,8504	4750
3	0,801555	4	0,944464	0,750769	2,639697	14,9794	3350
4	0,800039	4	0,943758	0,751790	2,639306	15,7517	4650
5	0,8	4	0,992602	0,750820	2,736024	11,2265	3200
6	0,8	4	0,948852	0,734179	2,631884	21,1005	4600
7	0,8	4	0,943740	0,751816	2,639296	16,5828	4900
8	0,8	4	0,948376	0,797501	2,694252	17,7023	4900
9	0,8	4	0,946656	0,770048	2,663360	17,8854	4300
10	0,8	4	<b>0,943740</b>	0,751816	2,639296	18,0717	<b>4450</b>

Le Tableau III.28 présente la meilleure valeur de  $Z=0.943740$ , avec une consommation de temps de 18,0717 s, et un NFE égale à 4450. La figure III.19

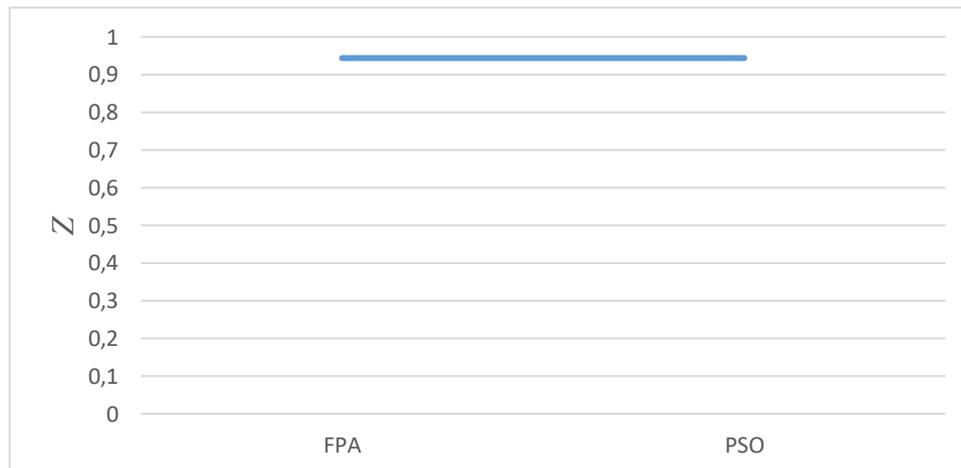
présente la convergence de la meilleure valeur obtenue, la valeur de z réduire jusqu'à 0.944464, puis commence a stabilisé.



**Figure III.19 :** Convergence de la meilleure valeur de la fonctionne objective Z (application 4, FPA).

**Tableau III.29 :** Valeurs de la fonction objective Z et l'écart type.

Algorithmes	Z			$\sigma$
	Mauvaise	Moyenne	Meilleure	
PSO	0,943790	0,943764	<b>0,943740</b>	1,636459E-05
FPA	0,992602	0,951586	<b>0,943740</b>	0,019389



**Figure III.20 :** Valeurs optimales de la fonction objectif Z par (PSO, FPA).

**Tableau III.30 :** Comparaison des valeurs de PSO et FPA.

Algorithmes	Z	Ra	CV	NEF	$\sigma$
PSO	0,94374	2,639296	0,751816	4850	1,6364E-05
FPA	0,94374	2,639296	0,751816	4450	0,019389

Le tableau III.30 compare les meilleures valeurs obtenues par PSO et FPA, à partir de ce tableau, on constate que la valeur optimale correspond aux deux algorithmes  $Z=0.943740$ . La figure III.20 présentent des valeurs optimales obtenues par PSO et FPA de la fonction objectif  $Z$ , on constate que la valeur optimale correspond à PSO et FPA  $Z=0.943740$ .

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux algorithmes de l'intelligence artificielle (bio-inspirés), pour résoudre les problèmes d'optimisation quatre processus d'usinage par l'enlèvement de matière. D'après les résultats obtenus, on conclue que les résultats donnés par PSO sont les plus performants par rapport à FPA.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Les travaux effectués dans ce mémoire sont des applications d'optimisation sur les critères de performance des procédés d'usinage (perçage, rectifieuse, électroérosion par fil et jet d'eau à haute pression, Nous avons choisi ces quatre procédés car ils sont très importants et complexes dans le monde industriel.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur l'optimisation des procédés d'usinage afin de connaître les différentes méthodes de résolution qui sont présentés dans le deuxième chapitre. Les algorithmes bio-inspirés (intelligence artificielle) nous avons choisi deux de ces algorithmes (PSO, FPA) pour appliquer et faire une comparaison entre les résultats obtenus.

Les résultats des critères de performance illustrent que l'algorithme PSO a fourni les meilleures solutions, donc cette méthode est plus convenable pour ces problèmes par rapport aux FPA. Le travail attendu dans le futur est de faire une combinaison des deux algorithmes afin d'obtenir un algorithme hybride.

### Bibliographie

- [1] S. Gara, "Procédés d'usinage tournage, fraisage, perçage, rectification. "32, rue Bague Paris Cedex 15, ellipses, 2014.
- [2] J. F Debonnie, "Usinage, "Editions du CEFAL, France, 2006.
- [3] F. Remli, " l'effet d'usinage sur acier XC18," Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Basakra en 2016.
- [4] S. Sandvik Coromant, "Fraisage Principes", Techniques de l'Ingénieur, Référence BM 7 082, France, 2001.
- [5] Société Sandvik Coromant, " perçage ", Techniques de l'Ingénieur, Référence BM 7 088, France, 2001.
- [6] A. Rahal, " Usinage par Electroérosion", Mémoire de master 2, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017.
- [7] A. Bellouifi, "Procédés de fabrication, "cours de master industrielle, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2010.
- [8] G. Germain, "Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser ", thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France, 2006.
- [9] M. A. Mellal and E. J. Williams, "Parameter optimization of advanced machining processes using cuckoo optimization algorithm and hoop heuristic," J. Intell. Manuf., vol. 27, no. 5, pp. 927–942, 2016.
- [10] P. Lechervy, "Usinage électrochimique", Techniques de l'Ingénieur, Référence B 7 270, 1996.
- [11] M. Ehsan Asgar and A. K. Singh Singholi, "Parameter study and optimization of WEDM process: A Review," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 404, no. 1, 2018.
- [12] J.L Prensier et J.B Vidal, " L'usinage à grande vitesse", L'École normale supérieure de Cachan, France, 2005.
- [13] F. Bettine. "Etude de processus d'usinage des pièces mécanique sur les machines à 5axes", Mémoire de Master, CRTI, 2012.

- [14] G.Kibria et M. P. Jahan "Micro-Electrical Discharge Machining (Micro-EDM) :Processes, Varieties and Applications",USA,2014,Elsevier. DOI : 10.1016/B978-0-08-096532-1.01107-9
- [15] A. Tiwari, A. Mandal, and K. Kumar, "Optimization of Overcut in Electrochemical Machining for EN 19 Tool Steel Using Taguchi Approach," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 2337–2345, 2015.
- [16] D. Singh and R. Shukla, "Parameter optimization of electrochemical machining process using black hole algorithm," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 282, no. 1, 2017.
- [17] J. T. Kavya, R. Keshavamurthy, and G. S. P. Kumar, "Studies on parametric optimization for abrasive water jet machining of Al7075-TiB 2 in-situ composite," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 149, no. 1, 2016.
- [18] P. B. Rana, J. L. Patel, and D. I. Lalwani, *Soft Computing for Problem Solving*, vol. 816. Springer Singapore, 2019
- [19] M. A. Mellal and E. J. Williams, "A survey on ant colony optimization, particle swarm optimization, and cuckoo Algorithms," IGI Global, USA, pp. 37–51, 2017.
- [20] H. Zidani, "Représentation de solution en optimisation continue, multi-objectif et applications, " Thèse de doctorat, Université Mohammed V, Maroc, 2014.
- [21] M. S. Madani et R. Ghouini, "Amélioration des paramètres technologiques de coupe en tournage," Université Kasdi Merbah-Ourgla,2011
- [22] V. N. Pham, "Programmation DC et DCA pour l'optimisation non convexe / optimisation globale en variables mixtes entières : Codes et Applications," Thèse de doctorat, Université de Caen, France, 2006.
- [23] I. Boussaid and P. De, "Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue," Thèse de doctorat, Université Paris-Est Créteil, France,2014.
- [24] F. Aissanou," Décisions multicritères dans les réseaux de télécommunication autonomes, " Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2012.
- [25] M. A. Mellal and E. Zio, "An adaptive particle swarm optimization method for

- multi-objective system reliability optimization,” *Journal of Risk and Reliability*, 2019. Doi : 10.1177/1748006X1985281.
- [26] T. Ameer, "Optimisation du processus d'usinage en utilisant la méthode des essaims de particules," Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Basakra, 2016.
- [27] P. Chootinan and A. Chen, "Constraint handling in genetic algorithms using a gradient-based repair method," *Comput. Oper. Res* , vol. 33, no. 8, pp. 2263–2281, 2006.
- [28] A. El Dor, "Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire. Applications en segmentation d'images et en électronique," Thèse de doctorat, Université Paris-Est Créteil, France, 2012
- [29] X. S. Yang, "Flower pollination algorithm for global optimization," *Lect. Notes Comput. Sci (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 7445 LNCS, pp. 240–249, 2012.
- [30] V. Gardeux "Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension : application à l'analyse de données de puces à ADN," Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France. 2011.
- [31] X. Yu, W. Chen, and X. Zhang, "An Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems," *Proc. 2018 2nd IEEE Adv. Inf. Manag. Commun. Electron. Autom. Control Conf. IMCEC 2018*, pp. 2663–2666, 2018
- [32] M. Dorigo and K. Socha, "Ant colony optimization," *Handb. Approx. Algorithms Metaheuristics*, pp. 26-1-26–14, 2007.
- [33] S. Ohatkar and Y. Gunjkar, "Smart Trends in Information Technology and Computer Communications," vol. 876, pp. 390–399, 2018.
- [34] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution- A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces," *Tech. Rep. TR-95-012*, pp. 1–12, 1995
- [35] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.

## Bibliographie

---

- [36] M. Karakoyun and A. Babalik, “Data Clustering with Shuffled Leaping Frog Algorithm (SFLA) for Classification,” 2015.
- [37] S. Kuriakose and M. S. Shunmugam, “Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 1–2, pp. 133–141, 2005.
- [38] R. V. Rao, D. P. Rai, and J. Balic, “A multi-objective algorithm for optimization of modern machining processes,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 61, no. August 2015, pp. 103–125, 2017.