

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



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA  
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Par

**SACI Rebai**

THÈME

---

**Sélection et optimisation des paramètres du  
procédé d'usinage par décharges électriques pour les  
matériaux durs**

---

Soutenue publiquement le 13 / 05/ 2024 devant le jury :

|                     |            |                             |               |
|---------------------|------------|-----------------------------|---------------|
| ABDELKRIM Mourad    | M.C.A      | Université de Ouargla       | Président     |
| AMEUR Toufik        | M.C.A      | Université de Ouargla       | Rapporteur    |
| BELLOUFI Abderrahim | Professeur | Université de Ouargla       | Co-Rapporteur |
| MEKHLOUFI Rafik     | M.C.A      | Université de Batna 2       | Examineur     |
| BOURIH Abdellah     | M.C.A      | Université de Batna 2       | Examineur     |
| BOURABOU Amor       | M.C.A      | Université de Constantine 1 | Examineur     |

## Dédicace

A la mémoire de mon défunt père.

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre ,,  
À cet source de tendresse, de patience et de générosité,  
A la mémoire de mon défunt ma mère.

À ma femme qui a toujours était à mes cotés  
A mes chères enfants : Takoua Selsabil, Douaa Nour Elhouda,  
Mohamed yasser.

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

À mon frère  
Cherif Rebiai et sa petite famille  
A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer  
....

# Remerciements

Je remercie Dieu qui m'a aidé à terminer ce modeste  
Travail

Je tiens à remercier chaleureusement tout d'abord mon directeur de thèse, Dr. AMEUR Toufik d'avoir accepté d'être l'encadreur de thèse, pour ses précieux conseils qui m'ont permis de concrétiser ce travail,

Je tiens à remercier aussi chaleureusement mon Co-Rapporteur le Professeur BELLOUFI Abderrahim, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier avec plus grande gratitude Dr ABDELKRIM Mourad maître de conférences à l'université Ouargla pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury

Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques. Mes remerciements vont également aux :

Dr. MEKHLOUFI Rafik maître de conférences à l'université de Batna 2

Dr. BOURIH Abdellah maître de conférences à l'université de Batna 2

Dr. BOURABOU Amor maître de conférences à l'université de Constantine

Ces remerciements ne seraient pas complets sans y avoir associé ma petite famille. Je remercie tout d'abord ma femme et mes enfants pour leur présence et leur patience.

# Nomenclature

| Symboles  | Unités     | Désignations                                                   |
|-----------|------------|----------------------------------------------------------------|
| EDM       |            | Usinage par électroérosion                                     |
| PID       |            | Proportionnel-intégral-dérivé                                  |
| MMT       |            | Système de test magnétique microscopique                       |
| TFT       |            | Transistor à film mince                                        |
| WEDM      |            | Usinage par électroérosion à fils                              |
| AEM       |            | Méthode de l'électrode auxiliaire                              |
| PMEDM     |            | Perçage micro- électroérosion par décharge                     |
| TOPSIS    |            | Technique d'ordre de préférence par similarité solution idéale |
| DoE       |            | Conception d'expériences                                       |
| DNPSO     |            | Optimisation à essaim de particules à voisinage dynamique      |
| PSO       |            | Optimisation à essaim de particules                            |
| RSM       |            | Méthodologie de surface de réponse                             |
| EWR       |            | Rapport d'usure de l'électrode                                 |
| MLRA      |            | Analyse de régression linéaire multiple                        |
| AEMO      |            | Algorithmes évolutionnaires multi- objectifs                   |
| PMD       |            | Poudre diélectrique mixte                                      |
| DE        |            | Différentiel évolution                                         |
| AEM       |            | Méthode de l'électrode auxiliaire                              |
| $\rho$    | $\Omega.m$ | Résistivité électrique du matériau de l'électrode              |
| SR        | $\mu m$    | Rugosité de surface                                            |
| MRR       | $mm^3/min$ | Taux d'enlèvement de matière                                   |
| SV        | Volt       | Tension de servomoteur                                         |
| $T_{on}$  | $\mu s$    | Temps d'impulsion                                              |
| $T_{off}$ | $\mu s$    | Temps d'arrêt d'impulsion                                      |
| $I_p$     | A          | Courant de crête                                               |
| V         | Volte      | Tension                                                        |

# Table des matières

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Introduction Générale ..... | 2 |
|-----------------------------|---|

## Chapitre I

### Synthèse bibliographique

|       |                                                               |    |
|-------|---------------------------------------------------------------|----|
| I.1   | Introduction.....                                             | 7  |
| I.2   | L'électroérosion.....                                         | 8  |
| I.2.1 | Histoire et parcours du processus micro-EDM.....              | 8  |
| I.2.2 | Inconvénients de la micro-EDM.....                            | 9  |
| I.2.3 | Avancement de la micro-EDM assistée par champ magnétique..... | 10 |
| I.2.4 | Applications industrielles de la micro-EDM.....               | 11 |
| I.3   | Principes du processus EDM.....                               | 12 |
| I.4   | Conditions d'usinage.....                                     | 16 |
| I.4.1 | Principaux éléments des conditions d'usinage.....             | 17 |
| I.4.2 | Éléments de performance d'usinage .....                       | 18 |
| I.4.3 | Adaptation du régime d'usinage .....                          | 19 |
| I.5   | Mécanisme d'enlèvement de la matière.....                     | 23 |
| I.5.1 | Phase de pré-claquage .....                                   | 24 |
| I.5.2 | Phase de claquage.....                                        | 25 |
| I.5.3 | Phase de décharge.....                                        | 26 |
| I.5.4 | Fin de décharge.....                                          | 26 |
| I.5.5 | Phase de post-décharge.....                                   | 27 |
| I.6   | Types de l'électroérosion.....                                | 28 |
| I.6.1 | Electroérosion à fil (WEDM) .....                             | 28 |
| I.6.2 | Micro-EDM .....                                               | 28 |
| I.6.3 | EDM de matériaux non conducteurs .....                        | 29 |
| I.6.4 | EDM à sec .....                                               | 30 |
| I.7   | Facteurs affectant la qualité d'usinage.....                  | 32 |

|       |                                          |    |
|-------|------------------------------------------|----|
| I.7.1 | Machine EDM .....                        | 32 |
| I.7.2 | Paramètres techno-économiques d'EDM..... | 34 |
| I.7.3 | Paramètres électriques .....             | 39 |
| I.7.4 | Paramètres non électriques .....         | 42 |
| I.8   | Conclusion.....                          | 43 |

---

## **Chapitre II**

### **Revue littérature**

---

|      |                              |    |
|------|------------------------------|----|
| II.1 | Introduction.....            | 45 |
| II.2 | Travaux expérimentaux.....   | 45 |
| II.3 | Travaux de modélisation..... | 60 |
| II.4 | Travaux d'optimisation.....  | 73 |
| II.5 | Conclusion.....              | 92 |

---

## **Chapitre III**

### **Modélisation des performances de l'usinage par décharges électrique**

---

|         |                                                                              |     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III.1   | Introduction.....                                                            | 94  |
| III.2   | Régression linéaire multiple.....                                            | 94  |
| III.2.1 | Modèle linéaire générale .....                                               | 94  |
| III.2.2 | Forme matricielle.....                                                       | 95  |
| III.2.3 | Estimation et propriétés des estimateurs .....                               | 95  |
| III.2.4 | Propriétés des estimateurs .....                                             | 96  |
| III.2.5 | Equation d'analyse de la variance et qualité d'un ajustement.....            | 98  |
| III.2.6 | Testes statistiques .....                                                    | 99  |
| III.2.7 | Test de signification globale du modèle de regression (Test de Fisher) ..... | 99  |
| III.2.8 | Règle de décision.....                                                       | 100 |
| III.3   | Cas de violation des hypothèses.....                                         | 101 |

|         |                                                                                              |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III.3.1 | Test de détection d'une multicolinéarité .....                                               | 101 |
| III.3.2 | Règle de décision.....                                                                       | 102 |
| III.3.3 | Autocorrélation des erreurs .....                                                            | 102 |
| III.3.4 | Test de détection de l'autocorrélation des erreurs .....                                     | 103 |
| III.4   | Etapes pour effectuer une régression.....                                                    | 106 |
| III.4.1 | Définir l'équation à estimer.....                                                            | 106 |
| III.4.2 | Choix de la méthode d'estimation.....                                                        | 106 |
| III.5   | Examen des résultats de la régression.....                                                   | 106 |
| III.5.1 | Modélisation des performances de l'usinage.....                                              | 106 |
| III.5.2 | Taux d'enlèvement de matière (MRR) .....                                                     | 106 |
| III.5.3 | Taux d'usure des outils (TWR).....                                                           | 107 |
| III.5.4 | Mesure de la rugosité de surface (Ra) .....                                                  | 108 |
| III.6   | Résultats.....                                                                               | 110 |
| III.6.1 | Analyse des résultats de MRR.....                                                            | 110 |
| III.6.2 | Analyse des résultats de TWR à l'aide d'une régression linéaire multiple .                   | 113 |
| III.6.3 | Analyse des résultats de Ra à l'aide d'une régression linéaire multi<br>variable.....        | 116 |
| III.7   | Etude de la précision et de l'erreur du modèle.....                                          | 120 |
| III.7.1 | Taux d'enlèvement de matière (MRR) .....                                                     | 123 |
| III.7.2 | Taux d'usure de l'outil (TWR).....                                                           | 123 |
| III.7.3 | Rugosité de surface (Ra).....                                                                | 124 |
| III.8   | Effet d'interaction des combinaisons de variables indépendantes.....                         | 125 |
| III.8.1 | Influence des paramètres d'usinage sur la réponse taux d'enlèvement de<br>matière (MRR)..... | 125 |
| III.8.2 | Influence des paramètres d'usinage sur la réponse-Taux d'usure de l'outil<br>(TWR).....      | 126 |
| III.8.3 | Influence des paramètres d'usinage sur la réponse- Rugosité de surface<br>(Ra).....          | 127 |
| III.9   | Conclusion.....                                                                              | 128 |

---

**Chapitre IV****Optimisation des paramètres d'usinage par décharges  
électriques**

---

|        |                                                              |     |
|--------|--------------------------------------------------------------|-----|
| IV.1   | Introduction.....                                            | 130 |
| IV.2   | Modélisation du problème d'optimisation.....                 | 130 |
| IV.2.1 | Variables d'optimisation .....                               | 131 |
| IV.2.2 | Critères d'optimisation.....                                 | 132 |
| IV.2.3 | Contraintes.....                                             | 133 |
| IV.2.4 | Modèle d'optimisation retenu .....                           | 134 |
| IV.3   | Optimisation multi-objectif à essaim de particule.....       | 135 |
| IV.3.1 | Problèmes d'optimisation multi-objectifs .....               | 135 |
| IV.3.2 | Optimalité de Pareto .....                                   | 135 |
| IV.3.3 | Surface des compromis ou front de Pareto.....                | 136 |
| IV.3.4 | Résolution d'un problème d'optimisation multi-objectif ..... | 137 |
| IV.4   | Méthode d'optimisation par essaim de particules.....         | 137 |
| IV.4.1 | Extension du PSO pour les problèmes multi-objectifs.....     | 144 |
| IV.4.2 | Algorithme multi-objectif DNPSO-LNL .....                    | 145 |
| IV.5   | Application.....                                             | 148 |
| IV.6   | Conclusion.....                                              | 150 |
|        | Conclusion Générale.....                                     | 152 |
|        | Perspectives.....                                            | 154 |
|        | Références Bibliographiques.....                             | 156 |

# Liste des figures

## Chapitre I

### Synthèse bibliographique

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.1</b> : Principe de l'usinage par électroérosion [2].....                                                                                    | 8  |
| <b>Figure I.2</b> : Histoire de l'évolution de la micro-EDM avec d'autres processus [5] .....                                                            | 9  |
| <b>Figure I.3</b> : Processus de micro-électroérosion assisté par champ magnétique [8].....                                                              | 12 |
| <b>Figure I.4</b> : Principe du procédé d'usinage par électroérosion [15].....                                                                           | 13 |
| <b>Figure I.5</b> : Schéma d'une machine à décharge électrique [15].....                                                                                 | 13 |
| <b>Figure I.6</b> : EDM à enfonçage conventionnel [15].....                                                                                              | 14 |
| <b>Figure I.7</b> : (a) Électroérosion à fil, (b) Usinage par micro-électroérosion [15] .....                                                            | 15 |
| <b>Figure I.8</b> : Outils de différentes sections et pièces produites [15] .....                                                                        | 15 |
| <b>Figure I.9</b> : Quelques applications de l'usinage EDM [15] .....                                                                                    | 16 |
| <b>Figure I.10</b> : Configuration électrique de l'usinage par décharge électrique [16] .....                                                            | 17 |
| <b>Figure I.11</b> : Principaux facteurs des conditions d'usinages [17] .....                                                                            | 18 |
| <b>Figure I.12</b> : Usinage à fond [17] .....                                                                                                           | 19 |
| <b>Figure I.13</b> : L'usinage de trous traversant [17] .....                                                                                            | 20 |
| <b>Figure I.14</b> : Usinage durant l'ébauchage [17].....                                                                                                | 20 |
| <b>Figure I.15</b> : Usinage durant la finition [17] .....                                                                                               | 21 |
| <b>Figure I.16</b> : Polarité dans les conditions d'usinage [17] .....                                                                                   | 21 |
| <b>Figure I.17</b> : Polarité inversée entre l'électrode cuivre et la pièce(acier) [17] .....                                                            | 22 |
| <b>Figure I.18</b> : Polarité inversée entre l'électrode Graphite et la pièce [17].....                                                                  | 22 |
| <b>Figure I.19</b> : Polarité inversée entre l'électrode tungstène et la pièce [17].....                                                                 | 23 |
| <b>Figure I.20</b> : Mécanisme d'enlèvement de la matière par EMD [34] .....                                                                             | 24 |
| <b>Figure I.21</b> : Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [20].....                                                    | 24 |
| <b>Figure I.22</b> : Phase de claquage d'après [20] .....                                                                                                | 25 |
| <b>Figure I.23</b> : Phase de décharge d'après [20] .....                                                                                                | 26 |
| <b>Figure I.24</b> : Phase de fin de décharge d'après [20].....                                                                                          | 27 |
| <b>Figure I.25</b> : Phase de post-décharge d'après [20] .....                                                                                           | 27 |
| <b>Figure I.26</b> : Schéma de principe d'une micro-EDM de zircone non conductrice utilisant une<br>électrode d'assistance en cuivre adhésive [54] ..... | 30 |
| <b>Figure I.27</b> : Schéma de principe de l'EDM à sec [65] .....                                                                                        | 31 |
| <b>Figure I.28</b> : Machine EDM [68] .....                                                                                                              | 33 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I.29</b> : Amélioration de la précision de l'EDM [64] ..... | 35 |
| <b>Figure I.30</b> : Modèle d'économie [64] .....                     | 36 |
| <b>Figure I.31</b> : Modèle de gain de temps [64] .....               | 38 |
| <b>Figure I.32</b> : Entre fer latéral et entrefer frontal [73] ..... | 42 |

### Chapitre III

## Modélisation des performances de l'usinage par décharges électrique

|                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure III.1</b> : Mesure l'écart d'une surface par rapport à une hauteur moyenne Ra (rugosité moyenne) .....  | 109 |
| <b>Figure III .2</b> : Répartition des résidus entre MRR et I, V, Ton et autocorrélation.....                     | 110 |
| <b>Figure III.3</b> : Nuage de points des résidus représentant la relation entre MRR et I, V, Ton                 | 110 |
| <b>Figure III.4</b> : Nuage d'observations sur les valeurs ajustées de MRR et I, V, Ton.....                      | 111 |
| <b>Figure III.5</b> : Histogramme montrant la distribution de I, V, Ton et MRR .....                              | 112 |
| <b>Figure III.6</b> : Répartition des résidus entre TWR et I, V et Ton avec autocorrélation .....                 | 113 |
| <b>Figure III.7</b> : Nuage de points des résidus représentant la relation entre TWR et I, V, Ton                 | 114 |
| <b>Figure III.8</b> : Nuage d'observations sur les valeurs ajustées de TWR et I, V, Ton.....                      | 114 |
| <b>Figure III.9</b> : Histogramme des valeurs dépendantes TWR, I, V, Ton.....                                     | 115 |
| <b>Figure III.10</b> : Répartition des résidus Ra, I, V et Autocorrélation de Ton .....                           | 116 |
| <b>Figure III.11</b> : Nuage de points des résidus représentant la relation entre Ra et I, V, Ton...              | 117 |
| <b>Figure III.12</b> : Nuage d'observations sur les valeurs ajustées de Ra et I, V, Ton .....                     | 118 |
| <b>Figure III.13</b> : Histogramme des résidus Ra et I, V, Ton .....                                              | 119 |
| <b>Figure III.14</b> : Variation du taux d'enlèvement de matière expérimental et prévu .....                      | 123 |
| <b>Figure III.15</b> : Variation des valeurs expérimentale et taux d'usure prévu de l'outil .....                 | 124 |
| <b>Figure III.16</b> : Variation d'expérimentale et prédite rugosité de surface.....                              | 124 |
| <b>Figure III.17</b> : Variation du taux d'enlèvement de matière prédite par la régression linéaire multiple..... | 125 |
| <b>Figure III.18</b> : Basé sur V et Ton, taux d'usure anticipé TWR .....                                         | 126 |
| <b>Figure III.19</b> : Variation de la rugosité de surface Ra prédite par régression linéaire multivariée .....   | 127 |

---

Chapitre IV

# Optimisation des paramètres d'usinage par décharges électriques

---

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure IV.1:</b> Paramètres de processus d'EDM [149] .....                                        | 132 |
| <b>Figure IV.2 :</b> Écarts de forme de surface [153].....                                           | 134 |
| <b>Figure IV.3 :</b> Front de Pareto [172].....                                                      | 136 |
| <b>Figure IV.4 :</b> Algorithme du PSO [163].....                                                    | 140 |
| <b>Figure IV.5 :</b> Topologies des essaims : (a) en cercle, (b) en rayon, (c) en étoile [157] ..... | 143 |
| <b>Figure IV.6 :</b> Arbre régulier [158].....                                                       | 144 |
| <b>Figure IV.7 :</b> Résultats obtenus MRR-TWR.....                                                  | 149 |

# Liste des Tableaux

## Chapitre III

### Modélisation des performances de l'usinage par décharges électrique

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tableau III. 1</b> Règles de décision.....               | 100 |
| <b>Tableau III. 2</b> Analyse de variance (ANOVA) MRR ..... | 113 |
| <b>Tableau III. 3</b> Analyse de variance (ANOVA) TWR ..... | 116 |
| <b>Tableau III. 4</b> Analyse de variance (ANOVA) Ra .....  | 120 |
| <b>Tableau III. 5</b> Résultats prédit (MRR, TWR, Ra).....  | 121 |
| <b>Tableau III. 6</b> Résultats (Erreur, Précision) .....   | 122 |

## Chapitre IV

### Optimisation des paramètres d'usinage par décharges électriques

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| <b>Tableau IV. 1</b> MOPSO parameters ..... | 148 |
| <b>Tableau IV. 2</b> Solutions limites..... | 149 |

# ***Introduction générale***

# Introduction générale

L'usinage en EDM (Electrical Discharge Machining), également connu sous le nom d'usinage par étincelage électrique a fait l'objet de nombreuses études depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, est une technologie de fabrication avancée utilisée pour traiter des matériaux durs et conducteurs électriques. Cette méthode d'usinage se distingue par son aptitude à façonner des pièces de haute précision, même dans des matériaux extrêmement durs tels que les métaux durs, les alliages spéciaux et les céramiques techniques.

L'usinage en EDM repose sur le principe de l'érosion électrique, où des décharges électriques contrôlées sont utilisées pour enlever de petites quantités de matière de la pièce à usiner, créant ainsi des formes complexes et des finitions de surface exceptionnelles.

L'EDM est particulièrement prisé dans l'industrie de la fabrication pour plusieurs raisons. Tout d'abord, il permet de travailler avec des matériaux extrêmement durs qui seraient difficiles à usiner avec des méthodes conventionnelles, comme le fraisage ou le tournage. De plus, cette technique ne nécessite pas de contact direct entre l'outil et la pièce, ce qui réduit considérablement l'usure de l'outil et permet de maintenir une haute précision dimensionnelle. L'usinage en EDM est également capable de produire des détails fins et des contours complexes avec une grande précision, ce qui en fait une méthode de choix pour la fabrication de composants pour l'industrie aérospatiale, automobile, médicale et électronique.

En outre, l'EDM offre une grande flexibilité en termes de matériaux, de formes et de tailles de pièces à usiner. Les opérations d'usinage en EDM peuvent être automatisées, ce qui améliore l'efficacité de la production et réduit les coûts de main-d'œuvre. Cependant, il est important de noter que l'usinage en EDM peut être un processus relativement lent par rapport à d'autres méthodes d'usinage, ce qui en fait une option privilégiée pour des pièces à haute valeur ajoutée nécessitant une précision exceptionnelle.

La compréhension des propriétés du matériau dur à usiner, telles que sa dureté, sa conductivité électrique, ou sa température de fusion joue un rôle crucial dans la détermination d'électrode appropriée. Les électrodes en cuivre sont couramment utilisées, mais des électrodes spéciales, telles que celles en graphite, peuvent être nécessaires pour certains matériaux. La surveillance de l'usure de l'électrode pendant le processus d'usinage peut, efficacement, aider à améliorer les performances du procédé. Une usure excessive peut affecter la précision de l'usinage. Ainsi, la modification des paramètres d'usinage lors des opérations peut prolonger la durée de vie de l'électrode. Le contrôle précis de la température du liquide de refroidissement ou de la zone de décharge peut être utile pour éviter la fusion du matériau et l'adhérence de

matériau à l'électrode. Cependant, l'examen des copeaux générés pendant le processus est essentiel car l'obtention des copeaux anormaux peuvent indiquer des problèmes de paramètres. Ajustez en conséquence.

Le mécanisme de l'élimination de matière en EDM (Electrical Discharge Machining) n'est pas clair. En effet, des études supplémentaires sont nécessaires pour l'élucider, en particulier compte tenu du manque de preuves scientifiques empiriques pour la construction et la validation des modèles EDM existants. Cela explique l'augmentation actuelle de la recherche sur les techniques expérimentales connexes. L'un des aspects les plus étudiés de ce type d'usinage est l'optimisation de la sélection de ces paramètres, ce qui nécessite des études approfondies dans le domaine de l'optimisation. La littérature examine comment divers paramètres d'usinage affectent les performances de l'EDM. Dans ce sens, la plupart des études sont concentré sur les effets des paramètres de l'EDM sur les performances de l'usinage, telles que le courant, la tension et la durée de l'impulsion.

De même, aucune amélioration de l'EDM ne peut être liée à une amélioration expérimentale, il est donc nécessaire de se tourner vers des études scientifiques basées sur les techniques mathématiques approuvées pour accélérer la production et obtenir des résultats développés dans le domaine. La majorité des travaux de recherche, menés dans ce sujet, étaient presque communs dans l'aspect générale et la méthodologie suivie. Ils sont similaires dans la mesure de données d'entrée et des conclusions de sortie.

Dans ces études, les chercheurs n'ont pas abordé, par exemple, l'amélioration des performances géométriques de l'usinage par décharge électrique (EDM), ce qui a attiré notre attention sur ce sujet. En effet, nous avons choisi d'aborder le sujet de l'EMD à travers l'étude de modélisation et d'optimisation des performances technologiques de ce procédé d'usinage. L'appui solide de notre choix résidait dans l'utilité des résultats souhaités de cette étude dans le domaine industrielle et économique.

Aujourd'hui, les problèmes d'optimisation prennent un classement important dans les sciences mathématiques et d'ingénierie. Ce genre de problèmes se trouve dans des divers domaines d'activité à savoir : l'industrie, le traitement d'image, la conception de systèmes mécaniques, l'électronique ou la recherche opérationnelle. Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver les solutions minimisant (ou maximisant) un critère d'optimisation présenté sous la forme d'une fonction-objectif en se limitant par les seuils de capacité présentés par des équations dites de contraintes. Certains problèmes d'optimisation sont qualifiés de difficiles, leurs solutions ne peuvent être trouvées par des méthodes

déterministes et leur résolution dans un temps raisonnable nécessite l'utilisation des algorithmes sophistiqués, méthodes probabilistes ou stochastiques.

L'apparition de ces méthodes d'optimisation remonte au dernier tiers du vingtième siècle. Conçues spécialement pour la résolution des problèmes non linéaires, ces méthodes permettent l'obtention d'une valeur approchée de la solution optimale en un temps raisonnable. Elles ont pour objectif la résolution d'un ensemble de problèmes dans différents domaines sans savoir à des informations supplémentaires des fonction-objectifs tels que les dérivés. Les méthodes stochastiques sont souvent inspirées de processus naturels qui relèvent de la physique (l'algorithme du recuit simulé), de la biologie de l'évolution (les algorithmes génétiques) ou encore de l'éthologie (les algorithmes de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaim particulaire).

L'optimisation par essaim de particule PSO (Particle Swarm Optimization) est l'une des méthodes stochastiques modernes, basée fondamentalement sur des algorithmes évolutionnaires inspirés du comportement social des animaux évoluant en groupe. Elle utilise, dans son processus de recherche, une population de solutions candidates afin d'obtenir la solution optimale d'un problème donné. Cette métaheuristique a été proposée, pour la première fois, en 1995 par James Kennedy socio-psychologue et Russell Eberhart ingénieur électricien. Depuis son apparition, cette méthode est connue par la simplicité de son algorithme et son efficacité particulière.

L'intérêt général des études présentées dans cette thèse réside dans la sélection optimale des paramètres d'usinage en EDM. C'est la détermination des paramètres de base du procédé d'usinage par décharges électriques pour les matériaux durs permettant d'obtenir des résultats de haute qualité prolongeant la durée de vie de l'outil et maximisant le taux d'enlèvement de matière tout en assurant une bonne rugosité de surface. Ce but global s'articule sur deux piliers. Le premier consiste à la modélisation des performances techno-économiques du processus d'EDM qui est basée sur l'étude des relations, de type cause-effet, entre les paramètres d'entrée de ce procédé d'usinage (conditions d'usinage) et les paramètres de sortie (performances d'usinage).

Cette phase d'étude d'investigation expérimentale permet, à son issue, de déterminer les relations exactes entre les conditions d'usinage tels que la tension, le courant, la vitesse d'avance et la durée de l'impulsion et les performances d'usinages à améliorer. L'établissement de ces modèles mathématiques est réalisée à l'aide des méthodes d'analyse régressif. L'obtention de modèles fiables permet, à la fois, de comprendre le processus d'usinage et de prédire les valeurs de performances obtenues. Le deuxième pilier de cette thèse consiste à construire le problème

d'optimisation des conditions d'usinage et de le résoudre afin d'obtenir les solutions optimales améliorant les performances d'usinage visées. La difficulté principale de cette partie réside dans la mise en application de l'algorithme du PSO car notre problème est présenté sous forme de problème d'optimisation multi-objectif non linéaire. Pour vaincre cette difficulté, l'algorithme standard du PSO est étendu en se basant sur la notion d'optimalité de Pareto. Cette technique permet d'obtenir l'ensembles des compromis possibles présenté sous la forme du front de Pareto. A la fin de cette partie, nous fournissons une méthodologie d'analyse des solutions compromis qui aide le décideur à choisir l'une des solutions Pareto optimales obtenues.

Nous avons effleuré les principaux aspects de l'usinage en EDM des matériaux durs. Au fil des développements technologiques, cette méthode continue d'évoluer, offrant ainsi des solutions de plus en plus avancées pour la fabrication de pièces complexes et exigeantes dans diverses industries. La sélection et l'optimisation des paramètres de l'EDM pour les matériaux durs nécessitent une combinaison de connaissances matérielles, d'expérimentation, de surveillance et d'ajustements continus. Une approche systématique permettra d'obtenir les meilleurs résultats en termes de qualité d'usinage, de productivité et de coûts.

En plus à une introduction générale et une conclusion générale, l'organisation du présent document est basée sur quatre chapitres :

- Le chapitre I : présente une synthèse bibliographique qui comporte une exploration détaillée du processus de micro-électro-érosion par décharge électrique (micro-EDM).
- Le chapitre II : présente une revue littérature consacrée à l'exploration sélectionnée et détaillée des travaux d'expérimentation, de modélisation et d'optimisation étudiés par certains chercheurs.
- Le chapitre III : décrit la modélisation des performances de l'usinage par décharges électrique en utilisant la régression linéaire multiple et ces fonctionnalités pour la sélection des modèles mathématiques de prédiction.

Le chapitre IV : consacré à l'optimisation des paramètres de l'usinage par décharges électriques proposons la combinaison des algorithmes à essaim de particules standard et la notion d'optimalité de Pareto.

## Chapitre I

# *Synthèse bibliographique*

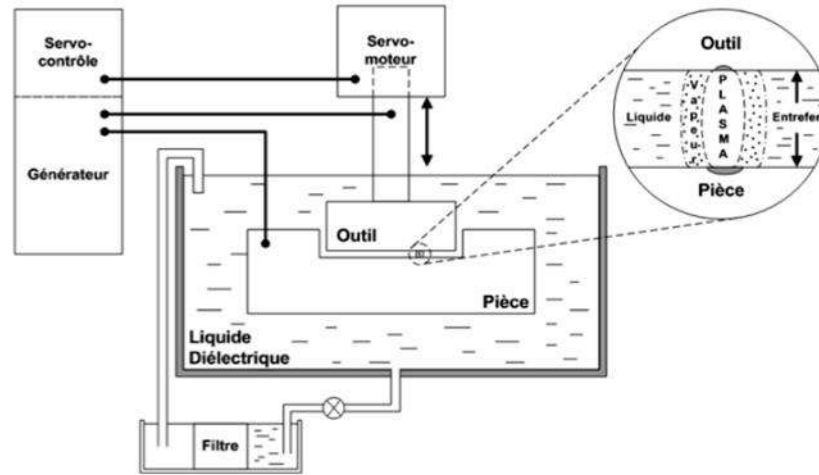
## I.1 Introduction

Ces dernières années, la pratique des matériaux durs est difficile à usiner, en raison de ses brillantes propriétés technologiques, est largement utilisée dans divers secteurs des industries manufacturières modernes. En raison de ses excellentes propriétés et de son comportement dans ces applications encore plus difficiles, sa transformation et son traitement présentent des problèmes qui limitent la précision et l'augmentation des coûts de production.

Par conséquent, l'usinage d'un tel matériau de manière efficace est un défi. L'usinage par électroérosion (EDM) est une solution brillante à ce problème, il est généralement utilisé pour usiner des matériaux difficiles à usiner, des alliages à haute résistance et résistants à la température et la fabrication d'outils et de matrices pour l'usinage de cavités et le contre-façonnage et la coupe, aussi longtemps car le matériau de travail est conducteur [4].

Le procédé d'enlèvement de matière par électroérosion a été proposé pour la première fois par les époux Lazarenko [1] en 1943. Son principe, illustré de manière schématique dans la Figure I.1, consiste à créer une série de décharges électriques « sparks », dans l'espace entre une électrode-outil et la pièce à usiner, immergées dans un diélectrique liquide. Cet espace inter électrode est appelé entrefer ou « gap » en anglais. La création d'un canal de plasma, entre l'outil et la pièce, parcouru par un courant électrique important entraîne la fusion de la matière aux extrémités de la pièce et de l'outil. L'extinction du plasma provoque l'éjection de la matière en fusion, le creusement de la pièce, ainsi que l'usure de l'outil. En multipliant le nombre de décharges tout en déplaçant l'outil par rapport à la pièce, on parvient à creuser celle-ci de manière importante. Pour favoriser un rythme régulier de décharges, l'entrefer est maintenu sous un flux de liquide diélectrique, ont le renouvellement permet l'évacuation des débris de matières resolidifiées après l'éjection.

La qualité des décharges dépend, en effet, de la valeur de l'entrefer et de son état physique, notamment du recouvrement du caractère isolant du liquide. Le processus décrit ci-dessus ne dure que de quelques centaines de nanosecondes à plusieurs dizaines de microsecondes. C'est pourquoi, pour entretenir les décharges, il est nécessaire d'utiliser des circuits électroniques rapides et un asservissement de position de l'outil par rapport à la pièce.



**Figure I.1** : Principe de l'usinage par électroérosion [2]

L'électroérosion est un procédé d'enlèvement de matière permettant d'usiner tous types de matériaux à condition qu'ils puissent conduire l'électricité. La seule condition à assurer étant la création d'un canal de plasma entre les électrodes. Des matériaux conducteurs, semi-conducteurs (silicium), ou peu conducteurs (céramiques telles que :  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN [3]) peuvent être mis en œuvre.

Dans ce chapitre, nous présenterons une synthèse bibliographique, comprend quelques définitions du processus de fabrication utilisant la décharge électroérosion (EDM).

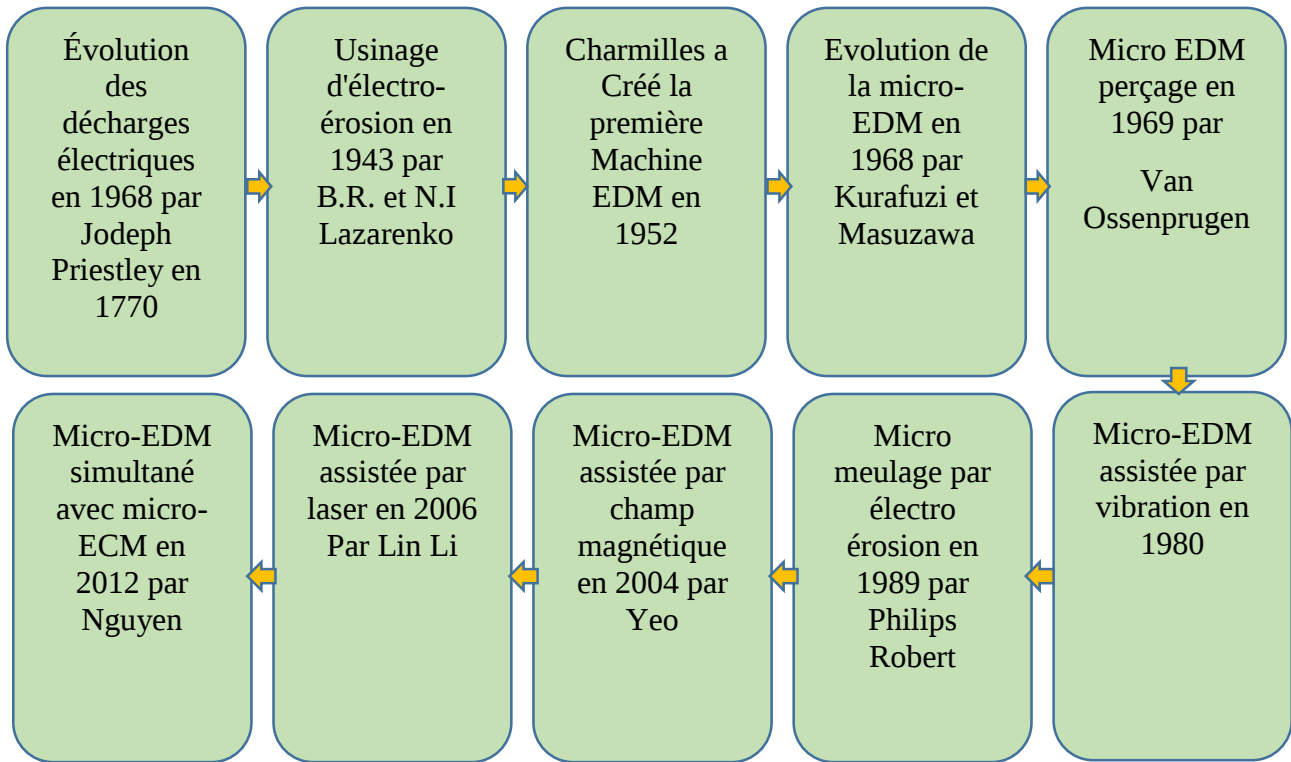
## I.2 L'électroérosion

### I.2.1 Histoire et parcours du processus micro-EDM

En 1952, le fabricant Charmilles a créé la première machine utilisant le procédé d'usinage par électroérosion et a été présentée pour la première fois à l'exposition européenne de la machine-outil en 1955. Pièce en alliage de 50 microns d'épaisseur. Par conséquent, le forage micro-EDM a également vu le jour en 1969. L'évolution de l'EDM à fil dans les années 1970 était due à de puissants générateurs, à de nouvelles électrodes d'outils à fil, à de meilleurs concepts mécaniques. Pour une intelligence artificielle meilleure et un rinçage plus efficace, une quantité importante d'efforts de recherche a été concentrée sur le développement du procédé de micro-usinage.

L'exigence de composants miniatures avec une bonne précision et d'excellentes caractéristiques de finition a amené la micro-EDM assistée par vibration, le meulage micro-EDM, le processus de micro-EDM assisté par champ magnétique respectivement dans le scénario du micro-usinage. L'usinage séquentiel par micro-électroérosion combiné au laser a

également été introduit en 2006. Enfin, la micro-EDM et la micro-EDM simultanées entrent dans le scénario du micro-usinage en 2012. Une initiative a été prise pour représenter l'évolution de la micro-EDM et de ses procédés dans le monde de l'usinage par électroérosion comme le montre la Figure I.2. [5]



**Figure I.2 :** Histoire de l'évolution de la micro-EDM avec d'autres processus [5]

### I.2.2 Inconvénients de la micro-EDM

Les inconvénients du processus de micro-EDM sont nombreux. L'un des principaux inconvénients de l'utilisation de la micro-EDM est le faible taux d'enlèvement de métal et la température de fusion élevée pour les matériaux difficiles à couper. Cela peut être dû au fait que les mauvaises conditions de rinçage dans l'espace de décharge provoquent l'usure de l'outil dans le processus de micro-EDM, ce qui peut restreindre le processus d'usinage au milieu de l'opération. Pour cette raison, la fourniture de la fabrication de multiples caractéristiques avec une précision dimensionnelle élevée est un problème problématique.

L'usure de l'outil est causée par l'énergie thermique qui se forme dans l'espace de décharge. Des décharges anormales causées par une chaleur excessive entre les couches resolidifiées de la pièce et l'électrode de l'outil ont entraîné une inexactitude dimensionnelle et

des surfaces inégales. Des recherches sont en cours pour l'utilisation de matériaux non conducteurs dans le processus de micro-EDM. Le coût de mise en place du processus de micro-EDM est très élevé en raison de l'utilisation répétée d'un nouveau matériau d'électrode d'outil causée par l'érosion du matériau. En raison d'une usure excessive de l'outil due à un rinçage indécemment et à un courant de crête élevé, la dépense globale d'usinage est assez élevée. Il est nécessaire de disposer d'arrangements de rinçage appropriés dans l'espace entre les électrodes entre l'outil et la pièce pendant l'intervalle de micro-EDM.

### **I.2.3 Avancement de la micro-EDM assistée par champ magnétique**

Il existe un besoin d'hybridation du processus de micro-EDM avec la force de champ magnétique pour augmenter l'efficacité d'usinage du processus d'usinage par micro-électroérosion. La combinaison de la micro-EDM et du champ magnétique est une avancée majeure dans le domaine du micro-usinage. Un nouveau procédé est développé et testé pour améliorer le taux d'enlèvement de matière dans la micro-EDM assistée par champ magnétique pour les matériaux non magnétiques.

Les électrodes de la pièce étaient orientées pour favoriser la direction du courant traversant la pièce, tandis qu'un champ magnétique externe était appliqué de manière à produire une force de Lorentz (force électromagnétique) dans le bain de fusion. Des actions de décharge simples ont été effectuées sur une pièce non magnétique en titane de grade 5 pour étudier les effets mécaniques de la force de Lorentz sur l'enlèvement de matière. Le MRR est augmenté jusqu'à près de 50 % et l'efficacité de l'érosion a augmenté de plus de 54 %, ce qui est plus que prévu selon les travaux qui ont été effectués jusqu'à présent [6].

Cela peut être dû au fait que le champ magnétique généré dans la région de décharge aide à éliminer les débris de la zone d'usinage, ce qui donne en outre de meilleures activités de rinçage et donc les décharges anormales sont arrêtées. En fin de compte, cela contribue à l'augmentation de l'efficacité d'usinage et du MRR. La vitesse de réponse lente du système d'asservissement conduit souvent à un court-circuit et à une décharge d'arc.

Pour gérer cette limitation, un système d'axe de suspension magnétique a été utilisé pour améliorer la fréquence de réponse. En utilisant l'algorithme PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) incrémental, la fréquence de réponse axiale (Z) atteint 150 Hz, la précision de position radiale et axiale est obtenue avec 5  $\mu\text{m}$  et 2  $\mu\text{m}$ . Et le micro EDM est réalisé à travers l'axe de suspension magnétique en course de 1,3 mm [7]. L'application du champ magnétique au processus de micro-EDM a amélioré l'élimination des débris et donc le rapport d'aspect des micro-trous [8].

### **I.2.4 Applications industrielles de la micro-EDM**

Le développement d'une nouvelle fonctionnalité par un processus de micro-usinage sans aucune application industrielle est comme un outil de coupe à point unique sans aucune application d'usinage dans un tour. Ainsi, il existe une offre d'applications industrielles de produits, caractéristiques fabriquées par procédé micro-EDM. Les applications prometteuses ne se limitent pas seulement à l'usinage de matériaux durs pour les micro-moules et les outils de coupe, mais également à la réalisation de structures difficiles à réaliser telles que les buses d'injection de carburant [9], les trous de filière pour les fibres synthétiques, les dispositifs électroniques et optiques, les actionneurs micro mécatroniques. Pièces et micro-outils pour la fabrication de ces dispositifs [10,11].

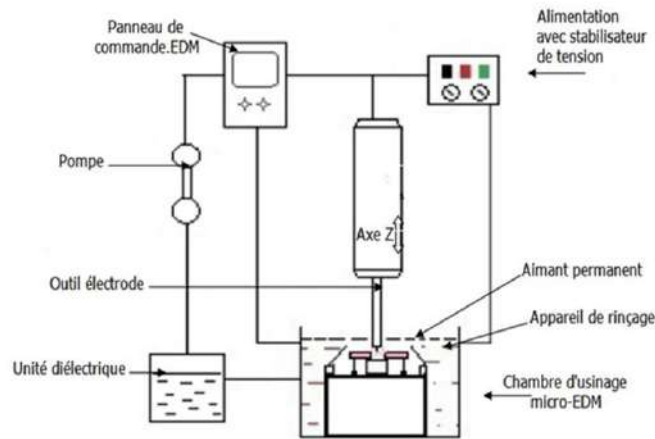
Les stylets micro sphériques pour les têtes de pal page des micro MMT (Système de Test Magnétique Microscopique) sont fabriqués par un procédé hybride de collage et d'assemblage sur micro EDM [12]. Un réseau de 400 trous traversant de tailles identiques a été fabriqué avec succès sur une plaque d'acier inoxydable d'une épaisseur de 30  $\mu\text{m}$  par un processus de micro-EDM par lots ascendants. Utilisant les deux effets du pompage et de la gravité, le micro-EDM batch ascendant facilite l'évacuation des débris et réduit la génération de rejets secondaires anormaux [13].

Avec le perçage micro-EDM, des micro-trous coniques inversés (le diamètre de sortie du trou usiné est supérieur au diamètre d'entrée) sont produits et ont une vaste application dans les buses d'injection de carburant diesel pour améliorer les émissions des moteurs diesel sans avoir besoin d'une pression d'injection plus élevée ou d'un diamètre plus petit des trous. Un masque d'ombre en acier inoxydable avec un rapport d'aspect élevé et une haute résolution a été développé à l'aide de Micro-EDM en mode batch. Les trous de pulvérisation des buses d'injecteur diesel en matériau 18CrNi8 ont été usinés par un procédé micro-EDM avec une plus grande précision et une efficacité d'usinage élevée [9].

Un processus de fabrication en mode batch de masque d'ombre en acier inoxydable avec un rapport d'aspect élevé et une haute résolution pour les OTFT (transistors à effet de champ à film mince organique) est développé. Ce masque perforé en acier inoxydable pourrait être utilisé comme méthode de structuration pour fabriquer des TFT (transistor à film mince) au penta cène [10].

Le kérosène est utilisé comme diélectrique pour la production par lots de micro-trous de masse en acier inoxydable. Mais de l'eau déionisée aurait pu être utilisée comme diélectrique pour de meilleurs résultats en termes d'efficacité d'usinage. Un nouvel entraînement d'alimentation à servocommande ultrasonique piézoélectrique pour les applications

industrielles de système d'usinage par décharge électrique utilisant la technologie ultrasonique piézoélectrique est développé. Le servo-variateur développé est validé avec succès en EDM [14].

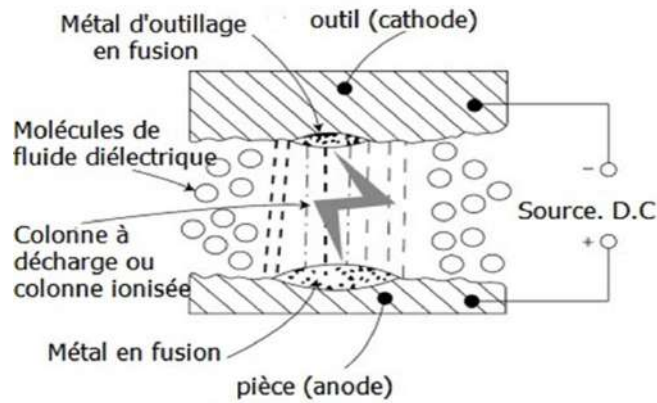


**Figure I.3 :** Processus de micro-électroérosion assisté par champ magnétique [8]

La figure I.3 montre un diagramme schématisé d'un processus de micro-EDM assisté par champ magnétique dans lequel des aimants permanents sont utilisés pour générer la force de Lorentz magnétique requise. Des étincelles se produisent dans la région du plasma entourée d'un champ magnétique, ce qui entraîne une plus grande élimination de matière de la pièce. Très peu de travaux de recherche ont été menés en utilisant la micro-EDM assistée par champ magnétique. La plupart des travaux de recherche sont basés sur des aimants permanents à force de champ magnétique fixe. Des niveaux variables de champs magnétiques doivent être incorporés dans d'autres travaux de recherche pour analyser plus en détail les effets sur le taux d'enlèvement de matière et la rugosité de surface.

### I.3 Principes du processus EDM

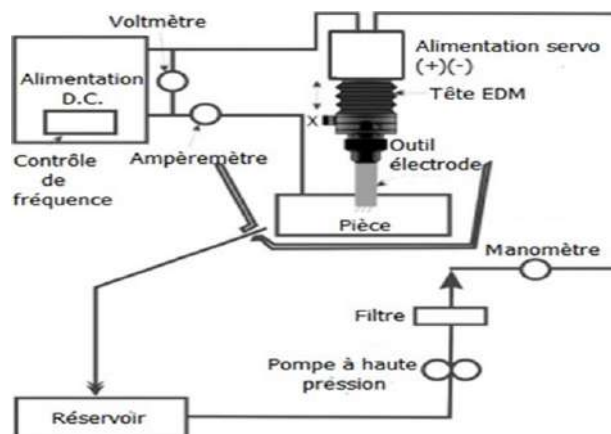
L'EDM est un processus thermoélectrique utilisé pour éliminer le métal via une série d'étincelles discrètes entre le métal et la pièce. Dans l'EDM, une étincelle électrique est utilisée comme outil de coupe pour couper (éroder) la pièce et produire la pièce finie à la forme requise. L'électricité circule à travers l'électrode sous la forme d'une onde carrée attaquant les points de moindre résistance sur la pièce. (figure I.4).



**Figure I.4 :** Principe du procédé d'usinage par électroérosion [15]

Dans l'EDM, l'enlèvement de matière est effectué en appliquant un courant haute fréquence impulsion (ON/OFF) à travers l'électrode jusqu'à la pièce. Cela enlève (érode) de très petits morceaux de matériau de la pièce à usiner à une vitesse contrôlée. L'électrode et la pièce sont toutes deux immergées dans un liquide appelé fluide diélectrique. La pièce est normalement l'anode et l'outil est la cathode. Un mince espace d'environ 0,025 mm est maintenu entre l'outil et la pièce par un système d'asservissement. Un outil de forme appropriée avec mécanisme d'alimentation est utilisé pour obtenir la forme et la taille appropriées du travail.

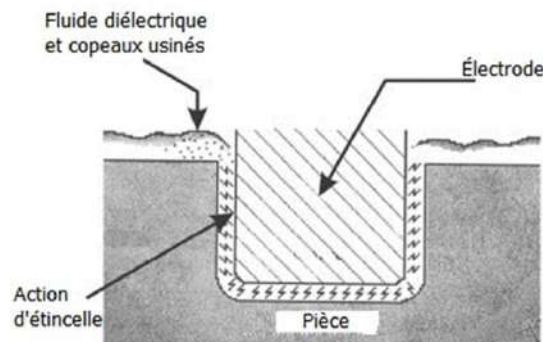
Le diélectrique utilisé dans le système circule est filtré en continu. Aucun meulage ou finition n'est nécessaire après l'opération EDM. Un diagramme schématique du processus EDM est présenté à la Figure I. 5.



**Figure I.5 :** Schéma d'une machine à décharge électrique [15]

L'EDM est essentiellement de trois types selon l'électrode utilisée, à savoir l'EDM par enfonçage, l'EDM à coupe par fil et le broyeur micro-EDM. L'électroérosion par enfonçage se compose d'une électrode et la pièce est immergée dans un liquide isolant. L'électrode et la pièce

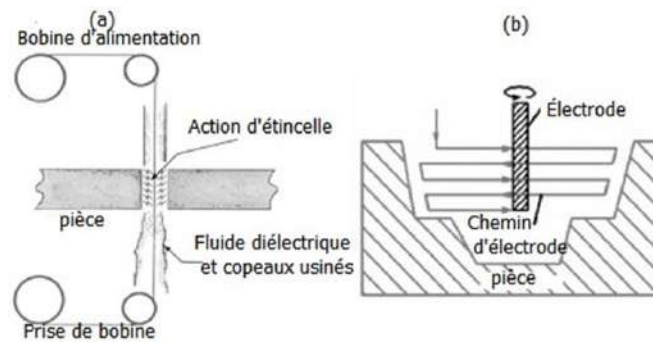
sont connectées à une alimentation électrique dans laquelle l'électrode est réalisée selon la forme requise. La machine utilise la forme de l'électrode pour éroder la forme inverse de la pièce. C'est l'un des processus de précision importants normalement utilisés pour fabriquer des cavités de moule. L'agencement EDM par enfonçage est présenté à la Figure I.6. Dans cette forme d'EDM, l'électrode est configurée comme la cavité souhaitée dans la pièce. La vitesse d'usinage dépend du type de matériau, de la surface du matériau à usiner et des conditions d'usinage [15].



**Figure I.6 :** EDM à enfonçage conventionnel [15]

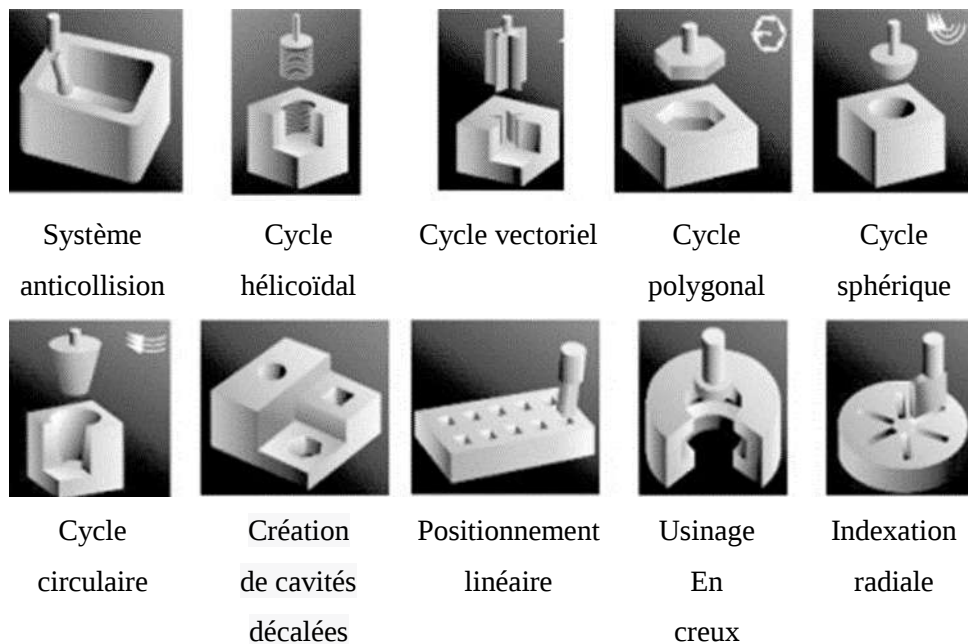
Dans l'électroérosion à fil, l'électrode est un fil est acheminée à travers un guide diamanté supérieur et inférieur. Les diamètres de fil varient généralement de 0,05 à 3,0 mm. L'électrode n'est utilisée qu'une seule fois est jetée après utilisation. Le contrôle du fil est effectué par une commande numérique par ordinateur, qui programme le chemin du fil. Cette forme d'EDM est la plus précise et peut être utilisée pour l'usinage d'ébauche et de finition. Un schéma de l'EDM à fil mobile est présenté par la Figure I.7.

Un troisième type d'EDM récemment développé est le broyeur micro EDM dans lequel l'électrode a des diamètres de 50  $\mu\text{m}$  à 10 mm. L'électrode complexe est remplacée par un jeu d'électrodes standardisées mobiles. Le processus est similaire à l'EDM par enfonçage conventionnel. Le micro-électroérosion complète l'électroérosion à fil en offrant la possibilité de percer des avant-trous à travers des matériaux traités thermiquement et du carbure. Il peut être utilisé pour l'usinage de cavités profondes jusqu'à 10 mm avec des parois presque verticales d'un cône de  $1,5^\circ$ , ainsi que pour l'usinage de nervures très fines ( $< 0,1$  mm). Cette technologie est une application importante dans le micro-usinage.



**Figure I.7:** (a) Électroérosion à fil, (b) Usinage par micro-électroérosion [15]

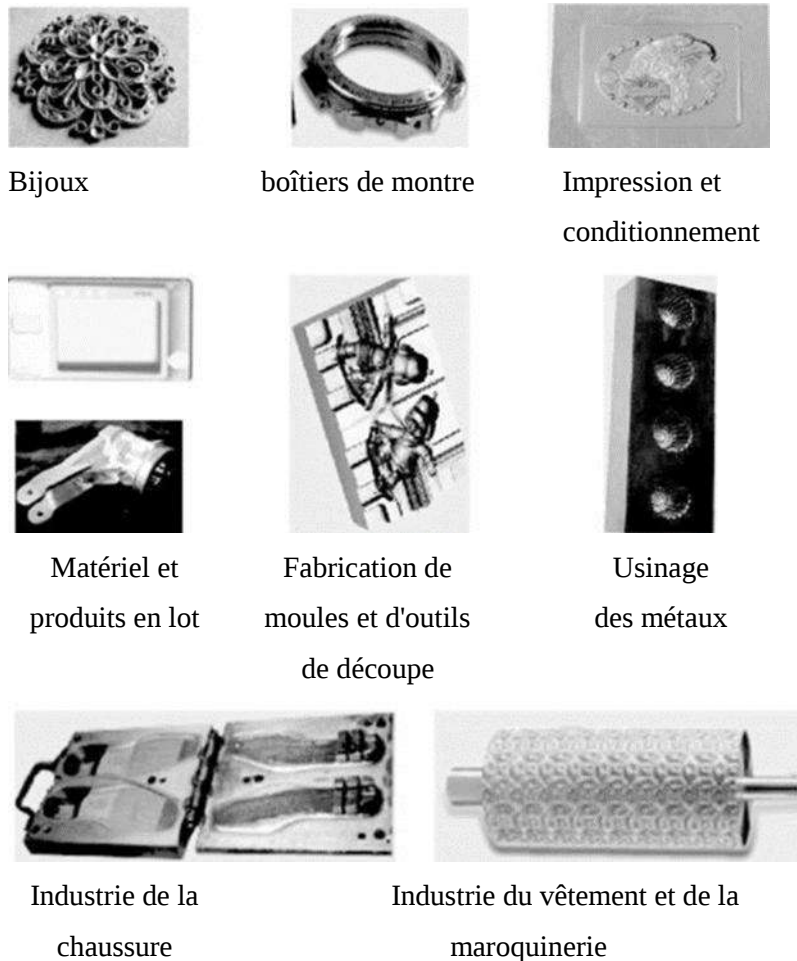
Le processus EDM est utilisé pour fabriquer différents types de pièces. La machine EDM est programmée pour des cycles d'usinage verticaux, orbitaux, vectoriels, polygonaux, sphériques, circulaires, directionnels, hélicoïdaux, coniques, rotatifs et indexés. Ces différents cycles d'usinage sont utilisés pour la fabrication des pièces, et sont présentés sur la Figure I.8.



**Figure I.8 :** Outils de différentes sections et pièces produites [15]

L'EDM présente de nombreux avantages par rapport à l'usinage conventionnel. En utilisant l'EDM, un matériau électriquement conducteur peut être coupé et a été utilisé pour l'usinage de pièces trempées et traitées thermiquement. Des profils complexes et élaborés peuvent couper avec précision, plus rapidement et à moindre coût. Des coupes fines et fragiles ont été réalisées facilement et sans bavures. L'EDM est principalement utilisé dans les industries de l'outillage et des matrices. Aujourd'hui, l'EDM fait partie intégrante du processus de

fabrication des prototypes et des pièces de production. Certaines des applications de l'EDM sont présentées dans la Figure I.9.



**Figure I.9 :** Quelques applications de l'usinage EDM[15]

#### I.4 Conditions d'usinage

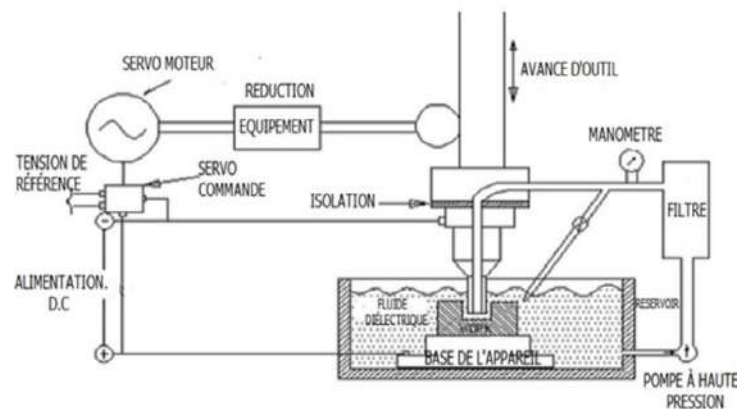
L'EDM se compose d'une électrode et d'une pièce immergées dans un liquide isolant tel que l'huile d'hydrocarbure comme fluide diélectrique. L'électrode et la pièce sont connectées à une alimentation pulsée, qui génère un potentiel électrique entre l'électrode et la pièce. Lorsque l'électrode s'approche de la pièce, une rupture diélectrique se produit dans le fluide, formant un canal de plasma, avec apparition d'une petite étincelle. Au fur et à mesure que le métal de base s'érode, l'éclateur augmente par la suite. L'électrode est ensuite abaissée automatiquement par la machine afin que le processus puisse se poursuivre sans interruption.

Plusieurs étincelles se produisent par seconde et le matériau de la pièce prend la forme inverse de l'électrode. Le processus d'enlèvement de matière dans EDM se déroule par érosion contrôlée à travers une série d'étincelles électriques. L'étincelle produite entre l'outil et la pièce

à usiner génère une grande quantité de chaleur dans la zone d'étincelles, faisant fondre et vaporisant le matériau de la pièce à usiner.

Pendant le processus d'usinage, l'outil et la pièce sont immergés dans un fluide diélectrique (kérosène/huiles EDM/eau déminéralisée/hydrocarbures/huiles minérales). Un espace approprié, connu sous le nom d'éclateur, est maintenu entre les surfaces de l'outil et de la pièce à l'aide d'un servo-contrôleur. L'outil est considéré comme une cathode et la pièce comme une anode. Lorsqu'une tension suffisante est générée entre l'outil et la pièce, l'outil commence à émettre des électrons. Ces électrons accélèrent vers la pièce chargée positivement. Dans ce processus, les électrons émis entrent en collision avec les molécules diélectriques présentes dans l'espace entre les électrodes.

Il en résultera la formation d'un canal plasma dans l'espace inter-électrodes. Ce canal de plasma permet au courant de circuler entre deux électrodes et une étincelle est générée dans l'entrefer. Cela produit une grande quantité de température (8000 à 12000°C) qui fond et évapore également certaines parties de la pièce à usiner et du matériau de l'outil (figure I.10) [16].



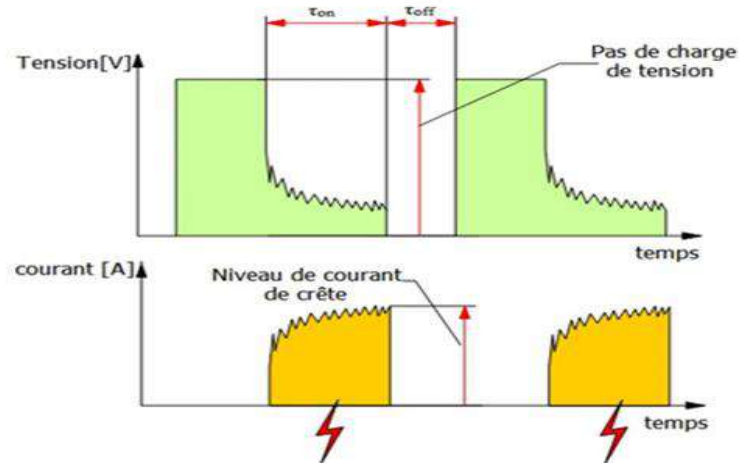
**Figure I.10 :** Configuration électrique de l'usinage par décharge électrique [16]

#### I.4.1 Principaux éléments des conditions d'usinage

La situation de l'usinage est modifiée par la tension, le courant, la durée, etc. de l'étincelle. La vitesse d'usinage, la taille des cratères, etc. peuvent changer en variant les "conditions d'usinage". (figure I.11) [17].  $T_{on}$  ( $\tau_{on}$ ) : Cela est également appelé "largeur d'impulsion". Cela signifie la durée de l'étincelle. Elle est exprimée en unité de  $\mu\text{Sec}$  (microsecondes : 1 / millionième de seconde) et est réglée dans une plage d'environ 0 à 1000  $\mu\text{Sec}$ .  $T_{off}$  ( $\tau_{off}$ ) : Cela est également appelé "temps d'arrêt". Les décharges EDM génèrent des étincelles intermittentes. Cela signifie le temps d'arrêt après chaque étincelle. Il est réglé dans une plage d'environ 0 à 1000  $\mu\text{s}$ .

Tension ouverte : Cela signifie la tension appliquée entre l'électrode et la pièce à usiner. Elle est exprimée en unité de V (volt) et réglée dans une plage d'environ 50 à 300 V.

Valeur de courant de crête : Cela signifie la valeur du courant électrique de l'étincelle. Elle est exprimée en unité d'A (Ampère) et est réglée dans une plage d'environ 0 à 500 A.



**Figure I.11 :** Principaux facteurs des conditions d'usinages [17]

#### I.4.2 Éléments de performance d'usinage

Les performances d'usinage varient en fonction des conditions d'usinage. Les éléments représentant les performances d'usinage sont les suivants :

- Taux d'enlèvement de matière
- Taux d'usure de l'électrode
- Rugosité de la surface usinée
- Écart de décharge

##### a) Taux d'enlèvement de matière

Le "taux d'enlèvement de matière" fait référence à la vitesse à laquelle l'étincelle enlève le matériau. Les unités utilisées sont [g/min] (poids) et [mm<sup>3</sup>/min] (volume). En général, dans des conditions d'usinage à "taux d'enlèvement de matière" élevé, les étincelles deviennent intenses et la surface devient rugueuse [17].

##### b) Taux d'usure des électrodes

Le "taux d'usure de l'électrode" fait référence à la quantité d'usure de l'électrode par rapport à la quantité de matériau enlevé de la pièce, exprimée en ratios. Le pourcentage (%) est utilisé comme unité de mesure. En général, des conditions d'usinage avec un faible "rapport d'usure de l'électrode" ont tendance à ralentir le taux d'enlèvement de matière."

**c) Rugosité de surface**

"La 'rugosité de surface d'usinage' fait référence à l'état de l'inégalité de la surface après que la matière a été enlevée par des étincelles. L'unité [Ra] est utilisée. Plus la rugosité de surface d'usinage est faible, plus le taux d'enlèvement devient faible."

**d) Écart de décharge électrique**

Le terme "Écart de décharge" fait référence à la quantité de jeu entre l'électrode et la pièce à usiner. L'unité [mm] est utilisée. "L'écart de décharge" augmente en présence d'étincelles puissantes.

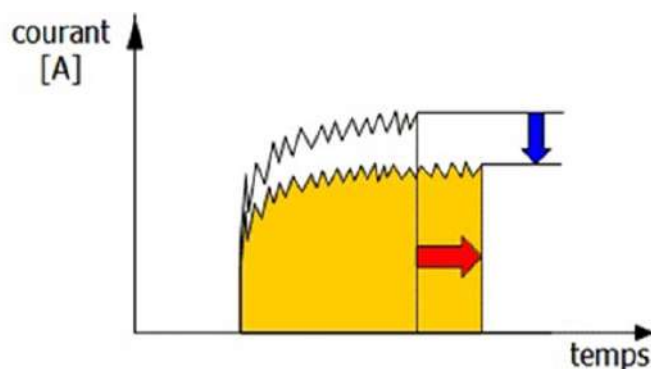
Ces quatre éléments varient en fonction des paramètres des conditions d'usinage. De nombreuses sortes de conditions d'usinage sont créées et utilisées en fonction des besoins liés aux différents types d'usinage [17].

**I.4.3 Adaptation du régime d'usinage**

Les conditions d'usinage par EDM (Électroérosion à Fils) sont établies en fonction de l'objectif de l'usinage. Les conditions d'usinage appropriées varient en fonction du type d'usinage, tel que l'usinage de fond, l'usinage de trous traversant, l'usinage grossier, la finition, etc.

**a) Conditions d'usinage appropriées pour l'usinage en fond de trou**

Étant donné qu'une forme est usinée avec un petit nombre d'électrodes dans le cas de l'usinage en fond de trou, des conditions d'usinage présentant un faible taux d'usure des électrodes sont nécessaires. En plus de réduire le niveau de courant de crête, le " $\tau_{on}$  ( $\tau_{on}$ ) est allongé (figure I.12) [17].



**Figure I.12 : Usinage à fond [17]**

### b) Conditions d'usinage appropriées pour l'usinage de trous traversant

Dans l'usinage de trous traversant, le "taux d'usure des électrodes n'est pas important et la condition d'usinage qui attache une grande importance au "taux d'élimination" est requise. En plus de raccourcir " $\tau_{on}$  ( $\tau_{on}$ )", le "niveau de courant de crête" est augmenté (figure I.13) [17].

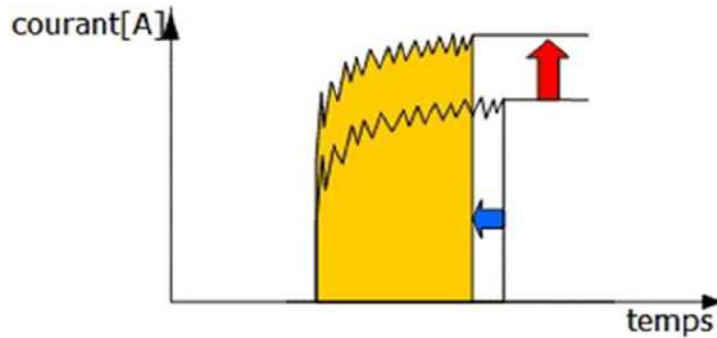


Figure I.13 : L'usinage de trous traversant [17]

### c) Conditions d'usinage adaptées à l'usinage grossier " l'ébauche "

Dans l'usinage grossier. En « ébauche », des conditions d'usinage qui accordent une grande importance au "taux d'enlèvement de matière" plutôt qu'à la "rugosité de la surface usinée" sont nécessaires. En plus d'allonger " $\tau_{on}$  ( $\tau_{on}$ )", le "niveau de courant de crête" est augmenté. (figure I.14) [17].

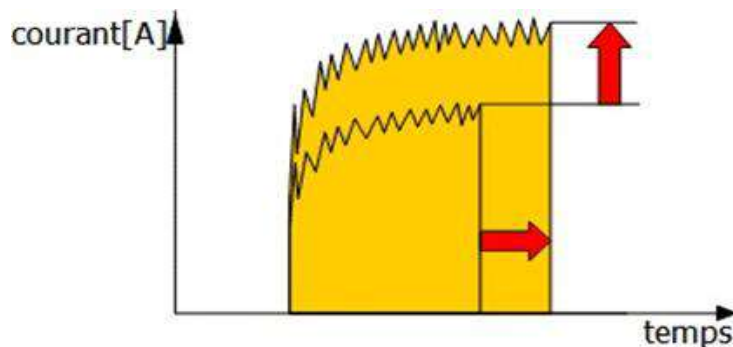
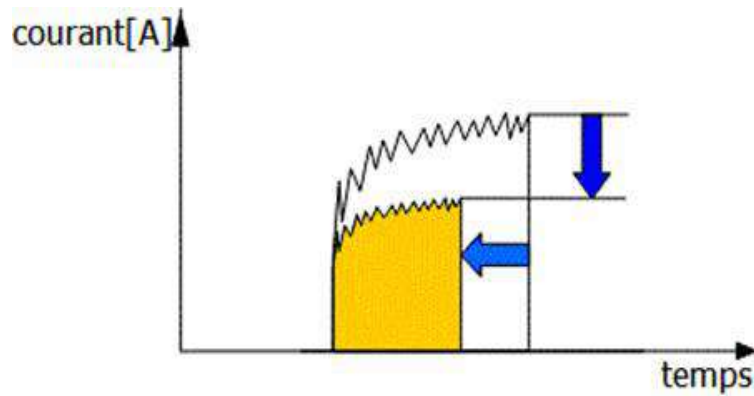


Figure I.14 : Usinage durant l'ébauchage [17]

### d) Conditions d'usinage adaptées à la finition

Dans la finition, des conditions d'usinage qui accordent une grande importance à la "rugosité de la surface usinée" plutôt qu'au "taux d'enlèvement de matière" sont nécessaires. En plus de raccourcir " $\tau_{on}$  ( $\tau_{on}$ )", le "niveau de courant de crête" est réduit. (figure I.15) [17].

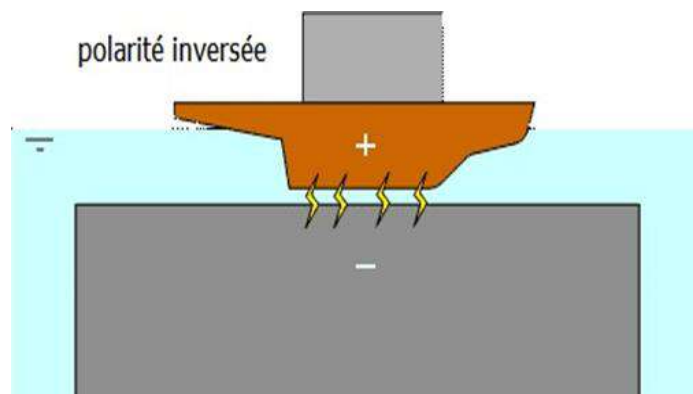


**Figure I.15 :** Usinage durant la finition [17]

#### e) La polarité

En EDM, qui élève l'étincelle en appliquant une tension entre la pièce à usiner et l'électrode, l'une d'entre elles est définie comme "+" (plus) et l'autre comme "-" (moins). Les éléments de ce réglage sont appelés "polarité" dans les conditions d'usinage. Le réglage des électrodes en "-" et des pièces à usiner en "+" est appelé "polarité positive", et le réglage des électrodes en "+" et des pièces à usiner en "-" est appelé "polarité inverse".

La "polarité" appropriée varie en fonction des matériaux de l'électrode et de la pièce à usiner ainsi que du contenu de l'usinage. (figure I.16) [17].



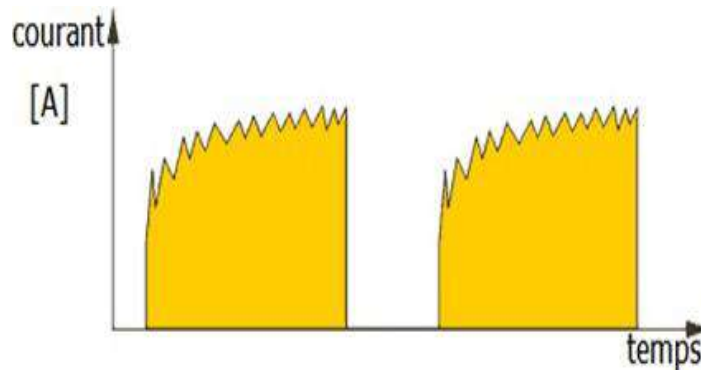
**Figure I.16 :** Polarité dans les conditions d'usinage [17]

#### f) Conditions d'usinage en fonction des matériaux

Les conditions d'usinage appropriées varient en fonction des matériaux des électrodes et de la pièce à usiner.

**1) Matériau de l'électrode : Cuivre - Matériau de la pièce à usiner : Acier**

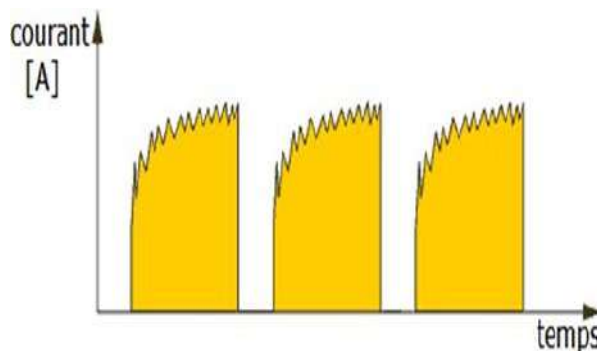
La polarité est généralement "polarité inverse" pour des opérations allant de l'usinage grossier à la finition. L'effet de réduction de l'usure de l'électrode en allongeant " $\tau_{on}$ " devient plus important par rapport à d'autres matériaux d'électrode. Lorsque la rugosité de la surface finie est fine, la "polarité" est réglée sur "positive" afin de permettre un usinage efficace avec de petites impulsions de décharge. (figure I.17) [17].



**Figure I.17 :** Polarité inversée entre l'électrode cuivre et la pièce(acier) [17]

**2) Matériau de l'électrode : Graphite - Matériau de la pièce à usiner : Acier**

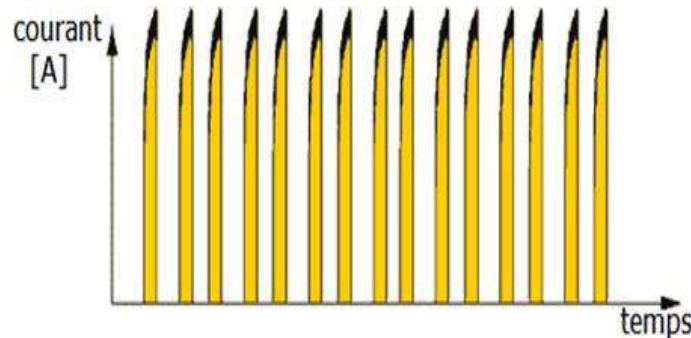
"La "polarité" est généralement "polarité inverse" pour des opérations allant de l'usinage grossier à la finition. Étant donné que l'impulsion de décharge a tendance à se produire plus facilement et qu'il est facile de se retrouver dans une condition anormale causée par la décharge partiellement concentrée, " $\tau_{on}$ " est réglé plus court en comparaison avec le cuivre en tant que matériau d'électrode. (figure I.18) [17].



**Figure I.18 :** Polarité inversée entre l'électrode Graphite et la pièce [17]

### 3) Matériau de l'électrode : Cuivre tungstène - Matériau de la pièce à usiner : Carbure cémenté"

Étant donné que le carbure cémenté est difficile à dissoudre par la chaleur, il convient à l'usinage par choc thermique. Par conséquent, la "polarité" est réglée sur "positive", " $\tau_{on}$ " est réglé extrêmement court et le "niveau de courant de crête" est réglé extrêmement élevé. (figure I.19).



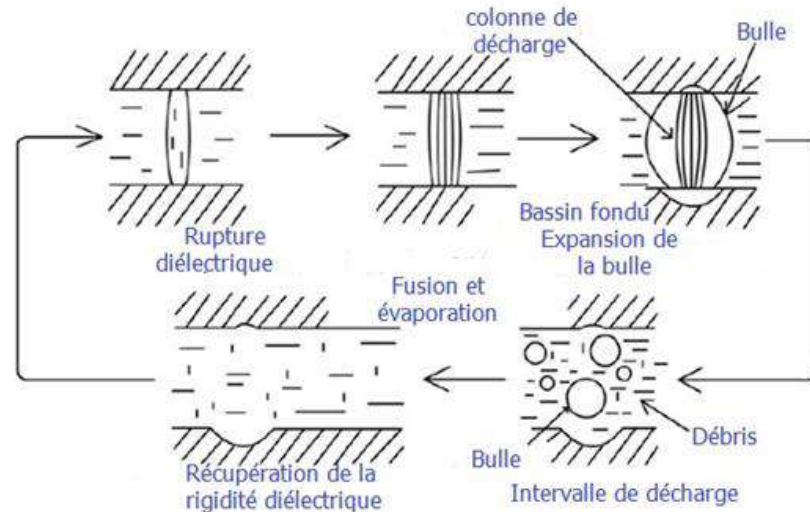
**Figure I.19 :** Polarité inversée entre l'électrode tungstène et la pièce [17]

#### I.5 Mécanisme d'enlèvement de la matière

Joseph [18] décrit le processus d'usinage par EE en cinq étapes. Celles-ci seront illustrées par une représentation de la tension et du courant aux bornes de l'outil et de la pièce. Il est important de noter qu'en raison de la courte durée de vie du plasma, de sa petite taille et de sa disposition entre deux surfaces très rapprochées, il est difficile d'utiliser les méthodes de diagnostics classiques des plasmas (sonde de Langmuir par exemple).

D'autres méthodes doivent être utilisées comme par exemple la spectroscopie d'émission optique, ce qui a été fait notamment par les travaux [19,20,21] ainsi que [22,23]. L'imagerie avec des caméras ultra-rapides de type ICCD est aussi un autre moyen de caractérisation des micro-plasmas utilisé en  $\mu$ EE. Ainsi Schumacher et al. [24] sont parvenus à imager les différentes phases de la décharge.

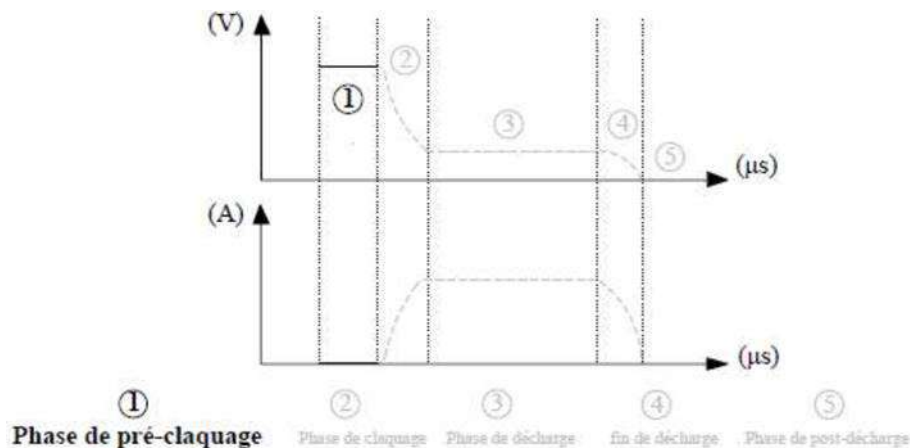
Le mécanisme décrit ci-dessous correspond aux ordres de grandeur en EE avec un générateur de décharge à transistors (1.3.2). A notre connaissance, il n'existe pas de description équivalente en  $\mu$ EE avec des ordres de grandeur expérimentaux (figure I.20).



**Figure I.20 :** Mécanisme d'enlèvement de la matière par EMD [34]

### I.5.1 Phase de pré-claquage

La phase de pré-claquage (figure I.21) correspond à l'application d'une différence de potentiel entre les deux électrodes avec une tension de l'ordre de 30 à 250 V [25] de façon à créer un champ électrique puissant (1 à 10MV/m avec un entrefer de 10 à 100  $\mu\text{m}$ ) propice à l'ionisation locale du diélectrique.



**Figure I.21 :** Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [20]

Pendant cette phase naissent et se propagent des canaux gazeux ionisés appelés amorces (streamers) qui croissent d'une manière extrêmement rapide et désordonnée d'une électrode à une autre [26,27]. Lorsque l'eau déionisée sert de diélectrique, les petites bulles d'hydrogène créées par électrolyse semblent jouer un rôle important [28,29]. En effet les amorces se propagent plus facilement dans un milieu gazeux.

Dans le cas d'un diélectrique de type huile, comme il n'y a pas de bulles d'hydrogène, le mécanisme de claquage pourrait être favorisé par des particules présentes dans l'entrefer [30]. Schumacher [24] indique que des ponts de particules (bulles, débris métalliques, etc.) entre les électrodes définissent la position des futurs arcs, ce qui expliquerait les différences constatées expérimentalement entre une décharge unique et une série de décharges.

### I.5.2 Phase de claquage

La transition entre un canal faiblement ionisé et un canal fortement ionisé est un phénomène mal connu. Ainsi, d'après [19], lorsque l'amorce atteint l'électrode opposée, toute l'énergie accumulée entre les deux électrodes se décharge en un laps de temps réduit (une période de temps plus courte). La tension chute brusquement sur une durée de 100 ns "nanoseconde" et le courant augmente fortement (figure I.22). Celui-ci peut atteindre plusieurs Ampères. Le champ électrique devient si intense que les électrons des atomes sont émis au point de contact et font le chemin inverse jusqu'au point de départ. C'est à ce moment-là, entre 100 et 200 ns après le claquage, que le courant atteint son maximum.

Les électrons sont accélérés dans le canal formé par l'amorce et conduisent à l'augmentation du canal ionisé. Ce « retour » d'amorce composé d'électrons semble être à la base d'un élargissement du canal de décharge, qui permet de faire passer un courant important. Il s'accompagne d'un craquement semblable à celui d'un éclair avec une onde de choc. Le diamètre du canal s'élargit rapidement. La température de l'arc électrique atteint 1,8 eV "électronvolt" (20000 K) et la densité d'électron  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

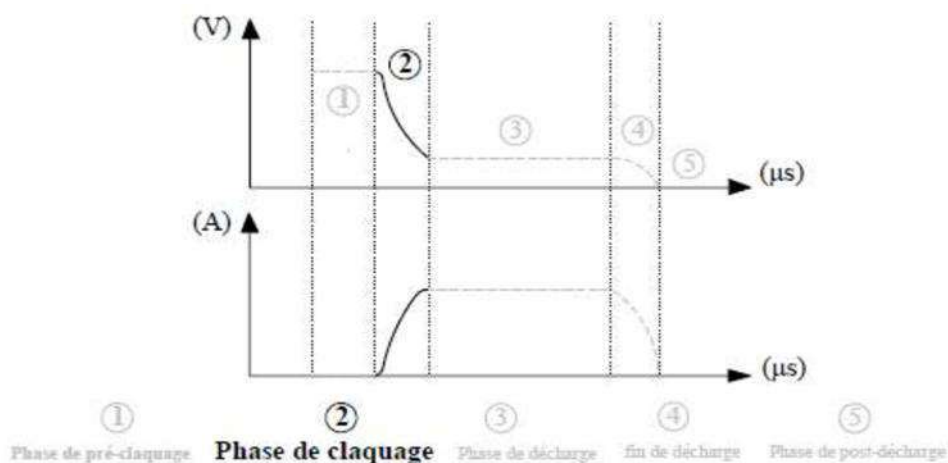
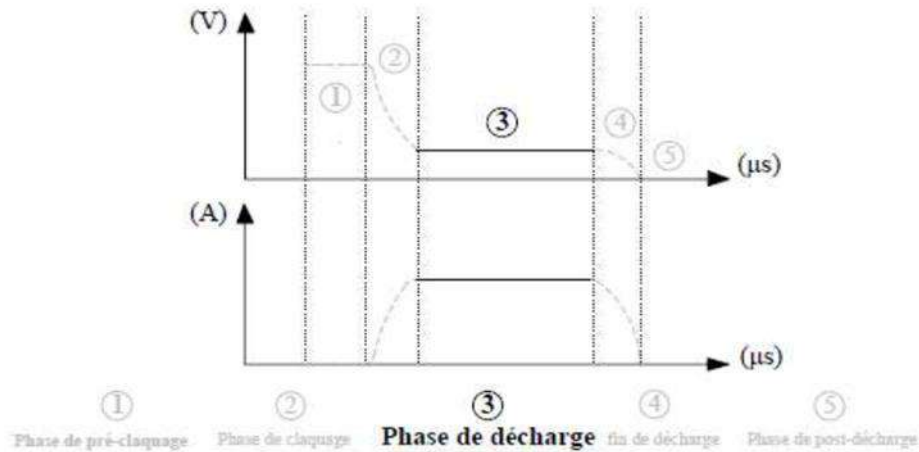


Figure I.22 : Phase de claquage d'après [20]

### I.5.3 Phase de décharge

D'après [19,23,31], un plasma se développe très rapidement (50ns) après le claquage et se stabilise. Le courant reste relativement constant (figure I.23). La lumière émise est particulièrement intense pendant les 500 ns puis elle faiblit. Son intensité dépend du courant.

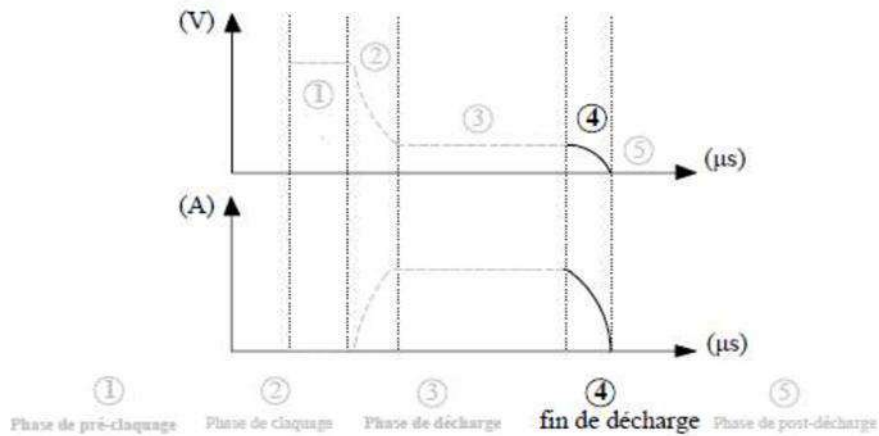


**1Figure I.23 :** Phase de décharge d'après [20]

Pour un entrefer de 10-100  $\mu\text{m}$ , la décharge stimule un volume dont le diamètre est de l'ordre de 100-200  $\mu\text{m}$ . Celui-ci croît légèrement pendant la décharge. La densité de courant est de  $10^6$  à  $10^7$   $\text{A. cm}^{-2}$ . La chute de tension est localisée près de chaque électrode sur une couche de 10 nm "nanomètre" d'épaisseur correspondant à la longueur de Debye avec un champ électrique intense de l'ordre de  $10^6$   $\text{V.cm}^{-1}$ . Des bulles de vapeur sont générées aussi bien dans l'eau que dans l'huile et sont dues à la chaleur libérée par le plasma.

### I.5.4 Fin de décharge

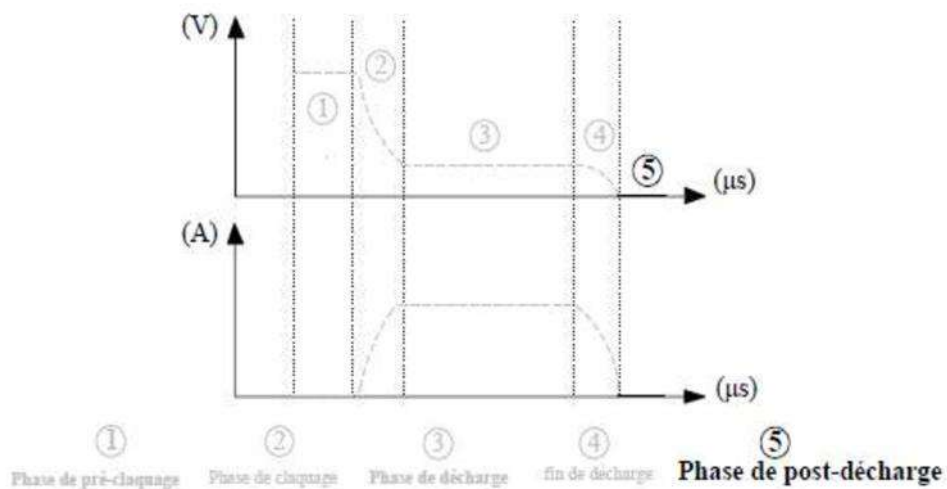
A la fin de la décharge, le plasma n'est plus alimenté et le courant est coupé entre les deux électrodes : la jonction est rompue (figure I. 24). Le plasma implose, conséquence de la pression du diélectrique et disparaît rapidement. De la lumière est souvent émise après la décharge par des particules métalliques incandescentes avec un rayonnement du type corps noir. Leur température mesurée par [19] est d'environ 2200 K, ce qui démontre qu'elles sont à l'état liquide au début de la post-décharge.



**Figure I.24 :** Phase de fin de décharge d'après [20]

### I.5.5 Phase de post-décharge

Le diélectrique joue un rôle très important durant cette phase (figure I.25). Il permet de diminuer la température des électrodes entre les impulsions et d'évacuer les débris fondus. Le milieu liquide confère une forme sphérique aux débris. Leur taille varie d'une expérience à l'autre et dépend des paramètres mais elle est typiquement d'une dizaine de  $\mu\text{m}$  [32]. La vitesse d'évacuation des débris dépend du flux de diélectrique. Cette évacuation doit être efficace car sinon la conductivité électrique du milieu sera trop faible et le claquage suivant sera perturbé. Le contrôle du processus deviendra alors difficile, ce qui conduira à un usinage de mauvaise qualité. Il est bien connu qu'ajouter une vibration par oscillation et/ou une rotation de l'électrode de travail permet une évacuation plus efficace des débris [33].



**Figure I.25 :** Phase de post-décharge d'après [20]

## **I.6 Types de l'électroérosion**

Certaines des variantes du processus EDM qui peuvent être modifiées pour les applications de micro-fabrication sont la micro-EDM, l'EDM à fil (WEDM -Wire Electrical Discharge Machining), l'EDM à sec [35,36].

### **I.6.1 Electroérosion à fil (WEDM)**

L'usinage par décharge électrique à fil (WEDM) a été introduit car il a la capacité de couper des formes complexes et des géométries extrêmement coniques avec des performances élevées, notamment en termes de précision, d'efficacité et de stabilité [37, 38, 39]. L'opération WEDM a un mécanisme d'enlèvement de matière très similaire à celui du processus EDM, sauf que WEDM utilise un fil de bobinage comme électrode [40, 41]. Le fonctionnement Micro-EDM utilise un fil de très petit diamètre ( $\varnothing$  20-50  $\mu$ m) comme électrode pour couper une largeur de coupe étroite dans la pièce. Le fil est tiré à travers la pièce à partir d'une bobine d'alimentation sur un mécanisme de rembobinage. Une décharge se produit entre le fil-électrode et la pièce en présence d'un flot de fluide diélectrique. Les paramètres de contrôle les plus importants pour ce processus sont le courant de décharge, la capacité de décharge, la durée d'impulsion, la fréquence d'impulsion, la vitesse du fil, la tension du fil.

### **I.6.2 Micro-EDM**

Le fonctionnement EDM a déjà été développé dans les micro-industries, car les micro-outils délicats peuvent usiner la surface de la pièce sans aucune déviation ni casse. Micro-EDM suit le principe similaire de la technologie EDM conventionnelle. Cependant, il existe quelques différences entre ces deux usinages en termes de circuiterie. L'EDM utilise un circuit de relaxation de capacité de résistance (relaxation RC) tandis que le micro-EDM utilise un circuit d'impulsion RC. Dans le circuit de relaxation RC, le courant et la tension sont généralement supposés constants dans le processus de modélisation. Cependant, en réalité, pour le circuit de relaxation RC, le courant et la tension sont contrôlés à un niveau prédéfini tout au long de la durée d'activation de l'impulsion.

En revanche, sur la base du processus de modélisation et de l'analyse paramétrique, le générateur d'impulsions RC pour une seule décharge montre que le courant et la tension ne sont maintenus à aucun niveau prédéfini. Toujours, le générateur d'impulsions RC dépend de l'état de charge du condensateur à tout instant. Le type de circuit à impulsions RC est connu pour avoir un faible taux d'enlèvement de matière (MRR) car il peut produire une très petite quantité d'énergie de décharge. La micro-EDM est particulièrement développée pour fabriquer des composants de taille comprise entre 1 et 999  $\mu$ m. Par conséquent, afin de produire des produits

de micro-géométries de haute précision et de haute précision, la micro-EDM est un type d'usinage approprié [42,43].

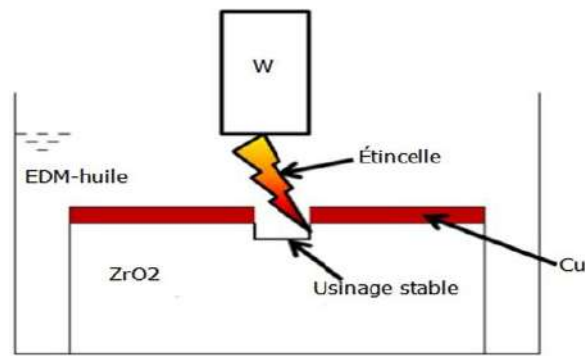
### **I.6.3 EDM de matériaux non conducteurs**

Matériaux capables de fournir une conductivité électrique minimale de 0,1 Scm-1 peut être traité par EDM. Ainsi, des matériaux comme les métaux et les céramiques conductrices sont capables de subir ce processus [44,45]. Les chercheurs appliquent l'EDM et la micro-EDM pour usiner les céramiques car elles sont difficiles à usiner avec les techniques de coupe conventionnelles [46, 47]. Mais, pour que le processus d'usinage soit continu, la céramique doit être conductrice. Ainsi, l'une des solutions consiste à créer un composite avec des dopants tels que le nitrure de titane (TiN) ou le carbure de tungstène (WC) sur la céramique.

Une autre alternative consiste à créer un composé conducteur en incorporant les particules de céramique dans une matrice métallique. Une autre approche consiste à utiliser l'électroérosion assistée par ultrasons. L'énergie ultrasonore peut aider à créer une érosion par étincelle et entraîner la formation de fissures qui provoquent un écaillage [48,49]. Les céramiques non conductrices ont également été usinées avec succès par EDM en utilisant la méthode de l'électrode auxiliaire (AEM) (figure I.26) avec quelques modifications apportées au processus qui est l'une des méthodes couramment utilisées [50-51].

Dans AEM, une couche conductrice est appliquée au-dessus de la céramique non conductrice afin de générer une étincelle entre la pièce et l'électrode de l'outil. Une température élevée autour du fluide diélectrique dégradera les chaînes polymères et créera des éléments carbonés à partir de chaînes polymères fissurées. Les éléments en carbone, ainsi que les débris conducteurs, recouvrent la surface de la céramique pour maintenir la conductivité [52,53]. Une couche conductrice est appliquée au-dessus de la céramique non conductrice afin de générer une étincelle entre la pièce et l'électrode de l'outil. Une température élevée autour du fluide diélectrique dégradera les chaînes polymères et créera des éléments carbonés à partir de chaînes polymères fissurées.

Les éléments en carbone, ainsi que les débris conducteurs, recouvrent la surface de la céramique pour maintenir la conductivité. Une couche conductrice est appliquée au-dessus de la céramique non conductrice afin de générer une étincelle entre la pièce et l'électrode de l'outil. Une température élevée autour du fluide diélectrique dégradera les chaînes polymères et créera des éléments carbonés à partir de chaînes polymères fissurées. Les éléments en carbone, ainsi que les débris conducteurs, recouvrent la surface de la céramique pour maintenir la conductivité.



**Figure I.26 :** Schéma de principe d'une micro-EDM de zircone non conductrice utilisant une électrode d'assistance en cuivre adhésive [54]

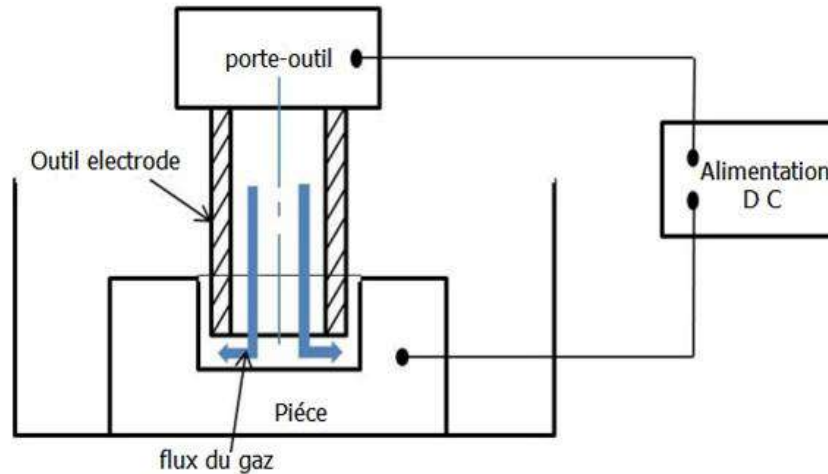
#### I.6.4 EDM à sec

Dans le processus EDM, le fluide diélectrique joue un rôle important afin d'éliminer les débris de l'espace d'usinage. De plus, le fluide diélectrique contribue également à améliorer l'efficacité de l'opération d'usinage ainsi qu'à améliorer la qualité et l'économie des pièces usinées. Les fluides diélectriques couramment utilisés sont des liquides à base d'huile minérale ou des huiles hydrocarbonées qui provoquent des risques d'incendie et des problèmes environnementaux. En effet, les déchets diélectriques générés lors de l'opération d'usinage sont très toxiques et non recyclables. De plus, lors de l'opération d'usinage, des fumées toxiques (CO et CH<sub>4</sub>) sont produits en raison de la décomposition chimique à haute température des huiles minérales.

Les fumées toxiques présentent également un risque pour la santé des opérateurs d'usinage [55]. Afin d'éviter ces problèmes, les chercheurs introduisent l'EDM à sec qui comprend le WEDM sec, le micro-EDM sec [56]. L'EDM à sec (figure I.27) est une méthode d'usinage verte dans laquelle l'électrode utilisée se présente sous la forme d'un tuyau et le gaz ou l'air circule à travers le tuyau au lieu du liquide en tant que fluide diélectrique qui élimine les débris de l'espace et refroidit la surface d'usinage [57]. En ce qui concerne le WEDM sec, également connu sous le nom de WEDM utilisant un fluide diélectrique sec, il s'agit d'une modification de l'opération WEDM à l'huile où le gaz est utilisé comme fluide diélectrique au lieu de liquide.

Le flux de gaz à haute pression aide à éliminer les débris et évite également un échauffement inutile du fil et de la pièce au niveau de l'espace de décharge. Une usure moindre de l'outil, une meilleure qualité de surface, des contraintes résiduelles plus faibles, une couche blanche plus fine et une plus grande précision d'usinage sont les principaux résultats de cette

technique à sec [58]. Cette technique à sec peut être applicable à presque toutes les opérations d'usinage au niveau micro [59].



**Figure I.27 :** Schéma de principe de l'EDM à sec [65]

Il y a des chercheurs qui ne sont pas d'accord avec l'idée d'utiliser le gaz au lieu du liquide comme fluide diélectrique. C'est parce que lorsque les étincelles se produisaient dans l'air, l'effet d'érosion serait très faible puisque la décharge électrique perd son énergie. De plus, la bulle de vapeur se dilate résultant de l'étincelle dans le fluide diélectrique et provoque l'augmentation de la pression dynamique du plasma. Cela est dû au fait que le fluide diélectrique environnant limite la croissance du plasma.

La bulle s'effondre et élimine le métal en fusion du cratère lorsque la température diminue pendant le temps d'arrêt. Même s'il existe des désaccords entre les chercheurs, l'EDM à sec a été introduit et signalé pour la première fois par la NASA en 1985 [60]. Les gaz couramment utilisés comme fluide diélectrique sont l'air atmosphérique, l'air comprimé, l'azote liquide, l'oxygène, gaz argon et hélium [61, 62].

Certaines recherches montrent que le taux d'élimination de matière (MRR) s'améliore lorsque l'oxygène est utilisé comme fluide diélectrique [63]. C'est parce que la réaction d'oxydation se produit avec l'apport d'oxygène gazeux qui augmente le volume d'enlèvement de travail pendant un cycle de décharge.

De plus, il n'y a pas de corrosion sur la surface d'usinage mais elle peut souffrir de rouille due à l'oxydation. Par rapport au WEDM conventionnel, la vibration du fil-électrode, la distance d'espacement plus étroite et la force de réaction du processus très négligeable dans le micro-EDM sec assistent ce processus pour permettre une grande précision dans la finition de la coupe.

Une vitesse d'usinage plus élevée et un taux d'usure des électrodes plus faible sont obtenus dans le fraisage EDM à sec. L'usinage tridimensionnel (3D) du carbure cémenté peut être effectué en utilisant le fraisage EDM à sec [64]. Un taux d'enlèvement de matière (MRR) plus élevé peut également être atteint dans l'EDM à sec lorsque la pièce est ajoutée avec la vibration ultrasonique. En effet, la vibration ultrasonore aide à chasser le métal en fusion des cratères [62].

La polarité est l'un des facteurs importants dans l'usinage par électroérosion à sec. Lorsque la polarité de l'électrode de l'outil est négative, le taux d'usure de l'outil est plus petit et le taux d'enlèvement de matière est plus élevé par rapport à la polarité positive.

La stabilité de l'opération d'usinage est maintenue lorsque l'outil est en rotation ou en mouvement planétaire. Le faible taux d'usure de l'électrode dans l'EDM à sec est dû au petit dommage physique de l'électrode de l'outil causé par la force réactive.

C'est parce que l'EDM sec est exempt de vaporisation de fluide diélectrique liquide lorsque la décharge se produit. De plus, l'adhésion des débris d'usinage sur l'électrode contribue à réduire l'usure de l'électrode [65].

## **I.7 Facteurs affectant la qualité d'usinage**

### **I.7.1 Machine EDM**

Pour commencer, nous expliquerons les principales parties de la machine EDM. La Figure I.28. Illustre les principales parties de la machine EDM.

La machine se compose de cinq parties principales :

- Axe contrôlé par CNC.
- Générateur électrique.
- Panneau de contrôle.
- Table de travail.
- Réservoir diélectrique avec filtre.

La première partie est l'axe commandé par CNC qui est équipé d'une électrode. Cette électrode doit être fabriquée à partir d'un matériau conducteur tel que le cuivre, le tungstène, le graphite, etc.



**Figure I.28 : Machine EDM [68]**

L'axe est contrôlé en utilisant le panneau de commande. La partie suivante est le récipient diélectrique. Il contient le fluide diélectrique nécessaire pour démarrer le processus. À l'intérieur du récipient diélectrique se trouve également un filtre qui filtre le liquide diélectrique. Cela est nécessaire car le liquide peut contenir de petites particules de la pièce à usiner et aussi parce qu'il doit s'assurer que le fluide est suffisamment pur pour rendre possible la réaction électrique [66,68].

La partie principale de la machine est le générateur électrique. Il s'agit de l'unité qui génère les impulsions électriques. La contrôlabilité du générateur est importante car le courant, la durée de l'impulsion et l'intervalle entre deux impulsions doivent être réglés avec précision. Deux types de générateurs existent : le générateur de relaxation ou RC et le générateur d'impulsions. La percée du générateur de relaxation dépend de la taille et de l'état de la fissure de travail. Pour le générateur d'impulsions, la percée est imposée par le générateur lui-même. La dernière partie est la table de travail pour fixer et ajuster la pièce à usiner [67].

Comme toutes les machines et outils mécaniques, le processus EDM présente des avantages et des inconvénients. L'un des avantages les plus importants du processus EDM est qu'il permet de fabriquer des produits avec une finition très précise, comparé à d'autres technologies et outils conventionnels. Par conséquent, l'EDM est principalement utilisé pour les matériaux très durs nécessitant une coupe complexe, en particulier pour les produits sophistiqués qui doivent avoir des dimensions exactes.

D'autres avantages de l'EDM sont, son utilisation pour la production de très petites pièces avec une grande précision (micro-EDM), la possibilité de produire les trous et les formes les plus précis, ainsi que son utilité pour le traitement de matériaux durs et de métaux.

Les inconvénients de l'EDM sont qu'il consomme beaucoup d'énergie et qu'il a un taux très lent d'enlèvement de matière par rapport à d'autres techniques de coupe. Un autre inconvénient est le temps nécessaire pour développer d'abord les outils de l'électrode avant de pouvoir les utiliser sur la machine EDM.

### **I.7.2 Paramètres techno-économiques d'EDM**

Si nous voulons travailler avec des machines EDM, nous devons avoir à l'esprit que c'est un processus très précis, de sorte que la moindre erreur que nous commettons au début du processus de production peut se propager à un défaut important à la fin du processus de production. Par conséquent, nous devons nous assurer que le processus se déroule dans les conditions les plus optimales.

Pour améliorer la précision et la fiabilité du processus EDM, nous devons savoir quels facteurs peuvent être ajustés. Dans ce cas, la première chose importante est d'analyser les paramètres qui affectent la qualité finale de la pièce dans le processus EDM.

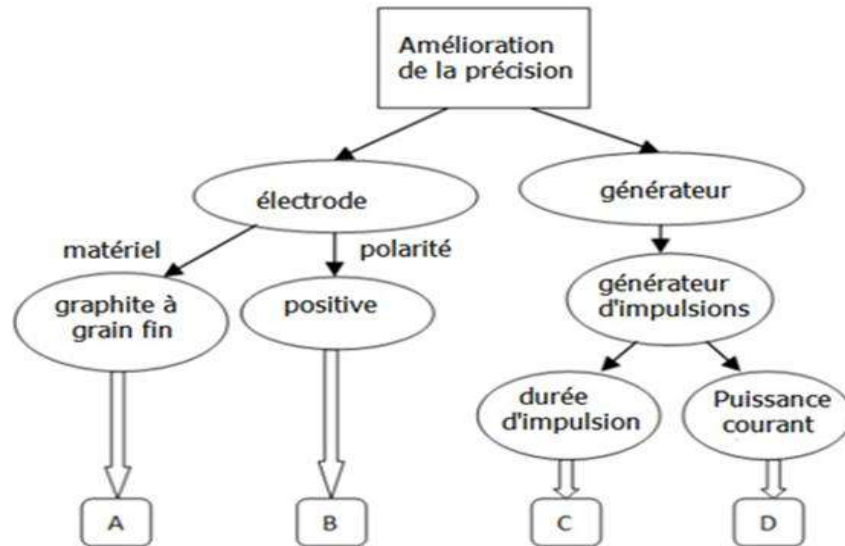
Les parties de la machine EDM que nous sommes en mesure de contrôler sont les suivantes :

- Axes contrôlés par CNC ;
- Fluide diélectrique ;
- Électrode ;
- Paramètres électriques.

Comme on peut le constater, quatre parties différentes de la machine influenceront la précision du processus EDM. Les modèles possibles qui peuvent améliorer la qualité du processus seront discutés.

#### **a) Amélioration de la précision**

Le premier modèle, et peut-être le plus important, est le modèle visant à améliorer la précision du processus d'usinage électro-érosif (figure I.29). La précision et l'exactitude de la fabrication des pièces sont aujourd'hui très importantes car la précision est étroitement liée à la qualité. De nos jours, les clients souhaitent toujours obtenir la meilleure qualité.



**Figure I.29 :** Amélioration de la précision de l'EDM [64]

#### État A :

La précision peut être améliorée en choisissant la meilleure électrode. Cela signifie que nous devons opter pour l'électrode qui présente le taux le plus élevé d'élimination de matériau. Par conséquent, nous devons choisir l'électrode qui peut résister aux dommages thermiques à un niveau élevé. En raison de la petite taille des grains du graphite, il peut résister à des températures plus élevées que d'autres électrodes et il offre une meilleure résistance à l'usure. Donc, si nous voulons améliorer le processus en choisissant l'électrode la plus utile, nous devons utiliser du graphite à grains fins. D'un autre côté, plus les grains sont fins, plus cela coûtera cher [68].

#### État B :

Non seulement le matériau de l'électrode est important, mais aussi sa polarité. Pour obtenir la meilleure qualité de finition, il est préférable de régler l'électrode en positif pour minimiser l'usure. Cependant, il existe des matériaux tels que le carbure, le titane, le cuivre, qui ne peuvent être coupés qu'avec une polarité négative de l'électrode.

#### État C :

Si vous avez décidé de travailler avec une électrode spécifique et que vous ne pouvez pas changer le matériau de l'électrode, vous pouvez améliorer la précision en modifiant ou en ajustant les paramètres du générateur. Au lieu d'utiliser un générateur de relaxation, vous pouvez utiliser un générateur d'impulsions à impulsions. Il est bien connu que ce générateur peut être ajusté de manière plus précise que le générateur de relaxation. Dans cette situation, nous avons choisi d'améliorer la précision en modifiant la durée de l'impulsion. En fonction de

l'électrode que nous utilisons, nous pouvons ajuster le générateur de manière à obtenir une durée d'impulsion plus courte. Cela se traduira par un retrait de matériau plus précis.

#### État D :

Une autre partie à ajuster, une fois que le matériau d'électrode à utiliser a déjà été décidé, est la puissance du courant. Il est possible de modifier la précision de la pièce en permettant un courant plus faible. Un courant élevé signifie une élimination importante de matériau. Ainsi, nous éliminons plutôt des pièces volumineuses et imprécises. Par conséquent, un courant plus faible éliminera des particules plus petites avec une plus grande précision. En conclusion, nous pouvons dire que si nous voulons vraiment améliorer la précision du processus, nous devons utiliser du graphite à grains fins comme matériau d'électrode. Une courte durée d'impulsion et un courant de puissance plutôt faible, associés à une haute fréquence, garantissent les meilleurs résultats de finition.

#### b) Amélioration des coûts

Outre l'amélioration de la précision, nous avons également la possibilité d'optimiser le processus tout en réduisant les coûts. Pour de nombreuses grandes entreprises, l'optimisation des dépenses est l'une de leurs principales priorités. À notre époque, tout tourne autour de l'argent et de la recherche de bénéfices rapides. C'est la raison pour laquelle ont développé ce modèle par l'utilisation des économies financières comme point de référence, comme le montre la figure I.30.

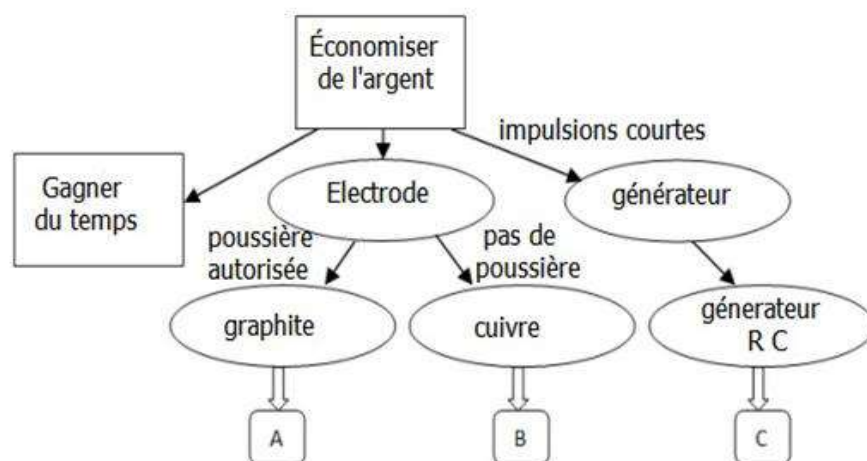


Figure I.30 : Modèle d'économie [64]

**État A :**

Nous pouvons économiser de l'argent en premier lieu en utilisant l'électrode la moins chère. Dans ce cas, nous optons pour l'électrode en graphite. Elle n'est pas seulement la moins chère en termes de prix, c'est aussi l'électrode la plus facile à adapter que nous avons. Cela signifie qu'il est vraiment facile d'ajuster l'électrode dans la forme correcte et que le prix de l'ajustement de l'électrode en graphite est également le moins cher. L'utilisation du graphite n'est possible qu'avec des pièces où la poussière est autorisée.

**État B :**

Si l'utilisation de poussière n'est pas autorisée pour la fabrication de la pièce de travail, nous sommes obligés d'utiliser du cuivre à la place du graphite. L'achat de l'électrode coûtera non seulement plus cher, mais en raison d'un taux d'usure plus élevé de l'électrode, nous aurons également besoin de plus de matériau. Cependant, cela reste moins cher que le tungstène ou un alliage tungstène-cuivre.

**État C :**

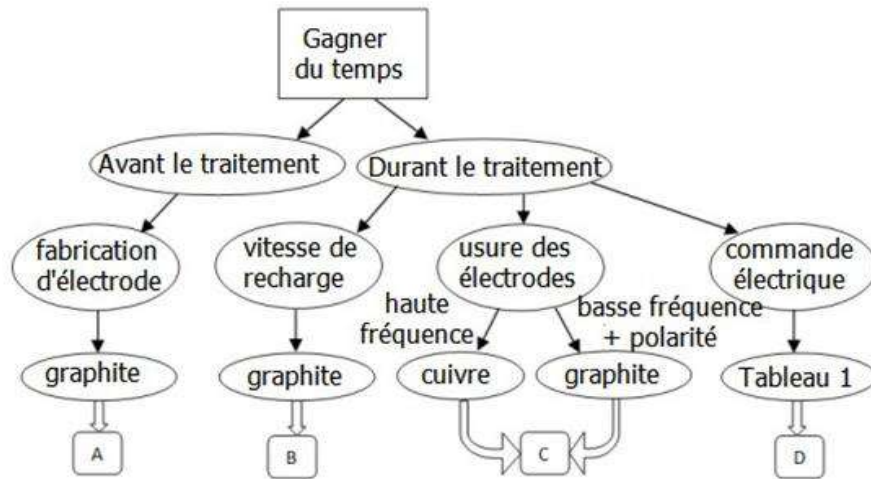
Si nous voulons obtenir un produit bien fini et que nous n'avons besoin que de courtes impulsions, il est moins cher d'utiliser un générateur de relaxation. Non seulement l'achat de la machine est moins cher, mais aussi la consommation d'énergie est moindre. Un inconvénient est que nous ne sommes pas en mesure d'ajuster les paramètres électriques.

Un autre facteur clé pour économiser de l'argent est de gagner du temps. Cependant, étant donné qu'il y a de nombreux facteurs à prendre en compte.

Nous pouvons conclure que si nous voulons économiser de l'argent, nous devons utiliser du graphite comme électrode et utiliser un générateur RC. Cependant, cela n'est possible que dans certaines occasions.

**c) Amélioration du temps**

Une autre chose qui pourrait améliorer le processus est de gagner du temps. L'une des choses les plus importantes pour réaliser un profit est le temps. Moins de temps il faut pour fabriquer un produit, mieux c'est. Donc, si nous sommes capables de fabriquer le même produit en moins de temps en utilisant d'autres techniques, nous améliorons le processus (figure I.31).



**Figure I.31 :** Modèle de gain de temps [64]

#### État A :

Nous pouvons gagner du temps même avant le début du processus EDM réel. La fabrication de l'électrode est un facteur important dans l'ensemble du processus. Avant de pouvoir utiliser la machine EDM, nous devons créer la forme de l'électrode. Nous savons que le graphite a la propriété d'être plus facilement adaptable que d'autres matériaux d'électrode.

#### État B :

Comme nous le savons, la conductivité du graphite est meilleure que celle du cuivre, ce qui signifie que la recharge sera également plus rapide. Une décharge plus rapide de l'électrode se traduira par une vitesse de coupe plus rapide, ce qui permettra de gagner du temps.

#### État C :

Une autre chose à laquelle nous pouvons réfléchir pour gagner du temps est l'usure de l'électrode. L'un des principaux avantages du graphite est qu'il a une plus grande résistance que le cuivre, ce qui lui conférera une plus longue durée de vie si nous travaillons avec une polarité positive et une faible fréquence. Si nous devons principalement travailler avec une haute fréquence, il est préférable d'utiliser le tungstène. Avec cela, il y aura moins de temps à consacrer au remplacement de l'électrode, ce qui permettra d'économiser du temps. Bien sûr, nous devons prendre en compte la taille du courant électrique.

**État D :**

Une dernière chose que nous pouvons faire pour gagner du temps est de réguler le contrôle électrique. À partir de l'emploi du temps numéro deux de la Figure I.31, nous pouvons voir un exemple de différents réglages électriques. À partir de cet emploi du temps, nous pouvons conclure que plus la durée d'utilisation de l'électrode est longue, plus l'enlèvement du métal est rapide. L'inconvénient est que plus vous travaillez rapidement, moins le résultat final sera précis.

En conclusion, nous pouvons dire que l'utilisation du graphite avec une durée d'utilisation plus longue que la durée de non-utilisation semble être la meilleure solution pour gagner du temps. D'un autre côté, si nous laissons l'électrode travailler rapidement, nous perdons en qualité de la pièce et l'électrode s'usera plus rapidement. Donc, nous pouvons conclure que si nous voulons gagner du temps dans le processus EDM, nous devons utiliser le graphite comme électrode. Le plus gros inconvénient de l'utilisation du graphite est la formation de poussière.

**I.7.3 Paramètres électriques**

Les principaux paramètres électriques sont : la tension de décharge, le courant de décharge, le temps d'impulsion, la polarité, La tension de décharge est liée à un éclateur et à la force de claquage du fluide diélectrique. La tension à vide avant l'augmentation de la décharge électrique [80].

**a) Courant de décharge**

Le paramètre essentiel lors de l'utilisation de la méthode d'usinage par électroérosion, également connue sous le nom d'EDM, est le courant de décharge. Ce courant représente la quantité d'énergie employée dans le processus EDM et est mesuré en unités d'ampérage. Pendant chaque impulsion, le courant augmente progressivement jusqu'à atteindre un niveau préalablement défini, appelé courant de crête. Dans les procédés d'électroérosion par enfonçage et d'électroérosion à fil, la valeur maximale d'ampérage est contrôlée en fonction de la superficie de la coupe.

Pour les opérations d'enlèvement de matière initiales et les zones comportant de larges surfaces, un ampérage plus élevé est généralement utilisé. L'utilisation de courants plus élevés peut améliorer le taux d'enlèvement de matière (MRR), mais cela se fait au détriment de la rugosité de la surface usinée et de l'usure de l'outil. Tous ces facteurs sont particulièrement cruciaux en EDM, car la cavité produite dans la pièce usinée est une réplique inversée de l'électrode de l'outil, et une usure excessive peut altérer la précision de l'usinage.

L'utilisation de matériaux d'électrode de meilleure qualité, notamment le graphite, permet de supporter des courants élevés sans subir de dommages excessifs [69 ,80].

#### **b) Tension de décharge**

Avant que le courant ne puisse circuler, la tension d'espace ouvert augmente jusqu'à ce qu'elle ait créé un chemin d'ionisation à travers le diélectrique. Une fois que le courant commence à circuler, La tension diminue et se stabilise à l'intérieur de la plage de travail.. La tension pré réglée détermine la largeur de l'éclateur entre le bord d'attaque de l'électrode et la pièce. Des réglages de tension plus élevés augmentent l'écart, ce qui améliore les conditions de rinçage et aide à stabiliser la coupe.

Le MRR, le taux d'usure de l'outil (TWR) et la rugosité de surface augmentent, en augmentant la tension en circuit ouvert, car la force du champ électrique augmente. Cependant, l'impact de la modification de la tension de circuit ouvert sur la dureté de surface après usinage s'est avéré être seulement marginal. La tension de décharge dans l'EDM est liée à l'éclateur et à la force de claquage du diélectrique [70-80].

#### **c) Temps impulsion ( $T_{on}$ )**

Il s'agit de la période de temps pendant laquelle le courant passe à travers l'outil dans un court intervalle appelé éclateur. Il influence directement la quantité de matériau à retirer de la pièce. La durée d'impulsion est également appelée durée d'impulsion mesurée en microsecondes ( $\mu s$ ). Le taux d'enlèvement de matière ne peut pas être augmenté seul en augmentant, mais une sélection appropriée du courant de crête ( $I_p$ ) est également requise pour une élimination efficace de la matière de la pièce. À courant et facteur de  $T_{on}$  marche constants, le MRR s'est avéré être diminué avec une  $T_{on}$  plus élevée, L'enlèvement des métaux est directement proportionnel à la quantité d'énergie appliquée pendant la durée de l'impulsion [70-80]. Cela provoque une expansion rapide des canaux de plasma, ce qui réduit la densité d'énergie sur l'anode.

#### **d) Temps d'arrêt ( $T_{off}$ )**

Il s'agit de la période de temps où aucune opération d'usinage n'a lieu, autrement dit, la période d'inactivité. Pendant cette phase, le fluide diélectrique est utilisé pour éliminer et nettoyer le matériau fondu de la surface de la pièce. Le cycle est considéré comme achevé lorsqu'un intervalle d'impulsions adéquat est laissé avant le démarrage du cycle suivant [80].

#### **e) Cycle de service**

Le facteur d'utilisation est exprimé en pourcentage et représente la proportion du temps de fonctionnement par rapport au temps de cycle total pendant l'usinage. On peut le définir

comme la relation entre la durée de l'impulsion et le temps de cycle global (la somme de la durée de l'impulsion et du temps d'arrêt). Il reflète l'efficacité de l'opération. Lorsque le facteur d'utilisation augmente, la durée des impulsions en fonctionnement augmente également, ce qui a pour effet d'augmenter le taux d'enlèvement de matière (MRR) [71] [80].

#### **f) Polarité**

La polarité de l'électrode peut être positive ou négative. Mais l'excès de matière est retiré du côté, ce qui est positif. Lorsque la décharge en série commence sous la zone de l'électrode et passe à travers l'espace, ce qui crée une température élevée provoquant une évaporation du matériau sur les faces des deux électrodes. Le canal plasma est composé de flux ioniques et électroniques.

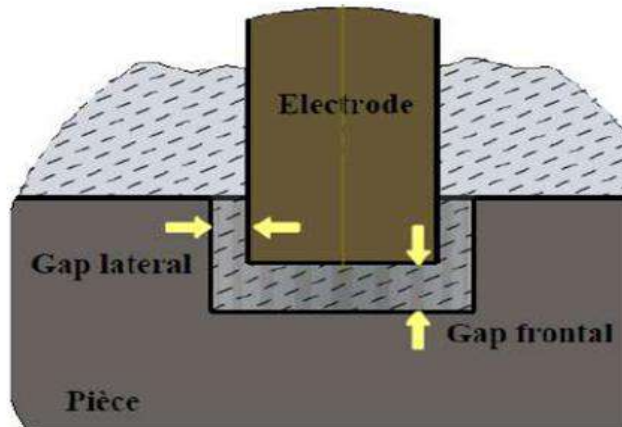
Comme les processus électroniques (masse plus petite que les anions) montrent une réaction plus rapide, le matériau anodique s'use principalement. Cet effet provoque une usure minimale des électrodes de l'outil et prend de l'importance lors des opérations de finition avec des temps de marche d'impulsion plus courts. Cependant, lors de l'exécution de décharges plus longues, la prédominance du processus électronique précoce se transforme en processus positron (la proportion du flux ionique augmente avec la durée de l'impulsion), entraînant une usure élevée de l'outil.

En général, la polarité est déterminée par des expériences et dépend du matériau de l'outil, du matériau de travail, de la densité de courant et des combinaisons de longueur d'impulsion. Les alimentations électriques modernes insèrent une « impulsion de swing » de polarité opposée à intervalles fixes pour éviter les arcs électriques.

#### **g) Entrefer (gap)**

Il est essentiel de maintenir une distance constante entre l'électrode et la pièce dans le processus d'électroérosion. Cette distance doit être régulée en permanence pour déclencher les décharges de manière autonome, indépendamment de tout facteur de contamination de l'environnement [72,80].

Dans le contexte de l'électroérosion par enfonçage, on peut identifier deux types d'espaces à prendre en considération : l'écart frontal et l'écart latéral. La distance entre l'outil et la pièce dépend principalement de la tension d'usinage et des propriétés du diélectrique utilisé, y compris sa nature, son degré de contamination et ses caractéristiques électriques. Lors de l'usinage en 3D, il devient essentiel de prendre en compte ces deux espaces pour maintenir un contrôle précis de la résolution de l'usinage (voir Figure I.32).



**Figure I.32 : Entre fer latéral et entrefer frontal [73]**

#### **I.7.4 Paramètres non électriques**

##### **a) Rotation de l'électrode**

Il s'agit de la vitesse de rotation des électrodes d'outils cylindriques ou en forme de disque, mesurée en tours / minute. Généralement, l'axe de rotation de l'électrode d'outil est normal à la surface de la pièce et dépend de la forme de l'électrode d'outil. L'augmentation de la vitesse de l'électrode de l'outil génère une force centrifuge plus élevée qui entraîne une élimination plus rapide des débris de l'espace d'usinage, ce qui améliore la stabilité et les performances d'usinage [78] [80].

##### **b) Rinçage par injection**

Le rinçage du diélectrique pendant le processus d'étincelle a un effet négatif sur les mesures de performance de l'EDM. Lonardo et Bruzzone [75] ont révélé que le rinçage pendant l'opération d'ébauche affectait le MRR et le TWR, tandis que dans l'opération de finition, il influençait le SR. Le taux de rinçage influence également la densité des fissures et la couche de refonte, qui peuvent être minimisées en obtenant un taux de rinçage optimal [76]. De plus, les différentes propriétés du fluide diélectrique jouent également un rôle essentiel pour éliminer les débris de l'espace d'usinage. La possibilité d'utiliser de l'eau au lieu du kérosène comme fluide de travail pour le micro-EDM a été expérimentée [77-80].

##### **c) Géométrie de l'outil**

La géométrie de l'outil est liée à la forme des électrodes de l'outil, à savoir carré, rectangle, cylindrique, circulaire, etc. Le rapport longueur / diamètre de tout matériau façonné. En cas

d'électrode à disque rotatif, le rapport devient épaisseur / diamètre. L'outil ayant moins de rapport d'aspect a donné une valeur plus élevée d'EWR. Ainsi, avec l'augmentation de la taille de l'électrode de l'outil, des performances plus élevées d'EDM peuvent être obtenues [78-80].

#### **d) Matériau d'outil (électrode)**

Des matériaux d'ingénierie ayant une conductivité thermique et un point de fusion plus élevés peuvent être utilisés comme matériau d'outil pour le processus d'EDM. Le cuivre, le graphite, le cuivre-tungstène, le tungstène argenté, le graphite et le laiton sont quelques-uns des matériaux d'électrode d'outil (électrode) utilisés dans l'EDM. [79-81].

### **I.8 Conclusion**

Ce chapitre a offert une revue de la littérature complète sur le sujet de l'électroérosion. Il couvre presque la totalité des conditions d'emploi de ce procédé d'usinage ; les principes fondamentaux et les techniques, les conditions requises pour l'exécution, les mécanismes impliqués dans l'enlèvement de matière. Ainsi, les différentes variations de l'électroérosion et les éléments ayant un impact sur la qualité d'usinage ont été analysées. Cette étude bibliographique a mis l'accent, particulièrement, sur les multiples facteurs et paramètres qui influent ce processus de coupe.

## Chapitre II

# *Revue littérature*

## II.1 Introduction

L'usinage par décharge électrique (EDM) est devenu l'un des processus les plus utilisés dans la technologie de fabrication ; ça joue un rôle crucial dans le domaine de la production mécanique, et par conséquent, c'est un processus ouvert pour faire face à plusieurs améliorations. En raison de la complexité et des objectifs d'optimisation, un grand nombre d'études et de recherches sont orientées vers les nouvelles technologies afin d'augmenter la productivité, d'améliorer la qualité des pièces usinées, et de minimiser les coûts et les délais de production.

Dans le processus d'usinage par décharge électrique, les paramètres d'usinage tels que courant, tension et le temps d'impulsion, ainsi que le diélectrique, la géométrie des électrodes, et les pièces jouent un rôle très important dans le choix de performances et qualité d'usinage. C'est pour cette raison les chercheurs ont concentré sur trois axes principaux tels que Les travaux expérimentaux, Les travaux basés sur la modélisation et Les travaux de l'optimisation.

À travers ce que nous avons lu dans ce domaine, nous avons réalisé une étude approfondie de la littérature sur les paramètres tels que le courant, le temps d'impulsion, le temps d'arrêt d'impulsion, la tension, etc. Et connaître l'effet de ces facteurs sur les propriétés d'usinage telles que MRR, TWR, Ra, etc. Pour étudier l'effet paramétrique de l'EDM.

## II.2 Travaux expérimentaux

### 1) Mohammad Jafar Haddad, et al

Ont étudié l'impact des paramètres d'usinage, tels que la puissance, le temps d'impulsion, la tension, et la vitesse de rotation de la broche, sur la rugosité de surface (Ra) et la circularité dans le processus de découpe électrique par fil (CWEDT) appliqué à l'acier d'outil AISI D3. Le choix de ce matériau s'explique par sa polyvalence dans diverses applications industrielles, notamment sous forme cylindrique, telles que les outils, les matrices, les moules, le poinçonnage, le taraudage, et bien d'autres.

L'évaluation des performances d'usinage a été réalisée à l'aide d'un plan d'expérience factoriel complet de  $22 \times 32$  afin d'étudier les effets des facteurs et de leurs interactions. Les résultats ont été analysés en utilisant la méthodologie de surface de réponse, ce qui a permis de dériver des équations de régression pour évaluer les performances d'usinage.

Concernant la rugosité de surface, il a été observé que celle-ci avait tendance à augmenter avec l'augmentation de la tension et de la puissance, ainsi qu'avec la diminution du temps d'arrêt des impulsions et de la vitesse de rotation de la broche. Cette tendance était principalement

attribuable à une libération d'énergie de décharge plus importante et à l'expansion du canal de décharge. Plus précisément, des impulsions plus courtes ont conduit à la formation de cratères de plus grand diamètre, entraînant ainsi une rugosité de surface plus élevée.

En ce qui concerne la circularité, l'analyse de variance (ANOVA) a montré que les paramètres les plus influents étaient la vitesse de rotation de la broche, la tension, la puissance, ainsi que les interactions entre la tension et la vitesse de rotation de la broche. Le temps d'arrêt des impulsions avait moins d'influence. Un modèle de régression a été établi pour la circularité, montrant que la tension et la vitesse de rotation de la broche jouaient un rôle plus prépondérant que la puissance dans son contrôle.

Les modèles prédictifs élaborés dans cette étude sont destinés à faciliter la sélection adéquate des paramètres d'usinage en vue d'obtenir la rugosité de surface et la circularité souhaitées lors de l'usinage de pièces cylindriques par le processus CWEDT. Des observations au microscope électronique à balayage ont également permis d'identifier des caractéristiques telles que les macro-rides, les cratères de surface, les couches recuites et les zones affectées par la chaleur, offrant ainsi une compréhension plus approfondie des effets des paramètres d'usinage sur les pièces CWEDT [82].

## **2) Patel Parth Kumar S, et al**

Ont visait à identifier les paramètres de traitement pour un matériau en acier à ressort EN47 utilisant une machine d'électroérosion (EDM) avec des électrodes en cuivre et en graphite. L'objectif principal était d'analyser l'influence de quatre facteurs de conception (l'impulsion on, l'impulsion off, le courant, la tension) ainsi que le facteur de service sur le processus EDM et ses effets sur les spécifications d'usinage telles que le taux d'enlèvement de matière et le taux d'usure de l'outil, ainsi que sur les caractéristiques de l'intégrité de la surface, notamment la rugosité moyenne de la surface. La méthodologie Taguchi a été utilisée pour mener les expériences, et un modèle mathématique a été développé pour prédire les performances en fonction des paramètres d'entrée.

Les chercheurs ont constaté que la plupart des travaux de recherche visaient à améliorer le taux d'enlèvement de matière tout en réduisant le taux d'usure de l'outil dans le processus d'électroérosion.

Des matériaux d'outil variés tels que le cuivre, le laiton, le graphite, l'aluminium et le cuivre-tungstène ont été utilisés, et leur impact sur les paramètres de la machine de traitement a été étudié.

Les chercheurs ont également exploré l'impact de différents modes de rinçage (pression, aspiration, rotation, orbite, vertical et jet), qui jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des résultats de l'usinage par électroérosion.

Certaines expériences ont été menées en utilisant de la poudre suspendue dans le diélectrique de l'électroérosion, et les effets de cette approche sur les performances de la machine ont été analysés.

En résumé, les chercheurs décrivent une recherche visant à optimiser le processus d'électroérosion pour le matériau en acier à ressort EN47 en utilisant différentes variables de conception et en mettant l'accent sur l'amélioration du taux d'enlèvement de matière et la réduction du taux d'usure de l'outil. Plusieurs facteurs, y compris les matériaux d'outil, les modes de rinçage et l'utilisation de poudre dans le diélectrique, ont été examinés pour améliorer les performances de la machine EDM [83].

### **3) K.D. Mohapatra et S.K. Sahoo**

Ont porté une étude sur l'analyse et l'optimisation d'un pignon miniature en cuivre de haute qualité. Le pignon en question a un diamètre primitif de 20 mm, un angle de pression de 20 degrés, un diamètre d'addendum de 24,44 mm, un diamètre de déduit de 14,44 mm et comporte 9 dents à découper. Pour cette analyse, un tableau orthogonal Taguchi L9 a été créé, permettant d'obtenir des combinaisons d'entrée pour calculer les résultats de sortie.

Trois paramètres de processus ont été choisis, à savoir le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion et la tension du fil, chacun ayant trois niveaux différents. Les trois paramètres de sortie étudiés étaient le taux de matière enlevée (MRR), la rugosité de surface et la largeur de coupe (kerf width). L'optimisation a été réalisée à l'aide de la méthode de la désirabilité avec la technique de l'ACP (Analyse en Composantes Principales).

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour déterminer quel facteur influençait le plus significativement les paramètres de la Wire EDM. Les graphiques et tracés ont été utilisés pour étudier les effets des paramètres du processus de Wire EDM, et une optimisation a été effectuée pour obtenir les meilleurs résultats.

Les résultats optimaux ont été obtenus avec des paramètres de processus spécifiques : un temps d'impulsion de 115  $\mu$ s, un temps d'arrêt de l'impulsion de 55  $\mu$ s et une tension du fil de 6 Kg-f. Ces paramètres ont donné lieu à un taux d'enlèvement de matière (MRR) de 2,347, une rugosité de surface (Ra) de 2,67 et une largeur de la coupe de 0,266, considérés comme les résultats idéaux.

L'analyse ANOVA a révélé que le temps d'arrêt de l'impulsion était le facteur le plus significatif, suivi de la tension du fil et du temps d'impulsion. Il a été constaté que l'enlèvement maximal de matière se produit avec un temps d'arrêt de l'impulsion élevé et un temps d'impulsion faible. Les variations de la largeur de la coupe étaient principalement attribuables aux variations de tension et de courant à différents moments du processus.

En fin de compte, cette étude a permis d'optimiser les paramètres de processus pour produire un grand nombre de pignons miniatures de haute qualité en cuivre, en maximisant le taux d'enlèvement de matière tout en maintenant une rugosité de surface acceptable et une largeur de coupe optimale [84].

#### **4) Pradeep Singh, et al**

Ont étudié les différents paramètres de l'EDM par fil. Le matériau de la pièce à usiner pour lequel les paramètres doivent être optimisés est l'acier EN 8. De nos jours, il est très important de trouver les meilleures conditions de fonctionnement pour toute technique de fabrication, en particulier dans le cas de l'usinage non conventionnel tel que l'usinage par décharge électrique, l'usinage par jet abrasif, l'usinage électrochimique, etc., car dans ces processus, le coût de fonctionnement est plus élevé que dans l'usinage conventionnel.

Le paramètre de sortie à optimiser est la déviation dimensionnelle, et les paramètres d'entrée sont l'avance du fil, le temps de décharge et la tension de servocommande. La méthode Taguchi a été utilisée pour optimiser les paramètres. Un tableau orthogonal 'L18' a été utilisé pour l'analyse statistique. Le logiciel MINITAB-17 a été utilisé pour obtenir les valeurs optimales pour les tests, et une expérience de confirmation a été réalisée pour valider les résultats.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées sur la base de l'optimisation telle que discutée ci-dessus :

- Augmenter le débit de fil réduit la déviation dimensionnelle.
- Augmenter le temps d'arrêt de l'impulsion augmente initialement la déviation dimensionnelle, puis la diminue ensuite.
- Augmenter la tension du servomoteur diminue la déviation dimensionnelle.
- Parmi les trois paramètres, la tension du servomoteur a le plus grand effet sur la déviation dimensionnelle, suivie du temps d'arrêt de l'impulsion, et enfin du débit de fil, dans cet ordre [85].

### 5) Vinod Kumar, et al

Ont exploré l'utilisation d'un diélectrique mélangé à de la poudre métallique dans le contexte de l'usinage électro-érosion par fil (WEDM) de l'alliage Nimonic-90. Leur étude présente les résultats de diverses expériences visant à évaluer l'efficacité de cette approche.

L'article commence par décrire le contexte de l'usinage électro-érosion par fil et met en évidence les défis associés à l'usinage de matériaux difficiles à traiter, tels que l'alliage Nimonic-90. Les auteurs exposent en détail la méthodologie expérimentale utilisée, notamment la composition du diélectrique mélangé à de la poudre métallique et les paramètres de l'usinage.

Les résultats des expériences sont ensuite présentés, mettant en évidence les améliorations observées en termes de vitesse d'usinage, de qualité de surface et de précision lors de l'utilisation du diélectrique mélangé à de la poudre métallique. Les auteurs discutent des implications de ces résultats et de l'efficacité de cette approche pour l'usinage de l'alliage Nimonic-90. En conclusion, l'article met en avant les avantages potentiels de l'utilisation du diélectrique mélangé à de la poudre métallique dans le WEDM de Nimonic-90 et suggère des axes de recherche future.

Pour résumer, cette étude se concentre sur l'amélioration de l'usinabilité de l'alliage Nimonic-90 en intégrant un diélectrique mélangé à de la poudre métallique dans le processus de WEDM, avec des résultats expérimentaux prometteurs qui pourraient avoir un impact positif sur l'industrie de l'usinage [86].

### 6) Paras Kumar et Ravi Parkash

Ont exploré et d'optimiser les paramètres du processus d'usinage par électroérosion (EDM) pour l'usinage de composites en aluminium borure de carbone (Al-B<sub>4</sub>C).

Dans l'étude, les chercheurs ont mené des expérimentations pour déterminer les paramètres EDM optimaux pour l'usinage efficace du composite Al-B<sub>4</sub>C. Ils ont évalué divers paramètres tels que l'intensité du courant, la vitesse d'avance, la durée d'impulsion, la polarité, et d'autres facteurs influents. L'objectif était d'obtenir des performances d'usinage optimales en termes de taux d'enlèvement de matière, de qualité de surface et de durée de vie de l'électrode.

Les résultats de l'étude ont montré que les paramètres EDM appropriés pour l'usinage du composite Al-B<sub>4</sub>C variaient en fonction des objectifs d'usinage spécifiques, tels que la réduction de la rugosité de surface, la minimisation de la déformation, ou la maximisation du taux d'enlèvement de matière. Les chercheurs ont utilisé des techniques d'optimisation pour identifier les réglages optimaux des paramètres EDM pour chaque objectif.

En conclusion, les chercheurs ont présenté une étude expérimentale approfondie sur l'optimisation des paramètres du processus EDM pour l'usinage de composites en aluminium borure de carbone. Leurs résultats offrent des informations utiles pour améliorer l'efficacité de l'usinage de ce matériau composite spécifique, ce qui peut avoir des applications importantes dans divers domaines de l'industrie [87].

#### **7) Kasinath Das Mohapatra et Susanta Kumar Sahoo**

Ont porté leur travail sur l'optimisation des paramètres de fabrication des engrenages à vis usinés par décharge électrique par fil en cuivre afin de minimiser l'erreur de pas et maximiser le taux d'enlèvement de matière. Les valeurs des paramètres ont été optimisées, créant ainsi une fonction de perte qui tient compte de l'erreur de pas unique et du taux d'enlèvement de matière. Cette fonction de perte a été examinée, et la valeur optimale obtenue peut être appliquée à des travaux futurs.

Le processus de fabrication des engrenages implique l'utilisation de l'EDM par fil pour obtenir le profil de la denture. L'erreur dans la denture a été étudiée, et il a été constaté que la minimisation des écarts dans l'erreur de pas et la maximisation du taux de matériau retiré (MRR) sont essentielles pour obtenir le profil de denture souhaité. Des plages idéales de temps d'arrêt d'impulsion et de temps d'impulsion ont été identifiées dans le processus d'EDM par fil.

Les paramètres d'entrée, tels que le temps d'impulsion et le temps d'arrêt d'impulsion, se sont révélés être des facteurs cruciaux dans la réduction de l'erreur de pas unique. L'erreur dans la denture est principalement attribuée au changement soudain de la tension et du courant, ce qui augmente l'énergie de décharge d'étincelle et, par conséquent, la vitesse de coupe, entraînant une distribution de surface inégale.

L'optimisation des paramètres d'usinage a conduit à une amélioration significative du rapport signal/bruit (S/N), passant de -1,800 à -4,180, soit une amélioration de 22,70 %. Cette amélioration confirme l'efficacité de la conception et de l'analyse préalables dans l'optimisation des paramètres de fabrication des engrenages à vis usinés par décharge électrique par fil en cuivre [88].

#### **8) Vishwnath Tripathi, et al**

Ont un objectif pour optimiser les variables du processus EDM (Electrical Discharge Machining) pour l'usinage de l'Inconel 904, un matériau couramment utilisé dans les applications industrielles. Les variables d'entrée examinées étaient la tension, le courant et la durée de l'impulsion, et un plan orthogonal Taguchi L9 a été utilisé pour cette optimisation.

Pour le taux d'enlèvement de matière (MRR), le courant d'étincelage (I) était le paramètre le plus significatif, suivi de la tension et de la durée de l'impulsion. Les paramètres d'usinage optimaux pour le MRR étaient une tension de 80 V, un courant de 8 A et une durée d'impulsion de 400.

Pour la rugosité de surface (Ra), le courant d'étincelage (I) était également le paramètre le plus significatif, suivi du temps d'étincelage et de la tension. Les paramètres d'usinage optimaux pour la Ra étaient une tension de 80 V, un courant de 4 A et une durée d'impulsion de 200.

Dans cette étude, l'accent était mis sur l'obtention du MRR maximal et de la Ra minimale en utilisant une méthode de conception d'expérience (DOE) avec le logiciel MINITAB 17 et en effectuant une analyse de variance (ANOVA) pour vérifier les résultats.

L'étude a également mentionné des perspectives pour les travaux futurs, notamment la possibilité de réduire le dépôt de carbone sur l'outil d'électrode grâce à un processus de finition de surface pendant l'usinage, ce qui pourrait améliorer le résultat en réduisant l'énergie d'étincelage et en augmentant le MRR. De plus, l'extension de cette recherche en augmentant le nombre de niveaux et en utilisant d'autres types de tableaux orthogonaux ainsi que différentes méthodes d'optimisation a été suggérée [89].

## **9) Sachin Ashok Sonawane et M. L. Kilkarni**

Ont examiné les effets de différents paramètres d'usinage, tels que le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, la tension du servo, le courant de crête, la vitesse d'avance du fil et la tension du fil, sur trois caractéristiques de performance lors de l'électro-érosion par fil de l'Inconel-625. Les caractéristiques de performance étudiées sont la rugosité de surface (SR), le taux d'enlèvement de matière (MRR) et la surcote.

L'expérimentation a été réalisée en utilisant le plan orthogonal de Taguchi L27, qui comprend différentes combinaisons de paramètres d'usinage. La méthodologie de surface de réponse (RSM) a été appliquée pour développer des modèles mathématiques qui permettent de comprendre les relations entre les différents paramètres d'usinage et les caractéristiques de performance. L'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour déterminer quels sont les paramètres d'usinage les plus significatifs qui affectent les caractéristiques de performance.

Les principales conclusions de cette recherche sont les suivantes :

Pour la rugosité de surface, les facteurs majeurs significatifs sont le temps d'impulsion, la tension du servomoteur, le courant de crête et le débit de fil.

-Pour le MRR, les facteurs majeurs significatifs sont le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, la tension du servomoteur, le courant de crête et le débit de fil.

Pour la surcote, les facteurs majeurs significatifs sont le temps d'impulsion, la tension du servomoteur et la tension du fil.

En outre, des modèles mathématiques ont été développés à l'aide de l'analyse de régression pour chaque caractéristique de performance. Ces modèles permettent de prédire les valeurs des caractéristiques de performance en fonction des valeurs des paramètres d'usinage. En résumé, cette étude contribue à mieux comprendre les paramètres d'usinage qui influencent la qualité et l'efficacité du processus d'électro-érosion par fil de l'Inconel-625, ce qui peut aider à optimiser ce processus dans diverses applications industrielles [90].

#### **10) Deepa Singh, et al**

Ont travaillé sur l'utilisation de l'électroérosion à fil pour l'usinage d'aciers à outils trempés et finis, en particulier pour créer de nouvelles caractéristiques géométriques après le durcissement et la finition. L'objectif principal de l'étude est d'optimiser le taux d'enlèvement de matière (TEM) en ajustant différents paramètres de processus.

Les aciers à outils sont généralement travaillés avant le traitement thermique et la finition pour créer des caractéristiques de maintien ou de fixation.

L'électroérosion à fil est une technique qui permet d'usiner des matériaux d'outils trempés et finis sans altérer leurs propriétés essentielles.

L'optimisation des paramètres d'usinage est nécessaire pour travailler sur de tels matériaux.

L'étude a utilisé l'approche Taguchi pour déterminer la contribution des différents paramètres de processus au TEM.

Les résultats montrent que le courant électrique a la plus grande influence sur le TEM, suivi par la durée d'impulsion et la tension de servocommande.

Les valeurs optimales maximales du courant, de la durée d'impulsion et de la tension de servocommande pour maximiser le TEM sont respectivement de 12 A, 60 s et 3 V.

Le TEM augmente linéairement avec l'augmentation du courant, mais est limité à 12 A pour des raisons de sécurité.

Le TEM augmente initialement avec l'augmentation du temps d'impulsion, mais diminue ensuite au-delà de 60 s.

Les effets de la tension de servocommande sur le TEM sont variables, mais une tension de 3 V est préférable en combinaison avec les autres paramètres.

Le courant a le plus grand impact sur le TEM, suivi par la durée d'impulsion, tandis que la tension de servocommande a moins d'effet. Un plan orthogonal L9 a été utilisé pour l'étude.

La valeur maximale du TEM obtenue est de 16,24 mm<sup>3</sup>/min avec une combinaison de paramètres de 12 A, 60 s et 3 V.

Le taux d'erreur à l'aide d'une DOE fractionnaire est de 5,89 %, inférieur à celui de la DOE factorielle complète, qui est de 10,49 %.

En résumé, l'étude vise à maximiser le taux d'enlèvement de matière lors de l'usinage d'aciers à outils trempés et finis en ajustant les paramètres de courant, de durée d'impulsion et de tension de servocommande, avec des résultats concluants sur les paramètres optimaux pour atteindre cet objectif [91].

### **11) Hargovind Soni. Narendranath S. Ramesh M R**

Ont présenté une étude sur l'électro-érosion par fil (WEDM) de l'alliage à mémoire de forme Ti50Ni45Co5. Pour optimiser le processus d'usinage, un plan orthogonal L-9 basé sur la méthode de Taguchi a été développé. La caractérisation de la surface usinée a été effectuée en tenant compte des microstructures, de la topographie de surface, de la micro dureté, de l'analyse par diffraction des rayons X et des contraintes résiduelles.

Les résultats ont montré que les paramètres du processus, tels que le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ), le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ) et la tension de servomoteur (SV), influencent considérablement l'usinage de l'alliage TiNiCo. Les réglages optimaux ont été déterminés à 125  $\mu$ s  $T_{on}$ , 35  $\mu$ s  $T_{off}$  et 40 V SV, ce qui a conduit à un taux d'enlèvement de matière plus élevé (MRR) et à une meilleure rugosité de surface (SR).

L'analyse de la surface usinée a révélé une zone plus dure près du bord de coupe, ainsi que la présence de TiNiO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> et CuZn grâce à la diffraction des rayons X. Cependant, des contraintes résiduelles de compression ont été observées à la surface usinée pendant le processus de WEDM.

En résumé, cette étude a mis en évidence l'importance des paramètres de processus  $T_{on}$ ,  $T_{off}$  et SV dans l'usinage de l'alliage TiNiCo. Les résultats ont montré que la combinaison optimale de ces paramètres améliore le MRR et la SR. De plus, diverses caractéristiques de la surface usinée ont été identifiées, notamment la dureté, la présence de composés chimiques spécifiques et les contraintes résiduelles [92].

**12) Shailesh S.Shirguppikar A.Dabade**

Ont porté une étude visant à mettre en œuvre le processus d'EDM sec (Électro-Érosion par Décharge Électrique) sur une machine EDM à base d'huile existante. Les expériences ont été menées en utilisant de l'acier doux et une électrode en cuivre creuse, avec comme principales variables de réponse le taux d'enlèvement de matière, le taux d'usure de l'outil et la rugosité de surface. La méthode Taguchi a été utilisée pour concevoir les expériences, et les paramètres de processus tels que le courant, le temps d'impulsion et la pression du gaz oxygène ont été examinés.

Les résultats de l'analyse statistique indiquent que le courant et le temps d'impulsion ont une influence significative sur le taux d'enlèvement de matière (MRR). Le temps d'impulsion est le paramètre le plus significatif pour le MRR, suivi du courant. Cette relation est attribuée à l'énergie d'étincelle.

En ce qui concerne le taux d'usure de l'outil (TWR), il est observé que le processus d'EDM sec entraîne un TWR plus faible, avec une absence de TWR dans la plupart des expériences. Cependant, un courant de 16 A et un dépôt de matériau de pièce sur l'électrode de l'outil entraînent un TWR positif. Le courant et le temps d'impulsion ont une influence statistiquement significative sur le TWR, car ils augmentent l'énergie thermique dans l'interface de l'électrode, provoquant la fusion et l'évaporation de l'électrode.

La rugosité de surface du trou percé est mesurée, et il est constaté que le courant est un paramètre significatif qui influence la rugosité de surface. Un courant plus élevé crée un cratère plus important dans la pièce, augmentant ainsi la rugosité de surface de la pièce usinée.

En revanche, la pression diélectrique n'affecte aucune des variables de réponse dans cette expérimentation [93].

**13) Gokulakannan. G, DR. R. V. Praveena Gowda et DR. S. Ramesh**

Ont porté une étude sur la fabrication et l'usinage de composites hybrides à matrice métallique (HMMC) en utilisant la technique de coulée sous agitation. L'alliage d'aluminium (Al6061) sert de matériau de matrice, tandis que les renforts sont constitués de carbure de silicium (SiC) et de carbure de bore (B4C) en différentes proportions en poids (SiC - 5, 10 et 15 %, et B4C - 5 %).

Les composites fabriqués sont ensuite usinés à l'aide d'une machine d'électro-érosion par fil (WEDM), et des paramètres tels que le taux d'enlèvement de matière (MRR) et la rugosité de surface (Ra) sont calculés pour chaque échantillon. La méthode de Taguchi est employée pour analyser l'influence des paramètres de processus (taux d'avance, courant, temps

d'impulsion, temps d'arrêt de l'impulsion) ainsi que la fraction volumique du renfort sur le MRR et Ra.

Les résultats montrent que l'augmentation du renfort dans le matériau composite a eu un impact positif sur le MRR et Ra jusqu'à un certain point, après quoi il a diminué. La technique de Taguchi est également utilisée pour prédire les comportements des paramètres de processus, et des équations de régression sont calculées pour chaque échantillon afin de déterminer le MRR et Ra optimaux.

En outre, la caractérisation des composites a été réalisée avec succès en utilisant la technique de coulée sous agitation, montrant une répartition uniforme du renforcement dans la matrice, bien que des cratères et des pores aient été observés sur les échantillons avec 15 et 20 % de renforcement.

Enfin, les chercheurs soulignent l'importance de l'usinage non conventionnel WEDM et de l'analyse Taguchi pour optimiser les paramètres de processus afin d'obtenir un rendement élevé dans la fabrication de ces composites AMC [94].

#### **14) B. R. Jadhav et al**

Ont engagé pour une étude expérimentale portant sur l'usinage de l'alliage Al-Si à l'aide du processus de micro-électro-érosion à décharge électrique (PMEDM).

L'objectif principal de cette recherche est d'explorer les différents paramètres du processus de PMEDM et leur impact sur l'usinage de l'alliage Al-Si. Les auteurs ont mené des expériences pour examiner l'influence de facteurs tels que la densité de courant, la vitesse d'avance, la durée de décharge, la concentration de poudre, et la polarité de l'électrode sur les performances de l'usinage.

Les résultats de l'étude ont montré que ces paramètres influencent significativement les caractéristiques de l'usinage, notamment la rugosité de surface, le taux de retrait de matière, et la durée de vie de l'électrode. Les chercheurs ont également observé des effets complexes interagissant entre ces paramètres.

En fin de compte, les chercheurs ont fourni des informations précieuses sur l'optimisation du processus de PMEDM pour l'usinage de l'alliage Al-Si, ce qui pourrait avoir des applications importantes dans l'industrie de la fabrication de composants en alliage Al-Si et contribuer à améliorer l'efficacité de ce processus.

Les résultats ont été étudiés pour le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'outil (TWR), la rugosité de surface (SR) et la micro dureté (MH). Ils ont observé que le courant et l'impulsion jouent un rôle vital pour MRR, TWR, SR et MH. Ces résultats peuvent

servir de référence pour les chercheurs et les ingénieurs travaillant dans le domaine de l'usinage de matériaux composites [95].

### 15) Abderrahim Belloufi et al

Ont porté l'étude expérimentale sur l'usinage par décharge électrique (EDM) des pièces en acier AISI 1095, en examinant les paramètres tels que le courant, la tension et la durée de l'impulsion ( $T_{on}$ ). Plusieurs conclusions importantes ont été tirées de cette étude :

L'approche expérimentale utilisée pour évaluer les performances de l'usinage EDM sur l'acier AISI 1095 s'est avérée pratique et économique. Elle permet de suivre efficacement l'évolution des performances de l'usinage.

La méthode expérimentale pour mesurer les performances de l'usinage EDM et les erreurs géométriques associées est facile à mettre en œuvre et à utiliser. Le système de mesure a montré une réponse adéquate quelles que soient les conditions d'usinage.

Les chercheurs ont développé des fonctions d'appartenance et des règles floues basées sur des mesures expérimentales. Ils ont constaté que certains paramètres d'usinage ont un impact plus important que d'autres sur les performances, notamment la durée de l'impulsion, la tension et le courant.

Les facteurs les plus influents sur différentes performances d'usinage sont :

Durée de l'impulsion : Taux de dépose de matériau, rugosité de surface, surcote radiale, cylindricité.

Tension : Taux d'usure de l'outil, taux d'usure, circularité.

Un modèle flou a été développé et testé avec succès, démontrant une grande précision dans la prédiction des performances de l'usinage EDM sur l'acier AISI 1095 traité.

Les résultats flous ont été comparés et validés par rapport aux résultats expérimentaux, confirmant la précision du modèle.

La modélisation floue est envisagée comme une méthode économique et efficace pour prédire les performances de l'usinage EDM dans d'autres contextes.

La sélection des paramètres d'usinage pour l'acier AISI 1095 traité peut être facilitée en utilisant la théorie des ensembles flous et en se basant sur la qualification de l'opérateur.

En résumé, cette étude a contribué à une meilleure compréhension du processus d'usinage par décharge électrique sur l'acier AISI 1095 en identifiant les paramètres critiques et en développant un modèle flou précis pour prédire les performances. Cette approche peut également être appliquée à d'autres processus d'usinage EDM [96].

**16) Sharma, A et al**

Ont travaillé sur l'optimisation des paramètres du processus d'usinage par décharge électrique (EDM) à l'aide de techniques hybrides basées sur la théorie des ensembles flous et la méthode de l'analyse des séquences grises. L'étude vise à améliorer l'efficacité et la qualité du processus EDM, qui est couramment utilisé dans l'industrie pour usiner des matériaux conducteurs.

Les auteurs ont mené une série d'expériences pour collecter des données sur les paramètres du processus EDM, tels que la tension d'impulsion, le courant de décharge, la vitesse de déplacement de l'électrode, etc. En utilisant ces données, ils ont développé un modèle hybride basé sur les ensembles flous et les séquences grises pour prédire les performances du processus, notamment la rugosité de la surface, la vitesse d'enlèvement de matière et la durée de vie de l'électrode.

Ensuite, les chercheurs ont utilisé des techniques d'optimisation pour trouver les paramètres optimaux du processus EDM qui maximisent les performances souhaitées. Cette approche hybride a montré des résultats prometteurs en termes d'amélioration de la qualité de l'usinage et de l'efficacité globale du processus EDM.

Les chercheurs concluent que l'utilisation de techniques hybrides basées sur les ensembles flous et les séquences grises peut être bénéfique pour l'optimisation des processus d'usinage par décharge électrique, ce qui peut avoir un impact significatif sur diverses applications industrielles nécessitant une précision et une efficacité accrues. [97]

**17) R. Manoj Samson, et al**

Ont examiné l'utilisation de l'usinage par électroérosion à fil (WEDM) pour maintenir l'intégrité de la surface lors de l'usinage du Ti-6Al-4V. Plus précisément, elle compare les performances de fils en laiton traités thermiquement et de fils en laiton revêtus de zinc en tant qu'outils d'usinage et optimise les paramètres du processus à l'aide de la technique d'optimisation TOPSIS.

Le Ti-6Al-4V a été choisi comme pièce à usiner en raison de ses propriétés exceptionnelles, notamment dans les environnements cryogéniques. La pièce à usiner a été usinée en une forme rectangulaire de dimensions  $10 \times 20$  mm à l'aide du WEDM.

L'analyse de Taguchi a été utilisée pour concevoir les expériences. Quatre paramètres : débit de fil, courant de crête ( $I_p$ ), temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{on}$ ) et temps d'impulsion ( $T_{off}$ ) ont été variés à trois niveaux. Quatre paramètres de réponse ont été pris en compte : Taux

d'enlèvement de matière (MRR), Taux d'usure de l'outil (TWR), Rugosité de surface (Ra) et Épaisseur de la couche retrempée.

Ces paramètres sont essentiels pour évaluer le processus d'usinage et la qualité de la surface. La technique d'optimisation TOPSIS (Technique for Order Préférence by Similarity to Ideal Solution) a été utilisée pour déterminer la meilleure combinaison de paramètres. Cette technique implique le calcul d'une matrice de performance, sa normalisation, l'attribution de poids aux paramètres de réponse, la détermination des solutions idéales (positives et négatives), le calcul des distances euclidiennes et le classement de la matrice de performance. Lors de l'utilisation du fil de laiton traité thermiquement, le meilleur MRR a été obtenu avec des valeurs de paramètres spécifiques ( $T_{on}$ ,  $T_{off}$ ,  $I_p$  et débit de fil). La finition de surface (Ra) a été optimisée avec différentes valeurs de paramètres.

L'épaisseur de la couche retrempée et le taux d'usure de l'outil ont également eu leurs combinaisons de paramètres optimaux. Une optimisation TOPSIS a été réalisée pour les fils en laiton traité thermiquement et en laiton revêtus de zinc. Le classement des expériences a révélé les meilleures combinaisons de paramètres pour chaque type de fil [98].

### **18) Elumalaia, et al**

Ont démontré par une étude, l'effet de la nano poudre de SiC sur l'usinage de l'Inconel 718 à différents régimes d'énergie de décharge (DER). Une amélioration significative du taux d'enlèvement de matière, une réduction du taux d'usure de l'outil et de la rugosité de surface ont été observées dans l'usinage par micro-électro-érosion à nano poudre (NPM $\mu$ EDM) par rapport à l'EDM micro.

L'additif nano a considérablement amélioré le taux d'enlèvement de matière (MRR) réduit le taux d'usure de l'outil (TWR) ainsi que la rugosité de surface respectivement. Des modèles ont été créés pour prédire la rugosité de surface dans le NPM $\mu$ EDM en utilisant deux approches différentes, à savoir la régression par vecteur de support (SVR) et la machine à forêt aléatoire (RFM). Les modèles SVR et RFM ont tous deux été en mesure de prédire la valeur (Ra) avec une meilleure précision.

L'influence de la nano poudre de SiC et de sa concentration sur l'usinage électro-érosion microscopique de l'Inconel 718 mélangé à de la nano poudre a été étudiée sous trois régimes énergétiques différents. Le taux d'enlèvement de matière, le taux d'usure de l'outil et la rugosité de surface ont été pris en compte comme critères de performance pour cette enquête. Des algorithmes d'apprentissage automatique ont été utilisés pour construire des modèles de prédiction à partir des données expérimentales. Ont conclu que Le DER moyen a produit un

meilleur MRR en raison d'une durée de charge et de décharge optimale et d'une efficacité d'érosion accrue.

Une amélioration moyenne de 163,58 % du MRR a été observée avec une concentration de nano poudre de SiC de 0,4 g/l sous DER moyen.

L'ajout de nano poudre de SiC a réduit le TWR jusqu'à 24,35 % sous des DER moyens et élevés.

Une réduction moyenne de 17,20 % de la rugosité de surface a été obtenue avec une concentration de nano poudre de SiC de 0,4 g/l. L'ajout de nano poudre de SiC dans le diélectrique a considérablement réduit le WLT.

Les noyaux SVR polynomial et RBF ont prédit la rugosité de surface en NPM $\mu$ EDM avec des valeurs de  $R^2$  de 0,979 et 0,986 respectivement [99].

#### **19) P. Mathan Kumar, et al**

Ont présenté une étude sur un alliage Inconel 718 choisi pour l'EDM, en utilisant une électrode TiB<sub>2</sub>-Cu fabriquée par métallurgie des poudres. Les facteurs d'entrée, à savoir le courant d'impulsion ( $I_p$ ), le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) et la tension de l'espace ( $G_v$ ), ont été sélectionnés et leurs réponses de sortie étaient la rugosité de surface (SR) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). Pour la surface de réponse, la technique de Box Behnken a été préférée lors de la conception des expériences DoE (Design of Experiments).

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour comprendre l'influence des facteurs d'entrée sélectionnés sur la SR et le MRR. Le RSM (Response Surface Methodology), intégré à une analyse de relation grise (GRA) (Grey Relational Analysis (GRA)) a révélé que les paramètres d'entrée optimaux pour de meilleures caractéristiques d'usinage étaient :  $I_p = 10$  A,  $T_{on} = 40$   $\mu$ s et  $G_v = 50$  V. De plus, les résultats ont également montré que le courant d'impulsion influençait de manière plus significative les réponses de sortie que les autres paramètres.

De plus, une augmentation de la tension de l'espace provoquait des irrégularités de surface sur la surface usinée. La morphologie de surface des surfaces usinées a été analysée à l'aide de la microscopie électronique à balayage (SEM) (Scanning Electron Microscopy (SEM))." et de l'analyse par spectrométrie de dispersion d'énergie (EDAX) (Energy Dispersive X-ray Spectrometry (EDAX)). De plus, une certaine quantité de transfert de matériau de l'outil a été notée lors de l'analyse EDAX.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants : La fabrication de l'électrode composite frittée TiB<sub>2</sub>-Cu par un processus de métallurgie des poudres est pratique, et un taux d'enlèvement de matière élevé (0,057 g/min) a été observé. La meilleure qualité de surface (2,71 µm) a été observée. Il a été constaté que le courant d'impulsion a plus d'influence sur le MRR et le SR.

Les réglages optimaux des paramètres ont été identifiés en utilisant l'analyse de surface de réponse/l'analyse de relation grise. En incluant une certaine quantité de titane, le matériau de l'outil a été transféré à la surface usinée lors de l'exécution optimale. L'analyse EDAX indique que 0,13 % de titane a été transféré sur la surface usinée [100].

### **II.3 Travaux de modélisation**

#### **1) Vinothkumar. S**

A traité du processus d'usinage par micro-électroérosion (Micro-EDM), une méthode électrothermique non conventionnelle où l'énergie électrique génère des étincelles pour éliminer les matériaux principalement grâce à l'énergie thermique de l'étincelle. Ce processus est complexe et mal compris.

L'étude décrit la modélisation par éléments finis du processus Micro-EDM de circuit RC en utilisant le logiciel ANSYS (Analyse Système Numérique et Simulations) (version 12) pour prédire le taux d'enlèvement de matière. Le modèle tient compte de la capacitance, de la résistance et de la tension pour prédire la distribution de température sur la pièce.

Les résultats ont été vérifiés expérimentalement en utilisant du cuivre pur comme électrode d'outil et de l'acier inoxydable AISI 304 comme matériau à usiner. De plus, le texte introduit un modèle d'érosion anodique pour capturer les principaux effets physiques du processus Micro-EDM.

Ce modèle permet de déterminer la variation de température dans la pièce et d'évaluer les taux d'enlèvement de matière dans différentes conditions d'usinage. En résumé, cette étude fournit une méthodologie utile pour définir les paramètres d'usinage et atteindre la précision souhaitée lors de la fabrication de composants par micro-EDM à circuit RC [101].

#### **2) Saurav Datta, Siba Sankar Mahapatra**

Ont développés, des modèles mathématiques quadratiques pour représenter le comportement du processus d'usinage par électro-érosion par fil (WEDM). Des expériences ont été menées avec six paramètres de processus : courant de décharge, durée de l'impulsion,

fréquence de l'impulsion, vitesse du fil, tension du fil et débit du diélectrique ; à varier à trois niveaux différents.

Les données relatives aux réponses du processus, à savoir le taux d'enlèvement de matière (MRR), la valeur de rugosité de la surface travaillée (une mesure de la finition de surface, SF) et le jeu de coupe, ont été mesurées pour chacune des courses expérimentales ; correspondant à des combinaisons de réglages de facteurs différents choisis de manière aléatoire.

Ces données ont été utilisées pour ajuster un modèle mathématique quadratique (modèle de surface de réponse) pour chacune des réponses, qui peut être représenté comme une fonction des six paramètres de processus susmentionnés. Les données prédites ont été utilisées pour l'identification de l'influence paramétrique sous forme de représentation graphique montrant l'influence des paramètres sur les réponses sélectionnées.

Les données prédites fournies par les modèles (selon la conception orthogonale L27 (3\*6) de Taguchi) ont été utilisées pour rechercher une combinaison paramétrique optimale afin d'obtenir un rendement souhaité du processus : taux d'enlèvement de matière maximal, bonne finition de surface (valeur minimale de rugosité) et précision dimensionnelle du produit.

L'analyse des relations grises a été adoptée pour convertir ce critère multi-objectif en une fonction objectif unique équivalente ; la note globale de relation grise, qui a été optimisée (maximisée) en utilisant la technique de Taguchi. Les paramètres optimaux ont été vérifiés par le biais d'un test confirmatoire ; montrant une bonne concordance avec la valeur prédite. Cela indique l'utilité de la technique grise-Taguchi en tant qu'optimiseur multi-objectif dans le domaine de l'EDM par fil [102].

### **3) Bozdana, et al**

Ont traité de la modélisation mathématique du perçage de trous par EDM (Electrical Discharge Machining) sur Inconel 718 à l'aide d'une électrode en laiton, en utilisant la méthodologie de surface de réponse.

Ils ont concentré sur le perçage de trous à l'aide de cette technique et propose une approche de modélisation mathématique pour optimiser ce processus.

La méthodologie de surface de réponse est utilisée pour développer un modèle mathématique qui prend en compte divers paramètres du processus de perçage par EDM, tels que l'intensité du courant, la durée de l'impulsion, la fréquence de l'impulsion, etc. Ce modèle vise à prédire les performances du processus, notamment la géométrie des trous percés et la qualité de la surface obtenue.

Ils ont inclus des résultats expérimentaux pour valider le modèle proposé. En fin de compte, l'objectif est d'optimiser le processus de perçage par EDM en utilisant la modélisation mathématique et la méthodologie de surface de réponse, ce qui peut aider à améliorer l'efficacité et la qualité de ce processus dans l'industrie manufacturière [103].

#### **4) Al Hazza, M. et al**

Ont traité de la modélisation des paramètres électriques dans le processus d'usinage électroérosion par décharge électrique (EDM) appliqué à l'alliage Ti6Al4V. Les auteurs ont utilisé une méthode basée sur les réseaux neuronaux pour modéliser ces paramètres importants dans le processus EDM.

Dans cette recherche, le Réseau de Neurones Artificiels (ANN) a été utilisé comme un outil efficace pour la modélisation et la prédiction de la rugosité de surface (SR), du taux d'enlèvement de matière (MRR) et du taux d'usure de l'outil (TWR) dans le processus EDM. La performance de l'EDM avec une électrode compacte en cuivre a été étudiée en utilisant le courant de crête ( $I_p$ ), la durée de l'impulsion ( $T_{on}$ ) et le facteur de service ( $\eta$ ) comme variables d'entrée. Un ensemble de données expérimentales a été obtenu avec différents niveaux.

Les expériences ont été planifiées et mises en œuvre en utilisant le plan composite central (CCD) de la méthodologie de surface de réponse (RSM) avec trois facteurs d'entrée à cinq niveaux. Le modèle de réseau de neurones a été construit en utilisant MATLAB. Les résultats indiquent que malgré la complexité de développement d'un modèle et de prédiction des résultats dans le processus EDM, la technique du réseau de neurones s'avère adéquate pour prédire la SR, le MRR et le TWR. Les modèles prédictifs de réseau de neurones se révèlent capables de fournir une grande précision.

L'influence du courant de crête ( $I_p$ ), de la durée de l'impulsion ( $T_{on}$ ) et du facteur de service ( $\eta$ ) sur la rugosité de surface (SR), le taux d'enlèvement de matière (MRR) et le taux d'usure de l'outil (TWR) de l'alliage Ti6Al4V avec une électrode compacte en cuivre (Cu) a été modélisée. Les résultats montrent différents pourcentages de précision. Cependant, tous les résultats montrent que tous les modèles sont valides [104].

#### **5) K. Kumara et R. Ravikumarb**

Ont traité de l'optimisation des paramètres du processus de découpe au fil (WEDM) en prenant en compte des paramètres tels que le temps d'allumage, le temps d'extinction, la vitesse du fil et l'alimentation du fil. Des expériences ont été réalisées avec ces paramètres à trois niveaux différents, et des mesures du taux d'enlèvement de matière et de la rugosité de surface

(Ra) ont été effectuées. Ces données ont été utilisées pour créer des modèles mathématiques quadratiques (RSM) pour chaque réponse, en fonction des paramètres du processus. Les données prédites ont ensuite été utilisées pour visualiser l'influence des paramètres sur les réponses sélectionnées.

L'approche de Taguchi a été employée pour trouver une combinaison optimale de paramètres visant à maximiser la réduction de la rugosité de surface. En outre, des expériences de confirmation ont été menées pour évaluer la validité des résultats prédits obtenus grâce à l'optimisation de Taguchi. Cette étude a permis de déterminer les paramètres d'usinage essentiels qui affectent la rugosité de surface dans le processus de WEDM, avec un accent particulier sur l'optimisation de la qualité de surface [105].

## **6) Mithun S. et al**

Ont concentré sur la modélisation du processus d'usinage par décharge électrique microscopique (Micro Electric Discharge Machining ou Micro-EDM) en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) sur Ti-6Al-4V comme pièce. Le Micro-EDM est une technique de fabrication avancée utilisée pour l'usinage de pièces de très petite taille avec une grande précision. La modélisation FEM est une approche de simulation numérique largement utilisée pour comprendre et optimiser les processus de fabrication.

L'objectif principal de chercheurs est de développer un modèle FEM pour prédire avec précision les caractéristiques de l'usinage par Micro-EDM, telles que la forme et la rugosité de la surface usinée, la profondeur d'usinage, etc. La modélisation FEM permet de prendre en compte divers paramètres du processus, tels que l'intensité du courant, la vitesse de déplacement de l'électrode, la conductivité de l'électrolyte, et d'autres variables influençant le processus de Micro-EDM.

Ils ont discuté les résultats de la modélisation FEM et de leur comparaison avec les résultats expérimentaux, démontrant ainsi la validité et l'efficacité du modèle proposé. Les conclusions de l'article mettent en évidence l'importance de la modélisation FEM dans la compréhension et l'amélioration du processus de Micro-EDM pour atteindre des performances de fabrication de haute précision.

En résumé, les chercheurs explorent l'application de la modélisation par éléments finis pour simuler et optimiser le processus de Micro-EDM, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'industrie manufacturière et la fabrication de composants de petite taille avec une grande précision [106].

**7) V. Muthukumara, et al**

Ont concentré sur la modélisation mathématique de la coupe radiale excessive lors de l'usinage électro-étincelage de l'Incoloy 800. Pour atteindre cet objectif, les auteurs ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (Response Surface Methodology). Cette méthode statistique leur a permis de développer un modèle mathématique qui décrit de manière précise la relation entre les paramètres de processus, tels que l'intensité du courant, la vitesse de déplacement de l'électrode, la durée de l'impulsion, et la coupe radiale excessive.

Les chercheurs discutent des résultats de l'étude, mettant en évidence les facteurs qui influencent la coupe radiale excessive lors de l'usinage de l'Incoloy 800. Les auteurs ont utilisé des techniques d'analyse statistique pour optimiser les paramètres de processus afin de minimiser cette coupe radiale excessive et d'améliorer la précision de l'usinage.

En conclusion, cette recherche vise sur la modélisation mathématique de la coupe radiale excessive dans le processus d'usinage électro-étincelage de l'Incoloy 800 en utilisant la méthode de surface de réponse. Les résultats obtenus peuvent être précieux pour améliorer la qualité et l'efficacité de ce processus dans l'industrie de la fabrication [107].

**8) J. Laxman et K. Guru Raj**

Ont concentré sur l'application de deux techniques différentes, à savoir la technique Taguchi et la modélisation basée sur la logique floue, dans le contexte des paramètres du processus de l'usinage par électroérosion (EDM). L'EDM est un processus d'usinage non conventionnel essentiel utilisé dans la fabrication pour façonner et créer des caractéristiques complexes dans des matériaux métalliques et non métalliques.

L'article commence par une introduction à l'EDM et à son importance dans les processus de fabrication modernes. Il met en évidence l'importance de l'optimisation des paramètres de l'EDM pour améliorer l'efficacité et la productivité.

Les auteurs utilisent la technique Taguchi, une méthode statistique largement reconnue pour l'amélioration de la qualité et l'optimisation. Ils utilisent le tableau orthogonal de Taguchi pour planifier et réaliser des expériences, en collectant des données sur divers paramètres du processus EDM.

En plus de la technique Taguchi, l'article introduit le concept de modélisation basée sur la logique floue. La logique floue est utilisée pour modéliser et analyser les paramètres du processus EDM. La logique floue permet de gérer les incertitudes et les informations imprécises, ce qui la rend adaptée aux systèmes complexes comme l'EDM.

Les auteurs présentent les résultats de leurs expériences et analyses en utilisant à la fois la technique Taguchi et la modélisation basée sur la logique floue. Ils discutent probablement des effets des différents paramètres de l'EDM sur le processus d'usinage et la qualité du produit.

En résumant les conclusions et en mettant en évidence les avantages de la combinaison de la technique Taguchi et de la modélisation basée sur la logique floue pour optimiser les paramètres du processus EDM. Les auteurs peuvent également suggérer des applications pratiques et des orientations pour les futures recherches. Fournir des informations précieuses sur l'optimisation des processus EDM grâce à une combinaison d'approches statistiques et basées sur la logique floue. Les chercheurs et les praticiens dans le domaine de la fabrication et des processus d'usinage peuvent trouver cet article utile pour améliorer l'efficacité et la qualité des produits dans le domaine de l'EDM [109].

#### **9) Hardik N. Mehtaa**

Ont étudié les différents modèles existants développés pour l'EDM, puis de développer un modèle prenant en compte une approche multidisciplinaire. Un modèle thermique non linéaire et transitoire du processus EDM par enfoncement d'outil a été développé. Ce travail repose sur une approche numérique thermique et le modèle thermique est validé avec des travaux publiés. L'approche numérique a été développée à l'aide du solveur d'analyse par éléments finis Ansys.

L'optimisation des résultats obtenus par la méthode d'évaluation permettra d'obtenir de meilleurs résultats à l'avenir. Les modèles théoriques rapportés basés sur l'analyse thermique ont une applicabilité limitée, car ils reposent sur des hypothèses telles que l'utilisation d'un rayon d'étincelle constant, l'approximation de la source de chaleur à un point ou à une forme de disque (uniforme) et des propriétés thermiques constantes des matériaux de travail/outils.

Il existe donc un besoin de développer un modèle de processus numérique plus complet et réaliste basé sur l'analyse thermique de l'EDM pour prédire avec précision la forme et la taille de la cavité de la croûte en modifiant les hypothèses susmentionnées. L'approche thermique a été couverte et elle est en bon accord avec les résultats publiés. Le pourcentage de différence entre les valeurs de MRR publiées se situe entre 0,38 et 2,38. L'expérimentation et l'optimisation à partir de ces résultats permettront d'obtenir de meilleurs résultats à l'avenir [110].

#### **10) Husein A. Hegab, et al**

Ont optimisé les paramètres du processus d'usinage par électroérosion de composites aluminium-nanotubes de carbone multicouches (AL-CNT). Les principaux objectifs de cette

optimisation sont le taux d'enlèvement de matière (MRR), le rapport d'usure de l'électrode (EWR) et la rugosité de surface moyenne (Ra). Les paramètres d'usinage considérés comprennent le temps d'usinage, le courant de décharge, la tension, la profondeur totale de coupe et le pourcentage de CNT ajouté en poids.

Pour atteindre ces objectifs, l'étude utilise la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour développer des modèles mathématiques reliant les réponses aux paramètres de processus significatifs. Les résultats expérimentaux indiquent que les niveaux optimaux pour le MRR sont un pourcentage de CNT de 0 %, un courant de décharge élevé de 6 A et une tension faible de 50 V. Pour le rapport d'usure de l'électrode, les niveaux optimaux sont un pourcentage de CNT de 5 % et un courant de décharge élevé de 6 A. En ce qui concerne la rugosité de surface moyenne, les niveaux optimaux sont un pourcentage de CNT de 0 %, un courant de décharge faible de 2 A et une profondeur de coupe élevée de 1 mm.

L'étude propose également une optimisation mono-objectif résolue à l'aide d'un algorithme génétique, ainsi qu'un modèle d'optimisation multi-objectif pour les trois réponses d'intérêt. Cette méthodologie combine les résultats expérimentaux, établit des modèles mathématiques dans le domaine d'intérêt et optimise les modèles de processus.

Pour l'expérimentation, un plan d'expérience L27OA est utilisé, réduisant ainsi le nombre d'essais nécessaires à 1/9 de la quantité totale. Les composites d'aluminium et de nanotubes de carbone sont utilisés, justifiés par leurs applications croissantes. La validation des modèles RSM montre des écarts moyens en pourcentage pour les différentes réponses, indiquant la précision des modèles, bien que l'amélioration soit possible en augmentant le nombre d'essais et en élargissant les plages de variables de processus.

Enfin, l'étude suggère plusieurs pistes de recherche futures, notamment l'exploration d'autres paramètres du processus EDM, la mesure de plusieurs réponses de qualité et l'utilisation de plans d'expérience différents. Elle met également en avant l'importance de l'état de la machine et du bruit lié à la machine dans la recherche et l'optimisation des processus [111].

#### **11) S. G. Badekar, B. M. Dabade**

Ont étudié l'électro-érosion par enfonçage électrique (EDM) est l'un des premiers procédés de fabrication non traditionnels. Le processus d'EDM est basé sur l'énergie thermoélectrique entre la pièce à travailler et une électrode. Il existe différents paramètres d'entrée qui influencent les résultats tels que le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'électrode (TWR) et la rugosité de surface (SR). L'optimisation est l'une des techniques utilisées dans les secteurs de la fabrication pour parvenir aux meilleures conditions

de fabrication, ce qui est une nécessité essentielle pour les industries en vue de la production de produits de qualité à moindre coût. De plus, en raison de la complexité de l'EDM, il est très compliqué de déterminer les paramètres de coupe optimaux pour améliorer les performances de coupe, ce qui est une action importante dans l'usinage. La modélisation est nécessaire pour établir une relation précise entre les paramètres d'entrée et de sortie. Cet article présente une revue des diverses activités de recherche menées dans la modélisation et l'optimisation des paramètres du processus EDM par différentes techniques sur différents milieux diélectriques, matériaux de la pièce à travailler et matériaux d'électrode.

La revue est basée sur des recherches antérieures et récentes sur la EDM. MRR, SR, TWR sont les mesures de performance de la EDM. La performance de ces paramètres de processus est affectée par divers paramètres de processus lors de l'usinage. L'article de revue évalue diverses techniques de modélisation de processus utilisées lors de l'usinage et diverses techniques d'optimisation appliquées pour améliorer le MRR, le TWR et le SR. Cela aide à identifier les paramètres d'optimisation et la technique de modélisation pour le travail de la EDM [112].

## **12) V. L. Bhambere et S. S. Khandare**

Ont développé, un modèle de perceptron multicouche (MLP) pour prédire le taux d'enlèvement de matière. Un modèle de régression mathématique a également été développé en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour établir la relation entre le taux d'enlèvement de matière (MRR) et les paramètres de processus d'entrée tels que le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ), le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ), le courant de crête ( $I_p$ ) et la tension de servo (SV). Les valeurs prédites par l'intermédiaire du MLP et de la RSM ont été comparées aux valeurs expérimentales.

Les erreurs moyennes en pourcentage sont trouvées à 1,29 % et -0,36527 % pour le MLP et la RSM respectivement. Il est observé que les valeurs prédites par la RSM se rapprochent davantage des valeurs expérimentales par rapport au modèle MLP.

Les valeurs prédites par les modèles RSM et ANN sont comparées aux valeurs expérimentales, et l'erreur pourcentage moyenne est également calculée. Il est observé que les valeurs prédites par les deux modèles sont approximativement les mêmes que les valeurs expérimentales. L'erreur pourcentage moyenne est de 1,28643 % et de -0,36829 % pour les modèles ANN et RSM respectivement [113].

**13) S. Chandramouli et K. Eswaraiah**

Ont porté une étude sur le développement d'un modèle basé sur des réseaux de neurones artificiels (ANN) pour prédire la qualité de l'usinage par électroérosion de l'acier martensitique à durcissement par précipitation (PH) et du cuivre-tungstène en tant qu'électrode d'outil. Les paramètres du processus étudiés comprennent le courant de crête, le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion et le temps de levée de l'outil, ainsi que les qualités d'usinage telles que le taux d'enlèvement de matière et la rugosité de surface. Un plan orthogonal L27 a été utilisé pour les expériences.

Les résultats montrent que la prédiction du taux d'enlèvement de matière et de la rugosité de surface par analyse de régression présente des variations dues à des phénomènes complexes non linéaires. Pour surmonter ces défis, un modèle de réseau de neurones artificiels a été développé en utilisant MATLAB avec la technique de rétro propagation Levenberg-Marquardt et une architecture de fonction d'activation sigmoïde logistique appropriée.

Ce modèle a été entraîné, testé et validé avec succès en utilisant des données expérimentales. Les résultats ont montré une concordance étroite entre les prédictions du modèle ANN et les données expérimentales, avec des écarts moyens très faibles entre les résultats prévus et réels. L'erreur moyenne observée pour le taux d'enlèvement de matière et la rugosité de surface lors de la phase de test était respectivement de 3,32 et 2,25.

En conclusion, ce modèle ANN s'est avéré être un outil efficace pour prédire les résultats du processus d'électroérosion complexe (EDM) pour l'usinage de l'acier 17-4 PH avec une électrode en cuivre-tungstène. Il a produit de meilleures prédictions par rapport au modèle de régression et peut être utilisé pour estimer les résultats de l'EDM pour une gamme de paramètres de processus donnée [114].

**14) J.F. Liu et Y.B. Guo**

Ont développé une approche de modélisation novatrice pour prendre en compte les décharges massives aléatoires. Cette approche s'appuie sur le processus stochastique de l'EDM (Électroérosion par Décharge en Milieu Liquide) et la théorie des probabilités. Plus spécifiquement, l'objectif était de simuler le processus d'EDM par enfoncement de NiTi tout en étudiant le mécanisme de dommage thermique causé par l'avancement des décharges massives aléatoires.

Un modèle innovant, capable de prendre en compte le phénomène de décharge aléatoire, a été intégré avec succès dans le logiciel ABAQUS pour simuler des décharges massives aléatoires. Ces décharges ont donné lieu à une surface isotrope.

Les prédictions du modèle concernant la géométrie du cratère résultant d'une seule décharge correspondaient très bien aux résultats expérimentaux.

L'évolution de la topographie de la surface et de la température a été étudiée avec 1700 décharges. Les profils de température de la surface supérieure ont révélé des caractéristiques pulsatrices, en conséquence du phénomène de décharge aléatoire à haute fréquence.

Une différence significative de gradient de température a été observée entre la surface supérieure et la sous-surface, avec un gradient plus élevé sur une profondeur d'environ 20  $\mu\text{m}$ , tandis qu'il diminuait progressivement en profondeur.

En fin de compte, cette approche de modélisation, qui prend en compte le phénomène de décharge aléatoire, s'est avérée être une méthode efficace pour étudier les effets des processus d'EDM.

En résumé, cette étude a développé une approche novatrice de modélisation pour comprendre les décharges massives aléatoires dans le contexte de l'EDM par enfoncement de NiTi. Les résultats obtenus démontrent que le modèle proposé est efficace pour caractériser les effets de ces processus sur la géométrie de surface et les profils de température [115].

### **15) Govindan Puthumana**

A présenté une modélisation du processus de Micro-EDM, en mettant particulièrement l'accent sur la réduction de l'usure de l'électrode d'outil, ce qui est essentiel pour la fabrication de pièces de petite taille sans compromettre leur biocompatibilité. L'article aborde des approches d'usinage spécifiques pour minimiser l'usure de l'électrode d'outil, en se basant sur une compréhension approfondie des paramètres du processus Micro-EDM.

En utilisant une analyse de régression linéaire multiple (MLRA) et des réseaux de neurones artificiels (ANN). Les facteurs de micro-EDM gouvernants choisis pour cette enquête étaient : la tension (V), le courant (I), le temps l'impulsion ( $T_{on}$ ) et la fréquence d'impulsion (F). Les modèles prédictifs proposés génèrent une corrélation fonctionnelle entre le taux d'usure des électrodes de l'outil (TWR) et les facteurs de micro-EDM régissant. Un modèle de régression linéaire multiple a été développé pour la prédiction de TWR en dix étapes à un niveau de signification de 90%. L'architecture optimale de l'ANN a été obtenue avec 7 couches cachées à une valeur R-SQ de 0,98.

Les valeurs prévues de TWR utilisant ANN correspondaient bien aux valeurs pratiquement mesurées et calculées de TWR. Sur la base de l'approche basée sur l'informatique douce proposée en matière de fabrication de micro-appareils biocompatibles, une condition pour le taux d'usure minimum de l'outil (TWR) a été obtenue.

Les résultats et les recommandations présentés dans l'article visent à améliorer la précision et l'efficacité du processus de Micro-EDM tout en garantissant la biocompatibilité des pièces micro fabriquées. Cela peut avoir des implications importantes dans divers domaines, tels que la fabrication de dispositifs médicaux et de composants pour d'autres applications biocompatibles [116].

#### **16) Ramanan G et Edwin Raja Dhas Jb**

Ont concentré sur l'optimisation des paramètres de l'usinage par EDM (Electrical Discharge Machining) à l'aide de la modélisation de surface de réponse et de l'analyse grise des relations. L'EDM est une méthode d'usinage importante dans la fabrication, mais son efficacité dépend largement des paramètres de processus tels que la tension, le courant, la vitesse de l'outil, etc.

Les auteurs ont utilisé la modélisation de surface de réponse pour explorer comment différents paramètres de l'EDM affectent plusieurs caractéristiques de réponse simultanément. Cela leur a permis de trouver un ensemble optimal de paramètres qui répondent à plusieurs critères de performance.

De plus, l'analyse grise relative a été employée pour évaluer l'importance relative des différents paramètres sur les caractéristiques de réponse. Cela a aidé à identifier quels paramètres ont le plus grand impact sur la performance de l'usinage par EDM.

L'analyse de la relation de gris a donné une faible rugosité de surface et un taux d'élimination élevé pour la combinaison du courant de décharge 17500 A, du temps d'impulsion 5  $\mu$ s, le temps d'arrêt de l'impulsion 50  $\mu$ s et la vitesse d'asservissement 100 tr/min. Les études de microstructure révèlent les interfaces entre les matériaux et l'apparition de particules de grains des meilleurs paramètres de combinaison.

Les résultats de l'analyse relative de gris dépassent légèrement les résultats expérimentaux de la technique de surface de réponse.

En résumé, les chercheurs met en évidence une approche méthodologique combinant la modélisation de surface de réponse et l'analyse grise relative pour optimiser les paramètres de l'usinage par EDM, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité et la qualité du processus d'usinage [117].

#### **17) Shivam Kumar Singh S. C. et Jayswal P.G**

Ont porté une étude sur l'usinage par électro-érosion à fil du matériau Inconel 686 en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM). L'Inconel 686 est un alliage résistant à

la corrosion utilisé dans des environnements corrosifs. L'étude a utilisé un matériau Inconel 686 comme pièce à usiner et a pris en compte quatre paramètres d'entrée contrôlables : le courant d'étincelage, le temps d'impulsion, le cycle de service en pourcentage et la tension. De plus, une électrode en aluminium hautement conducteur a été utilisée.

Un plan central composite en surface de réponse a été créé avec 30 expériences utilisant différentes combinaisons de paramètres de processus pour étudier leur impact sur le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'outil (TWR) et la rugosité de surface Ra.

Les résultats ont montré que le courant d'étincelage, le temps d'impulsion, le cycle de service et la tension ont une influence significative sur le MRR, le TWR et le Ra. Un modèle statistique a été développé pour prédire ces caractéristiques de sortie, avec des valeurs de  $R^2$  élevées (0,9222 pour le MRR, 0,9402 pour le TWR et 0,8764 pour le Ra) indiquant que le modèle est satisfaisant.

L'objectif final de l'étude était de déterminer les paramètres de processus significatifs qui influencent le MRR, le TWR et le Ra lors de l'usinage par électro-érosion à fil du matériau Inconel 686. Les conditions optimales pour l'usinage ont été déterminées, notamment un MRR de 7,638 mm<sup>3</sup>/min, un TWR de 1,076 mm<sup>3</sup>/min et un Ra de 9,183 µm, en utilisant des paramètres spécifiques tels qu'un courant d'étincelle de 7A, un temps d'impulsion de 400 µs, un cycle de service en pourcentage de 9 et une tension de 70V. Ces résultats permettent d'optimiser efficacement et économiquement le processus d'EDM pour le matériau Inconel 686[118].

### **18) Muthusamy Prabu et al**

Ont étudié l'effet de certains des principaux paramètres du processus d'usinage par électro-érosion, tels que la pression de lavage, le courant, le temps d'impulsion et les vibrations, sur le taux d'usure de l'outil (TWR) et le taux d'enlèvement de matière (MRR) de l'alliage composites Al/10 % en poids de TiB<sub>2</sub> (borure de titane) composites.

L'étude vise à comprendre les caractéristiques de l'usinage de ces composites spécifiques et à élaborer des modèles pour prédire le MRR et le TWR en fonction des paramètres de l'EDM.

La méthodologie de surface de réponse a été utilisée pour déterminer les critères les plus importants afin de maximiser le MRR et minimiser le TWR. La procédure expérimentale a été conçue sur la base d'un plan central composite rotatif du second ordre. Une analyse de sensibilité a été utilisée pour identifier les critères importants et les classer par ordre d'importance dans la validation du modèle.

De nombreux efforts ont été déployés pour comparer les résultats calculés des données obtenues. La sensibilité au temps d'impulsion s'est avérée avoir un effet plus significatif sur le

MRR et le TWR que les autres critères. La valeur du MRR augmente avec une augmentation du courant de crête. Cela se produit dans une pièce qui transfère directement la chaleur à la pièce, et ces fonctions augmentent le TWR. Cela se produit en raison d'une augmentation du MRR et d'une diminution du TWR.

Les résultats de cette recherche contribuent à améliorer la compréhension et la maîtrise des processus d'usinage de ces matériaux composites, ce qui peut avoir des applications importantes dans divers domaines de l'ingénierie [119].

### **19) M. Azadi Moghaddam et F. Kolahan**

Ont présenté une de modélisation et l'optimisation du processus d'Usinage par Décharge Électrique (EDM) en utilisant un Réseau de Neurones Artificiels (ANN) et l'algorithme d'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO). Trois caractéristiques de performance, à savoir la qualité de surface, la quantité de matériau enlevée de la pièce et le rapport d'usure de l'outil, ont été considérées dans cette recherche.

L'objectif principal était d'optimiser le processus pour minimiser simultanément le Taux d'Usure de l'Outil (TWR) et la Rugosité de Surface (SR), tout en maximisant le Taux d'Enlèvement de Matériau (MRR). Pour atteindre cet objectif, un réseau de neurones avec (BPNN) algorithme de rétro propagation pour les réseaux de neurones a été utilisé pour établir une relation entre les paramètres d'entrée du processus et les caractéristiques de sortie.

Dans la dernière partie de l'étude, l'algorithme PSO a été employé pour optimiser le processus avec des caractéristiques multi-réponses. Des tests de confirmation ont été réalisés pour valider la procédure d'optimisation proposée. Les résultats ont montré que le modèle BPNN pouvait simuler le processus EDM avec une précision de moins de 1 % d'erreur, et que l'algorithme PSO était très efficace pour optimiser le processus, avec moins de 4 % d'erreur.

Les valeurs empiriques nécessaires pour modéliser le processus EDM sur des pièces en acier AISI2312 travaillées à chaud ont été déterminées par la méthodologie Taguchi. La technique d'optimisation multi-objectif a permis de trouver une combinaison de paramètres d'entrée du processus permettant d'obtenir une MRR maximisée tout en minimisant simultanément SR et TWR. Le modèle BPNN a montré un accord approprié entre les réponses prédites et les valeurs expérimentales, avec moins de 0,8 % d'erreur pour les trois sorties, démontrant ainsi son efficacité.

En conclusion, cette étude a réussi à modéliser efficacement le processus EDM à l'aide du BPNN et à optimiser ses paramètres d'entrée à l'aide de l'algorithme PSO. Les résultats ont confirmé l'efficacité de la procédure hybride proposée (BPNN-PSO) pour la modélisation

multi-réponses et l'optimisation du processus EDM, ce qui suggère que cette approche peut être appliquée avec succès à d'autres processus de fabrication [120].

## **20) Sushant B. Patil et al**

Ont optimisé les paramètres du processus d'usinage par décharge électrique par fil à l'aide de la méthodologie de surface de réponse. Un plan composite central est utilisé pour la conception des expériences. Les paramètres du processus pris en compte pour cette étude sont le temps d'impulsion, le débit de fil, le temps d'arrêt de l'impulsion et la tension de servomoteur.

Pour cette expérimentation, l'EN-31 est utilisé comme matériau de pièce à usiner. La forte proportion de carbone présente dans le matériau en fait un choix courant pour la fabrication de poinçons et de matrices. Pour déterminer les facteurs significatifs, une analyse de la variance (ANOVA) est réalisée. L'analyse de la variance pour le taux de matériau enlevé (MRR) montre clairement que le temps d'impulsion et la tension de servomoteur sont les paramètres les plus significatifs.

D'après l'analyse des résultats, la valeur élevée de MRR est obtenue avec une valeur élevée de temps d'impulsion et une valeur faible de tension de servomoteur. En ce qui concerne la rugosité de surface, le temps d'impulsion et la tension de servomoteur sont également les facteurs les plus significatifs par rapport aux autres ; la valeur faible de rugosité de surface est obtenue avec une valeur faible de temps d'impulsion et une valeur élevée de tension de servomoteur [121].

## **II.4 Travaux d'optimisation**

### **1) V. Muthu Kumar et al**

Ont présenté une étude sur l'optimisation des paramètres du processus d'usinage par électroérosion par fil (Wire-EDM) pour travailler un alliage de titane (Ti-6AL-4V). Les paramètres du processus, tels que le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, l'avance du fil et la tension de l'espace, ont été ajustés pour améliorer le taux d'enlèvement de matière, la rugosité de surface et la largeur de la coupe.

L'étude a utilisé un fil de laiton de 0,25 mm de diamètre dans une machine Electronica Ecocut. La méthode Taguchi a été employée pour optimiser ces paramètres, en obtenant un grade de corrélation grise pour identifier les niveaux optimaux des paramètres. Une analyse de variance (ANOVA-Analysis of Variance) a été effectuée pour déterminer la contribution en pourcentage de chaque paramètre aux résultats.

Un test de confirmation a été réalisé pour valider les résultats. Les résultats expérimentaux ont montré que l'optimisation des paramètres grâce à la méthode Grey-Taguchi permet d'améliorer efficacement les performances du processus Wire-EDM.

Cette approche combinant la méthode Taguchi et l'analyse de relation grise simplifie l'optimisation de caractéristiques multiples du processus, sans nécessiter de calculs complexes. Les paramètres optimaux pour l'usinage de l'alliage Ti-6Al-4V sont une tension d'écart de 50 V, un temps d'impulsion de 10  $\mu$ s, un temps d'arrêt d'impulsion de 10  $\mu$ s et une vitesse d'avance du fil de 6 mm/min.

En conclusion, la méthode Grey-Taguchi est efficace pour optimiser les paramètres de l'usinage par électroérosion par fil pour des alliages de titane, offrant des directives pour le développement de ce processus pour d'autres matériaux en ingénierie [122].

## **2) L. Savadamuthu, et al**

Ont abordé une approche basée sur la méthodologie de classement basée sur l'analyse d'enveloppement de données de Taguchi (DEAR) (Data Enveloppement Analysis with R) pour optimiser les opérations de WEDM (usinage par électroérosion à fil) avec plusieurs réponses en utilisant une électrode en fil de molybdène réutilisable dans le Suzhou Baoma BMW 2008 Wire cut EDM. La relation entre les paramètres d'entrée, notamment la vitesse du fil, le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, le courant maximal et l'avance de la table, est optimisée en tenant compte des caractéristiques multi-réponses, à savoir le taux d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité de surface (SR) et la largeur de la rainure (KW) sur le WEDM dans le matériau de chaîne industrielle EN 9, est étudiée grâce à l'analyse des résultats expérimentaux et à la modélisation mathématique. Les résultats extraits de l'Analyse d'Enveloppement de Données de Taguchi (DEAR) sont utilisés pour l'optimisation des paramètres de sortie et aboutissent à des solutions optimales.

Pour évaluer les effets du nouveau processus de fil EDM (électroérosion par fil), une tentative a été faite pour déterminer les paramètres d'usinage importants pour des mesures de performance telles que le taux d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité de surface (SF) et la puissance (kW) séparément dans le processus WEDM. Il a été constaté que  $P_c$ ,  $W_s$  et  $V_c$  jouent un rôle significatif dans les opérations de découpe en WEDM pour maximiser le MRR, minimiser la rugosité de surface et minimiser la largeur de coupe.

L'expérience de confirmation montre que les erreurs associées au MRR, à la SF et au kW ont été explorées, et les paramètres d'usinage optimaux associés à plusieurs caractéristiques de performance ont été déterminés à l'aide de DEAR. À partir des résultats expérimentaux et de

l'analyse statistique de l'ANOVA. Les niveaux de combinaison optimaux des paramètres d'usinage associés à plusieurs caractéristiques de performance sont les suivants :  $W_s$  (7 m/min),  $T_{on}$  (39  $\mu s$ ),  $T_{off}$  (8  $\mu s$ ),  $P_c$  (5A) et  $V_c$  (80 mm/min).

Le MRR, la SF et le kW ont été grandement améliorés et le coût du processus réduit lorsque les paramètres d'usinage ont été réglés aux niveaux optimaux en utilisant un fil de molybdène [123].

### 3) G. Rajyalakshmi et P. Venkata Ramaiah

Ont présenté une étude sur l'optimisation du processus d'électroérosion par enfoncement (WEDM) sur Inconel 825 en utilisant l'approche de l'analyse relationnelle grise de Taguchi. L'objectif principal était d'améliorer le taux d'enlèvement de matière, la rugosité de surface et l'écart d'étincelle dans le processus. Pour ce faire, une méthode de conception d'expériences avec un plan orthogonal a été combinée avec l'analyse relationnelle grise pour déterminer les meilleurs paramètres de processus.

L'étude a été menée en utilisant un plan orthogonal L36 de Taguchi, avec chaque expérience réalisée sous différentes conditions de paramètres d'usinage. Les résultats ont été analysés à l'aide de la théorie relationnelle grise pour identifier la meilleure combinaison de paramètres. Les conclusions de l'étude ont montré que cette méthode a efficacement amélioré les performances d'usinage du processus WEDM.

L'analyse a également identifié plusieurs facteurs importants tels que le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, la tension de servomoteur d'angle, le débit de fil, la tension du fil, l'avance du servomoteur, la tension d'espacement d'étincelle et le débit de diélectrique, qui ont un impact significatif sur les mesures de performance telles que le taux d'enlèvement de matière, la rugosité de surface et l'espacement d'étincelle.

Les paramètres de processus optimaux recommandés pour l'électroérosion par fil de l'Inconel 825 sont : un temps d'impulsion de 105  $\mu s$ , un temps d'arrêt de l'impulsion de 50  $\mu s$ , une tension de servomoteur d'angle de 70 V, une pression de rinçage de 15 kg/cm<sup>2</sup>, un débit de fil de 2 m/min, une tension de fil de 9 kg-f, une tension d'espacement d'étincelle de 30 V et un débit de servomoteur de 1 à 100 mm/min.

En utilisant la méthode grise-Taguchi, le taux d'enlèvement de matière a augmenté, la rugosité de surface a diminué, et l'espacement d'étincelle a diminué, ce qui indique une efficacité améliorée dans le processus d'usinage. En conclusion, la méthode grise-Taguchi s'est avérée idéale et adaptée pour l'optimisation des paramètres du processus d'électroérosion par fil, en prenant en compte plusieurs caractéristiques de performance comme le taux d'enlèvement

de matière, la rugosité de surface et l'espacement d'étincelle, spécifiquement pour l'usinage de l'Inconel 825[124].

#### 4) Kasinath Das Mohapatra, S. K. Sahoo

Ont travaillé l'analyse et l'optimisation des paramètres de processus pour la fabrication d'engrenages droits à pas fin en cuivre par électro-érosion à fil (WEDMed). Les paramètres étudiés comprennent l'erreur de pas unique ( $F_{pt}$ ) et le taux d'enlèvement de matière (MRR). L'engrenage a des spécifications précises, telles qu'un diamètre de base de 46,98 mm, une largeur de face de 4,9 mm et un diamètre de cercle de pas de 50 mm, avec un fil en laiton.

Les chercheurs ont analysé les effets de quatre paramètres de WEDM, à savoir le temps d'impulsion, le temps de pause d'impulsion, le débit d'alimentation du fil et la tension du fil, sur la géométrie des engrenages droits. Ils ont réalisé des expériences pour mesurer les valeurs de MRR et de  $F_{pt}$  de l'engrenage et ont ensuite optimisé les paramètres de WEDM en utilisant la fonction de perte de qualité de Taguchi. Des graphiques ont également été créés à partir des résultats optimisés.

Les conclusions tirées de ces travaux expérimentaux sont les suivantes :

a) Le temps d'impulsion actif et le temps d'impulsion inactif sont des paramètres cruciaux. Il existe des plages optimales pour ces paramètres permettant de minimiser l'erreur de pas et de maximiser le taux d'enlèvement de matière.

b) La déviation de pas unique est fortement influencée par l'interaction entre le temps d'impulsion inactif et le débit de fil.

c) Les principales causes des écarts dans le pas des engrenages usinés par électro-érosion par fil sont les cratères de forme irrégulière créés par des étincelles violentes à haute énergie de décharge, ainsi que le décalage du fil dû aux forces générées pendant l'usinage [125].

#### 5) V. Muthukumar et al

Ont étudié et utilisé l'algorithme d'optimisation par essaim de particules accéléré (APSO) pour optimiser les paramètres d'usinage dans le contexte de l'usinage par décharge électrique par fil (WEDM) de l'acier à outils AISI D3. L'objectif principal était d'optimiser les paramètres d'usinage pour maximiser le taux de retrait de matière (MRR), minimiser la rugosité de surface et réduire la largeur des fissures lors de l'usinage par décharge électrique par fil. Quatre paramètres d'usinage ont été optimisés à l'aide de l'algorithme APSO (Particle Swarm Optimization) (Algorithme de Particules avec Adaptation) : le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, la tension de l'écartement et l'avance du fil.

Un plan orthogonal L9 de Taguchi a été utilisé pour mener des expériences sur une machine WEDM CNC. Les réponses, telles que le MRR, la rugosité de surface et la largeur des fissures, ont été mesurées. Des modèles de régression linéaire ont été utilisés pour établir des relations empiriques entre les paramètres d'usinage et les réponses mesurées. L'algorithme APSO a été appliqué pour optimiser les paramètres d'usinage afin d'obtenir les meilleures performances possibles, tout en respectant la contrainte de rugosité de surface. Des équations empiriques ont été développées pour prédire la largeur des fissures, la rugosité de surface et le MRR en fonction des paramètres d'usinage.

Les conditions optimales obtenues étaient : tension d'écartement de 50 V, temps d'impulsion de 6  $\mu$ s, temps d'arrêt d'impulsion de 8  $\mu$ s et débit de fil de 10 mm/min, avec une valeur de fonction objectif de 0,434. Les expériences de confirmation ont montré une amélioration significative des résultats par rapport aux valeurs moyennes de sortie : réduction de la rugosité de surface de 25,06 %, réduction de la largeur des fissures de 18,16 % et augmentation du MRR de 15,22 %.

L'algorithme APSO s'est révélé prometteur pour l'optimisation des paramètres d'usinage WEDM, en atteignant des performances améliorées tout en respectant les contraintes. Les équations empiriques développées peuvent être utilisées pour prédire les résultats d'usinage. Cette approche peut être appliquée à d'autres matériaux et processus d'usinage pour automatiser l'optimisation des paramètres. En résumé, cette étude a réussi à améliorer significativement les performances de l'usinage par décharge électrique par fil en utilisant l'algorithme APSO pour optimiser les paramètres d'usinage, avec des résultats confirmés expérimentalement [126].

## **6) Milan Kumar Das et Tapan Kr. Barman**

Ont étudié et concentré sur l'impact des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface, mesurée en termes de la rugosité moyenne de la ligne centrale (Ra), lors du processus d'usinage par électro-érosion à fil (WEDM) de l'acier EN 31. Pour atteindre cet objectif, les chercheurs ont utilisé l'algorithme de colonie d'abeilles artificielles (ABC) pour déterminer la combinaison optimale de paramètres de processus.

Les expériences ont été menées en variant les paramètres tels que le courant de décharge, la tension, le temps d'impulsion et le temps d'arrêt de l'impulsion en utilisant la méthode de conception centrale composite (CCD). Un modèle mathématique a été développé en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour prédire la valeur de Ra en fonction de ces paramètres.

Les résultats ont révélé que la combinaison optimale de paramètres pour minimiser Ra était la suivante : un courant de 12 (A) ampères, une tension de 60 V, un temps d'impulsion de 5  $\mu$ s et un temps d'arrêt d'impulsion de 2,244  $\mu$ s. Une confirmation expérimentale a été effectuée pour valider cette analyse, et la valeur optimale obtenue a été en accord étroit avec les résultats expérimentaux, présentant une faible erreur calculée, d'environ 1%.

Les chercheurs ont également utilisé des graphiques de surface en 3D pour étudier l'effet des paramètres d'entrée sur Ra, montrant que Ra est proportionnel au courant, au temps d'impulsion et à la tension. Enfin, l'étude a examiné la morphologie de surface des pièces produites par WEDM en utilisant des images de microscopie électronique à balayage (SEM).

En résumé, les chercheurs ont utilisé l'algorithme ABC pour déterminer les paramètres optimaux dans le processus d'usinage par électroérosion au fil afin de minimiser la rugosité de surface (Ra) de l'acier EN 31. Les résultats ont été confirmés expérimentalement, et l'étude a également analysé l'impact des paramètres d'entrée sur Ra et la morphologie de surface des pièces usinées [127].

## 7) Vikram Singha et S.K. Pradhanb

Ont visait à analyser les effets de plusieurs paramètres du processus de découpe par fil EDM (électroérosion par fil) sur trois paramètres de performance : le taux d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité de surface (SR) et la vitesse de coupe, en utilisant un spécimen en acier AISI D2 et un fil de laiton comme électrode. Pour atteindre cet objectif, des expériences ont été menées selon un plan orthogonal L27 (34) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été employée pour modéliser une surface de réponse de second ordre et estimer les conditions d'usinage optimales.

Les principaux paramètres de processus étudiés étaient le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ), le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ), la tension de servo (SV) et la vitesse d'avance du fil (WF). Un modèle de régression a été développé avec succès pour les trois paramètres de performance : le taux d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité de surface (SR) et la vitesse de coupe. Cela permet de prédire ces paramètres en fonction des paramètres de processus.

Les deux principaux facteurs significatifs qui ont un impact sur le taux de coupe sont le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) et le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ).

Pour ce qui est de la rugosité de surface (SR), les principaux facteurs significatifs sont le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) et la tension de servo (SV).

En ce qui concerne le taux d'enlèvement de matière (MRR), les deux principaux facteurs significatifs sont le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) et le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ).

Les paramètres optimaux pour maximiser le MRR et la vitesse de coupe tout en minimisant la SR sont les suivants : temps d'impulsion de 112,99  $\mu$ s, temps d'arrêt d'impulsion de 45  $\mu$ s, tension de servo de 20 volts et avance du fil de 4,85 mm/min.

Ces résultats sont précieux pour les ingénieurs en fabrication, car ils fournissent des recommandations précises pour les paramètres de processus optimaux lors de l'usinage de l'acier AISI D2 avec la méthode de découpe par fil EDM. Cette information peut contribuer à améliorer l'efficacité de la production et la qualité des pièces usinées [128].

## 8) Kapil Gupta et Neelesh Kumar Jain

Ont présenté une analyse et une optimisation des paramètres de micro-géométrie des engrenages à pignons miniatures à pas fin fabriqués en laiton par électro-érosion par fil (WEDMed). Les chercheurs ont étudié les effets de quatre paramètres de processus WEDM (tension, temps d'impulsion en marche, temps d'impulsion à l'arrêt et vitesse d'avance du fil) sur la micro-géométrie des engrenages en utilisant la méthodologie de surface de réponse de Box-Behnken. Ils ont constaté que ces paramètres influencent significativement les déviations du profil et du pas des engrenages.

Plus précisément, des déviations plus importantes du profil et du pas ont été observées avec des valeurs plus élevées de tension et de temps d'impulsion en marche, ainsi qu'avec des valeurs plus basses de vitesse d'avance du fil et de temps d'impulsion à l'arrêt. Pour optimiser la micro-géométrie, une analyse de désirabilité a été réalisée pour minimiser simultanément la déviation du profil et la déviation du pas. Les paramètres WEDM optimisés ont permis d'obtenir des valeurs de déviation du profil ( $F_a$ ) et du pas ( $F_p$ ) de 11,5  $\mu$ m et 9,1  $\mu$ m, respectivement, classant ainsi l'engrenage avec un numéro de qualité DIN de 7 et 5 pour le profil et le pas, ce qui est meilleur que les résultats obtenus par les processus conventionnels de fabrication. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

Les paramètres de processus WEDM, tels que la tension, la durée d'impulsion en marche, la durée d'impulsion à l'arrêt et le débit de fil, sont hautement significatifs pour minimiser les déviations totales du profil et du pas accumulées. Les interactions entre certains de ces paramètres ont un impact significatif sur les déviations du profil et du pas. Les déviations observées sont principalement dues à des cratères de forme irrégulière et au décalage du fil pendant l'usinage. Les valeurs optimales des paramètres WEDM pour minimiser les déviations sont de 9 V pour la tension, 0,6 s pour la durée d'impulsion en marche, 160  $\mu$ s pour la durée d'impulsion à l'arrêt et 13 m/min pour le débit de fil.

Ces valeurs optimisées classent l'engrenage en qualité 7 et 5 selon la norme DIN. Cette étude démontre la capacité supérieure du WEDM à fabriquer des engrenages miniatures de haute qualité pour des dispositifs miniaturisés [129].

### 9) Hardik A. et al

Ont examiné les tendances de recherche en WEDM, en se penchant sur la relation entre divers paramètres de processus (comme le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, la tension de servocommande, le courant de crête, le débit diélectrique, la vitesse du fil, la tension du fil) et plusieurs réponses du processus (comme le taux d'enlèvement de matière, la rugosité de surface, l'écart d'étincelle, le retard du fil et le rapport d'usure du fil), ainsi que sur les facteurs d'intégrité de surface. L'optimisation des paramètres de processus est essentielle pour réduire les coûts et les délais de fabrication. L'article présente différentes méthodes d'optimisation et d'exploration des relations qui sont couramment employées par les chercheurs.

Après une analyse approfondie de la littérature existante sur l'optimisation des paramètres d'usinage en WEDM, les conclusions suivantes ont été tirées :

Plusieurs techniques de (Design of Experiments) (DOE) ont été utilisées par les chercheurs, notamment le plan factoriel complet, la méthode Taguchi et le plan d'expérience de surface de réponse. Il a été constaté que le plan factoriel complet est la méthode préférée, car il permet d'étudier un grand nombre de variables en fournissant toutes les combinaisons possibles de paramètres sélectionnés.

Les performances prédictives globales de la technique d'optimisation par essaim particulière sont supérieures à celles des autres méthodes. Les algorithmes génétiques sont également préférés lorsque le nombre d'entrées est élevé et que l'analyse demande plus de temps.

Actuellement, la plupart des travaux d'optimisation des paramètres d'usinage se concentrent sur la modélisation des paramètres de sortie à l'aide de réseaux de neurones, remplaçant ainsi largement les méthodes de régression classiques. Les progrès récents dans les algorithmes et les processeurs rapides facilitent l'entraînement des réseaux de neurones, garantissant des résultats améliorés.

En résumé, l'article met en évidence les différentes approches d'optimisation des paramètres d'usinage en WEDM et conclut que le plan factoriel complet, l'optimisation par essaim particulière et l'utilisation de réseaux de neurones sont des méthodes prometteuses pour améliorer l'efficacité et la qualité du processus de WEDM [130].

**10) B. Haritha Bai et G. Vijaya Kumar**

Ont présenté une approche hybride, baptisée approche floue-grise, pour dériver un ensemble optimal de paramètres de matériau et d'usinage dans le contexte de l'usinage par fil électroérosion (WEDM) des matériaux composites à matrice métallique (AMMC). Pour ce faire, des échantillons d'AMMC sont produits en suivant un plan expérimental Taguchi qui prend en compte les paramètres combinés de matériau et de WEDM. Ces échantillons sont ensuite usinés à l'aide d'une machine WEDM. Les réponses obtenues, telles que l'usure de l'outil et le coût du processus, sont optimisées en utilisant l'approche floue-grise, qui combine l'analyse de relation floue et la logique floue.

Suite à l'analyse des données concernant les facteurs influents, il est conclu que les paramètres  $T_{on}$ , BM et PRM sont les plus significatifs, ayant un impact majeur sur les réponses multiples. Les paramètres RM et WP ont une influence moyenne sur les réponses, tandis que les paramètres  $T_{off}$ , WF et SF ont finalement moins d'influence sur ces réponses.

Les résultats de cette étude sont remarquables, avec un pourcentage de gain de 55,55 % dans l'usure de l'outil, un pourcentage de gain de 26,47 % dans le coût du processus, et un pourcentage de gain de 35,96 % dans la note Grey Fuzzy. Cette approche hybride offre donc une méthode efficace pour optimiser les paramètres de matériau et d'usinage dans le contexte de l'usinage par WEDM des AMMC, avec des avantages significatifs en termes d'efficacité et de coût [131].

**11) S. Banerjee et al**

Ont traité de l'étude expérimentale des caractéristiques de rugosité ( $R_a$ ) de l'acier à ressort EN 47 en utilisant la découpe par fil électrique (WEDM) et de l'optimisation des paramètres du processus d'usinage en se basant sur un plan orthogonal L27. L'objectif principal de l'étude est de comprendre et de contrôler la rugosité de surface de l'acier à ressort EN 47 en utilisant la découpe par fil électrique (WEDM) en ajustant les paramètres de ce processus. Quatre paramètres d'usinage sont considérés dans l'expérience : le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ), le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ), l'avance du fil (WF), et la tension de l'écartement (V). Après des expériences, la combinaison optimale de paramètres pour obtenir la rugosité minimale est déterminée comme étant  $T_{on} 3 T_{off} 3 WF 1 V 1$ .

Cela signifie que des niveaux élevés de temps d'impulsion et de temps d'arrêt d'impulsion sont nécessaires, tandis que des niveaux plus bas d'avance du fil et de tension de l'écartement sont préférables. Une analyse statistique de la variance (ANOVA) est réalisée pour évaluer l'importance des différents paramètres d'usinage et de leurs interactions. Il est conclu que le

temps d'impulsion, en combinaison avec l'avance du fil, joue un rôle essentiel dans le contrôle de la rugosité de l'acier EN 47. L'application des paramètres optimaux permet de réduire la rugosité de surface d'environ 26 % par rapport à l'état initial de l'acier à ressort EN 47. En plus de l'analyse de rugosité, une analyse chimique est effectuée pour étudier la composition du matériau de l'échantillon.

L'étude utilise l'array orthogonal de Taguchi pour optimiser les paramètres du processus WEDM en ce qui concerne la rugosité de surface de l'acier à ressort EN 47. Il est noté que le temps d'impulsion et le débit de fil ont la plus grande influence sur le contrôle de la rugosité de surface. Les interactions entre le temps d'impulsion et le temps d'arrêt de l'impulsion, ainsi que le temps d'impulsion et le débit de fil, sont également importantes pour contrôler la rugosité. En utilisant les paramètres optimaux, la rugosité de surface est réduite d'environ 26 %, passant de la valeur initiale à la valeur optimale.

En résumé, cette étude expérimentale se concentre sur l'optimisation des paramètres du processus de découpe par fil électrique (WEDM) pour réduire la rugosité de surface de l'acier à ressort EN 47, en mettant en évidence l'importance du temps d'impulsion et du débit de fil dans ce processus [132].

## **12) Pallavi. S. Karande et al**

Ont mené une expérimentation pour évaluer l'utilisation du matériau EN-31 avec du cuivre comme matériau d'électrode en utilisant la technologie de l'EDM (Electrical Discharge Machining). Plusieurs paramètres de processus, tels que le courant de décharge (DC), le temps d'impulsion (Pulse on Time), le temps d'arrêt d'impulsion (Pulse off Time), ont été pris en compte. La performance du processus a été évaluée en termes d'usure de l'outil.

L'expérience a été planifiée en utilisant la méthode Taguchi avec un tableau orthogonal L9, comprenant trois niveaux et trois facteurs. Les effets principaux sur les moyennes de l'usure de l'outil ont été analysés à l'aide du logiciel Minitab 14. En utilisant l'objectif "Plus petit est meilleur", les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) ont révélé que le courant de décharge (DC), le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) et le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ) ont un impact significatif sur l'usure de l'outil.

Les paramètres influents sur l'usure de l'outil en EDM sont le courant de décharge, le temps d'impulsion et le temps d'arrêt d'impulsion.

L'usure de l'outil augmente proportionnellement avec l'augmentation du courant de décharge.

L'usure de l'outil montre également une augmentation proportionnelle avec l'augmentation du temps d'arrêt d'impulsion.

Les niveaux optimaux des paramètres pour minimiser l'usure de l'outil sont : courant de décharge de 5A, temps d'impulsion de 75 $\mu$ s et temps d'arrêt d'impulsion de 25 $\mu$ s [133].

### 13) Javed Mujawar et al

Ont porté sur une expérimentation visant à améliorer les caractéristiques d'un matériau en acier AISI D2 en utilisant la technique EDM (Electrical Discharge Machining), avec du cuivre comme matériau d'électrode. Plusieurs paramètres de processus, tels que le courant de décharge (DC), le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, etc., ont été pris en considération pour optimiser les performances du processus, mesurées en termes de rugosité de surface (Ra).

L'étude a utilisé la méthodologie Taguchi pour planifier les expériences, utilisant un tableau orthogonal L16 avec quatre niveaux et trois paramètres. Les résultats ont été analysés à l'aide du logiciel Minitab 14, et des graphiques ont été obtenus pour représenter les effets principaux des moyennes sur la rugosité de surface (Ra).

En suivant l'objectif "Plus petit est meilleur" pour la rugosité de surface, les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont révélé que le courant de décharge (DC), le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) et le temps d'arrêt de l'impulsion ( $T_{off}$ ) avaient un impact significatif sur la rugosité de surface du matériau.

L'expérimentation a été réalisée en utilisant une machine de décharge électrique de type DieSinker, la CHMER 50NZ, avec une polarisation positive de l'électrode et une polarisation négative de la pièce à usiner. L'huile d'EDM recyclée a été utilisée comme diélectrique.

La machine était équipée des éléments suivants :

- Une unité d'alimentation électrique
- Une fonction CNC pour le contrôle de la machine
- Un réservoir étanche avec un mandrin de fixation d'outil
- Un dispositif de maintien de l'outil
- Une unité de commande servo pour le mouvement vertical de l'outil.

L'ensemble de cette expérimentation visait à optimiser le processus de découpe électrique pour obtenir une meilleure rugosité de surface sur le matériau en acier AISI D2, en ajustant les paramètres de processus clés. Les résultats obtenus grâce à l'analyse Taguchi et ANOVA permettent de guider les futures étapes d'optimisation de ce processus [134].

**14) Mayank M. Ghodasara et al**

Ont porté une étude expérimentale pour optimiser les paramètres de découpe au fil électrique par décharge (WEDM) pour l'acier WPS Die, un matériau difficile à usiner en raison de sa dureté. La découpe au fil électrique est utilisée dans divers domaines tels que la médecine, la fabrication de moules, la production d'outils, l'aérospatiale et l'industrie automobile. L'article se concentre sur l'identification des paramètres de processus optimaux pour obtenir une rugosité de surface optimale et un taux de matière enlevée (MRR) élevé lors de la découpe de l'acier WPS Die avec WEDM.

Les paramètres clés du processus tels que l'avance de la machine, le temps d'impulsion marche et le temps d'impulsion arrêt ont été étudiés en tant que paramètres d'entrée, tandis que la rugosité de surface ( $R_a$ ) et le MRR sont considérés comme des paramètres de sortie. Les résultats de l'expérience ont montré les impacts suivants sur le matériau WPS Die Steel :

L'augmentation du temps d'impulsion marche ( $T_{on}$ ) entraîne une augmentation du MRR et de la rugosité de surface (SR).

L'augmentation du temps d'impulsion arrêt ( $T_{off}$ ) conduit à une diminution du MRR et de la rugosité de surface (SR).

L'augmentation de l'alimentation de la machine entraîne une augmentation du MRR et de la rugosité de surface (SR).

La combinaison optimale des paramètres pour obtenir un MRR maximal et une meilleure rugosité de surface est la suivante :  $T_{on} = 116 \mu s$ ,  $T_{off} = 55 \mu s$ , alimentation de la machine = 0,6.

Dans cette expérience, le MRR maximal atteint est de 123 mg/min, et la rugosité de surface moyenne est de 2,681 microns.

En conclusion, cette étude expérimentale a permis d'identifier les paramètres de processus optimaux pour la découpe au fil électrique de l'acier WPS Die, ce qui est essentiel pour obtenir des résultats de découpe de haute qualité dans diverses applications industrielles [135].

**15) S. K. Tamang et al**

Ont réalisées une enquête expérimentale et une optimisation paramétrique sur le processus d'EDM (Electrical Discharge Machining) afin de produire des micro-trous d'un diamètre de 500  $\mu m$  sur de l'acier inoxydable de grade 304. Les paramètres de processus tels que le courant (I), la tension de l'écartement (V) et le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) ont été considérés et optimisés pour améliorer la qualité des trous, mesurée en termes de surcote (OC) et d'angle de conicité ( $\theta$ ).

Des modèles de régression statistique ont été développés pour prédire les valeurs de OC et  $\theta$  en fonction des paramètres du processus, et les effets de ces paramètres ont été étudiés à l'aide de graphiques en surface. Les paramètres optimaux ont été déterminés pour atteindre une ou plusieurs caractéristiques de performance souhaitées.

L'approche traditionnelle de l'analyse Taguchi a été utilisée pour optimiser chaque objectif individuellement. Cependant, l'innovation majeure de cette étude réside dans l'application de l'optimisation multi-objectif de Taguchi, visant à minimiser simultanément la surcote (OC) et l'angle de conicité ( $\theta$ ) afin d'améliorer la qualité des trous.

Les résultats de cette optimisation multi-objectif ont conduit à la combinaison optimale des paramètres de processus suivante : courant (I) de 10 A, tension de l'écartement (V) de 50 V et temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) de 150  $\mu$ s. Cette combinaison a permis d'obtenir une meilleure qualité de trou avec un minimum de surcote et d'angle de conicité. Ces résultats ont été comparés à l'analyse de la désirabilité et ont montré une proximité significative.

En résumé, cette étude a utilisé la modélisation statistique par régression et l'optimisation multi-objectif de Taguchi pour améliorer la qualité des trous lors du perçage de micro-trous dans de l'acier inoxydable. Les résultats ont démontré l'efficacité de cette approche en obtenant des niveaux optimaux de paramètres de processus pour atteindre des objectifs multiples de qualité des trous [136].

#### **16) Riteshkumar Paghdal et Jaypalsinh Rana**

Ont porté l'étude sur la recherche des paramètres optimaux pour l'usinage par électroérosion à fil de l'acier H13, un matériau utilisé dans les outils de matrice chaude. L'objectif était d'améliorer la finition de surface, le taux de production et le coût de production en optimisant les paramètres du processus. La méthodologie Taguchi a été utilisée pour concevoir l'expérience, et les paramètres d'usinage étudiés étaient le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, le courant de crête, le débit de fil, la tension du fil et la tension de servomoteur. L'expérience a été planifiée selon le plan orthogonal L8 de Taguchi, et les paramètres de réponse mesurés étaient la rugosité de surface, le taux d'enlèvement de matière et la largeur de la rainure. Les résultats de l'expérience ont été analysés à l'aide de l'analyse de variance (ANOVA) pour déterminer l'impact significatif de chaque paramètre d'usinage sur les paramètres de réponse. Les conclusions principales sont les suivantes :

Le temps de désactivation de l'impulsion a la plus grande influence sur la rugosité de surface.

- Le courant de crête a également un effet significatif sur la rugosité de surface.

- La tension du fil à moins d'effet sur la rugosité de surface.
- Une augmentation du temps d'impulsion, du temps de désactivation de l'impulsion et de la tension du servomoteur entraîne une augmentation de la rugosité de surface.
- Une augmentation du courant de crête, du débit de fil et de la tension du fil entraîne une diminution de la rugosité de surface.
- Le temps d'impulsion à la plus grande influence sur le MRR.
- Le débit de fil a moins d'effet sur le MRR.
- Une augmentation du temps d'impulsion et du temps de désactivation de l'impulsion entraîne une augmentation du MRR.
- Une augmentation du temps de désactivation de l'impulsion, du courant de crête, du débit de fil, de la tension du fil et de la tension du servomoteur entraîne une diminution du MRR.
- Le courant de crête a la plus grande influence sur la KW.
- Le temps de désactivation de l'impulsion et la tension du servomoteur ont moins d'effet sur la KW.
- Une augmentation du temps d'impulsion et du débit de fil entraîne une augmentation de la KW.
- Une augmentation du temps de désactivation de l'impulsion, du courant de crête, de la tension du fil et de la tension du servomoteur entraîne une diminution de la KW.

En résumé, cette étude a permis de déterminer les paramètres optimaux pour l'usinage par électroérosion à fil de l'acier H13, en tenant compte de leurs impacts sur la rugosité de surface, le taux d'enlèvement de matière et la largeur de la rainure. Ces informations sont précieuses pour améliorer la qualité et l'efficacité de ce processus d'usinage [137].

#### **17) K.D. Mohapatra et S.K. Sahoo**

Ont visé à minimiser les erreurs dans les engrenages en optimisant les paramètres d'usinage, en se concentrant sur les engrenages droits en cuivre usinés par décharge électrique par fil.

L'objectif principal est d'optimiser les paramètres d'usinage pour réduire l'erreur de pas unique et maximiser le taux de matière enlevée dans les engrenages en cuivre. Les paramètres d'entrée ont été ajustés pour obtenir les meilleures valeurs d'erreur de pas unique et de taux de matière enlevée. Une fonction de perte a été créée en optimisant ces paramètres. Une analyse microstructurale a été réalisée pour examiner les défauts de surface, et une modélisation numérique a été utilisée pour étudier la température de la pièce.

Les paramètres clés affectant les réponses étaient le temps d'impulsion, le temps d'arrêt d'impulsion, le débit de fil et la tension de fil. L'optimisation de ces paramètres a permis de minimiser l'erreur de pas unique et de maximiser le taux de matière enlevée. Les paramètres d'entrée les plus significatifs étaient le temps d'impulsion, suivi du temps d'arrêt d'impulsion, du débit de fil et de la tension de fil. L'augmentation du temps d'impulsion et de la tension de fil a conduit à une augmentation de l'erreur de pas unique et du taux de matière enlevée. Les fluctuations de la tension et du courant ont été identifiées comme la principale cause des erreurs dans la denture, entraînant une distribution inégale de la surface.

- Les résultats ont montré une amélioration de 22,70% dans le rapport S/N, confirmant l'efficacité de l'optimisation des paramètres d'usinage.
- Des défauts de surface tels que des cratères, des vides et des trous ont été observés sur la denture usinée en raison de la haute température et de la densité énergétique élevée des étincelles. Des fissures et une usure du fil ont également été notées sur l'électrode de fil.
- Des éléments étrangers tels que le chlorure de cuivre molybdène, le Ferrocényl cuivre et les composés de cuivre-nickel ont été détectés sur la surface du matériau en raison du recyclage du fluide diélectrique. Une modélisation numérique a révélé que la température maximale du matériau de la pièce après usinage par fil en laiton était de 22,87 °C. Les paramètres optimisés obtenus peuvent être utilisés pour usiner d'autres engrenages droits en cuivre afin de produire des engrenages de haute qualité.

En résumé, cette étude se concentre sur l'optimisation des paramètres d'usinage pour améliorer la qualité des engrenages droits en cuivre usinés par décharge électrique par fil, en mettant en évidence les facteurs clés et les défauts potentiels du processus [138].

### **18) Rahul O et Vaishya Chand**

Ont visait à évaluer l'impact des paramètres d'usinage sur les performances dans le contexte de la micro-électroérosion (EDM) en utilisant la méthode Taguchi et l'analyse de la variance (ANOVA). Une approche hybride basée sur Taguchi a été proposée pour optimiser plusieurs objectifs, notamment un taux d'enlèvement de matière élevé, une faible usure de

l'outil, une meilleure finition de surface et une tolérance dimensionnelle réduite. Les paramètres d'entrée pris en compte étaient le débit diélectrique, le courant de décharge, le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) et le temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ), avec l'utilisation de l'outil en cuivre.

L'analyse de la variance a permis d'évaluer l'importance des paramètres sur le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'outil (TWR), la rugosité de surface ( $R_a$ ) et la tolérance dimensionnelle (DT). Les résultats de l'analyse Taguchi ont montré que le courant de décharge avait un impact significatif sur MRR, tolérance dimensionnelle et  $R_a$ , tandis que le débit diélectrique influençait principalement TWR.

Une comparaison entre l'approche hybride et l'analyse Taguchi a été présentée, et les résultats ont été confirmés par un test de confirmation. Les conclusions de l'expérience ont révélé que le courant de décharge était le facteur le plus influent sur le taux d'enlèvement de matière, suivi du temps d'impulsion, tandis que la tension d'entrée avait le plus d'effet sur la rugosité de surface. Ces conclusions sont cruciales pour les applications industrielles, en particulier dans le domaine de l'usinage de pièces en acier inoxydable AISI 304 avec un outil en carbure de tungstène massif utilisant la méthode de refroidissement latéral [139].

### **19) Ashish Kumar Srivastava**

A traité de l'étude de l'intégrité de la surface et des performances d'un matériau composite métallique (MMC) hybride A359/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/B<sub>4</sub>C lors du processus de découpe au fil électrique (WEDM) dans différentes conditions de fonctionnement. Pour ce faire, une analyse par microscopie électronique à balayage (SEM) a été effectuée pour examiner la surface usinée. Les principales mesures de performance étudiées sont la rugosité de surface et le taux de matière enlevée (MRR). L'étude a utilisé un plan d'expérience de Taguchi avec des essais aléatoires et a également inclus une analyse des relations grises pour confirmer l'efficacité de la méthode proposée.

L'intensité de courant de crête a été identifiée comme le facteur le plus significatif affectant la rugosité de surface (70,03 %) et le MRR (66,76 %) de manière drastique.

Les valeurs optimisées pour la rugosité de surface et le MRR, obtenues grâce à l'expérience de confirmation de Taguchi, sont respectivement de 2,18  $\mu\text{m}$  et de 1,654 mm/min.

Les valeurs R-carré calculées à l'aide de la technique de Taguchi pour la rugosité de surface et le MRR sont respectivement de 0,9923 et 0,9738, confirmant la précision des constantes prédites et la pertinence du modèle développé.

Les paramètres d'usinage optimaux issus de l'analyse des relations grises sont A1, B3, C1, D1, pour évaluer les performances de la rugosité de surface et du MRR.

Les valeurs optimisées de la rugosité de surface et du MRR obtenues grâce à l'expérience de confirmation des relations grises sont de 2,1  $\mu\text{m}$  et de 1,80 mm/min, respectivement.

En comparant les résultats de la technique de Taguchi avec ceux de l'analyse des relations grises, il est observé que les valeurs de rugosité de surface et de MRR obtenues grâce à cette dernière méthode sont considérablement meilleures, avec des améliorations de 3,80 % et 12,02 % respectivement par rapport à l'expérience de Taguchi [140].

## 20) Munish Giri et al

Ont porté une étude des effets des paramètres de processus, tels que le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, le courant de crête et la tension du servo, sur la rugosité de surface (SR) dans le cadre de la technologie d'usinage par électroérosion par fil (WEDM).

L'objectif de l'étude est d'analyser comment les paramètres de processus influent sur la rugosité de surface dans le processus de WEDM.

Les chercheurs ont utilisé une approche de conception centrale composite de la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour planifier et effectuer des expériences. Ils ont établi des relations mathématiques entre les paramètres d'entrée du WEDM et la rugosité de surface.

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour déterminer les paramètres de processus qui sont statistiquement significatifs. Cela permet d'identifier les paramètres ayant un impact significatif sur la rugosité de surface.

Plusieurs paramètres de processus ainsi que leurs interactions ont été identifiés comme importants pour la rugosité de surface selon l'ANOVA.

L'augmentation du temps d'impulsion entraîne une augmentation de la rugosité de surface, car cela conduit à une plus grande énergie de décharge.

En revanche, l'augmentation du temps d'arrêt de l'impulsion et de la tension de servocommande améliore la finition de la surface.

L'augmentation du courant de crête augmente la rugosité de surface, tandis que sa réduction la diminue.

Les valeurs prédites des réponses sont en accord étroit avec les résultats expérimentaux, ce qui confirme la validité de l'approche utilisée.

En résumé, l'étude explore comment les paramètres de processus influencent la rugosité de surface dans le WEDM, en mettant en évidence les paramètres importants et en fournissant des conclusions sur la manière d'optimiser la rugosité de surface dans ce contexte [141].

**21) R. Shanmuga Prakash et al**

Ont visé à déterminer les paramètres optimaux pour l'usinage de l'acier AISI D3, un matériau à haute teneur en carbone et en chrome. Les paramètres examinés incluent le temps d'impulsion, le temps d'arrêt de l'impulsion, le courant et la tension. Deux épaisseurs de matériau de travail différentes, 50 mm et 75 mm, ont été usinées en utilisant soit de l'eau déminéralisée seule, soit de l'eau déminéralisée avec de la poudre de cuivre comme milieu diélectrique.

L'augmentation de l'épaisseur de la pièce entraîne une augmentation de la rugosité de la surface usinée. Les pièces plus fines permettent d'obtenir une meilleure finition de surface.

L'utilisation d'eau déminéralisée avec de la poudre de cuivre comme diélectrique conduit à un taux d'enlèvement de matière (MRR) plus élevé par rapport à l'eau déminéralisée seule.

La présence de poudre de cuivre dans le milieu diélectrique n'affecte pas négativement la finition de surface.

Pour une pièce de 50 mm d'épaisseur, les paramètres optimaux équilibrant le MRR et la rugosité ( $R_q$ ) sont les suivants : temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) de 35  $\mu s$ , temps d'arrêt de l'impulsion ( $T_{off}$ ) de 4  $\mu s$ , courant de 4A et tension de 100V, que ce soit avec de l'eau déminéralisée seule ou avec de la poudre de cuivre comme diélectrique.

Pour une pièce de 75 mm d'épaisseur, les paramètres optimaux déduits de la fonction objective combinée sont les suivants :  $T_{on}$  de 15  $\mu s$ ,  $T_{off}$  de 4  $\mu s$ , courant de 4A et tension de 100V, que ce soit avec de l'eau déminéralisée seule ou avec de la poudre de cuivre comme diélectrique [142].

**22) A. Bourebbou et al**

Ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour prédire divers paramètres lors de l'usinage par électroérosion de l'acier AISI 1095 avec une électrode en cupro tungstène. Ils ont mené avec succès 25 expériences en manipulant quatre paramètres d'entrée. À partir des résultats expérimentaux, ils ont développé des modèles mathématiques pour prédire le taux d'enlèvement de matière (MRR), la durée de cycle (DC), la rugosité de surface (SR) et la circularité.

Les valeurs prédites par ces modèles correspondent bien aux résultats expérimentaux, ce qui montre l'efficacité de la méthode de la RSM pour modéliser les paramètres d'usinage dans le processus d'EDM pour l'AISI 1095. Une nouvelle approche a été proposée pour développer un modèle d'optimisation du processus d'EDM, où les paramètres d'usinage tels que le courant, le temps d'impulsion et le temps d'arrêt d'impulsion sont considérés comme des variables de

décision. Les chercheurs ont utilisé l'algorithme génétique multi-objectifs pour optimiser les performances de l'usinage par électroérosion, identifiant ainsi les valeurs optimales des paramètres de processus pour différentes mesures de performance.

Pour un taux d'enlèvement de matière accru, les paramètres d'usinage recommandés sont : courant ( $I_p$ ) = 85,66 A, tension (V) = 82,18 V, temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) = 1,22  $\mu$ s et temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ) = 7,27  $\mu$ s.

Pour une meilleure qualité de surface, les paramètres d'usinage recommandés sont : courant ( $I_p$ ) = 17,75 A, tension (V) = 82,52 V, temps d'impulsion ( $T_{on}$ ) = 0,83  $\mu$ s et temps d'arrêt d'impulsion ( $T_{off}$ ) = 9,59  $\mu$ s.

L'étude démontre que l'association de la méthodologie de surface de réponse avec l'algorithme génétique constitue une méthode efficace pour l'optimisation des paramètres d'usinage par électroérosion.

En perspective, cette étude pourrait être étendue pour développer des modèles d'optimisation pour d'autres paramètres tels que le taux d'enlèvement de matière spécifique (TWR), le taux d'enlèvement d'énergie spécifique (EWR) et la cylindricité.

En résumé, cette recherche montre comment la méthodologie de surface de réponse et l'algorithme génétique peuvent être appliqués avec succès pour optimiser les paramètres d'usinage par électroérosion, ce qui pourrait avoir des applications futures dans l'optimisation d'autres paramètres de ce processus [143].

### 23) Sıtkı Akıncioğlu

A décrit une étude sur l'électroérosion par décharge électrique (EDM) avec un alliage de titane (Gr2) et ses implications dans l'industrie de la défense. Plusieurs paramètres EDM ont été expérimentés, et des avancées technologiques ont permis le développement de nouveaux processus industriels. La méthode Taguchi a été utilisée pour déterminer les paramètres optimaux, et l'analyse de la variance (ANOVA) a été employée pour étudier l'impact de ces paramètres sur les caractéristiques de performance telles que le taux d'usure de l'outil, le taux d'enlèvement de matière, la profondeur et la rugosité de surface.

Les résultats montrent que l'intensité du courant est le facteur le plus influent sur ces caractéristiques, avec des pourcentages d'influence élevés. Une augmentation de l'intensité du courant a eu un impact positif sur la perte d'usure de l'outil mais a affecté négativement la rugosité de surface. Des analyses au microscope électronique à balayage ont confirmé que la plus basse rugosité de surface a été obtenue lors de la première expérience, et des intensités de courant plus élevées ont entraîné une rugosité de surface moins favorable.

En résumé, cette étude a montré l'importance de l'intensité du courant dans le processus EDM pour les alliages de titane et a fourni des informations utiles pour l'optimisation des paramètres dans l'industrie de la défense, en mettant en évidence les compromis entre l'usure de l'outil et la rugosité de surface [144].

## **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents travaux réalisés par certains chercheurs dans le domaine d'usinage par électroérosion tel que, les travaux expérimentaux, les travaux basés sur la modélisation et les travaux d'optimisation. A travers cette étude, nous avons mis l'accent sur les différents paramètres de ce procédé tels que le courant, la tension, le temps d'impulsion, le temps d'arrêt d'impulsion ainsi que le diélectrique, la géométrie des électrodes. Ainsi, nous avons inspecté à quel point les paramètres d'entrée précités affectent les paramètres de sortie tels que le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'outil (TWR) et la rugosité de surface (Ra).

## Chapitre III

# *Modélisation des performances de l'usinage par décharges électrique*

### III.1 Introduction

Le taux d'enlèvement de matière (MRR) faible est une limitation majeure du processus EDM lorsqu'il s'agit d'usiner des pièces. Par conséquent, il est primordial d'améliorer cette caractéristique du processus tout en préservant d'autres mesures de performance telles que l'érosion de l'outil et la qualité de surface [145]. Cette amélioration peut être obtenue en optimisant judicieusement les paramètres d'usinage qui influent sur ces caractéristiques du processus (MRR, Ra et TWR). L'objectif est d'augmenter le MRR tout en réduisant le TWR et le Ra [146].

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser la régression linéaire multiple pour la prédiction des performances de l'usinage par décharges électriques en permettant l'établissement des modèles mathématiques fiables.

La régression linéaire multiple est une méthode statistique permettant d'analyser la relation, ou la corrélation, entre une variable dépendante spécifique et une ou plusieurs variables indépendantes. Dans notre cas, cette relation concerne les paramètres d'usinage (courant (I), tension (V) et temps d'impulsion ( $T_{on}$ )) en tant que variables d'entrée, et les indicateurs de performance (MRR, TWR, Ra) en tant que variable de sortie. Cette relation est cruciale pour évaluer la productivité du processus [120].

### III.2 Régression linéaire multiple

#### III.2.1 Modèle linéaire générale

Le modèle générale est une généralisation du modèle simple dans lequel figurent plusieurs explicative [147].

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1t} + \beta_2 x_{2t} + \dots \beta_k x_{kt} + \varepsilon_t, \quad t = 1, \dots, n \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$Y_t$  : variable à expliquer à  $t$

$x_{1t}$  : variable explicative 1 à  $t$

$x_{kt}$  : variable explicative k à  $t$

Avec :  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  : paramètres du modèle.

$\varepsilon_t$  : Erreur de spécification elle est inconnue et restera inconnue.

$n$  : nombre d'observations.

### III.2.2 Forme matricielle

Pour faciliter l'écriture de certains résultats, on a habituellement recours aux notations matricielles [147]. En écrivant le modèle observation par observation, nous obtenons :

$$\begin{aligned} Y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{21} + \dots \beta_k x_{k1} + \varepsilon_1, \dots, \\ Y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{12} + \beta_2 x_{22} + \dots \beta_k x_{k2} + \varepsilon_2, \dots, \\ Y_t &= \beta_0 + \beta_1 x_{1t} + \beta_2 x_{2t} + \dots \beta_k x_{kt} + \varepsilon_t, \dots, \\ Y_n &= \beta_0 + \beta_1 x_{1n} + \beta_2 x_{2n} + \dots \beta_k x_{kn} + \varepsilon_n, \dots, \end{aligned}$$

Soit sous la forme matricielle :

$$Y_{(n,1)} = X_{(n,k+1)} + B_{(k+1,1)} + \varepsilon_{(n,1)} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$Y_{(n,1)} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_k \\ Y_n \end{bmatrix}; \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_t \\ \beta_k \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \cdot & \cdot & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \cdot & \cdot & x_{k2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{1t} & x_{2t} & \cdot & \cdot & x_{kt} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \cdot & \cdot & x_{kn} \end{bmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_t \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Avant d'estimer le modèle, on cite d'abord les hypothèses sur lesquelles il se repose.

Le modèle repose sur les hypothèses suivantes :

$H_0$  : les valeurs  $x_{it}$  sont observées sans erreurs.

$H_1$  :  $E(\varepsilon_t) = 0$  espérance nulle

$H_2$  :  $E(\varepsilon_t^2) = \sigma_\varepsilon^2$  (la variance de l'erreur est constante  $\forall(t)$ ).

$H_3$  :  $E(\varepsilon_t \varepsilon_{t'}) = 0$  si  $t \neq t'$  (indépendance des erreurs).

$H_4$  :  $Cov(x_{it}, \varepsilon_t) = 0$  (erreur indépendant des  $x_{it}$ ).

$H_5$  : absence de colinéarité entre les variables explicatives  $\Rightarrow (X'X)$  régulière et  $(X'X)^{-1}$  existe.

$H_6$  :  $\left( \frac{X'X}{n} \right)$  Tend vers une matrice finie non singulière.

$H_7$  :  $n > k + 1$  : nombre d'observations est supérieur aux nombre des séries explicatives.

### III.2.3 Estimation et propriétés des estimateurs

Soit le modèle :

$$Y_t = X_t B + \varepsilon_t \quad (\text{III.3})$$

Afin d'estimer le vecteur  $(B)$  composé des coefficients  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  nous appliquons la méthode des moindres carrés ordinaire (MCO) qui consiste à minimiser la somme des carrés des erreurs, soit :

$$\text{Min} \sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2 = \text{Min} \varepsilon' \varepsilon = \text{Min} (Y - X\hat{B})' (Y - X\hat{B}) = \text{Min} S \quad (\text{III.4})$$

Avec  $\varepsilon'$  : est le transposé du vecteur  $\varepsilon$

Pour minimiser cette fonction par rapport au vecteur  $(B)$  nous différencions  $S$  par rapport au même vecteur et on obtient :

$$\frac{\partial S}{\partial B} = -2 X' Y + 2 X' X \hat{B} = 0 \Rightarrow \hat{B} = (X' X)^{-1} X' Y \quad (\text{III.5})$$

Avec  $(X' X)$  matrice de dimension  $(k+1, k+1)$  est inversible.

Le modèle estimé s'écrit :

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1t} + \hat{\beta}_2 x_{2t} + \dots \hat{\beta}_k x_{kt} + e_t \quad (\text{III.6})$$

Avec

$$e_t = Y_t - \hat{Y}_t$$

Ou  $e_t$  : résidu : est l'écart entre la valeur observée de la variable à expliquer et sa valeur estimée, elle est connue.

### III.2.4 Propriétés des estimateurs

#### a) Estimateur sans biais

Soit le modèle :

$$Y = XB + \varepsilon \quad (\text{III.7})$$

On peut s'écrire :

$$\begin{cases} Y = X \hat{B} + e \\ \hat{Y} = X \hat{B} \end{cases} \Rightarrow e = Y - \hat{Y}$$

Nous obtenons :

$$\hat{B} = (X' X)^{-1} X' Y = (X' X)^{-1} X' (X B + \varepsilon)$$

$$\hat{B} = (X' X)^{-1} X' (X B) + (X' X)^{-1} X' \varepsilon$$

$$\hat{B} - B = (X' X)^{-1} X' \varepsilon \quad (\text{III.8})$$

D'où

$$E(\hat{B}) = B + (X' X)^{-1} X' E(\varepsilon) \quad (\text{III.9})$$

Avec

$$E(\varepsilon) = 0$$

Finalement

$$E(\hat{B}) = B \Rightarrow \text{L'estimateur est sans biais}$$

**b) Estimateur de la variance de l'erreur et la matrice de variance covariance des coefficients de régression**

On a :

$$v(\hat{\beta}) = E \left[ (\hat{\beta} - \beta)(\hat{\beta} - \beta)' \right] \quad (\text{III.10})$$

En remplaçant (III.9) dans (III.10) on obtient :

$$v(\hat{\beta}) = \sigma_{\varepsilon}^2 \left( (X'X)^{-1} (X'X)(X'X)^{-1} \right) = \sigma_{\varepsilon}^2 (X'X)^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_{\varepsilon}^2 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon}^2 & 0 & . & . & 0 \\ . & 0 & \sigma_{\varepsilon}^2 & 0 & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & . & . & 0 & \sigma_{\varepsilon}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Avec  $\sigma_{\varepsilon}^2$  matrice diagonale

Et puisque  $\sigma_{\varepsilon}^2$  est inconnu donc on l'estime.

Estimateur de la variance de l'erreur :

Soit le modèle :

$$Y_i = X B + \varepsilon_i$$

On a

$$e = Y - \hat{Y}$$

$$\hat{Y} = X \hat{\beta}$$

D'où

$$e_i = Y - X \hat{\beta} \quad (\text{III.12})$$

En remplaçant

$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y$  dans l'équation (III.12) on aura :

$$e = Y - X (X'X)^{-1} X'Y = \left[ I - X (X'X)^{-1} X' \right] Y \quad (\text{III.13})$$

On pose Matrice,

$$M = I - X (X'X)^{-1} X' \quad (\text{III.14})$$

Alors

$$\sum_t e_t^2 = e'e = \varepsilon' M' M \varepsilon = \varepsilon' M \varepsilon$$

$$E(e'e) = \sigma_\varepsilon^2 I_n \text{Tr} \left[ I - X (X'X)^{-1} X' \right] = \sigma_\varepsilon^2 I_n (n - k - 1)$$

On obtient alors :

$$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 I_n \frac{e'e}{(n - k - 1)} \quad (\text{III.15})$$

Avec : var  $(\hat{\beta}) = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 (X'X)^{-1}$  matrice variance – covariance

### III.2.5 Equation d'analyse de la variance et qualité d'un ajustement

Nous avons :

$$\sum Y_t = \hat{Y}_t \Rightarrow \bar{Y} = \bar{\hat{Y}}$$

Et

$$\sum e_t = 0$$

De ces deux relations nous déduisons l'équation fondamentale de l'analyse de la variance :

$$\sum_t (Y_t - \bar{Y})^2 = \sum_t (\hat{Y}_t - \bar{\hat{Y}})^2 + \sum_t e_t^2 \quad (\text{III.16})$$

$$SCT = SCE + SCR$$

Avec :

*SCT* : variabilité totale

*SCE* : variabilité expliquée

*SCR* : variabilité résiduelle.

Cette équation permet de juger la qualité d'ajustement d'un modèle, en effet plus *SCE* est proche du *SCT* meilleur est l'ajustement globale du modèle. Cependant ces valeurs dépendent des unités de mesure, c'est pourquoi on préfère utiliser le nombre sans dimensions] :

$$R^2 = \frac{\sum_t (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_t (Y_t - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{\sum_t e_t^2}{\sum_t (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (\text{III.17})$$

$R^2$  = Coefficient de détermination : mesure la proportion de la variance de  $Y$  expliquée par la régression de  $Y$  sur  $X$ .

Si  $n \prec k$  alors on calcule le coefficient de détermination corrigé.

$$\overline{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} (1 - R^2) \quad (\text{III.18})$$

On a  $\overline{R}^2 \leq R^2$  et si  $n$  est grand  $\overline{R}^2 \cong R^2$

### III.2.6 Testes statistiques

Tester l'influence directe de la variable explicative sur la variable endogène, revient à tester son coefficient de régression s'il est égale ou différent de 0, pour un seuil choisi, en général  $\alpha = 0,05$ .

Le test d'hypothèse est le suivant : est appelé (test bilatéral)

$$H_0 : \beta_i = 0$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0$$

La statistique est la suivante :

$$T_{c_c}^\alpha = \left| \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i}{\partial(\hat{\beta}_i)} \right| \rightarrow T_{n-k-1, \alpha \%} \quad (\text{III.19})$$

### III.2.7 Test de signification globale du modèle de regression (Test de Fisher)

Pour tester si l'ensemble des variables explicatives ont une influence sur la variable à expliquer, on fait le test d'hypothèse suivant :

$$H_0 : \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k = 0$$

$$H_1 : \text{il existe au moins, } \beta_i \neq 0 \text{ } i:1 \dots n$$

A partir de l'équation de l'analyse de la variance on a

$$\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2 = \sum_{t=1}^n (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2 + \sum_{t=1}^n e_t^2$$

$$\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y})^2 = E \left( \sum_{t=1}^n e_t^2 \right) = (n - k - 1) \sigma^2$$

$$\text{D'où} \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n-k-1} = \frac{SCR}{n-k-1} \quad (\text{III.20})$$

Et d'après la définition d'un khideu on a :

$$\frac{(n-k-1)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} \rightarrow \chi_{n-k-1}^2 \quad (\text{III.21})$$

De (III.20) et (III.21) on obtient.

$$\frac{(n-k-1)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} = \frac{(n-k-1)SCR}{(n-k-1)\sigma^2} = \frac{SCR}{\sigma^2} \rightarrow \chi_{n-k-1}^2 \quad (\text{III.22})$$

De même pour  $SCE$  et  $SCE$

$$E \left( \sum_{t=1}^n (\hat{Y}_t - \bar{\hat{Y}})^2 \right) = (k)\sigma^2 \Rightarrow \hat{\sigma}^2 = \frac{SCE}{k} \Rightarrow \frac{k\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} = \frac{k(SCE)}{k(\sigma^2)} \rightarrow \chi_k^2$$

Puisque  $\chi_{n-k-1}^2$  et  $\chi_k^2$  sont indépendants alors :

Sous  $H_0$  :

$$F_c = \frac{\frac{\sum_{t=1}^n (\hat{Y}_t - \bar{\hat{Y}})^2}{k}}{\frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{(n-k-1)}} = \frac{\chi_k^2 / k}{\chi_{n-k-1}^2 / (n-k-1)} = \frac{R^2 / k}{1 - R^2 / (n-k-1)} \rightarrow F_t(k, n-k-1, \theta \%) \quad (\text{III.23})$$

### III.2.8 Règle de décision

Si  $F_c > F_t^{\alpha\%} \Rightarrow$  on a

Tableau III. 1 Règles de décision

| Source de Variation             | Sommes des carrées                                                                | Degré de liberté | Moyenne des carrées             | F- calculé                       |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| $X_{1t}, X_{2t}, \dots, X_{kt}$ | $SCE = \sum_t (\hat{y} - \bar{\hat{y}})^2$<br>$= \hat{\beta}' X' Y - n \bar{Y}^2$ | $k$              | $SCE / k =$<br>$MC_{reg}$       | $F_c =$<br>$MC_{reg} / MC_{res}$ |
| Variabilité résiduelle          | $SCR = \sum_t e_t^2$<br>$= Y' Y - \hat{\beta}' X' Y$                              | $n-k-1$          | $SCR / (n-k-1)$<br>$= MC_{res}$ |                                  |
| Variabilité totale              | $SCT = \sum_t (Y_t - \bar{Y})^2$<br>$= Y' Y - n \bar{Y}^2$                        | $n-1$            |                                 |                                  |

### ■ Prévion dans le modèle de la régression multiple

Le problème consiste à déterminer quelle valeur doit être attribuée à la variable endogène lorsque nous connaissons les valeurs des variables exogènes. Le modèle général estimé est le suivant :

$$\hat{Y}_t = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1t} + \dots + \hat{\beta}_k x_{kt} + e_t \quad (\text{III.24})$$

La prévision pour la date t+h est la suivante :

$$\hat{Y}_{t+h} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{1t+h} + \dots + \hat{\beta}_k x_{kt+h} + e_{t+h} \quad (\text{III.25})$$

L'erreur de prévision est donnée par :

$$e_{t+h} = Y_{t+h} - \hat{Y}_{t+h} \rightarrow N(0, \sigma_{e_{t+h}}^2) \quad (\text{III.26})$$

L'intervalle au seuil de probabilité  $(1-\theta)$  est donné par la formule suivante :

$$Y_{t+h} = \hat{Y}_{t+h} \pm T\left(\frac{\theta}{2}, n-k-1\right) \cdot \hat{\sigma}_e \sqrt{X_{t+h}' (X'X)^{-1} X_{t+h} + 1} \quad (\text{III.27})$$

Considérant que les hypothèses du modèle linéaire général sont vérifiées, la prévision est sans biais.

## III.3 Cas de violation des hypothèses

### III.3.1 Test de détection d'une multicolinéarité

#### a) Test de Klein

Le test de Klein est fondé sur la comparaison du coefficient de détermination  $R^2$  calculé sur le modèle à  $k$  variables et les coefficients de corrélation simple  $r_{xi, xj}^2$  entre les variables explicatives pour  $i \neq j$

Si

$R_y^2 < r_{xi, xj}^2$  : Il y a présomption de multi colinéarités.

#### b) Test de Farrar et Glauber

La première étape consiste à calculer le déterminant de la matrice des coefficients de corrélation entre les variables explicatives.

$$D = \begin{vmatrix} 1 & r_{x1, x2} & r_{x1, x3} & \dots & r_{x1, xk} \\ r_{x2, x1} & 1 & r_{x2, x3} & \dots & r_{x2, xk} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{xk, x1} & r_{xk, x2} & r_{xk, x3} & \dots & 1 \end{vmatrix} \quad (\text{III.28})$$

Lorsque la valeur du déterminant  $D$  tend vers zéro, le risque de multi colinéarité est important. On dit que deux variables explicatives sont parfaitement corrélées quand :

$$D = \begin{vmatrix} 1 & r_{x1,x2} \\ r_{x2,x1} & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

La deuxième étape consiste à effectuer un test  $\chi^2$  selon les hypothèses suivantes :

$H_0 : D = 1$  (Les séries sont orthogonales).

$H_1 : D < 1$  (Les séries sont dépendantes) la valeur empirique du  $*\chi^2$  est calculée à partir de l'échantillon.

$$*\chi^2 = - \left[ n - 1 - \frac{1}{6}(2K + 5) \right] \cdot \ln D \quad (\text{III.29})$$

$n$  : La taille de l'échantillon

$K = K+1$  Nombre de variables explicatives (terme constant inclus)

$\ln$  = logarithme népérien

### III.3.2 Règle de décision

Si  $*\chi^2 \geq \chi^2$  Lu dans la table à  $\frac{1}{2}K(K-1)$  degrés de liberté et au seuil  $\alpha\%$ , alors L'hypothèse  $H_0$  est rejetée, il y a donc présomption de multi colinéarité.

Si  $*\chi^2 < \chi^2$  : Nous acceptons l'hypothèse d'orthogonalité.

### III.3.3 Autocorrélation des erreurs

Lorsque les erreurs sont corrélées cela veut dire que  $\text{Cov}(\varepsilon_t, \varepsilon_t') \neq 0$  les estimateurs obtenus par la méthode des moindres carrés ordinaires ne sont plus de variance minimale, en effet :

$$\text{var}(\hat{\beta}) = E \left[ (\hat{\beta} - \beta)(\hat{\beta} - \beta)' \right] = (X'X)^{-1} X'E(\varepsilon\varepsilon')X(X'X)^{-1} \quad (\text{III.30})$$

$$\text{var}(\hat{\beta}) = (X'X)^{-1} X'\mu_\varepsilon X(X'X)^{-1} > \sigma_\varepsilon^2 (X'X)^{-1}$$

Avec

$$\begin{bmatrix} \nu(\varepsilon_1) & \text{cov}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) & \dots & \dots & \text{cov}(\varepsilon_1, \varepsilon_n) \\ \text{cov}(\varepsilon_2, \varepsilon_1) & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{cov}(\varepsilon_n, \varepsilon_1) & \cdot & \cdot & \cdot & \nu(\varepsilon_n) \end{bmatrix}$$

### III.3.4 Test de détection de l'autocorrélation des erreurs

#### a) Test de Durbin et Watson (DW)

Ce test permet de détecter une autocorrélation des erreurs d'ordre 1.

Sa forme est :

$$\varepsilon_t = \varphi \varepsilon_{t-1} + v_t$$

Avec :

$$v_t \rightarrow N(0, \sigma_\varepsilon^2)$$

Le test d'hypothèse est le suivant :

$$H_0 : \varphi = 0$$

$$H_1 : \varphi \neq 0$$

La statistique de DW est la suivante :

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2} \quad (\text{III.31})$$

Où  $e_t$  Est le résidu de l'estimation du modèle.

On a :  $0 < DW < 4$

Afin de tester l'hypothèse  $H_0$ , Durbin et Watson on a tabulé les valeurs critiques de DW au seuil de 5 % en fonction de la taille de l'échantillon (n) et du nombre de variables explicatives (k). la lecture de la table permet de déterminer deux valeurs  $d_1$  et  $d_2$  comprises entre 0 et 2 qui délimitent l'espace entre 0 et 4 selon le schéma suivant :

$$0 \text{ --- } d_1 \text{ --- } d_2 \text{ --- } 2 \text{ --- } 4-d_2 \text{ --- } 4-d_1 \text{ --- } 4$$

$$\varphi > 0 ? \quad \varphi = 0 \quad \varphi = 0 ? \quad \varphi < 0$$

$d_2 < DW < 4 - d_2 \Rightarrow \varphi = 0$  : pas d'autocorrélation des erreurs.

$0 < DW < d_1 \Rightarrow$  on rejette  $H_0 : \varphi > 0$  : l'existence d'autocorrélation

$4-d_1 < DW < 4 \Rightarrow$  on rejette  $H_0 : \varphi < 0$  : l'existence d'autocorrélation

$d_1 < DW < 2$  ou  $4 - d_2 < DW < 4 - d_1 \Rightarrow$  zone de doute.

#### b) Correction de l'autocorrélation

Dans le cas de l'auto corrélation des erreurs on utilise la méthode des moindres carrée généralisée (MCG) ou estimateur de AITKEN donnée par :

$$\hat{\beta} = (X' \mu_{\varepsilon}^{-1} X)^{-1} X' \mu_{\varepsilon}^{-1} Y \quad (\text{III.32})$$

Et

$$\omega_{\hat{\beta}} = (X' \mu_{\varepsilon}^{-1} X)^{-1} \quad (\text{III.33})$$

### c) Hétéroscédasticité des erreurs

Lorsque les variances de l'erreur ne sont plus de variances constantes sur la première diagonale c. a. d :

$$E(\varepsilon, \varepsilon') \Omega_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \sigma_{\varepsilon 1}^2 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & \sigma_{\varepsilon 2}^2 & . & . & . & . \\ . & 0 & . & . & . & . \\ . & . & . & \sigma_{\varepsilon i}^2 & . & . \\ . & . & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & . & . & 0 & \sigma_{\varepsilon n}^2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

On dit qu'il y a un problème d'hétéroscédasticité et les conséquences de ce problème est le même que dans l'autocorrélation des erreurs et qui sont :

Estimateur sans biais

L'estimateur de MCO ne possède plus de variance minimale

Correction de l'hétéroscédasticité

L'estimateur BLUE du modèle heteroscedastique est alors celui des MCG :

$$\hat{a} = (X' \Omega_{\varepsilon} X)^{-1} (X' \Omega_{\varepsilon}^{-1} Y) \quad (\text{III.35})$$

$$\omega_{\hat{a}} = (X' \Omega_{\varepsilon}^{-1} X)^{-1} \quad (\text{III.36})$$

### d) Test de détection de l'hétéroscédasticité

Il existe plusieurs tests de détection de l'hétéroscédasticité parmi ces tests, le test de White fondé sur une relation significative entre le carré du résidu et une ou plusieurs variables explicatives en niveau et au carré au sein d'une même équation et régression [147] :

$$e_t^2 = a_1 x_{1t} + b_1 x_{1t}^2 + a_2 x_{2t} + b_2 x_{2t}^2 + \dots + a_k x_{kt} + b_k x_{kt}^2 + a_0 + v_t \quad (\text{III.37})$$

Si l'un de ces coefficients de régression est significativement différent de 0 alors on accepte l'hypothèse d'hétéroscédasticité. Nous pouvons procéder à ce test à l'aide de test de Fisher de nullité des coefficients [4]:

$$H_0 : a_1 = b_1 = a_2 = b_2 \dots \dots \dots = a_k = b_k = 0$$

Si on refuse  $H_0$  alors il existe un risque d'hétéroscédasticité.

#### **e) Remédier à la multi colinéarité**

Augmenter la taille de l'échantillon : Cette technique n'est pas efficace que si l'ajout d'observations diffère significativement de celles figurant déjà dans le modèle. La « Ridge Régression » : est une réponse purement numérique, il s'agit de transformer la matrice  $XX$  en  $(XX + cI)$ .

#### **f) Sélection du modèle optimal**

Dans la pratique, l'économetre est souvent confronté aux choix de plusieurs variables explicatives  $x_1, x_2, \dots, x_k$  choisies pour expliquer la variable endogène  $Y$ . Plusieurs outils statistiques nous permet de déterminer quelles variables à retenir ou quelles variables à exclure dans un modèle.

Cependant, cette démarche peut aboutir à un raisonnement non économique car elle permet d'aboutir à des modèles économétriques qui sont souvent bons sur le plan statistique mais en contradiction avec la réalité économique. Ces techniques de sélection de variables explicatives sont donc à manier avec prudence. Par ailleurs, la question du choix d'un meilleur modèle est posée sachant qu'il existe plusieurs en concurrence dont les variables sont toutes significatives mais qui ne sont pas les mêmes. Généralement, dans la pratique on choisit le modèle dont le  $R^2$  (coefficient de détermination) est le plus élevé. Cependant, ce critère à un inconvénient qui est de ne pas arbitrer entre la perte de degrés de liberté du modèle et l'ajustement qui en résulte. C'est pourquoi on préfère utiliser les critères d'AKAIKE ou SCHWARZ afin de comparer des modèles impliquant un nombre différent de variables explicatives.

### **III.4 Etapes pour effectuer une régression**

#### **III.4.1 Définir l'équation à estimer**

La première étape consiste à déterminer ce que l'on cherche à modifier c'est à dire la variable endogène Y et les éléments qui expliquent les variations de cette variable c'est-à-dire les variables explicatives Xi. Cette première étape repose donc sur une étude économique du problème à traiter et sur la recherche d'information statistique. Le tracé des graphiques de l'évolution de chaque série sélectionnée permet de comparer l'ampleur de leurs fluctuations ainsi que de mettre en évidence des décalages dans leurs variations.

#### **III.4.2 Choix de la méthode d'estimation**

La méthode de régression la plus fréquemment utilisée est la méthode des moindres carrés ordinaire puisqu'elle permet (si les hypothèses sont vérifiées) d'obtenir le meilleur estimateur linéaire sans biais. On utilise d'autres méthodes d'estimations lorsque les hypothèses ne sont plus vérifiées, ceci se produit généralement après avoir effectué une première régression avec les MCO.

### **III.5 Examen des résultats de la régression**

#### **III.5.1 Modélisation des performances de l'usinage**

Après avoir effectué une régression deux types de résultats sont à contrôler avant de les exploiter :

- Résultats économiques
- Résultats statistiques

Le premier élément à contrôler est la pertinence des coefficients obtenus par la régression, il est ainsi impossible de trouver une propension marginale supérieur à 1, il ne faut pas tomber dans l'excès inverse : la régression n'est pas faite pour se conforter dans les résultats que l'on souhaite. Les résultats statistiques sont exploités au moyen de tests, à chacun des problèmes décelés correspondent une réponse spécifique. Le souhait d'obtenir de bons résultats statistiques ne doit pas conduire à utiliser des variables qui ne sont pas justifiées d'un point de vue économique ou à omettre des variables pertinentes.

#### **III.5.2 Taux d'enlèvement de matière (MRR)**

Le taux d'enlèvement de matière, parfois appelé taux d'enlèvement de métal, représente la quantité de matière retirée d'une pièce au fil du temps. L'objectif essentiel de la fabrication

de pièces est d'augmenter la production tout en réduisant le temps nécessaire ou de maximiser les bénéfices tout en minimisant les coûts. Lorsque les machinistes planifient leur travail, l'une des premières variables qu'ils prennent en compte est le taux d'enlèvement de matière. Cela comprend des éléments tels que la profondeur de coupe radiale (RDOC) et la profondeur de coupe axiale (ADOC). Si votre objectif est d'améliorer l'efficacité de la production, même une légère augmentation du taux d'enlèvement de matière peut entraîner une amélioration significative. Ce taux est généralement mesuré en mm<sup>3</sup>/min et peut être exprimé mathématiquement comme suit :

$$MRR = 1000 \frac{\Delta W_w}{\rho_w T} \quad (\text{III.38})$$

$\Delta W_w$  : est la perte de poids du matériau de travail pendant le fraisage

$\rho_w$  : est la masse volumique de la pièce :

$T$  : est le temps d'usinage.

La relation linéaire choisie pour modéliser le temps d'enlèvement de matière (MRR) est donnée par :

$$\begin{aligned} Y = & C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 (X_1 X_2 X_3) + C_5 (X_1^2 X_2) + C_6 (X_1^2 X_3) + C_7 (X_2^2 X_1) \\ & + C_8 (X_2^2 X_3) + C_9 (X_3^2 X_1) + C_{10} (X_3^2 X_2) + C_{11} (X_1 X_2) + C_{12} (X_1 X_3) + C_{13} (X_2 X_3) \\ & + C_{14} (X_1^2) + C_{15} (X_2^2) + C_{16} (X_3^2) \end{aligned} \quad (\text{III.39})$$

Les valeurs des coefficients de la relation ci-dessus sont déterminées par régression linéaire multiple. Un programme implémenté sur MATLAB est utilisé pour trouver les valeurs de ces coefficients.

### III.5.3 Taux d'usure des outils (TWR)

La durée de vie de l'outil joue un rôle crucial dans l'amélioration de la productivité et revêt donc une grande importance économique pour le processus. Des taux d'usure élevés des matériaux d'électrode peuvent entraîner des interruptions pendant l'usinage, des périodes d'usinage prolongées, des coûts d'usinage élevés et une réduction de l'efficacité du processus. Le taux d'usure de l'outil (TWR) correspond au poids moyen de matériau retiré de l'outil par unité de temps, comme le montre la formule suivante :

$$TWR = 1000 \frac{\Delta W_T}{\rho T} \quad (\text{III.40})$$

$\Delta W_T$  : est la perte de poids du matériau d'électrode pendant l'usinage

$\rho T^T$ : est la densité du matériau d'électrode

La relation linéaire choisie pour modéliser l'usure des électrodes est donnée par Les figures, tableaux et formules mathématiques :

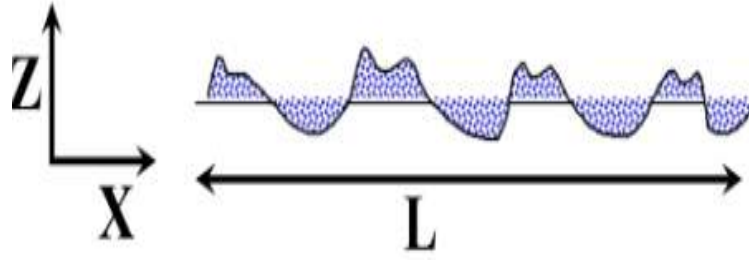
$$\begin{aligned} Y = & C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 (X_1 X_2 X_3) + C_5 (X_1^2 X_2) + C_6 (X_1^2 X_3) + C_7 (X_2^2 X_1) \\ & + C_8 (X_2^2 X_3) + C_9 (X_3^2 X_1) + C_{10} (X_3^2 X_2) + C_{11} (X_1 X_2) + C_{12} (X_1 X_3) + C_{13} (X_2 X_3) \\ & + C_{14} (X_1^2) + C_{15} (X_2^2) + C_{16} (X_3^2) \end{aligned} \quad (\text{III.41})$$

Nous créons un programme dans MATLAB afin que le modèle de régression linéaire que nous avons utilisé détermine les valeurs des coefficients.

#### III.5.4 Mesure de la rugosité de surface (Ra)

La rugosité de surface est une mesure des variations subtiles de la hauteur physique de la surface, contrairement aux variations plus importantes telles que la forme et l'ondulation, qui font généralement partie de la géométrie de surface. La rugosité de surface revêt une importance particulière dans l'assurance de la performance adéquate des composants dans divers domaines tels que la tribologie, les revêtements de surface, la microfluidique et la biocompatibilité. Les mesures de la rugosité de surface peuvent être réalisées à l'aide de méthodes quantitatives ou qualitatives.

Les méthodes qualitatives englobent des aspects visuels tels que la réflectance de surface, l'épaisseur de la couche de traitement, ainsi que le déplacement de pointes de sonde sur la surface pour une détection tactile de base. La moyenne de rugosité, souvent notée Ra, représente le paramètre de texture de surface le plus fréquemment rapporté. Il offre une mesure globale de la texture de surface. Plus précisément, Ra correspond à l'écart moyen entre l'élévation de chaque point de la surface et l'élévation moyenne. Pour mieux visualiser cela, prenons en considération le profil ci-dessous, qui illustre une section typique de surface (figure III.1).



**Figure III.1 :** Mesure l'écart d'une surface par rapport à une hauteur moyenne Ra (rugosité moyenne)

La ligne de coupe horizontale dans le profil représente la hauteur de la moyenne arithmétique, comme indiqué par la zone bleue qui indique la différence par rapport à cette ligne. Ra est calculé en divisant la longueur totale du profil par le nombre total de zones bleues. L'instrument le plus couramment utilisé pour évaluer la rugosité de surface est une sonde de jauge.

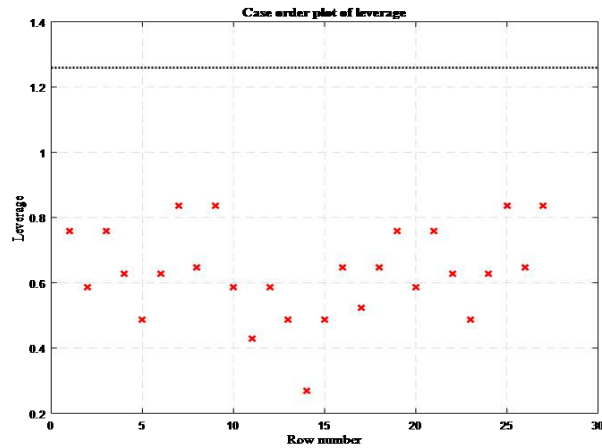
La modélisation de Mesure l'écart d'une surface par rapport à une hauteur moyenne Ra repose sur une relation linéaire choisie, qui est formulée comme suit :

$$\begin{aligned}
 Y = & C_0 + C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 (X_1 X_2 X_3) + C_5 (X_1^2 X_2) + C_6 (X_1^2 X_3) + C_7 (X_2^2 X_1) \\
 & + C_8 (X_2^2 X_3) + C_9 (X_3^2 X_1) + C_{10} (X_3^2 X_2) + C_{11} (X_1 X_2) + C_{12} (X_1 X_3) + C_{13} (X_2 X_3) \\
 & + C_{14} (X_1^2) + C_{15} (X_2^2) + C_{16} (X_3^2)
 \end{aligned} \quad (\text{III.42})$$

Pour déterminer (III.42), nous créons un programme dans MATLAB de sorte que la régression linéaire que nous avons utilisée est ce qui a déterminé les valeurs de coefficient.

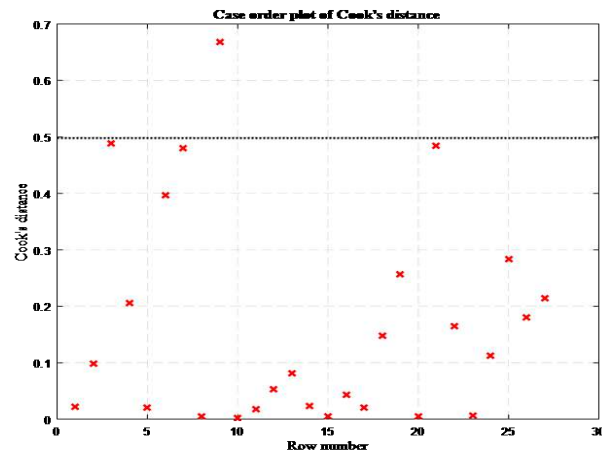
## III.6 Résultats

### III.6.1 Analyse des résultats de MRR



**Figure III.2 :** Répartition des résidus entre MRR et I, V, Ton et autocorrélation

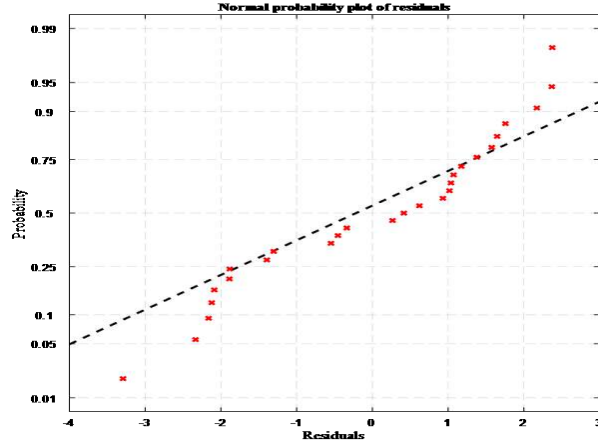
Le graphique présenté dans la Figure III.2 représente un modèle comportant trois variables indépendantes (I, V,  $T_{on}$ ) et une variable dépendante (MRR). Il illustre la dispersion des résidus par rapport à la valeur attendue. L'analyse statistique est utilisée pour évaluer s'il existe une corrélation entre ces variables, ce qui est une procédure standard pour déterminer la présence d'une relation linéaire de régression. Il est important de noter qu'il n'y a pas de points présentant une influence significative. Cependant, il convient de rechercher un point où la distance de Cook est considérable.



**Figure III.3 :** Nuage de points des résidus représentant la relation entre MRR et I, V, Ton

En observant le graphique de la Figure III.3, nous constatons la présence de quatre points légèrement écartés et un point très éloigné, qui peuvent potentiellement ne pas avoir d'impact significatif sur le modèle. Par conséquent, nous optons pour une analyse de régression des

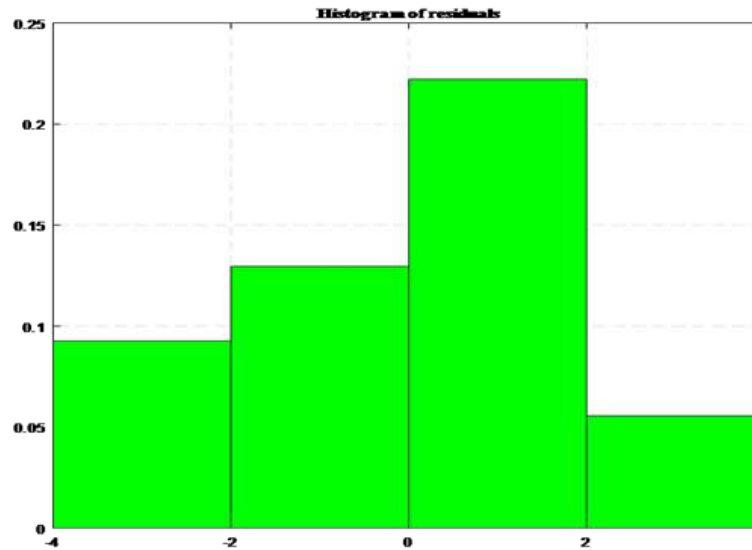
moindres carrés, une méthode qui établit la relation entre la variable dépendante (I, V,  $T_{on}$ ) et la variable indépendante (MRR). Cette technique statistique permet d'estimer ou de prédire une valeur inconnue d'une variable à partir d'une valeur connue.



**Figure III.4 :** Nuage d'observations sur les valeurs ajustées de MRR et I, V,  $T_{on}$

D'après la Figure III.4, plusieurs lignes ont été tracées à travers ces points, et la courbe de fonction est déterminée en utilisant l'ensemble des points voisins. La méthode des moindres carrés offre un ajustement entre la variable dépendante (I, V,  $T_{on}$ ) et la variable indépendante (MRR). Le graphique de probabilité normale ci-dessus semble approprié, avec peu de divergence par rapport à la ligne droite. Les coefficients de régression linéaire pour le taux d'enlèvement de matière en ce qui concerne les trois paramètres d'usinage (courant (I), tension (V), durée d'impulsion ( $T_{on}$ )) sont formulés comme suit :

$$\begin{aligned}
 MRR = & 2.1557x_3 - 0.016203x_3^2 + 0.010024x_2x_3 - 6.2639e^{-6}x_2x_3^2 - 0.0050427x_2^2 \\
 & - 2.039e^{-5}x_2^2x_3 + 0.03309x_1x_3 - 2.7986e^{-5}x_1x_3^2 - 0.060995x_1x_2 - 7.5223e^{-6}x_1x_2x_3 \\
 & + 0.00037865x_1x_2^2 - 0.74575x_1^2 - 0.00056042x_1^2x_3 - 0.0025313x_1^2x_2 + 0.05036x_1^3 \\
 & + 1.2619e^{-5}x_2^3 + 2.5101e^{-5}x_3^3
 \end{aligned} \tag{III.43}$$



**Figure III.5 :** Histogramme montrant la distribution de I, V, Ton et MRR

La Figure III.5 présente la répartition des valeurs des variables d'entrée et de sortie. Pour chaque groupe, un rectangle est construit avec une base correspondant à la valeur du groupe et une hauteur équivalente au nombre d'observations dans ce groupe. Cet histogramme est similaire à un histogramme classique, mais sans espace entre les barres. En ce qui concerne l'histogramme des résidus ci-dessus, il révèle que les résidus suivent une distribution cohérente. Cet histogramme peut être décrit comme ayant un pic global dans la plage de (0 à 2) et un pic local dans la plage de (2 à 0).

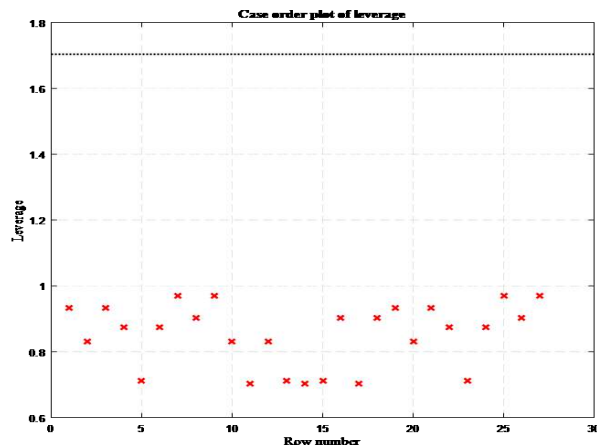
- **Analyse de la variance (ANOVA) MRR**

L'analyse de variance (ANOVA) appliquée au modèle développé révèle que le modèle est statistiquement significatif, comme illustré dans le Tableau III.2. De plus, il est capable d'expliquer de manière significative les effets du courant de décharge, de la tension et du temps d'impulsion sur les taux d'enlèvement de matière. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) atteint une valeur de 0,906, ce qui indique que les variables indépendantes I, V,  $T_{on}$  expliquent 90,6 % des variations observées dans les valeurs des variables dépendantes. Les 9,4 % restants des variations dans les variables (MRR) peuvent être attribués à d'autres facteurs ou variables non pris en compte dans cette étude, mais qui ont un impact sur la variable dépendante (MRR).

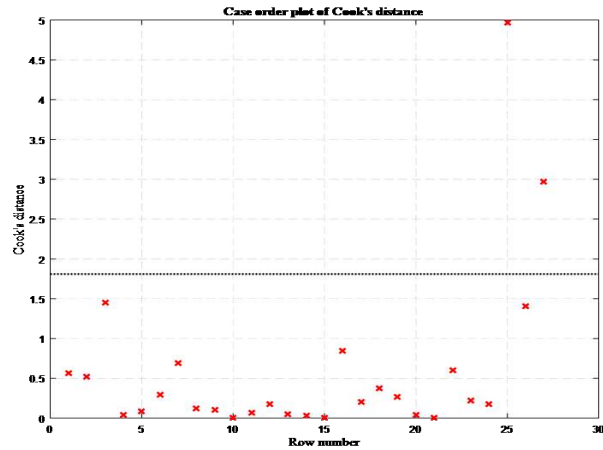
**Tableau III. 2** Analyse de variance (ANOVA) MRR

|                 | Somme<br>des<br>carrés | Degrés<br>de<br>liberté | Moyenne<br>Des<br>carrés | Statistique<br>de<br>Fisher(F) | Valeur<br>P |
|-----------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------|
| <b>Total</b>    | 781.04                 | 26                      | 30.04                    | 6.0167                         | 0.0033143   |
| <b>Modèle</b>   | 707.54                 | 16                      | 44.221                   |                                |             |
| <b>Résiduel</b> | 73.497                 | 10                      | 7.3497                   |                                |             |

### III.6.2 Analyse des résultats de TWR à l'aide d'une régression linéaire multiple

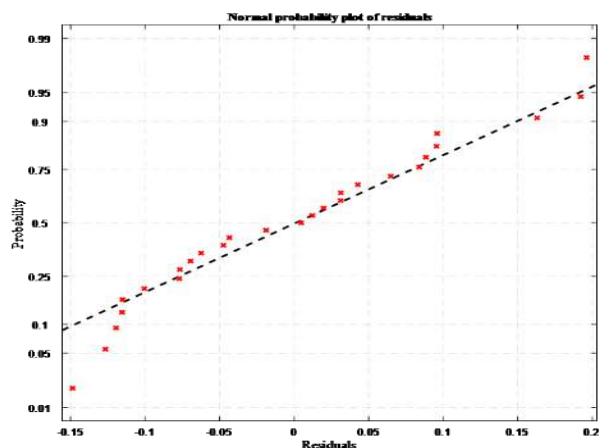
**Figure III.6 :** Répartition des résidus entre TWR et I, V et Ton avec autocorrélation

Le schéma de dispersion résiduel représenté dans la Figure III.6 présente un modèle composé de trois variables indépendantes (I, V,  $T_{on}$ ) et d'une variable dépendante (TWR). Les calculs mathématiques permettent de déterminer si une corrélation existe entre ces variables. Cette démarche est couramment employée pour établir l'existence d'une relation de régression linéaire. En observant précédente, il est évident qu'aucun point d'influence majeure ne se distingue. Ainsi, il convient de rechercher un point où la distance de Cook présente une valeur significative.



**Figure III.7 :** Nuage de points des résidus représentant la relation entre TWR et I, V, Ton

En observant la Figure III.7, on remarque la présence de deux points avec une distance de Cook élevée, mais un seul point se détache considérablement et est peu susceptible d'influer sur le modèle. Par conséquent, nous nous appuyons sur une analyse de régression des moindres carrés. Cette méthode est une variante de l'analyse de régression qui établit une relation linéaire entre la variable dépendante (I, V,  $T_{on}$ ) et la variable indépendante (TWR). Cette technique est connue sous le nom de régulation optimale, une méthode statistique qui permet d'estimer ou de prédire la valeur inconnue d'une variable à partir de la valeur connue d'une autre variable. Les variables utilisées pour la prédiction sont appelées variables explicatives, tandis que les variables dont on cherche à prédire les valeurs sont appelées variables à expliquer, car elles reposent sur la construction de régressions et la dérivation de courbes contenant des valeurs maximales ou minimales.

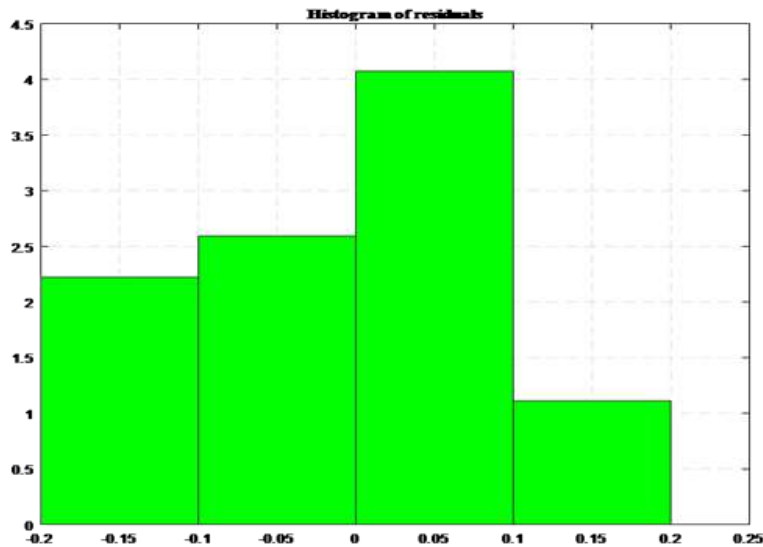


**Figure III.8 :** Nuage d'observations sur les valeurs ajustées de TWR et I, V, Ton

En examinant la Figure III.8, on peut observer que les résidus suivent une distribution normale, car les points sont regroupés autour de la ligne centrale. Plusieurs lignes ont été tracées

à travers ces points, et une ligne droite a été tracée pour englober un ensemble de données, avec le nombre de points déterminant la ligne de régression. La méthode des moindres carrés offre la corrélation la plus robuste entre la variable dépendante (I, V,  $T_{on}$ ) et la variable indépendante (TWR). Le graphique de probabilité normale ci-dessus semble adéquat, étant relativement proche de la ligne droite. Le modèle de régression linéaire multivariée pour l'usure de l'électrode en fonction de trois paramètres d'usinage (Courant (I), Tension (V) et Temps d'impulsion ( $T_{on}$ )) prend la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 TWR = & 1.4978e^{-5}x_3^3 - 6.1106e^{-5}x_2x_3^2 + 8.3972e^{-8}x_2x_3^3 + 7.8804e^{-5}x_2^2x_3 \\
 & - 1.3889e^{-9}x_2^2x_3^2 - 2.4431e^{-5}x_2^3 - 1.6434e^{-7}x_2^3x_3 - 1.1263e^{-5}x_1x_3^2 \\
 & - 9.7541e^{-8}x_1x_3^3 + 4.7321e^{-6}x_1x_2x_3 + 1.8646e^{-7}x_1x_2x_3^2 - 8.6963e^{-5}x_1x_2^2 \\
 & + 7.7009e^{-8}x_1x_2^2x_3 - 3.2338e^{-7}x_1x_2^3 + 0.00044832x_1^2x_3 + 1.8819e^{-6}x_1^2x_3^2 \\
 & - 4.5536e^{-6}x_1^2x_2x_3 + 8.9844e^{-6}x_1^2x_2^2 - 1.6988e^{-5}x_1^3x_3 - 3.0134e^{-5}x_1^3x_2 \\
 & + 7.2858e^{-5}x_1^4 + 8.5511e^{-8}x_2^4 - 2.7872e^{-8}x_3^4
 \end{aligned} \quad (III.44)$$



**Figure III.9 :** Histogramme des valeurs dépendantes TWR, I, V,  $T_{on}$

L'histogramme des résidus révèle que les données suivent une distribution normale. On peut caractériser cet histogramme comme ayant un maximum global autour de (0 à 0,1) et un maximum local autour de (0,1 à 0). Les barres de l'histogramme de la Figure III .41 sont uniformément espacées. Cette figure illustre la répartition des valeurs de I, V,  $T_{on}$  et TWR.

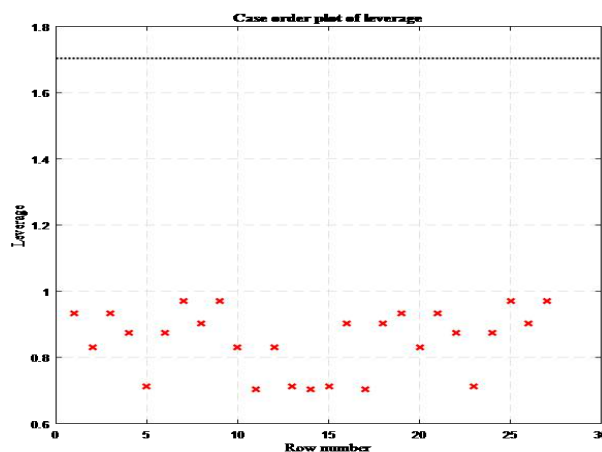
• **Analyse de la variance (ANOVA) TWR**

En examinant l'ANOVA du modèle élaboré, nous constatons que le modèle est statistiquement significatif (Tableau III. 3) et qu'il est capable d'expliquer efficacement les variations de l'usure de l'électrode dues au courant de décharge, à la tension et au temps d'impulsion. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) associé à la variable cible est de 0,88, ce qui signifie que cette valeur explique 88 % des variations observées dans les variables indépendantes (I, V,  $T_{on}$ ) par rapport aux valeurs de la variable dépendante (TWR). Les 12 % restants des variations de la variable dépendante (TWR) sont attribuables à d'autres facteurs ou variables non pris en compte dans cette étude.

**Tableau III. 3** Analyse de variance (ANOVA) TWR

|                 | Somme<br>des<br>carrés | Degrés<br>de<br>liberté | Moyenne<br>des<br>carrés | Statistique<br>de<br>Fisher | Valeur<br>P |
|-----------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------|
| <b>Total</b>    | 2.1775                 | 26                      | 0.083749                 | 1.3531                      | 0.042458    |
| <b>Modèle</b>   | 1.9195                 | 22                      | 0.087252                 |                             |             |
| <b>Résiduel</b> | 0.25793                | 4                       | 0.064483                 |                             |             |

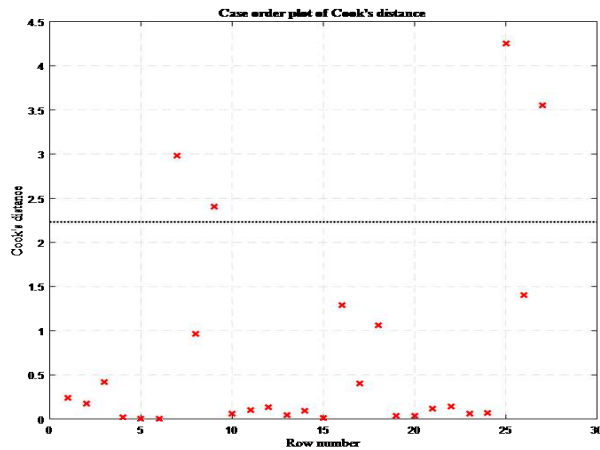
**III.6.3 Analyse des résultats de  $R_a$  à l'aide d'une régression linéaire multi variable**



**Figure III.10** : Répartition des résidus  $R_a$ , I, V et Autocorrélation de  $T_{on}$

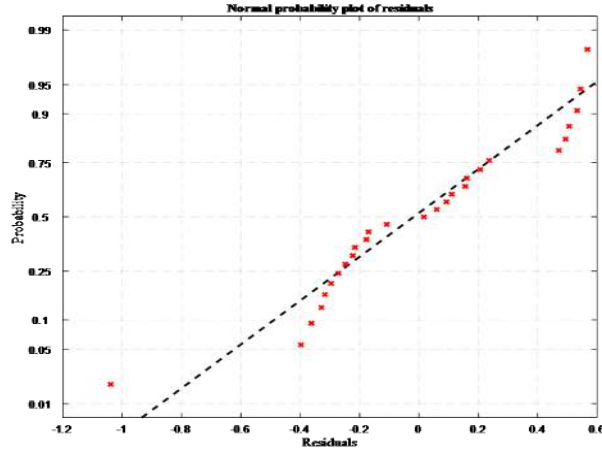
Le schéma illustré dans la Figure III.10 est un modèle comprenant trois variables indépendantes (I, V,  $T_{on}$ ) et une variable dépendante ( $R_a$ ). Il représente un nuage de points qui

montre les résidus par rapport aux valeurs attendues. Il est évident qu'aucun motif particulier n'apparaît dans les points de la figure, ce qui est en accord avec la linéarité attendue. Ce type de représentation est souvent appelé un nuage de points ou un graphique (x, y), où chaque point représente des données observées. Les axes x et y affichent les valeurs des variables dépendantes et indépendantes, permettant ainsi d'identifier toute relation entre elles. Les points représentent les valeurs observées pour chaque observation et forment un nuage de points qui nous permet d'évaluer la variabilité des données. Des calculs peuvent être effectués pour déterminer s'il existe une relation entre les variables, ce qui est une procédure couramment utilisée dans l'analyse statistique. En examinant la Figure III.10, il est clair qu'aucun point ne présente une influence notable, ce qui nous amène à rechercher un point où la distance de Cook est significative.



**Figure III.11 :** Nuage de points des résidus représentant la relation entre  $R_a$  et  $I$ ,  $V$ ,  $T_{on}$

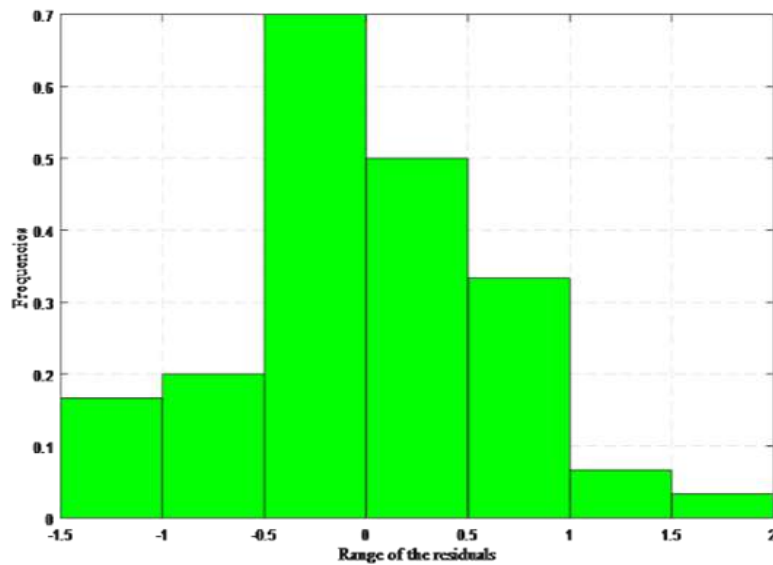
D'après le graphique de la Figure III.11, tel que le montre la courbe, il y a quatre points situés du côté droit qui ne sont pas considérés comme ayant une influence significative. Par conséquent, nous nous appuyons sur une analyse de régression des moindres carrés. Cette méthode d'analyse de régression établit une relation linéaire entre la variable ( $I$ ,  $V$ ,  $T_{on}$ ) et la variable indépendante ( $R_a$ ). Il s'agit d'une technique statistique qui permet d'estimer ou de prédire la valeur inconnue d'une variable en se basant sur la valeur connue d'une autre variable. Les variables utilisées pour la prédiction sont appelées variables explicatives, tandis que les variables attendues sont désignées comme variables dépendantes, car elles sont déterminées en utilisant des régressions et la dérivation de lignes qui minimisent ou maximisent les carrés.



**Figure III.12 :** Nuage d'observations sur les valeurs ajustées de Ra et I, V, Ton

En se référant à la Figure III.12, le terme le plus approprié est un terme tribord qui est tracé par défaut à partir d'un groupe de points de moment qui continuent de refléter les données en eux. Plusieurs degrés sont tracés par défaut à partir de ces points, et le terme "ferme" est préféré en fonction du nombre de points sur ou touchant ces points, ou en tenant compte d'une faible variabilité dans les capacités résiduelles tolérées. La méthode des moindres carrés a principalement réduit la variabilité dans les variables dépendantes (I, V, Ton) et indépendantes (SR). Le déplacement de prévision permis semble mieux fonctionner en remplacement du lissage normal. La norme de la régression linéaire multiple de la rigidité de la jauge dans la triade de paramètres d'usinage (Courant (I), Tension (V) et Temps d'Impulsion (Ton)) est définie comme suit :

$$\begin{aligned}
 Ra = & 2.1129e^{-5}x_3^3 - 3.5072e^{-5}x_2x_3^2 + 6.9269e^{-8}x_2x_3^3 + 4.3682e^{-5}x_2^2x_3 + 6.033e^{-8}x_2^2x_3^2 \\
 & + 2.1838e^{-5}x_2^3 + 2.1571e^{-8}x_2^3x_3 - 0.00040201x_1x_3^2 + 8.9724e^{-7}x_1x_3^3 - 3.8973e^{-5}x_1x_2x_3 \\
 & + 3.4271e^{-7}x_1x_2x_3^2 - 0.00057273x_1x_2^2 - 1.846e^{-6}x_1x_2^2x_3 + 1.0185e^{-5}x_1x_2^3 + 0.0047666x_1^2x_3 \\
 & - 8.4444e^{-6}x_1^2x_3^2 + 1.7143e^{-5}x_1^2x_2x_3 - 0.0001513x_1^2x_2^2 - 8.9313e^{-5}x_1^3x_3 + 0.0012517x_1^3x_2 \\
 & - 0.0037278x_1^4 - 2.8023e^{-7}x_2^4 - 5.0028x_3^4
 \end{aligned} \quad (III.45)$$



**Figure III.13 :** Histogramme des résidus Ra et I, V, Ton

Cet histogramme, illustré dans la figure III.13, peut être décrit comme ayant un pic global à l'intervalle de (0 à 0,5) et un pic local à l'intervalle de (0,5 à 0). Il synthétise les données, qu'elles soient discrètes ou continues, en les représentant par des intervalles de valeurs. Cela offre une manière pratique de visualiser les caractéristiques principales de la répartition des données, de résumer de grands ensembles de données et d'identifier d'éventuelles observations anormales ou des intervalles sans données. Les valeurs possibles des données sont regroupées en classes ou en groupes. Pour chaque groupe, un rectangle est créé, où la base correspond à la valeur de ce groupe et la hauteur correspond au nombre d'observations dans ce groupe. Cet histogramme ressemble à un histogramme classique, à la différence qu'il n'y a pas d'espace entre les barres. Les barres de l'histogramme ont généralement la même largeur. La figure III.13 représente un histogramme qui montre la distribution des valeurs de I, V,  $T_{on}$  et Ra.

- **Analyse de la variance (ANOVA) Ra**

L'analyse de variance (ANOVA) effectuée sur le modèle élaboré révèle que ce modèle est significatif, comme indiqué dans le Tableau III. 4. Il permet de bien expliquer les impacts du courant de décharge, de la tension et du temps d'impulsion sur l'usure de l'électrode. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) de la variable cible atteint 0,957. Cette valeur démontre clairement que, dans le modèle de régression, les variables indépendantes (I, V et  $T_{on}$ ) expliquent 95,7 % des variations observées dans les valeurs de la variable dépendante (Ra). Les 4,3 % restants de ces différences sont attribués à d'autres facteurs non pris en compte dans cette

étude, mais liés à la variable dépendante ( $R_a$ ). En d'autres termes, ces 4,3 % représentent l'effet résiduel de ces autres facteurs ou variables.

**Tableau III. 4** Analyse de variance (ANOVA)  $R_a$

|                 | <b>Somme<br/>des<br/>carrés</b> | <b>Degrés<br/>de<br/>liberté</b> | <b>Moyenne<br/>des<br/>carrés</b> | <b>Statistique<br/>de<br/>Fisher</b> | <b>Valeur<br/>P</b> |
|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| <b>Total</b>    | 87.968                          | 26                               | 3.3834                            | 4.0666                               | 0.090946            |
| <b>Modèle</b>   | 84.203                          | 22                               | 3.8274                            |                                      |                     |
| <b>Résiduel</b> | 3.7647                          | 4                                | 0.94118                           |                                      |                     |

### III.7 Etude de la précision et de l'erreur du modèle

Pour calculer le pourcentage d'erreur des 27 tests, la formule suivante est utilisée :

$$e_i = \left[ \frac{|Ra_{exp} - Ra_{regres}|}{Ra_{exp}} \right] \times 100 \quad (III.46)$$

$Ra_{exp}$  : Rugosité expérimentale

$Ra_{regres}$  : Précision de la rugosité

$e_i$  : Taux d'erreur

Pour calculer le pourcentage de précision des 54 tests, la formule suivante est utilisée :

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ 1 - \frac{|Ra_{exp} - Ra_{regres}|}{Ra_{exp}} \right] \times 100 \quad (III.47)$$

Dans notre cas  $N = 27$  tests et  $A$  : Précision

**Tableau III. 5** Résultats prédit (MRR, TWR, Ra)

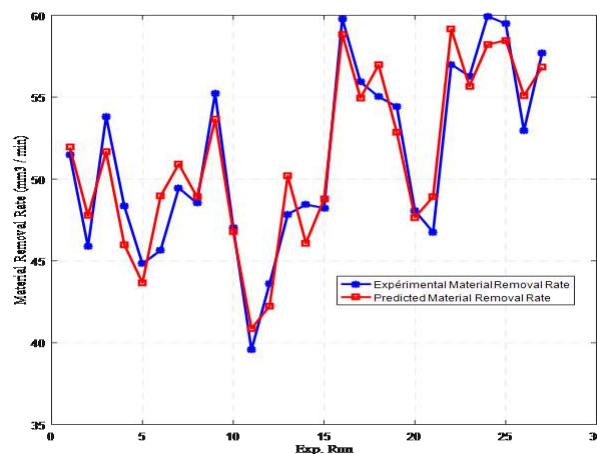
| Test | I<br>(A) | V<br>(V) | T <sub>on</sub><br>(μs) | MRR<br>pred | TWR<br>pred | Ra<br>pred |
|------|----------|----------|-------------------------|-------------|-------------|------------|
| 1    | 12       | 120      | 100                     | 51,9398     | 2,031       | 1,2859     |
| 2    | 14       | 120      | 100                     | 47,763      | 1,8555      | 3,7402     |
| 3    | 16       | 120      | 100                     | 51,6627     | 1,6891      | 5,8253     |
| 4    | 12       | 120      | 200                     | 45,9938     | 1,7042      | 0,9283     |
| 5    | 14       | 120      | 200                     | 43,6628     | 1,8649      | 1,2751     |
| 6    | 16       | 120      | 200                     | 48,9601     | 1,8369      | 1,6843     |
| 7    | 12       | 120      | 400                     | 50,9137     | 1,9701      | 0,9277     |
| 8    | 14       | 120      | 400                     | 48,9162     | 1,8145      | 2,7751     |
| 9    | 16       | 120      | 400                     | 53,6504     | 1,9784      | 1,4942     |
| 10   | 12       | 160      | 100                     | 46,7686     | 1,6575      | 3,2534     |
| 11   | 14       | 160      | 100                     | 40,8686     | 1,4227      | 3,2598     |
| 12   | 16       | 160      | 100                     | 42,2352     | 1,4513      | 6,7119     |
| 13   | 12       | 160      | 200                     | 50,204      | 1,718       | 2,0942     |
| 14   | 14       | 160      | 200                     | 46,0898     | 1,5301      | -0,0655    |
| 15   | 16       | 160      | 200                     | 48,7937     | 1,2622      | 2,2006     |
| 16   | 12       | 160      | 400                     | 58,8534     | 1,6139      | 2,0177     |
| 17   | 14       | 160      | 400                     | 54,9523     | 1,4262      | 2,8864     |
| 18   | 16       | 160      | 400                     | 56,9728     | 1,3751      | 6,0876     |
| 19   | 12       | 200      | 100                     | 52,8589     | 1,2921      | 3,8811     |
| 20   | 14       | 200      | 100                     | 47,6592     | 0,9924      | 2,7046     |
| 21   | 16       | 200      | 100                     | 48,916      | 1,4404      | 4,9156     |
| 22   | 12       | 200      | 200                     | 59,151      | 1,8771      | 6,3315     |
| 23   | 14       | 200      | 200                     | 55,6768     | 1,3842      | 1,7489     |
| 24   | 16       | 200      | 200                     | 58,2108     | 1,1499      | 2,0824     |
| 25   | 12       | 200      | 400                     | 58,4803     | 1,4103      | 3,4181     |
| 26   | 14       | 200      | 400                     | 55,0989     | 1,3327      | 1,0289     |
| 27   | 16       | 200      | 400                     | 56,8291     | 1,4388      | 2,5596     |

**Tableau III. 6 Résultats (Erreur, Précision)**

| Test | I<br>(A) | V<br>(V) | Ton<br>( $\mu$ s) | Erreur %<br>(MRR) | Précision<br>(MRR)% | Erreur %<br>(TWR) | Précision<br>(TWR)% | Erreur %<br>(Ra) | Précision<br>(Ra)% |
|------|----------|----------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| 1    | 12       | 120      | 100               | 0,893162393       | 99,10683761         | 3,096446701       | 96,9035533          | 11,3172414       | 88,68275862        |
| 2    | 14       | 120      | 100               | 4,126880314       | 95,87311969         | 8,143564356       | 91,85643564         | 10,3303835       | 89,66961652        |
| 3    | 16       | 120      | 100               | 4,026193572       | 95,97380643         | 6,232704403       | 93,7672956          | 3,71404959       | 96,28595041        |
| 4    | 12       | 120      | 200               | 4,873216132       | 95,12678387         | 2,057471264       | 97,94252874         | 9,87378641       | 90,12621359        |
| 5    | 14       | 120      | 200               | 2,581883088       | 97,41811691         | 6,565714286       | 93,43428571         | 8,05932203       | 91,94067797        |
| 6    | 16       | 120      | 200               | 7,251040526       | 92,74895947         | 4,823834197       | 95,1761658          | 2,0755814        | 97,9244186         |
| 7    | 12       | 120      | 400               | 2,939142742       | 97,06085726         | 2,950738916       | 97,04926108         | 32,5285714       | 67,47142857        |
| 8    | 14       | 120      | 400               | 0,816570486       | 99,18342951         | 0,805555556       | 99,19444444         | 15,1345566       | 84,86544343        |
| 9    | 16       | 120      | 400               | 2,877624909       | 97,12237509         | 2,059405941       | 97,94059406         | 14,9384615       | 85,06153846        |
| 10   | 12       | 160      | 100               | 0,555815437       | 99,44418456         | 1,339285714       | 98,66071429         | 6,66885246       | 93,33114754        |
| 11   | 14       | 160      | 100               | 3,307886754       | 96,69211325         | 8,603053435       | 91,39694656         | 14,4409449       | 85,55905512        |
| 12   | 16       | 160      | 100               | 3,152487961       | 96,84751204         | 6,367741935       | 93,63225806         | 4,54672897       | 95,45327103        |
| 13   | 12       | 160      | 200               | 4,91954023        | 95,08045977         | 5,604395604       | 94,3956044          | 17,6516854       | 82,34831461        |
| 14   | 14       | 160      | 200               | 4,851775392       | 95,14822461         | 4,801369863       | 95,19863014         | 114,23913        | -14,23913043       |
| 15   | 16       | 160      | 200               | 1,168774622       | 98,83122538         | 0,976             | 99,024              | 7,34634146       | 92,65365854        |
| 16   | 12       | 160      | 400               | 1,599398094       | 98,40060191         | 5,483660131       | 94,51633987         | 22,0965251       | 77,9034749         |
| 17   | 14       | 160      | 400               | 1,748077955       | 98,25192205         | 13,56363636       | 86,43636364         | 53,5319149       | 46,46808511        |
| 18   | 16       | 160      | 400               | 3,530437943       | 96,46956206         | 3,390977444       | 96,60902256         | 8,04229607       | 91,95770393        |
| 19   | 12       | 200      | 100               | 2,886459673       | 97,11354033         | 3,574626866       | 96,42537313         | 1,99242424       | 98,00757576        |
| 20   | 14       | 200      | 100               | 0,854587061       | 99,14541294         | 4,463157895       | 95,53684211         | 5,6484375        | 94,3515625         |
| 21   | 16       | 200      | 100               | 4,63315508        | 95,36684492         | 0,662068966       | 99,33793103         | 2,85375494       | 97,14624506        |
| 22   | 12       | 200      | 200               | 3,755481494       | 96,24451851         | 6,653409091       | 93,34659091         | 3,92261002       | 96,07738998        |
| 23   | 14       | 200      | 200               | 1,071783937       | 98,92821606         | 12,94339623       | 87,05660377         | 26,7318841       | 73,26811594        |
| 24   | 16       | 200      | 200               | 2,901084237       | 97,09891576         | 5,495412844       | 94,50458716         | 8,66666667       | 91,33333333        |
| 25   | 12       | 200      | 400               | 1,697260044       | 98,30273996         | 7,823529412       | 92,17647059         | 8,16772152       | 91,83227848        |
| 26   | 14       | 200      | 400               | 4,058356941       | 95,94164306         | 9,237704918       | 90,76229508         | 37,2621951       | 62,73780488        |
| 27   | 16       | 200      | 400               | 1,509358752       | 98,49064125         | 6,571428571       | 93,42857143         | 9,38461538       | 90,61538462        |

### III.7.1 Taux d'enlèvement de matière (MRR)

En examinant les résultats élevés présentés dans la Figure III.14, obtenus grâce à l'utilisation de l'optimisation par essaim de particules (PSO) et de la régression linéaire multiple, et en les comparant aux courbes obtenues à partir des mêmes paramètres de traitement expérimentaux, il est possible de conclure que les résultats obtenus par voie mathématique sont pratiquement identiques, voire parfois meilleurs que ceux obtenus par le biais d'expériences. En comparant les résultats, nous constatons que les matériaux ont été retirés de manière plus efficace, avec une précision de prédiction du modèle de régression linéaire multivariée atteignant 97,0893 % et un taux d'erreur de seulement 2,9106 %. À la lumière de ces résultats, nous pouvons avoir confiance en la combinaison de l'approche (PSO) et de la régression linéaire multiple que nous avons employée pour obtenir des performances supérieures en ce qui concerne le taux de matière retirée (MRR).

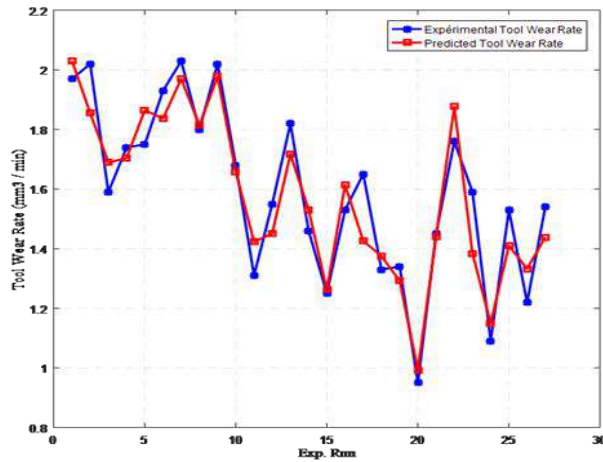


**Figure III.14 :** Variation du taux d'enlèvement de matière expérimental et prévu

### III.7.2 Taux d'usure de l'outil (TWR)

La Figure III.15 met en évidence la capacité du modèle de régression linéaire multiple élaboré à prédire le taux d'usure (TWR). Les mêmes paramètres d'usinage ( $I$ ,  $V$ ,  $T_{on}$ ) ont été utilisés pour obtenir les taux d'usure, à la fois à partir du modèle de régression linéaire multiple et des essais de confirmation expérimentaux, comme illustré dans la Figure III.15. Les résultats des essais de confirmation expérimentaux ont révélé que le modèle de régression linéaire multiple génère des valeurs de taux d'usure très proches des valeurs expérimentales. Les écarts maximum et minimum entre les taux d'usure prédits et les taux d'usure expérimentaux s'élèvent

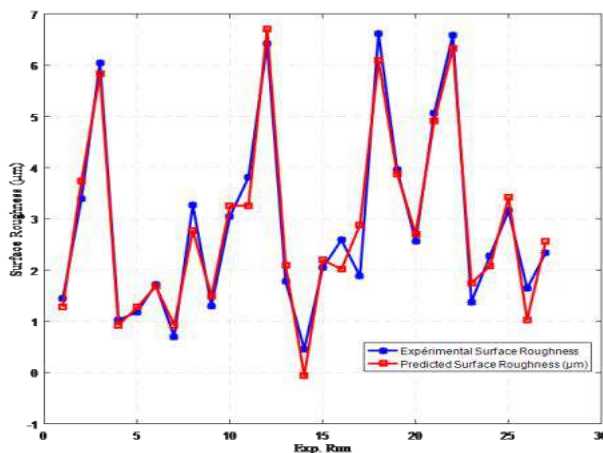
respectivement à 0,001 % et 0,0424 %. En conséquence, la précision de prédiction du modèle de régression linéaire multiple élaboré atteint 94,6559 %.



**Figure III.15 :** Variation des valeurs expérimentale et taux d'usure prévu de l'outil

### III.7.3 Rugosité de surface (Ra)

Le modèle de régression linéaire multiple construit démontre sa capacité à prédire la rugosité de surface (Ra). La Figure III.16 présente une validation expérimentale avec les paramètres d'usinage (I, V,  $T_{on}$ ). Les résultats expérimentaux indiquent que le modèle composite que nous avons développé produit une valeur de Ra très proche de celle observée expérimentalement. Les écarts maximum et minimum entre la rugosité de surface prédite (Ra) et la rugosité de surface mesurée expérimentalement (Ra) s'élèvent à 0,0919  $\mu\text{m}$  et 0,3945  $\mu\text{m}$  respectivement. En conséquence, la précision de prédiction du modèle de régression linéaire multiple établi s'élève à 82,9197 %, avec un taux d'erreur de 17,0802 %.



**Figure III.16 :** Variation d'expérimentale et prédite rugosité de surface

### III.8 Effet d'interaction des combinaisons de variables indépendantes

#### III.8.1 Influence des paramètres d'usinage sur la réponse taux d'enlèvement de matière (MRR)

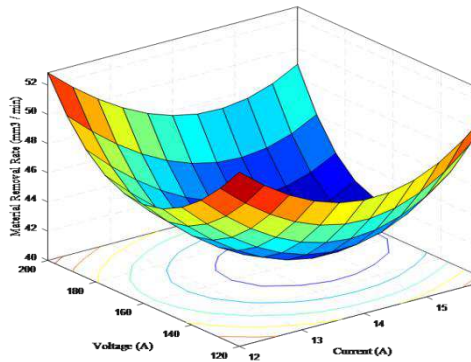


Figure .17 (a)

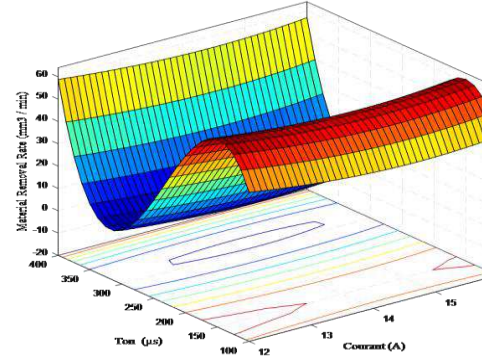


Figure .17 (b)

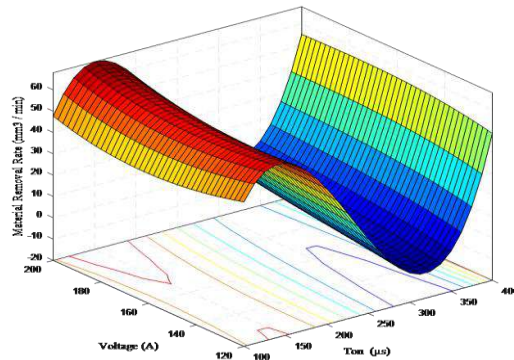


Figure .17 (c)

**Figure III.17 :** Variation du taux d'enlèvement de matière prédite par la régression linéaire multiple

Nous pouvons constater à partir des résultats présentés dans les Figures 17a, 17b et 17c que la régression que nous avons développée produit des résultats satisfaisants en ce qui concerne les valeurs de R et de F (ANOVA), ce qui est également évident dans les Figures 17a et 17b. Ces dernières figures nous informent sur l'impact du courant et de la durée d'impulsion sur le taux d'enlèvement de matière (MRR), montrant une augmentation du MRR avec un pic à  $MRR_{max} = 59,151 \text{ mm}^3/\text{min}$ . Il est également notable que la durée d'impulsion a un effet significatif et réactif sur le MRR, indépendamment de la valeur du courant. De plus, la tension (V) a un effet moins marqué sur les Figures 17b et 17c.

En résumé, la Figure 17a indique que l'augmentation du courant a un impact significatif sur l'augmentation du taux de matière retirée. La Figure 17b suggère que l'augmentation du

courant en combinaison avec la durée d'impulsion produit de bons résultats pour notre paramètre cible. Enfin, la Figure 17c révèle que l'augmentation de la durée d'impulsion affecte le MRR, avec une importance minimale de la tension (V). Par conséquent, parmi tous les paramètres spécifiés, le courant (I) est le facteur prédominant influençant le processus d'usinage.

### III.8.2 Influence des paramètres d'usinage sur la réponse-Taux d'usure de l'outil (TWR)

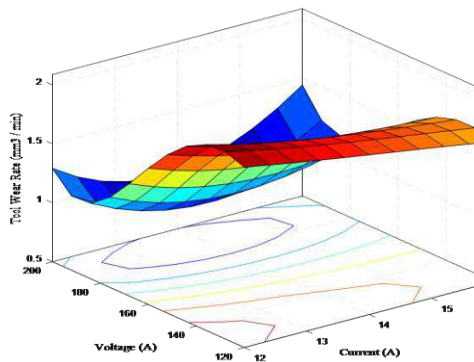


Figure. 18a

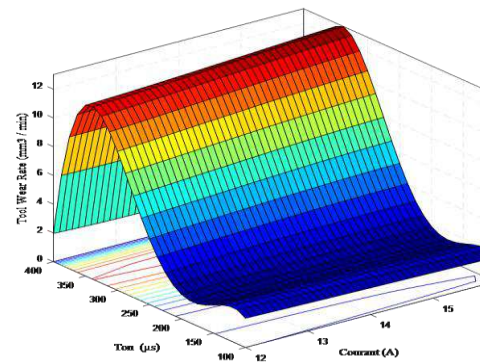


Figure. 18b

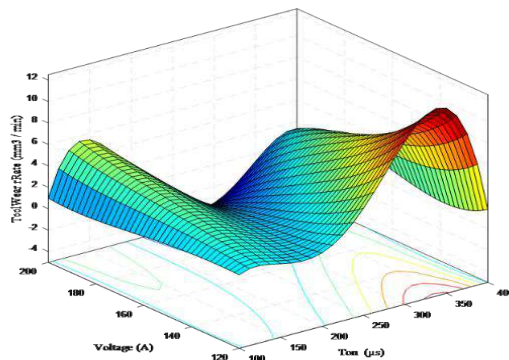


Figure. 18c

Figure III.18 : Basé sur V et Ton, taux d'usure anticipé TWR

Comme démontré dans les figures 18a, 18b et 18c, le taux d'usure de l'outil (TWR) est étudié en fonction des trois paramètres d'usinage : I, V et  $T_{on}$ . Dans le cas d'un courant élevé, une tendance à des taux d'enlèvement de matière élevés est observée. Les figures 18a et 18b mettent en évidence que l'usure augmente jusqu'à atteindre un certain point, après quoi elle se stabilise. De plus, il est notable que de courtes impulsions ( $T_{on}$ ) entraînent une usure rapide de l'électrode. Ces observations sont le résultat de recherches et d'analyses effectuées par le biais de l'ANOVA.

Cependant, avec des impulsions plus longues, l'usure se produit de manière beaucoup plus progressive. En pratique, la valeur optimale de la durée de l'impulsion se situe dans une plage spécifique, où l'une de ses extrémités correspond à la durée d'impulsion maximale, comme indiqué dans les figures 18b et 18c, et l'autre extrémité correspond à la durée d'impulsion qui minimise le taux d'usure de l'outil. Il est préférable d'utiliser une valeur de tension faible, comme le suggère la figure 18c. Cette préférence s'explique par la conductivité plus élevée de l'électrode et la dissipation thermique plus rapide.

En fin de compte, le taux d'usure de l'outil atteint sa valeur maximale,  $TWR=2,03 \text{ mm}^3/\text{min}$ , lorsque les paramètres sont fixés à  $I=12$ ,  $V=120$  et  $T_{on}=100 \text{ }\mu\text{s}$ , qui sont les valeurs minimales. De ce fait, nous pouvons conclure que les facteurs cruciaux pour minimiser l'usure de l'outil sont la durée de l'impulsion ( $T_{on}$ ) et le courant ( $I$ ).

### III.8.3 Influence des paramètres d'usinage sur la réponse- Rugosité de surface ( $R_a$ )

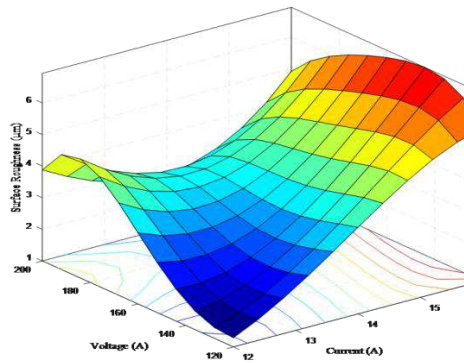


Figure .19 (a)

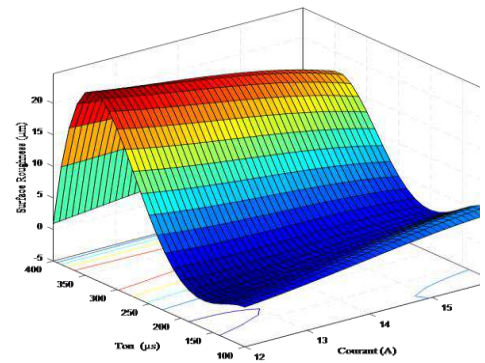


Figure .19 (b)

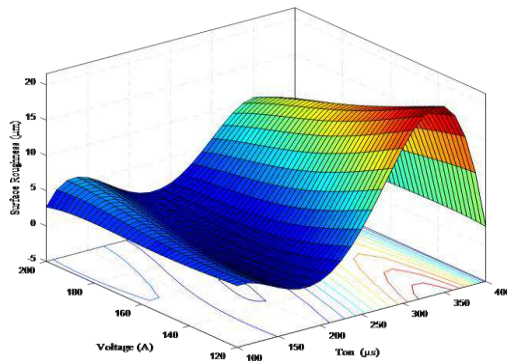


Figure .19 (c)

**Figure III.19 :** Variation de la rugosité de surface  $R_a$  prédite par régression linéaire multivariée

L'effet de l'intensité électrique ( $I$ ), de la tension ( $V$ ) et de la durée de l'impulsion ( $T_{on}$ ) sur la rugosité de la surface est illustré graphiquement dans les Figures 19(a), 19(b) et 19c. La rugosité de surface est intrinsèquement liée à la durée de l'impulsion ( $T_{on}$ ). Au cours du processus de décharge, l'électrode négative émet des électrons qui perdent une grande partie de leur énergie lorsqu'ils entrent en collision avec la surface de la pièce à usiner. Cette zone subit une décharge électrique, entraînant une brusque augmentation de la température. Les molécules présentes dans l'électrolyte sont ionisées par ces électrons. Ce phénomène découle de la fusion et de l'évaporation localisées dans la zone exposée à la décharge, créant ainsi de micro-dépressions à la surface.

Il est implicite que la rugosité de surface augmente progressivement avec l'intensité. De plus, la rugosité augmente à mesure que le courant augmente dans cette plage spécifique (Figure 19a). De même, la Figure 19b montre que la rugosité de surface augmente lorsque la durée de l'impulsion et le courant diminuent. Enfin, la rugosité de surface augmente lorsque la durée de l'impulsion et la tension sont réduites (Figure 19c). Parmi les trois paramètres d'usinage, il est clairement établi que la durée de l'impulsion a le plus d'influence sur la rugosité de surface ( $R_a$ ), avec une précision moyenne de 82,9197 %.

### **III.9 Conclusion**

Les investigations effectuées au sein de ce chapitre nous ont conduit à tirer plusieurs conclusions significatives. Les résultats issus de l'application de la régression linéaire multiple démontrent sa capacité à prédire efficacement paramètres technoeconomiques du procédé d'usinage par électroérosion. De plus, ces approches ont permis une amélioration notable dans le processus de retrait de matériau, mettant en évidence l'impact direct des paramètres d'entrée tels que le courant de décharge et la durée d'impulsion sur les performances d'usinage. Il est clair que ces paramètres revêtent une grande importance dans l'influence du taux d'enlèvement de matière (MRR), du taux d'usure (TWR) et de la rugosité de surface ( $R_a$ ).

## Chapitre IV

# *Optimisation des paramètres d'usinage par décharges électriques*

## IV.1 Introduction

L'électroérosion a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine de la fabrication, offrant la possibilité d'intervenir dès la phase de conception des pièces. Cette technologie permet non seulement de concevoir de nouveaux processus d'usinage, mais également d'attribuer de nouvelles caractéristiques aux pièces pour les améliorer. De plus, les avancées constantes dans ce domaine, telles que l'utilisation de nouveaux matériaux pour les électrodes, le développement de machines plus rapides et plus abordables, ainsi que la maîtrise des paramètres électriques et des étincelles, contribuent à l'amélioration continue du procédé.

L'optimisation du processus d'usinage par EDM peut être accomplie à travers diverses méthodes, notamment la méthodologie de surface de réponse, les analyses Taguchi, les réseaux artificiels, ou encore des méthodes hybrides. L'une des approches les plus couramment utilisées dans le domaine de la fabrication est la méthodologie de surface de réponse (RSM), qui trouve une large application dans des contextes analytiques et industriels, notamment dans des processus conventionnels tels que le tournage, le fraisage, la soudure, le meulage.

Dans le cadre des problèmes d'optimisation multi-objectifs (MO), il est courant de rechercher non pas une unique solution optimale, mais un ensemble de solutions dites Pareto optimales qui correspondent aux différents compromis possibles. Ce regroupement de solutions dans l'espace fonctionnel est appelé le front de Pareto. Pour résoudre ce type de problèmes, les algorithmes évolutionnaires multi-objectifs (AEMO) se révèlent être des techniques particulièrement puissantes et polyvalentes, permettant de déterminer un ensemble de solutions avec une répartition équilibrée, même dans des cas complexes. Cependant, il est important de noter que les AEMO exigent un grand nombre d'évaluations des fonction-objectifs, ce qui les rend peu pratiques pour des problèmes nécessitant des temps de calcul importants, comme c'est souvent le cas dans le domaine de la mise en forme des matériaux.

Ce chapitre se concentrera sur l'optimisation des paramètres de l'usinage par décharges électriques (EDM). Il consiste, en premier lieu, de construire ce problème à partir des modèles mathématiques établis dans le chapitre précédent. Par la suite, il se penche sur la résolution de ce problème en utilisant un algorithme multi-objectif de type Pareto.

## IV.2 Modélisation du problème d'optimisation

Pour réussir dans l'utilisation de l'électroérosion, il est essentiel de comprendre les points clés suivants :

1. La tension : Elle évolue pour créer un champ électrique là où la résistance est la plus faible, en fonction des aspérités et de l'état de surface de la pièce. Un courant de faible

intensité entraîne une faible capacité d'enlèvement de matière, tandis qu'un courant de forte intensité permet un enlèvement de matière plus important, mais génère une usure accrue de l'électrode.

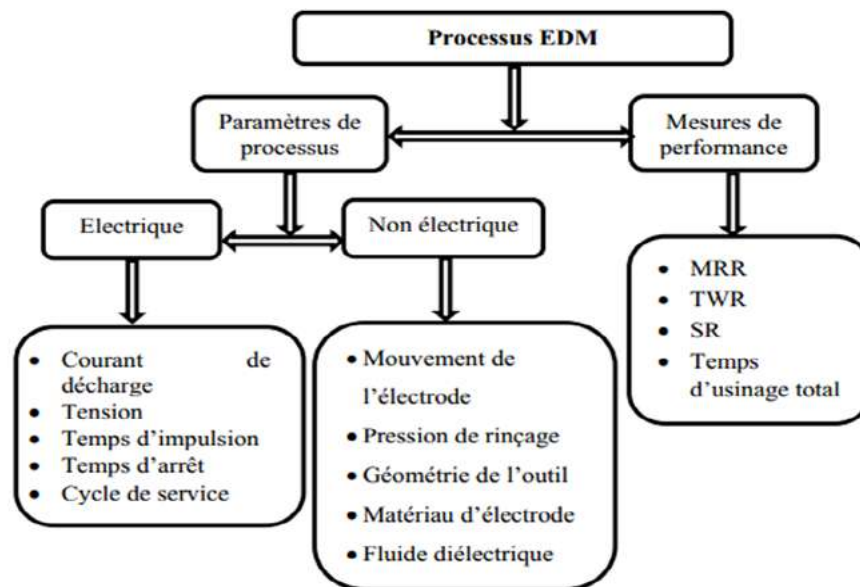
2. Le temps d'impulsion : Il est également un paramètre crucial. Une durée d'impulsion réduite entraîne une usure accrue de l'électrode. À l'inverse, une durée d'impulsion plus longue réduit l'usure de l'outil. Il a été observé qu'un intervalle plus court entre les étincelles permet d'obtenir un enlèvement de matière plus important et une usure de l'électrode moindre.
3. L'intensité de l'étincelle : Elle influe directement sur la rugosité de la surface usinée. Une faible intensité conduit à une rugosité réduite, tandis qu'une intensité élevée produit une rugosité plus importante.
4. Polarité d'usinage : La polarité est définie en fonction de la connexion de l'électrode. Elle peut varier en fonction de la nature des matériaux traités.
5. Intensité du courant : Les générateurs offrent plusieurs niveaux d'intensité, allant de 0,65A à 400A, avec des valeurs courantes atteignant 25A.
6. Temps d'impulsion : Il correspond à la durée effective de passage du courant pendant une décharge.
7. Temps d'intervalle entre les étincelles : Cette variable désigne la période pendant laquelle la tension est nulle entre l'électrode et la pièce [151].

Ces paramètres sont souvent un impact direct sur les paramètres techno-économiques du processus mais on trouve qu'un nombre important d'eux sont dépendants. En effet, l'établissement du problème d'optimisation du processus d'EMD nécessite une analyse plus profonde pour déterminer les paramètres d'usinage indépendants et qui peuvent présenter, en juste valeur, ce procédé d'usinage.

#### **IV.2.1 Variables d'optimisation**

En EDM, les paramètres d'usinage sont généralement choisis en se basant sur l'expérience de l'opérateur ou sur des données fournies par les fabricants de machines. Cependant, lorsque de telles informations sont utilisées pour l'usinage d'un acier mal connu, la qualité et la cohérence des performances d'usinage peuvent être compromises. Les recommandations des fabricants concernant les réglages des paramètres ne sont souvent applicables qu'aux aciers les plus couramment utilisés. Ainsi, l'optimisation des paramètres du processus EDM évolue d'autant plus complexe en raison de la multitude de variables d'usinage en jeu, et de légères

variations dans l'un de ces paramètres peuvent avoir un impact significatif sur le processus global. Les paramètres critiques qui influencent le procédé d'usinage par électroérosion peuvent être regroupés en deux catégories distinctes : les paramètres électriques et les paramètres non électriques. La figure IV.1 illustre une schématisation du processus EDM présentant les paramètres de réglage et les paramètres de performance.



**Figure IV.1:** Paramètres de processus d'EDM [149]

On trouve ainsi que les paramètres non électriques sont liés à la conception des pièces. Ils peuvent être déterminés lors de la planification géométrique de l'opération d'usinage. Par ailleurs, les paramètres électriques sont les plus fiables pour la modélisation mesures de performances car ils ont l'influence la plus significatives sur ces mesures. En effet, l'amélioration des critères de performance du processus d'EDM peut être basée sur la sélection des paramètres électriques. Par conséquent, les variables d'optimisation pour le problème considéré sont :

- L'intensité électrique ( $I$ ),
- La tension ( $V$ ),
- La durée de l'impulsion ( $T_{on}$ ).

#### IV.2.2 Critères d'optimisation

Les paramètres de performance technoeconomique du procédé d'usinage par décharges électrique sont, généralement, l'efficacité du processus d'enlèvement de matière présenté par le volume de matière enlevé de la pièce par unité de temps (débit de matière enlevée MRR),

l'efficacité de l'électrode présentée par le volume de matière enlevé de l'électrode par unité de temps (usure relative de l'outil TWR) et la qualité géométrique des surfaces produites présentée par l'état de surface (rugosité de surface  $R_a$ ) (figure IV.1).

Ces paramètres sont influencés directement par les paramètres d'usinage, tels que le temps d'impulsion ( $T_{on}$ ), le temps de repos ( $T_{off}$ ), le courant de décharge ( $I$ ) et la résistivité électrique du matériau de l'électrode ( $\rho$ ). D'après les résultats de l'étude expérimentale présentée dans le troisième chapitre, ces paramètres sont interagissant. On trouve, ainsi, que l'amélioration de l'un de ces critères peut détériorer les autres car ils évoluent de manière contradictoire.

Par ailleurs, la justification économique des opération d'usinage en EMD doit être basée sur l'amélioration simultanée de l'efficacité des trois principaux éléments intervenant dans ce procédé ; la machine, l'outil et la pièce. Cela peut être réalisée par l'augmentation du volume de matière enlevé de la pièce en diminuant l'usure de l'outil électrode et en respectant les exigences géométriques de la pièce. En effet, les critères quantifiant les qualités technoéconomiques qui peut être considérés dans cette étude sont :

- Le débit de matière enlevée MRR,
- L'usure de l'électrode TWR.

Par conséquent, le problème d'optimisation considéré dans notre étude consiste à la recherche des valeurs des paramètres d'usinage ( $I$ ,  $V$ ,  $T_{on}$ ) maximisant le MRR et minimisant le TWR, d'une manière simultanée.

#### IV.2.3 Contraintes

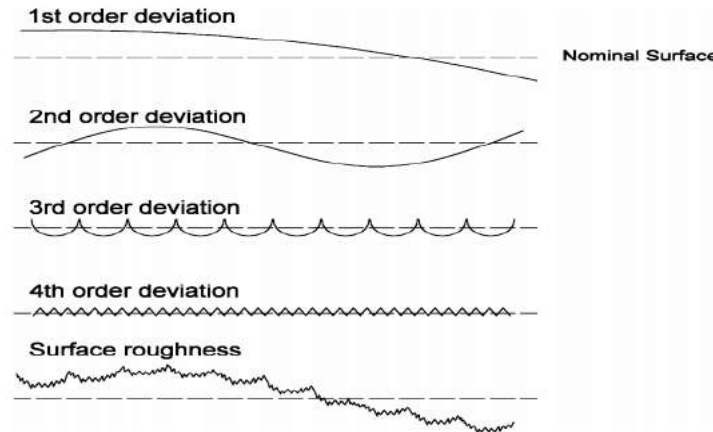
La rugosité de surface est un critère de qualité largement utilisé pour les produits, en particulier dans le domaine de fabrication mécanique. Obtenir la qualité de surface souhaitée revêt une grande importance pour assurer le bon fonctionnement d'une pièce. Cependant, il est difficile de trouver une solution simple en raison de la nature complexe du processus de formation de la rugosité de surface et de l'influence de nombreux facteurs incontrôlables.

La rugosité de surface est définie comme l'écart par rapport à la surface nominale de la troisième au sixième ordre, selon les normes internationales. Les premiers et deuxièmes ordres se réfèrent à la forme, comme la planéité et la circularité, ainsi qu'à l'ondulation, respectivement. Ces imperfections sont souvent dues à des erreurs de machine-outil, à la déformation de la pièce, à des réglages incorrects, à des vibrations et à des inhomogénéités du matériau de la pièce.

Les troisièmes et quatrièmes ordres de déviation concernent les rainures périodiques, les fissures et les débris, qui sont associés à la forme et à l'état des arêtes de coupe, à la formation

des copeaux et à la cinématique du processus. Enfin, les cinquième et sixième ordres de déviation se rapportent à la structure du matériau de la pièce, influencée par des mécanismes physico-chimiques à l'échelle du grain et du réseau, tels que le glissement, la diffusion, l'oxydation, les contraintes résiduelles, etc.

Ces différents types de déviations se combinent pour former le profil de rugosité de surface, comme illustré dans la figure IV.2.



**Figure IV.2 : Écarts de forme de surface [153]**

La considération de la qualité des surfaces produites est traduite, dans le problème d'optimisation, par le respect de la limite de rugosité de surface exigée par le constructeur. Nous pouvons, ainsi, présenter cette limite par l'inégalité suivante :

$$R_a \leq R_{amax}$$

#### IV.2.4 Modèle d'optimisation retenu

En se basant sur les notions présentées dans cette section, le problème d'optimisation considéré se traduit par la recherche des solutions ( $I$ ,  $V$ ,  $T_{on}$ ) maximisant le MRR, minimisant le TWR et respectant la limite sur le  $R_a$ . Il s'agit d'un problème d'optimisation multi-objectif avec contrainte qui peut être présenté par la forme canonique suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } (-MRR) \text{ et } TWR \\ \text{Tel que } \begin{array}{l} I_{min} \leq I \leq I_{max} \\ V_{min} \leq V \leq V_{max} \\ T_{onmin} \leq T_{on} \leq T_{onmax} \end{array} \\ \text{Et sous } R_a \leq R_{amax} \end{array} \right.$$

Où la minimisation du  $(-MRR)$  est équivalente à la maximisation du MRR.

### IV.3 Optimisation multi-objectif à essaim de particule

#### IV.3.1 Problèmes d'optimisation multi-objectifs

Sous forme canonique, un problème d'optimisation multi-objectif est défini par :

$$\begin{cases} \text{Min } F_j(X); j = 1 \text{ à } m \\ \text{Sous } X_{imin} \leq X_i \leq X_{imax}; i = 1 \text{ à } n \\ \text{Et } G_k(X) \leq G_{kmax} \\ H_l(X) = \overline{H_l} \end{cases}$$

Où  $m$  et  $n$  sont, respectivement, le nombre d'objectifs et le nombre de variables.

Ainsi, on trouve que la multiplicité des objectifs pose un problème lors de la détermination d'une solution objectif. Pour un problème mono-objectif, la solution optimale est la combinaison qui donne le minimum de la fonction-objectif, alors qui améliore le critère d'optimisation considéré. Sachant que dans la plupart des problèmes multi-objectifs, les critères sont contradictoires, la notion simple d'optimalité ne peut pas être utilisée car l'amélioration d'un critère peut détériorer un autre. En effet, et pour ce genre de problèmes, l'utilisation de l'optimalité de Pareto appelée aussi notion de dominance de Pareto devienne un issu convenable.

#### IV.3.2 Optimalité de Pareto

Pour la comparaison des scalaires, les opérateurs logiques  $=$ ,  $<$  et  $\leq$  sont suffisants. Ces mêmes opérateurs doivent être étendus pour la comparaison des vecteurs.

Ainsi, et pour la comparaison des deux vecteurs  $u$  et  $v$  de même dimension, on peut écrire :

- $u = v$  si  $\forall i \in I, u_i = v_i$
- $u \leq v$  si  $\forall i \in I, u_i \leq v_i$
- $u < v$  si  $u \leq v$  et  $u \neq v$

Dans des cas exceptionnels, ces relations ne sont pas suffisantes. Par exemple, la comparaison des deux vecteurs (1, 3) et (2, 1) ne peut pas être résolue à l'aide de ces relations. Il est essentiel donc d'employer d'autres relations de classification plus fiables.

Pour cette fin, plusieurs relations, appelées relations d'ordre ou de dominance ont été présentées [172] : la *dominance* et la *cône-dominance* [173], la dominance au sens de *Pareto* ou de *Geoffrion* [174], ...etc.

Ainsi, et dans la plupart des travaux d'optimisation, la notion de dominance au sens de Pareto est la plus employée. Lors de la comparaison des deux vecteurs décisions  $u$  et  $v$ , cette notion consiste aux relations suivantes :

- $u < v$  ( $u$  domine  $v$ ) si  $\forall i \in I, u_i < v_i$
- $u \preceq v$  ( $u$  domine faiblement  $v$ ) si  $\forall i \in I, u_i \leq v_i$

- $u \sim v$  ( $u$  est équivalent à  $v$ ) si  $u \nprec v$  &  $v \nprec u$

Pour les ensembles de vecteurs, on dit qu'un sous-ensemble  $P'$  contenu dans l'ensemble  $P$  est non dominé, s'il est composé de vecteurs qui ne sont dominés par aucun vecteur de  $P$ . Cet ensemble est dit Pareto optimal.

D'après cette notion, on constate qu'un problème d'optimisation à critère multiple possède tout un ensemble de solutions non dominées au sens de Pareto dit Pareto optimale. Par analogie aux problèmes mono-objectifs, les notions d'optimum local et global peuvent être introduites [172] :

- Un vecteur de décision est dit *Pareto globalement optimal*, s'il n'existe aucun vecteur de l'espace faisable ne le domine.
- Un vecteur de décision  $x$  est dit *Pareto localement optimal*, s'il n'existe aucun vecteur dans sa localité qui le domine.

#### IV.3.3 Surface des compromis ou front de Pareto

L'optimalité des solutions d'un problème multi-objectif par rapport aux critères d'optimisation considérés est relative car ces critères sont, souvent, contradictoires. Par conséquent, la solution qui minimise un critère peut maximiser l'autre. Pour cela, on cherche toujours les meilleurs compromis entre les différents critères.

Cet ensemble de solutions, appelé aussi front de Pareto ou surface de compromis, est l'ensemble des solutions non dominées du problème. Il est aussi appelé ensemble des solutions efficaces.

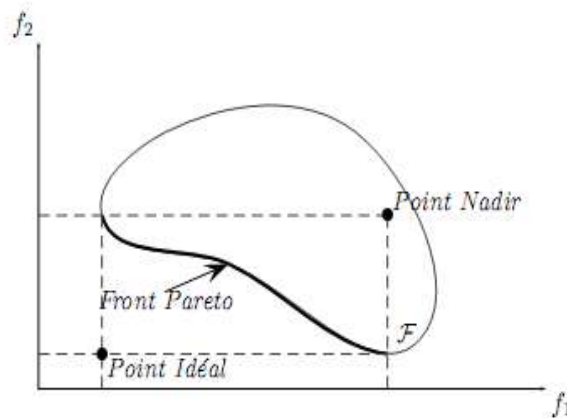


Figure IV.3 : Front de Pareto [172]

Dans l'exemple de deux critères présenté dans la figure IV.3 le point idéal  $z^*$  est le vecteur décision dont chaque composante est la solution optimale du problème de minimisation de l'un des critères considérés. Généralement, ce vecteur ne correspond pas à une solution faisable mais

il est parfois utile en tant qu'une référence, par exemple, lors de la normalisation des valeurs des objectifs.

Au contraire du point idéal qui représente les bornes inférieures de chaque critère, le point de Nadir  $z^{nad}$  correspond à leurs bornes supérieures sur le front de Pareto. Ce vecteur est bien plus difficile de trouver que le vecteur idéal. Il peut être un compromis possible, suivant la nature du problème (notamment, la convexité du domaine de recherche).

Pour la normalisation de chaque critère d'optimisation, les vecteurs idéals et de Nadir sont en particulier utilisés de la manière suivante [175] :

$$f_m^{norm} = \frac{f_m - z_m^*}{z_m^{nad} - z_m^*} \quad (IV.1)$$

#### IV.3.4 Résolution d'un problème d'optimisation multi-objectif

D'après la définition d'un problème d'optimisation multi-objectif, le décideur doit tenir en compte que la solution recherchée n'est qu'une solution préférée. Il doit tout simplement choisir une des solutions Pareto optimales obtenues selon ses préférences. En effet, il cherche à trouver la solution optimale satisfaisante à ses préférences.

Afin d'introduire ses préférences, le décideur doit, généralement, poursuivre un des deux différents comportements : le premier qui consiste à intervenir dès le début de la modélisation du problème, en exprimant les préférences afin de transformer le problème multi-objectif originale en un problème mono-objectif équivalent. La solution de ce nouveau problème n'est, alors, qu'un seul choix qui exprime nettement les préférences introduites. Dans ce cas, on risque de perdre toute signification au problème. Le deuxième comportement procède d'une manière inversée. Il consiste à déterminer l'ensemble entier des compromis possibles (surfaces des compromis). Par la suite, le décideur effectue son choix dans cet ensemble suivant leurs préférences.

Dans ce contexte, deux classes de méthodes de résolution ont été introduites : les méthodes agrégées (ou non Pareto) et les méthodes Pareto. La première classe de méthodes consiste à transformer un problème multi-objectif en un problème mono-objectif et d'utiliser les algorithmes d'optimisation classiques. La deuxième classe traite les objectifs du problème simultanément et au même niveau d'importance et utilise la notion de dominance au sens de Pareto pour la sélection des solutions optimales [176].

#### IV.4 Méthode d'optimisation par essaim de particules

L'algorithme à essaim de particules PSO s'inspire à l'origine du monde des animaux vivant en groupe. Il s'appuie notamment sur un modèle développé par Craig Reynolds à la fin

des années 1980, permettant de simuler le déplacement simultané des éléments d'un groupe d'oiseaux. Une autre source d'inspiration, basée sur le comportement socio-psychologique des troupes, est revendiquée par James Kennedy et Russel Eberhart. Ces derniers ont développé l'algorithme original de cette méthode en 1995.

Cette méthode d'optimisation stochastique se base sur la collaboration des individus entre eux au sein d'un essaim. Elle a d'ailleurs des similarités avec les algorithmes de colonies de fourmis, qui s'appuient eux aussi sur le concept d'auto-organisation. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents peut posséder une organisation globale complexe.

L'approche d'optimisation par essaim de particules repose sur un groupe initial d'individus, appelés particules, qui sont initialement positionnés de manière aléatoire (ou uniforme) dans l'espace de recherche en constituant une structure appelée essaim. Pendant la recherche, chaque particule représente une solution potentielle du problème considéré. Elle conserve en mémoire la meilleure solution qu'elle a rencontrée et peut également la communiquer avec les autres particules de son voisinage. A partir des meilleures solutions individuelles communiquées par les particules de l'essaim, une meilleure solution globale est sélectionnée. Cette solution est affichée comme étant un score global qui peut être considéré comme un guide (leader) pour toute l'essaim.

En combinant ces connaissances sur les optimums locaux et empiriques, l'ensemble des particules tend normalement à converger vers la solution optimale globale du problème en cours de résolution [156]. A partir de ces connaissances, l'essaim mène une recherche basée sur un déplacement collectif et synchrone de ses particules. Dans cette manœuvre, chaque particule suit une triple tendance [177].

- La tendance de poursuivre son chemin,
- La tendance de revenir à sa meilleure position,
- La tendance d'aller vers la meilleure position trouvée par l'essaim.

Ainsi, grâce à des règles de déplacement très simples (dans l'espace des solutions), les particules peuvent converger progressivement vers un minimum global. A la fin du processus de recherche, ce minimum global est déclaré solution optimale du problème d'optimisation considéré. Cette heuristique semble cependant mieux fonctionner pour des espaces en variables continues.

Au départ de l'algorithme chaque particule est donc positionnée (aléatoirement ou non) dans l'espace de recherche du problème. La vitesse de déplacement d'une particule est affectée à la fois par la position la plus optimiste lors de son mouvement (expérience individuelle) et la position de la particule la plus optimiste dans ses environs (expérience globale).

La recherche de la solution optimale dans la version standard du PSO [169] repose sur l'échange d'informations sociales de l'essaim. Chaque particule utilise, dans ses déplacements, deux informations essentielles [170] : la position du meilleur score global  $G_{best}$ , affichée par la meilleure particule de l'essaim, ainsi que la position du meilleur score personnel  $P_{best}$ , présenté par lui-même. Pour cette raison, chaque particule compare, après déplacement, la valeur atteinte dans la position actuelle avec son meilleur score  $P_{best}$ , si la valeur actuelle est inférieure (en cas de minimisation), la particule constate qu'elle a atteint un nouveau meilleur score personnel. Dans ce cas, il compare ce nouveau score au meilleur score global  $G_{best}$ , s'il est inférieur, il l'affiche comme nouveau meilleur score globale.

Les particules explorent l'espace des solutions potentielles, selon trois tendances : la tendance à suivre leur propre chemin, la tendance à avancer vers le leader de la particule, la solution ayant le score global le plus élevé et la tendance à revenir à son score individuel le plus élevé [169,170]. Sachant que le mécanisme du PSO repose sur la recherche itérative par essaim de particules, le déplacement du  $i^{th}$  particule est formulée par [170] :

$$v_i(t) = \omega(t)v_i(t-1) + c_1r_1(P_{best_i} - x_i(t-1)) + c_2r_2(leader_i - x_i(t-1)) \quad (IV.2)$$

Où  $\omega$  est l'inertie,  $c_1$  et  $c_2$  sont des coefficients constants fixés par l'utilisateur,  $r_1$  et  $r_2$  sont des nombres aléatoires dans la plage [0 1], tirés à chaque itération et  $P_{best_i}$  est la meilleure solution trouvée par la particule  $p_i$

Ensuite, la localisation de la particule est calculée par [170] :

$$x_i(t) = x_i(i-1) + v_i(t) \quad (IV.3)$$

Ces relations confirment la tendance des particules pour être influencées par le succès de n'importe quelle particule voisine même si cette particule n'est pas proche dans l'espace de recherche, mais elle est proche sur la base d'une topologie de voisinage qui définit la structure sociale de l'essaim [178]. La sélection d'un leader pour une particule  $p_i$  ( $leader_i$ ) dépend de la topologie de son voisinage.

#### a) Algorithme standard du PSO

L'application du PSO comprend les étapes suivantes :

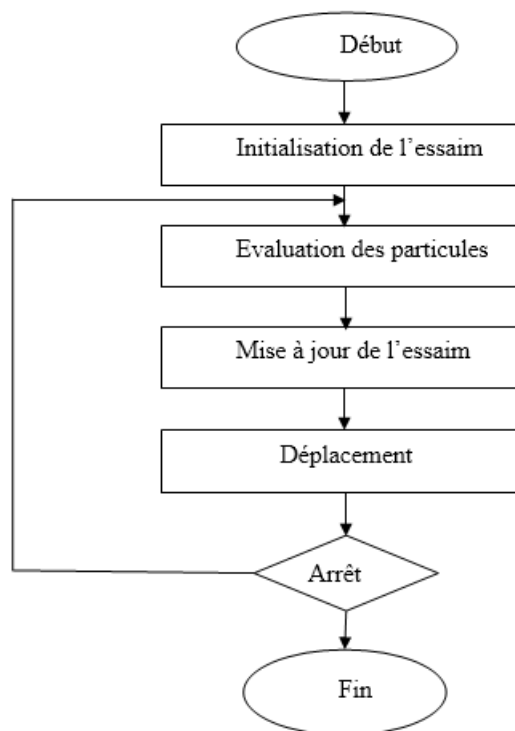
- Initialisation des particules de l'essaim dans l'hyperespace de recherche,
- Evaluation des particules de l'essaim,
- Mise à jour de l'essaim,
- Déplacement,
- Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, retour à l'étape 2.

La mise à jour d'une particule  $p_i$  de l'essaim se base sur l'actualisation de la position de son score personnel ( $p_{best_i}$ ) et de son leader ( $leader_i$ ). Pour ce but, elle compare l'évaluation de

sa position actuelle avec celle de son score personnel. Si la valeur actuelle est meilleure (c'est à dire, la particule a réalisé un nouveau score), alors ; la valeur de  $pbest_i$  sera égale à la valeur actuelle et sa position sera égale à la position actuelle. Ensuite, cette particule devra choisir un nouveau guide ( $leader_i$ ).

En PSO, la sélection d'un leader constitue un aspect très important. Le bon choix des leaders peut aider l'algorithme à éviter la convergence vers des optima locaux. Contrairement à  $Pbest$ , l'actualisation des *leaders* est liée à la structure de l'essaim car ces derniers sont, généralement, choisis à partir des autres particules de l'essaim.

Ainsi, l'algorithme du PSO peut être présenté par l'organigramme de la figure suivante (figure IV.4) :



**Figure IV.4 :** Algorithme du PSO [163]

En général le critère d'arrêt peut être un nombre fixe d'itérations ou encore fonction de la fonction-objectif ou lorsque les vitesses des particules tendent vers 0.

## **b) Paramètres du PSO**

Le processus de sélection des paramètres dans l'algorithme PSO est crucial et délicat. Il représente une étape essentielle qui a un impact significatif sur la robustesse et la capacité de convergence de l'algorithme vers les régions optimales de l'espace de recherche [157].

### 1) Coefficients de confiance

Les coefficients de confiance cognitif  $c_1$  et social  $c_2$ , également appelés constantes d'accélération, ont pour rôle de pondérer l'influence de la meilleure position individuelle et celle de son leader. En général, le choix de ces coefficients est empirique, et plusieurs méthodes ont été suggérées pour les déterminer. Une approche courante pour fixer ces coefficients est de les relier au facteur d'inertie  $W$ , généralement choisi autour de 0,72. Cette relation peut être exprimée par la formule suivante :

$$c_1 = c_2 = \frac{(w + 1)^2}{2} \quad (IV.4)$$

Parfois et pour avoir une convergence un peu plus lente, ils sont pris constants. Les analyses mathématiques menées par Van-Den-Bergh, F, dans le cadre de la recherche de conditions théoriques pouvant conclure sur la convergence de l'algorithme PSO, ont abouti à qui donne, en effet, une idée sur le choix de tels paramètres.

$$0 \leq c_1 + c_2 \leq 4$$

### 2) Coefficient de constriction

Les recherches pour améliorer l'algorithme PSO conduisent à introduire ce paramètre dont le but est d'éviter la divergence de l'algorithme. La convergence de l'algorithme PSO est toujours liée aux trois paramètres  $c_1$ ,  $c_2$  et  $w$ . En outre, la combinaison entre ces dernières variables peut donner un certain équilibre pour les phases d'intensification et de diversification de l'algorithme. Pour cela, un nouveau paramètre, dit coefficient de constriction, est mis en jeu afin de mieux garantir la convergence de l'algorithme. L'équation (IV. 6) est réécrite alors comme suit [157] :

$$v_{ij}(t+1) = \chi \left[ v_{ij}(t) + \phi_1 r_1 (pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)) \right] + \phi_2 r_2 \left[ gbest_j(t) - x_{ij}(t) \right] \quad (IV.6)$$

Avec :

$$\chi = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}}, \phi = (\phi_1 + \phi_2) > 4 \quad (IV.7)$$

Et, par analogie, nous pouvons déduire que :  $\chi = w$ ,  $c_1 = \chi \phi_1$  et  $c_2 = \chi \phi_2$

Cette méthode évite la convergence prématurée et mène à la bonne exploration des différentes régions de l'espace de recherche.

### 3) Facteur d'inertie

L'objectif de l'emploi d'un facteur d'inertie était de maintenir un contrôle précis sur la vitesse à chaque itération. Le choix astucieux de ce facteur contribue à une exploration efficace de l'espace de recherche. Par conséquent, ce facteur revêt une grande importance car il régule et prévient la concentration excessive ou la sous-exploration locale de l'algorithme.

En réalité, la valeur appropriée du facteur d'inertie permet de gérer l'amplitude de la vitesse d'une particule donnée. Lors du développement de l'algorithme PSO, la sélection de la valeur appropriée du facteur d'inertie s'est basée sur des études empiriques.

Le facteur d'inertie exerce une influence significative sur la découverte de nouvelles régions de l'espace de recherche, agissant comme une source d'amélioration supplémentaire. Il varie dans une plage de valeurs décroissantes au fil du temps, généralement dans l'intervalle [0.4, 0.9].

La technique la plus courante et simple consiste à appliquer une décroissance linéaire du facteur d'inertie au fil des itérations [178].

$$w_{t+1} = w_{\max} - \left( \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} \right) t \quad (IV.8)$$

Où  $t_{\max}$  représente le nombre maximum des itérations,  $w_{\min}$  et  $w_{\max}$  désignent, respectivement, les valeurs minimale et maximale du facteur d'inertie.

Une autre variante, dans laquelle le facteur d'inertie est choisi au hasard selon une distribution uniforme dans l'intervalle [0.5, 1], a été proposée. Le choix d'un tel intervalle a été inspiré de la version de l'algorithme PSO avec facteur de constriction.

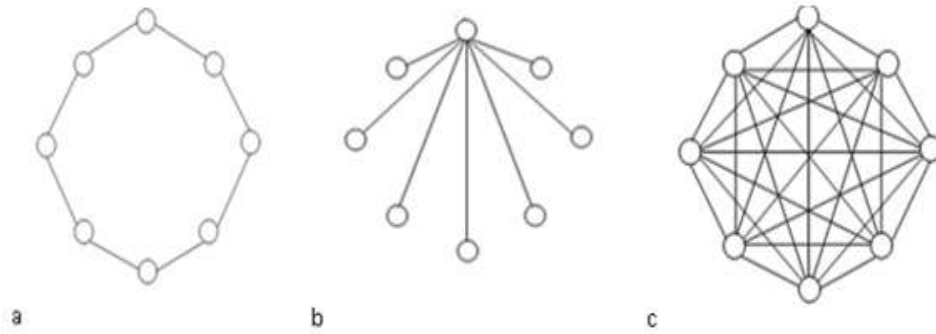
### 4) Topologie du voisinage

Le PSO, en tant que technique d'optimisation stochastique, s'inspire d'un comportement social, ce qui explique l'importance de la notion de voisinage. Dans la littérature sur le PSO, plusieurs topologies de voisinage ont été définies pour spécifier clairement les relations au sein de l'essaim.

Deux techniques de voisinage sont distinguées : le voisinage social et le voisinage géographique. Le voisinage social est le plus couramment utilisé en pratique en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de sa faible charge en termes de temps de calcul, et il tend à devenir un voisinage géographique lorsque l'algorithme PSO converge.

En revanche, le voisinage géographique, également appelé physique, repose sur le calcul de la distance euclidienne entre chaque particule pendant le processus de recherche à chaque itération.

Dans la littérature, on retrouve principalement trois topologies : en étoile, en anneau et en cercle, comme l'illustre la figure IV.5.



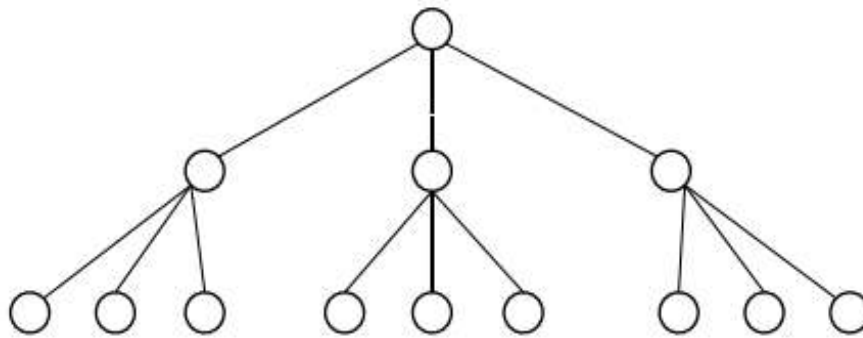
**Figure IV.5 :** Topologies des essaims : (a) en cercle, (b) en rayon, (c) en étoile [157]

La topologie en cercle, dite aussi en anneau, et dans laquelle chaque particule communique avec les deux voisins immédiates. On parle de la version locale de l'algorithme PSO (figure a). Dans la topologie en rayon, les particules ne communiquent qu'avec une seule particule dite centrale. Seule cette dernière se déplace vers la meilleure position. L'échange d'informations avec le voisinage n'aura lieu que si ce déplacement apporte une amélioration (figure b). Tandis que dans la topologie en étoile, chaque particule est reliée à toutes les autres particules de l'essaim qui y sont considérées comme informatrices (Figure c). Par ailleurs, il convient de noter que la topologie en étoile permet une convergence plus rapide de l'algorithme PSO que celle en anneau en plus d'une simplicité remarquable de mise en œuvre. Par contre, cette dernière est moins vulnérable aux optima locaux. Généralement, les performances de l'une ou de l'autre de ces topologies dépendent du problème d'optimisation traité.

En général, les différentes topologies statiques proposées dans la littérature de PSO ne résolvent pas le problème de la convergence prématurée de PSO, même si beaucoup d'entre elles améliorent ses performances. La recherche s'est donc poursuivie, visant toujours à élaborer une topologie robuste permettant d'améliorer les performances de l'algorithme. Les auteurs ont alors essayé de mettre en place des topologies dynamiques. Ils ont trouvé que ces topologies pouvaient avoir de meilleures performances que les topologies statiques, et ce, au moyen d'un changement de leurs structures, d'une itération à l'autre.

Cette structuration permet aux particules de changer leurs trajectoires de déplacement, afin de pouvoir s'échapper des optima locaux. Parmi ces topologies, on trouve la structure en arbre régulier (figure IV 6). Dans cette topologie, les particules sont structurées sous forme

régulière d'un arbre et chaque nœud de cette structure contient exactement une particule. En effet, chaque particule est influencée par son record personnel (*pbest*) et par la meilleure position de la particule qui est directement au-dessus dans l'arbre. La particule au niveau du nœud échange son nouveau record personnel uniquement avec la particule au niveau plus haut. De cette façon, cette topologie offre aux particules un voisinage dynamique.



**Figure IV.6 :** Arbre régulier [158]

#### IV.4.1 Extension du PSO pour les problèmes multi-objectifs

La solution d'un problème d'optimisation multi-objectif ne consiste pas en une solution unique, comme pour le cas des problèmes à critère simple, mais plutôt en un ensemble des solutions non dominées ou encore dites solutions Pareto optimales. En effet, l'optimisation multi-objectif mène à l'obtention de l'ensemble des compromis possibles appelé front de Pareto ou surfaces de compromis.

En général, lors de la résolution d'un problème d'optimisation multi-objectifs, les principaux objectifs à atteindre sont [160] :

- Maximiser le nombre d'éléments de l'ensemble des solutions Pareto optimales trouvé,
- Minimiser la distance entre ces différents éléments,
- Maximiser la distribution des solutions trouvées.

Compte tenu que l'algorithme PSO est basé sur le concept de recherche par groupe, il est souhaitable de produire plusieurs solutions non dominées à chaque itération. Donc, comme avec tout autre algorithme évolutionnaire, les deux questions, à prendre en considération lors de l'extension de l'algorithme PSO à l'optimisation multi-objectif, sont :

- Comment conserver les solutions non dominées, trouvées au cours du processus de recherche, en tenant compte de toutes les solutions non dominées par rapport à toutes les

solutions à l'itération précédente ? En outre, il est souhaitable que ces solutions soient bien réparties le long du front Pareto.

- Comment maintenir la diversité dans l'essaim afin d'éviter la convergence vers une solution unique ? En problèmes d'optimisation mono-objectifs, toutes les particules utilisent pour mettre à jour ses positions le meilleur score de l'essaim comme leader. Cependant, dans le cas des problèmes d'optimisation multi-objectifs, chaque particule peut avoir leader différent. Cela peut, efficacement, garantir un niveau élevé de diversité dans le front de Pareto obtenu. Ces leaders sont, généralement, sélectionnés à partir de l'ensemble solutions non dominées trouvées et stockées dans un endroit différent de l'essaim, que nous appellerons archive externe. En outre, le contenu de cette archive sera la sortie finale de l'algorithme MOPSO. Il est déclaré comme solution optimale du problème considéré.

#### IV.4.2 Algorithme multi-objectif DNPSO-LNL

Le DNPSO-LNL (Dynamic Neighborhood Particles Swarm Optimization with Local Non dominated Leaders) est un algorithme d'optimisation multi-objectif à essaim de particules développée par [166, 167]. Cette méthode est basé sur l'aspect de voisinage dynamique inspiré de l'algorithme DNPSO (Dynamic Neighborhood Particles Swarm Optimization) [164,165]. Cette version transforme l'algorithme original non agrégé et non Pareto en algorithme de type Pareto en modifiant la technique de classification des objectifs afin de les traiter au même niveau d'importance [167].

Dans cette extension du PSO pour les problème multi-objectifs [167], la relation de dominance de Pareto est utilisée pour choisir les solutions non dominées, qui sont ensuite conservées séparément dans une archive illimité externe. À la fin du processus d'optimisation, l'ensemble des solutions enregistrées dans cette archive est présenté comme front de Pareto ou surface de compromis. En effet, et en une seule exécution, l'algorithme peut fournir comme résultat l'ensemble de tous les compromis possibles. Aussi, il peut déterminer à partir de cet ensemble le meilleur compromis. Pour cela, une fonction d'utilité est introduite afin d'évaluer, en termes de qualité, les solutions non dominées obtenues. Une telle fonction est souvent utilisée pour la classification des solutions non dominées [168]. Cette fonction exprime l'évaluation élémentaire pour présenter la valeur de satisfaction de chaque critère d'optimisation. En effet, et pour chaque fonction-objectif, la valeur de satisfaction élémentaire est présentée par :

$$u_i = \frac{F_i^{\max} - F_i}{F_i^{\max} - F_i^{\min}} \quad (\text{IV.9})$$

Où  $F^{min}$  est la valeur de la fonction-objectif entièrement satisfaisante, et  $F^{max}$  est la valeur de la fonction-objectif complètement inacceptable. Par conséquent, l'évaluation du  $i^{ième}$  critère d'optimisation,  $u_i$  représente le degré de satisfaction de la fonction-objectif correspondante à ce critère comme une valeur entre 0 et 1. La valeur 1 représente le degré d'un critère complètement satisfait et 0 un critère complètement insatisfait.

Pour la  $k^{th}$  solution non dominée, la valeur d'évaluation normalisée est calculée par :

$$u^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} u_i^k}{\sum_{k=1}^{N_{sol}} \sum_{i=1}^{N_{obj}} u_i^k} \quad (IV.10)$$

Où  $N_{obj}$  est le nombre de objectifs considérés et  $N_{sol}$  reflète le nombre de solutions non dominées. La solution non dominée qui atteint la plus forte valeur (valeur maximale) d'évaluation représente le meilleur compromis.

Dans cette version, la notion de voisinage dynamique est conservée, ainsi, une nouvelle méthode de classification des objectifs basée sur la hiérarchie lexicographique différentielle est introduite. L'essaim est divisé en sous-essaims, chacun utilisant un ordre d'objectifs différent. Le nombre des sous-essaims est égal au nombre d'ordres possibles des objectifs. De cette manière, les objectifs sont traités au même niveau d'importance. Par exemple dans le cas de deux objectifs, l'essaim est divisé en deux sous-essaims. Le premier utilise l'ordre 1-2 et le second utilise l'ordre 2-1.

La hiérarchie différentielle des objectifs est introduite par un indice dit de classification lié à chaque particule de l'essaim. Il détermine, pour un problème de  $N_{obj}$  objectifs, une séquence  $F_i$  de fonction-objectifs ; du  $F_1$  à  $F_{obj}$ . Cependant, la particule détermine son leader de manière itérative en déterminant son voisinage dans les solutions non dominées à l'aide de la distance calculée en utilisant l'une des fonction-objectif selon séquence associée de la particule en question.

A chaque itération  $k$  (de 1 à  $N_{obj}$ ), le processus de sélection des leaders s'articule sur les étapes suivantes :

- Calculer les distances de la particule aux particules de son voisinage actuel dans l'ensembles des solutions non dominées en utilisant la valeur de la fonction-objectif  $F_k$ ,
- Déterminer les particules ( $N_{obj} - (k - 1)$ ) les plus proches comme voisinage de la particule actuelle en fonction des distances calculées. Ceci constitue le nouveau voisinage de la particule.

Le voisinage initial ( $k = 1$ ) est formé de toutes les solutions non dominées enregistrées dans l'archive externe. Dans la dernière itération ( $k = N_{obj}$ ), le voisinage sera constitué d'une seule solution qui sera prise comme un leader.

L'archive externe des solutions non dominées est alimentée par les meilleurs scores personnels ( $Pbest_i$ ). Lorsqu'une particule atteint un nouveau record personnel, elle le compare à toutes les solutions enregistrées. Si cette solution n'est dominée par aucune, elle est considérée comme solution non dominée et ajoutée au contenu de l'archive externe.

Pour cette raison, une archive temporaire est utilisée. En début d'itération, le contenu de l'archive externe est déversé dans cet archive intermédiaire et chaque fois qu'une particule atteint un nouveau score personnel, celui-ci s'ajoute au contenu de cette archive. A la fin de l'itération, les solutions de l'archive temporaire sont comparées l'une à l'autre afin de sélectionner les solutions non dominées. Celles-ci sont à nouveau enregistrées dans les archives externes.

Ainsi, les étapes suivantes peuvent être utilisées pour illustrer l'algorithme DNPSO-LNL utilisé [167] :

**Étape 1.** Initialisation de l'essaim par un groupe de  $m$  particules avec des positions et des vitesses aléatoires. Attribution d'un indice d'ordre d'objectifs pour chacune des particules de l'essaim.

**Étape 2.** Initialisation de l'archives de solutions non dominées par un ensemble vide.

**Étape 3.** Evaluation de la position actuelle de chaque particule de l'essaim en calculant les valeurs des fonction-objectives et des contraintes.

**Étape 4.** Mise à jour du score personnel des particules de l'essaim et de l'ensemble de solutions non dominées. Si l'évaluation actuelle de la  $i^{ième}$  particule domine son meilleur score  $Pbest_i$ , La position du  $Pbest_i$  sera égale à la position actuelle et son évaluation sera égale à l'évaluation actuelle. Dans ce cas, le contenu de l'archive temporaire des solutions non dominées doit être mis à jour. Si cette nouvelle solution n'est dominée par aucune, elle rejoint l'archive.

**Étape 5.** Filtration de l'archives de solutions non dominées en éliminant les solutions dominées.

**Étape 6.** Sélection d'un leader pour chaque particule de l'essaim en se basant le processus présenté au-dessus.

**Étape 7.** Effectuation du déplacement collectif des particules en déterminant, pour chacune, de nouveaux position à l'aide des équations

**Étape 8.** Revenir à l'étape 3 si le nombre d'itérations n'arrive au nombre d'itérations maximal.

### IV.5 Application

Le problème d'optimisation maximisant le MMR (minimisant -MMR) et minimisant le TWR peut être présent par le modèle mathématique suivant :

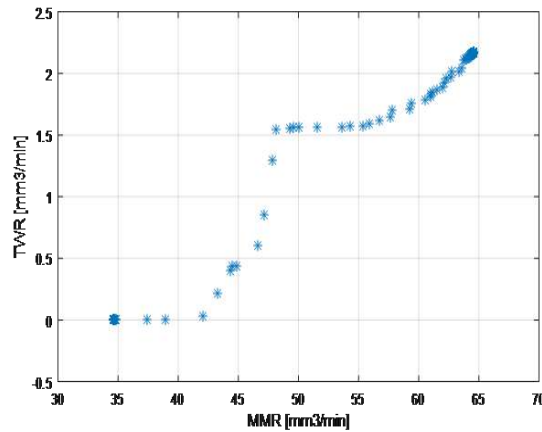
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } (-MRR) \text{ et } TWR \\ 12 \leq I \leq 16 \\ \text{Tel que } 120 \leq V \leq 200 \\ 100 \leq T_{on} \leq 400 \\ \text{Et sous } R_a \leq 0.6 \end{array} \right.$$

Pour la résolution du problème, nous avons utilisé une implantation de l'algorithme DNPSO-LNL sur Matlab. Ce programme utilise un essaim de 100 particules,  $r_1$  et  $r_2$  sont considérés égaux de valeur 1 et  $c_1$  et  $c_2$  sont, respectivement, égal à 0.9 et 0.45. Ainsi, il utilise un facteur d'inertie dynamique où  $\omega_{\max}$  et  $\omega_{\min}$  sont, respectivement égale à 0.9 et 0.45. Le nombre maximale d'itération est fixé à 300 itérations (Table IV. 1).

**Tableau IV. 1** MOPSO parameters

| <b>t<sub>max</sub></b> | <b>m</b> | <b>(<math>\omega_{\max}</math>, <math>\omega_{\min}</math>)</b> | <b>(<math>c_1</math>, <math>c_2</math>)</b> | <b>(<math>r_1</math>, <math>r_2</math>)</b> |
|------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 300                    | 100      | (0.9, 0.45)                                                     | (0.9, 0.45)                                 | (1, 1)                                      |

La recherche a abouti à 185 solutions non dominées. Par rapport à la non linéarité du problème et la complexité de l'espace de recherche, ce nombre est considéré très important. Il présente la richesse, en solutions optimales, assurée par la méthode utilisée et par conséquence, la robustesse de l'algorithme d'optimisation. Ces solutions Pareto optimales sont illustrées dans la Figure IV.7. Elles représentent une courbe typique du front de Pareto. En examinant cette courbe, on voit que l'approximation obtenue à une forme concave. Ainsi, on voit bien que les solutions sont réparties de manière excellente sur ce front. Sachant que l'approximation d'un front de Pareto de forme concave est une tâche, généralement, difficile, le résultat obtenu démontre, sans aucun doute, les capacités importantes de l'algorithme utilisé car il a pu, efficacement riveter la convergence vers les optima locaux.



**Figure IV.7 :** Résultats obtenus MRR-TWR

Par ailleurs, on trouve que l'ensemble des solutions obtenues offre une chance particulière aux décideurs d'avoir la solution adéquate à leurs préférences. Cela veut dire que le concepteur peut facilement sélectionner une solution en fonction de ses préférences. Elles lui permettent, aussi, de comprendre l'évolution des paramètres technoéconomiques considérés en fonction des conditions d'usinage. De plus, il peut avoir une idée approfondie sur l'interaction entre ces paramètres.

Le tableau VI. 2 illustre les solutions limites ; celle qui maximise le MRR, celle qui minimise le TWR et celle qui représente le meilleur compromis entre eux. A partir de ce tableau, un utilisateur peut directement adopter une solution. S'il souhaite par exemple conserver son outil, il doit adopter la solution minimisant le TWR. Dans le cas contraire et s'il veut gagner du temps, il doit sélectionner la solution maximisant le MMR. Même si cet utilisateur n'a pas une connaissance approfondie du problème, il peut directement adopter le meilleur compromis et qui améliore simultanément les deux critères considérés.

**Tableau IV. 2** Solutions limites

| Solution            | I (A) | V (V)  | T (μs) | MRR (mm <sup>3</sup> /min) | TWR (mm <sup>3</sup> /min) | Ra (μm) |
|---------------------|-------|--------|--------|----------------------------|----------------------------|---------|
| maximiser MMR       | 12    | 120    | 139.45 | 64.54                      | 2.16                       | 0.0037  |
| minimiser TWR       | 14.64 | 177.05 | 228.87 | 34.62                      | 0.0011                     | 0.1658  |
| compromise solution | 15.37 | 184.31 | 219.62 | 42.06                      | 0.0327                     | 0.2224  |

#### IV.6 Conclusion

L'application présentée dans ce chapitre présente une tentative d'établissement d'une méthodologie générale de planification des opérations d'usinage par décharge électrique basée sur la combinaison de la méthode d'optimisation par essaim de particules étendue aux problèmes multi-objectifs (DNPSO-LNL) et la régression linéaire multiple. Cette méthodologie consiste, en premier lieu, à la prédiction des paramètres technoéconomiques de ce processus tels que le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'outil (TWR) et la rugosité des surfaces usinées (Ra) lors de l'EDM de l'acier AISI 1095 en utilisant des électrodes en cuivre-tungstène. Pour ce but, un total de vingt-sept expériences ont été menées avec succès en manipulant les trois paramètres d'entrée, ainsi, des modèles mathématiques pour le MRR, le TWR et le Ra ont été élaborés. L'utilisation de ces modèles de prédiction dans l'optimisation ont permettent l'obtention d'un ensemble très riche des solutions Pareto optimales (185 solutions).

Cette étude met en évidence que la combinaison de l'optimisation par essaim de particules (PSO) et de la régression linéaire multiple constitue une méthode efficace pour l'optimisation des paramètres d'usinage de l'EDM.

## ***Conclusion générale***

## Conclusion Générale

Les recherches réalisées dans le cadre de cette thèse ont contribué à une compréhension approfondie de l'impact de divers paramètres d'entrée dans le processus d'usinage par électroérosion de l'acier AISI 1095. Les paramètres d'entrée essentielles (courant de décharge  $I$ , tension  $V$  et durée d'impulsion  $T$ ) ont été considérés comme des variables dans le problème de modélisation et d'optimisation des performances du procédé d'usinage. Ces recherches sont répartie en deux parties chacune comporte une approche distincte, à savoir une approche expérimentale, reliée à la technique de régression linéaire multiple, a été utilisée pour évaluer l'influence de ces paramètres sur les performances d'usinage et une approche d'optimisation multi-objectif basée sur l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) permettant l'approximation de l'ensemble des solutions compromis du problème d'optimisation formé à l'aide des modèles mathématiques obtenus dans la première partie.

En résumé, cette étude a réussi la mise en application d'un algorithme d'optimisation multi-objectif à essaim de particules (MO-PSO), basé sur la notion de dominance de Pareto, pour la recherche des solutions Pareto optimales minimisant le taux d'usure de l'outil (TWR) et maximisant le taux d'enlèvement de matière (MRR) tout en tenant compte de la limite exigée sur la rugosité de surface (Ra).

A partir des données expérimentales collectées des essais sur l'usinage par électroérosion des pièces en acier AISI 1095, des modèles mathématiques précis ont été élaborés pour la prédiction des performances du processus (MRR, TWR, Ra) en fonction des paramètres d'usinage ( $I$ ,  $V$ ,  $T$ ) à l'aide de la technique de régression linéaire multiple. Ces modèles fournissent une méthode efficace pour la compréhension des effets des conditions d'usinage sur les paramètres technologiques de performance en EDM. Ainsi, ils ont permis de présenter les différentes interactions entre ces performances.

D'une manière générale, cette procédure d'investigation expérimentale a permis la représentation des performances technologiques de coupe par électroérosion de l'acier AISI 1095. Cependant, la procédure expérimentale suivie, dans cette partie de l'étude, constitue une méthodologie générale pour la modélisation des paramètres d'usinage par électroérosion des aciers durs.

En second temps, les modèles mathématiques issus de la partie d'étude expérimentale sont utilisés dans la construction du problème de sélection des paramètres d'usinage par électroérosion. Ce problème a été présenté sous forme d'un problème d'optimisation multi-objectif avec contraintes. Il s'agit d'un problème améliorant l'efficacité d'usinage par la

maximisation du taux d'enlèvement de matière tout en préservant l'outil électrode par la minimisation de perte en matière de cet outil et en respectant les limites géométries imposées sur la pièce présentée par le seuil de rugosité de surface. En effet, il tient en compte les trois éléments essentiels du système d'usinage par électroérosion ; la machine, l'outil et la pièce. Par conséquent, le problème d'optimisation traité dans cette étude consiste à la recherche des valeurs des conditions d'usinage (I, V et T) permettant, de manière simultanée, la maximisation du taux d'enlèvement de matière (MMR) et la minimisation du taux d'usure de l'électrode (TWR) sous la contrainte de la rugosité de surface (Ra).

La nature multi-objectif du problème nous a conduit à l'utilisation d'une méthode de type Pareto qui permet la collection de toutes les solutions compromis possibles. Ce choix a donné l'opportunité d'introduction à postériori des préférences du décideur lors de la sélection d'une solution optimale car l'ensemble diversifié des solutions Pareto optimales obtenus à l'aide d'un algorithme à essaim de particules (MOPSO) comporte toutes les compromis possibles entre les deux critères d'optimisation considérés. Ainsi, il fournit directement un meilleur compromis qui assure la satisfaction des critères d'optimisation au même niveau d'importance. Par ailleurs, le choix d'une méthode d'optimisation stochastique (PSO) a été basé sur la propriété quasi-linéaire du modèle d'optimisation en plus à la simplicité particulière de sa mise en application et son extension pour les problèmes d'optimisation multi-objectif.

L'ensemble des solutions optimales obtenu à l'aide cet algorithme a constitué une très bonne approximation du front de Pareto. De plus, ces résultats ont souligné que l'optimisation multi-objectif à essaim de particules (MOPSO) peut s'avérer une approche bénéfique pour l'optimisation des paramètres d'entrée du processus EDM de l'acier AISI 1095. Cette approche d'optimisation a permis d'identifier, d'une manière directe et rapide, une solution compromis qui peut être adoptée par l'opérateur sans qu'il cherche à comprendre le problème ou à pratiquer le choix suivant les préférences et de fournir l'ensembles des solutions Pareto-optimales qui constitue la base riche pour le choix d'une solution qui améliore les critère d'optimisation chacun suivant le taux d'importance fixé par le décideur.

Les résultats obtenus dans cette étude ont démontré, d'un côté, l'efficacité et la précision de la procédure expérimentale suivie pour la modélisation des paramètres d'usinage par électroérosion et d'autre coté la robustesse de l'algorithme multi-objectif utilisé pour le traitement du problème d'optimisation constitué. Ils ont justifié, de manière rationnelle, les choix et les directives mathématiques suivis pour la confusion des outils de modélisation basés sur l'analyse régressif et des méthodes d'optimisation stochastiques étendues pour les problèmes à critère d'optimisation multiple. Cette combinaison a fourni un outil mathématique d'aide à la

décision très fiable basé uniquement sur l'approximation. Cependant, l'approche développée dans cette étude constitue une méthode de traitement à posteriori des problèmes d'optimisation multi-objectifs basée sur la notion d'ordre et de dominance de Pareto. Il est très clair que cette approche peut être utilisée, avec succès, pour la majorité des problèmes d'optimisation issus du domaine de fabrication mécanique.

En fin de compte, cette étude apporte une contribution significative à la compréhension et à l'optimisation du processus d'usinage EDM de l'acier AISI 1095 en utilisant des électrodes en cuivre-tungstène. Les conclusions de cette recherche sont susceptibles d'être précieuses pour l'industrie manufacturière et la fabrication de composants en acier de haute qualité. Elle peut constituer une base de départ solide pour la modélisation et l'optimisation d'autres procédés évolués de fabrication car l'application de méthodologie développée dans cette étude pour des problèmes similaires semble très simple.

## **Perspectives**

On propose dans des futurs travaux :

- ✓ Choisir d'autres types de matériaux durs
- ✓ Etudier d'autres paramètres dépendants et indépendants
- ✓ Etudier l'effet des diélectriques utilisés et leur influence sur les performances d'usinage.
- ✓ Utiliser d'autres méthodes d'optimisation

***Références***  
***Bibliographiques***

## Références Bibliographiques

- [1]. B. R. Lazarenko, «About the Inversion of Metal Erosion and Methods, » Moscow/CCCP, Russian: WEI-Institut, 1943.
- [2]. G. Girardin, «Development d'un procédé d'usinage par micro-électroérosion,» Lyon-France: L'université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [3]. B. Lauwers, J. P. Kruth, W. Liu, and al, «Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, p. 347–352, 2004.
- [4]. M. k. P. Sanjay Kumar Majhi, «Hargovind Soni. Application of integrated RSM GREY-entropy analysis for optimization of edm parameters, » *International Conference on Advanced Research in Mechanical Engineering*, 2013.
- [5]. P.Mukhopadhyay, B. R.Sarkar, «Advancement in ultrasonic vibration and magnetic field assisted microedm process: an overview,» *international Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, vol. 10, pp. 362-373, 2019.
- [6]. Heinz K, Kapoor S G,Devor R E,Surla V, «An investigation of magnetic-field assisted material removal in micro-EDM for nonmagnetic materials,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 133, p. (9) pages), 2011.
- [7]. Guo Y , Ling Z, «Amagnetic suspension spindle system for micro-EDM,» *CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII)*, vol. 42, pp. 543-546, 2016.
- [8]. Yeo S H, Murali M,Cheah H T, «Magnetic field assisted micro electro-discharge machining,» *Journal of Micromechanics and Micro engineering*, vol. 14, pp. 1526-1529, 2004.
- [9]. Hao T, Yong Li, Long Z,Baoquan Li, «Mechanism design and process control of micro EDM for drilling spray holes of diesel injector nozzles,» *Journal of Precision Engineering*, vol. 37, pp. 213-221, 2013.
- [10]. Yi S M, Park M S, Lee Y S, Chu C N, «Fabrication of a stainless-steel shadow mask using batch mode micro-EDM,» *Journal of Microsystem Technology*, vol. 14, pp. 411-417, 2008.
- [11]. Xu J, Guo B, Shan D, Wang Z, Li M, Fei X, «Micro-punching process of stainlesssteel foil with micro-die fabricated by micro-EDM,» *Journal of Microsystem Technology*, vol. 20, pp. 83-89, 2013.
- [12]. Sheu D Y, Cheng C C, «Assembling ball-ended styli for CMM's tactile probing heads on micro EDM,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 485-492., 2012.
- [13]. Chen, Shun-Tong, «Fabrication of high-density micro holes by upward batch micro EDM,» *Journal of Micromechanics and Micro engineering*, vol. 18, p. (9), 2008.

- [14]. Shafiq M, Abdalla H S, Fransson P, «Mechanism design and process control of discharge machining system industrial applications using linear ultrasonic motor,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 135(2), p. (12 pages), 2013.
- [15]. K. Palanikumar, J. Paulo Davim, «Electrical discharge machining: study on machining characteristics of WC/Co composites,» *Machining and machine-tools*, pp. 135-168, 2013.
- [16]. Kulkarni, Pallavi. S. Karande.Prof. V. V. Potdar.Swapnil S, «Controlling The Tool Wear For EDM While Offering Statistical Treatment And Optimization Techniques For Problem Solving – Experimentation,» *International Journal of Informative & Futuristic Research*, vol. 3, pp. 2075-2087, 2016.
- [17]. [https://www.edm.kd-solution.com/en\\_edm04.html](https://www.edm.kd-solution.com/en_edm04.html), «EDM Tips How - to use electrical discharge machining,» *Reserved by KD Solution.Co, Ltd.*
- [18]. C. Joseph, «Contribution à l'accroissement des performances du processus de  $\mu$ EDM par l'utilisation d'un robot à dynamique élevée et de haute précision,» Swiss: l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [19]. A. Descoeudres, «Characterization of electrical discharge machining plasmas,» Swiss: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- [20]. Descoeudres, A., and al, «Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma,» *journal of Physics D-Applied Physics*, vol. 38, p. 4066–4073, 2005.
- [21]. A. Descoeudres, C. Hollenstein, R. Demellayer, and G. Wälder, «Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma,» *J. Mater. Process Technol*, vol. 149, p. 184–190, 2004.
- [22]. W. Natsu, S. Ojima, T. Kobayashi, and M. Kunieda, «Temperature Distribution Measurement in EDM Arc Plasma Using Spectroscopy,» *JSME Int. J. Ser. C Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf*, vol. 47, p. 384–390, 2004.
- [23]. K. Albinski, K. Musiol, A. Miernikiewicz, S. Labuz, and M. Malota, «The temperature of a plasma used in electrical discharge machining,» *Plasma Sources Sci. Technol*, vol. 5, p. 736–742, 1996.
- [24]. B. M. Schumacher, «After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed,» *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, p. 376–381, 2004.
- [25]. L. Bianchi. and. E. Regal, «Usinage par électroérosion,» *Tech. L'ingénieur*, p. 2–24, 1987.
- [26]. A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, A. J. Schwabe, and H. Yamashita, «Propagation and Structure of Streamers in liquid Diele,» *International Study Group, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society*, vol. vol. 14, p. 6–17, 1998.
- [27]. J. Qian, R. P. Joshi, E. Schamiloglu, J. Gaudet, J. R. Woodworth, and J. Lehr, «Analysis of polarity effects in the electrical breakdown of liquids,» *J. Phys. D. Appl Phys*, vol. 39, p. 359–369, 2006.

- [28]. T.Aka, Ngnui and A. Beroual, «Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field,» *J. Phys. D. Appl. Phys*, vol. 34, p. 1408–1412, 2001.
- [29]. J. Qian, R. P. Joshi, J. Kolb, K. H. Schoenbach, J. Dickens, A. Neuber, M. Butcher, M. Cevallos, H. Krompholz, E. Schamiloglu, and J. Gaudet, «Microbubble based model analysis of liquid breakdown initiation by a sub microsecond pulse,» *J. Appl. Phys*, vol. 97, 2005.
- [30]. Y. S. Wong, L. C. Lim, I. Rahuman, and W. M. Tee, «Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric,» *J. Mater. Process. Technol*, vol. 79, p. 30–40, 1998.
- [31]. W. Natsu, M. Shimoyamada, and M. Kunieda, «Study on Expansion Process of EDM Arc Plasma,» *JSME Int. J. Ser. C*, vol. 49, p. 600–605, 2006.
- [32]. Knight, G. Vasudevamurthy and T. W., «Effect of system parameters on size distribution of 304 stainless steel particles produced by electrical discharge mechanism,» *Mater. Lett*, vol. 61, p. pp. 4872–4874, 2007.
- [33]. J. C. Diot, W. Zaugg, G. Naville, and J. P. Briffod, «Rotative tool-electrodes of simple shapes for 3D electroerosive machining,» *U.S. Patent 61844862001*, 2001.
- [34]. M. r. Dahmani, «Optimisation d'un procédé d'usinage par micro électroérosion,» Lyon: Délivrée par L'université Claude Bernard Lyon1, 2015.
- [35]. Hoang, K. T. and Yang, S. H., «A study on the effect of different vibration assisted methods in micro-WEDM,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1616-1622, 2013.
- [36]. Ali, M. Y, Karim, A. N. M, Adesta, E. Y. T, Ismail, A. F, Abdullah, A. A, et Idris, M. N, «Comparative study of conventional and micro WEDM based on machining of meso/micro sized spur gear,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 11 (5), pp. 779-784, 2010.
- [37]. Hoang, K. T. and Yang, S. H., «A new approach for micro-WEDM control based on real time estimation of material removal rate.,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 6 (2), p. 246, 2015.
- [38]. Chen, Z., Huang, Y., Huang, H., Zhang, Z., and Zhang, G, «Three dimensional characteristics analysis of the wire-tool vibration considering spatial temperature field and electromagnetic field in WEDM,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 92, pp. 85-96, 2015.
- [39]. Patil, P. A. and Waghmare, C. A, «A review on advances in wire electrical discharge machining,» *In Proceedings of the International Conference on Research and Innovation in Mechanical Engineering*, pp. 179-189, 2014.
- [40]. Debroy, A. and Chakraborty, S, «Non-conventional optimization techniques in optimizing non-traditional machining processes:a review,» *Management Science Letters*, vol. 3(1), pp. 23-38, 2013.

- [41]. Azhiri, R. B., Teimouri, R., Baboly, M. G., and Laseman, Z, «Application of Taguchi,ANFIS and grey relational analysis for studying, modelling and optimization of wire EDM process while using gaseous media,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71 (1), pp. 279-295, 2014.
- [42]. Schubert, A., Ziedler, H., Wolf, N., and Hackert, M, «Micro electro discharge machining of electrically nonconductive ceramics,» *AIP Conference Proceedings*, Vols. %1 sur %21353, (1) , pp. 1303-1308, 2011.
- [43]. Pecas, P. and Henriques, E, «Electrical discharge machining using simple and powder mixed dielectric: the effect of the electrode area in the surface roughness and topography,» *Journal of Materials Processing Technology.*, vol. 200, pp. 250-258, 2008.
- [44]. Asfana, A., Ali, M. Y., Mohamed, A. R., and Hung, W. N. P, «Material removal rate of zirconia in electro discharge micromachining,» *Advanced Materials Research.*, pp. 1115,20-23, 2015
- [45]. Hosel, T, Muller, C, and Reinecke,H, «Spark erosive structuring of electrically nonconductive zirconia with an assisting electrode,» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 4, pp. 357-361, 2011a.
- [46]. Schubert, A. and Zeidler, H, «Machining of nonconductive ZrO<sub>2</sub> ceramics,» *International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, pp. ISBN: 978-0-9553082-6-0, S. 6-9 (Bd.2)., 2009.
- [47]. Muttamara, A, Janmanee, P, and Fukuzawa, Y, «A Study of Micro-EDM on Silicon Nitride Using Electrode Materials,» *International Transaction Journal of Engineering,Management, & Applied Science & Technologies*, vol. 1 (1), pp. 001-007., 2010.
- [48]. Mohri, N, Fukuzawa, Y, Tani. T, Saito, N, and Furutani, K, «Assisting electrode method for machining insulating ceramics,» *Annals of the CIRP*, vol. 45, pp. 201-204, 1996.
- [49]. Hosel, T, Cvancara, T, Ganz, T, Muller, C, and Reinecke, H, «Characterization of high aspect ratio nonconductive ceramic microstructures made by spark erosion,» *Microsystem Technologies*, vol. 17, p. 313–318, 2011.
- [50]. Mohamed, A. R, Asfana, B, and Ali, M. Y, «Investigation of recast layer of non conductive ceramic due to micro-EDM,» *Advanced Materials Research*, vol. 845, pp. 857-861, 2014.
- [51]. Chen, Y. F., Lin, Y. C., Chen, S. L., and Hsu, L. R, «Optimization of electro discharge machining parameters on ZrO<sub>2</sub> ceramic using the Taguchi method,» *Journal of Engineering Manufacture*, pp. 195-205, 2009.
- [52]. Muttamara, A., Fukuzawa, Y., Mohri, N., and Tani, T, «Effect of electrode material on electrical discharge machining of alumina,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 209, 2545-2552, 2009.

- [53]. Fukuzawa, Y., Mohri, N., Tani, T., and Muttamara, A, «Electrical discharge machining properties of noble crystals,» *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 393-397, 2004.
- [54]. Banu, A., Ali, M. Y., and Rahman, M. A, «Micro-electro discharge machining of non conductive zirconia ceramic: investigation of MRR and recast layer hardness,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 75, pp. 257-267, 2014.
- [55]. Zhang, Q. H., Zhang, J. H., Ren, S. F., Deng, J. X., and Ai, X, «Study on technology of ultrasonic vibration aided electrical discharge machining in gas,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 640-644, 2004.
- [56]. Khatri, B. C., Rathod, P., and Valaki, J. B, «Ultrasonic vibration-assisted electric discharge machining: a research review,» *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 230(2), pp. 1-12, 2015.
- [57]. Skrabalak, G. and Kozak, J, «Study on dry electrical discharge machining Wear,» *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. Vol III , pp. 978-988, 2010.
- [58]. Singh, P., Chaudhary, A. K., Singh, T., and Rana, A. K, «Comparison of outputs for dry EDM and EDM with oil: a review,» *International Journal for Research in Emerging Science and Technology*, vol. 2(6), pp. 45-49, 2015.
- [59]. Yu, Z. B., Takahashi, J., Nakajima, N., Sano, S., and Kunieda, M, «Feasibility of 3-D surface machining by dry EDM,» *International Journal of Electrical Machining*, vol. 10, pp. 15-20, 2005.
- [60]. Leao, F. N. and Pashby, I. R, «A review on the use of environmentally friendly dielectric fluids in electrical discharge machining,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 341-346, 2004.
- [61]. Paul, G., Roy, S., Sarkar, S., Hanumaiah, N., and Mitra, S, «Investigations on influence of process variables on crater dimensions in micro-EDM of titanium aluminide alloy in dry and oil dielectric media,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, pp. 1009-1017, 2013.
- [62]. Teimouri, R. and Baseri, H, «Experimental study of rotary magnetic field assisted dry EDM with ultrasonic vibration of workpiece,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vols. %1 sur %267(5-8), pp. 1371-1384, 2013.
- [63]. Chakraborty, S., Dey, V., and Ghosh, S. K, «A review on the use of dielectric fluids and their effects in electrical discharge machining characteristics,» *Precision Engineering*, vol. 40, pp. 1-6, 2015.
- [64]. Chandra, B., Singh, H., and Garg, J, «A review on emerging areas of interest in electrical discharge machining,» *International Journal of Advanced Engineering Technology*, vol. 2(3), pp. 1-9, 2011.
- [65]. Al, Asfana Banu and Mohammad Yeakub, «Electrical Discharge Machining (EDM):A Review,» *International Journal of ngeineering Materials and Manufacture*, vol. 1(1), pp. 3-10, 2016.

- [66]. Ficko, M., Balic, J. et Brezocnik, M. and Pahole, I, «Solving of floor layout problem in flexible manufacturing system by genetic algorithms,» *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms.*, vol. 2(4), pp. 354-364, 2010.
- [67]. Cus, F. and Balic, J, «Combined system for off-line optimization and adaptive cutting force contro,» *Journal of Machine Engineering*, vol. 10(2), pp. 25-35, 2010.
- [68]. De Wolf, D. and Cardon, L. and Balic, J, «Parameters affecting the quality of the electrical discharge machining process,» *Advances in Production Engineering & Management*, vol. 5(4), pp. 245-252, 2010.
- [69]. K.H. Ho, S.T. Newman, «State of the art electrical discharge machining (EDM),» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43 (5), p. 1287–1300, 2003.
- [70]. H.K. Kansal, S. Singh, P. Kumar, «Application of Taguchi method for optimization of powder mixed electric discharge machining,» *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 7, p. 329–341, 2005.
- [71]. A. Pandey, S. Singh, «Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2(6), pp. 2172-2191, 2010.
- [72]. D. Kreme, «Usinage par Electroérosion,» *Techniques de L'ingénieur, Traité Génie Mécanique*, vol. BM 7 251, pp. 1-22, 1997.
- [73]. G. Guillaume, «Développement d'un Procède d'Usinage par Micro Electroérosion,» Lyon: Université Claude Bernard Lyon 1, 2012.
- [74]. J.S. Soni, G. Chakraverti, «Study of surfaces and accuracies produced during EDM of high carbonhigh chromium die steel with rotating electrode,» *ndian Journal of Engineering & Materials Science*, vol. 1, pp. 127-134, 1994.
- [75]. P.M. Lonardo, A.A, «Effect of flushing and electrode material on diesinking EDM,» *CIRP Annals*, vol. 48, p. 123– 126, 1999.
- [76]. Y.S. Wong, L.C. Lim, L.C. Lee, «Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces,» *J. Mater. Process. Technol*, vol. 48 , p. 299–305, 1995.
- [77]. K. Kagaya, Y. Oishi, K. Yada, «Micro-electrodischarge machining using water as a working fluid-I: micro-hole drilling,» *Precision Engineering*, vol. 8(3), pp. 157-162, 1986.
- [78]. R. Singh, J.S. Khamba, «Investigation for ultrasonic machining of titanium and its alloys,» *J. Mater. Process. Tech*, vol. 183, p. 363–36, 2007.
- [79]. G. Boothroyd, W. Knigh, «Fundamentals of machining and machine Tools,» New York: Marcel Dekker, 1989.
- [80]. M. Mourad, «Prédiction des paramètres du processus d'usinage par Electroérosion,» Ouargla-Algerie: Universite kasdi merbah ouargla faculte des sciences appliquees departement de genie mecanique, 2020.

- [81]. Mukhopadhyay, P. and Sarkar, B. R, «Advancement in ultrasonic Vibration and Magnetic Field Assisted Micro-EDM Process: An Overview,» *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, vol. 10 (2), pp. 362-373, 2019.
- [82]. Mohammad Jafar Haddad, Fereshteh Alihoseini, Mostafa Hadi, Meysam Hadad, Alireza Fadaei Tehrani and Aminollah Mohammadi, «An experimental investigation of cylindrical wire electrical discharge turning process,» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 46, p. 1119–1132, 2010.
- [83]. Patel Parth Kumar S, Krunal Shah, S. J. Thank, «Experimental analysis and optimization of process parameters of EDM for EN-47 – A Review,» *IJSRSET*, vol. (1)6, pp. 364-368, 2015.
- [84]. K.D. Mohapatra, S.K. Sahoo, «Experimental investigation of wire edm parameters for gear cutting process using desirability with pca,» *International Journal For Technological Research In Engineering*, vol. 2(10), pp. 2415-2419, 2015.
- [85]. Pradeep Singh, Arun Kumar Chaudhary, Tirath Singh Amit Kumar Rana, «Experimental investigation of Wire EDM to optimize dimensional deviation of EN8 Stee through Taguchi's Technique,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 02 ( 03), pp. 2395-0072, 2015.
- [86]. Vinod Kumar, Kamal Kumar Jangra and Vikas Kumar, «An experimental study on trim cutting operation using metal powder mixed dielectric in WEDM of Nimonic-90,» *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 7, p. 135–146, 2016.
- [87]. Parkash, Paras Kumar and Ravi, «Experimental investigation and optimization of EDM process parameters for machining of aluminum boron carbide (Al–B<sub>4</sub>C) composite,» *An International Journal Machining Science and Technology*, vol. 20( 2), pp. 330-348, 2016.
- [88]. Sahoo, Kasinath Das Mohapatra and Susanta Kumar, «Experimental analysis and optimisation of process parameters for gear cutting process using wire EDM,» *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems* , vol. 9, n° %14, 2016.
- [89]. Vishwnath Tripathi, Shani Kumar, Sangam Kumar, and Sumit Verma, «Study and Experimentation for Process Parameters on Inconel 904L by using EDM,» *GRD Journals Global Research and Development Journal for Engineering*, vol. 2(6), 2017.
- [90]. M. L. K. Sachin Ashok Sonawane, «An experimental study of WEDM parameters on Inconel-625,» *international Journal of Advanced Research Trends in Engineering and Technology (IJARTET)*, vol. 4( 11), 2017.
- [91]. Ivi B L, and Khidiya M S, «An experimental investigation of material removal rate in Electric discharge machining of heat treated carbon Tool Steel (SK2MCr4),» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5 (10), p. 1798–1808, 2018.
- [92]. M, Hargovind Soni , Narendranath S , Ramesh, «Experimental Investigation on Effects of Wire Electro Discharge Machining of Ti50Ni45Co5 Shape Memory Alloys,»

- Springer Science Business Media B.V, part of Springer Nature*, vol. 10, p. 483–249, 2018.
- [93]. A.Dabade, Shailesh S.Shirguppikar, «Experimental Investigation of Dry Electric Discharge Machining (Dry EDM) Process on Bright Mild Steel», *Materials Today*, vol. 5(2), pp. 7595-7603, 2018.
  - [94]. Gokulakannan. G, DR. R. V. Praveena Gowda and DR. S. Ramesh, «Experimental investigation and process parameter optimization al hybrid composite material processed by wedm using taguchi», *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, vol. 9(6), p. 899–916, 2019.
  - [95]. B. R. Jadhav, M.S. Sohani, S. S. Shirguppikar, «Experimental investigation of various process parameters of powder mixed electro discharge machining process for machining of al si alloy», *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 10(08), pp. 127-136, 2019.
  - [96]. Chiba, Abderrahim Belloufi , Mourad Mezoudj , Mourad Abdelkrim , Imane Rezgui and Elhocine, «Experimental and predictive study by multi-output fuzzy model of electrical discharge machining performances», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, p. 2065–2093, 2020.
  - [97]. Sharma, A., and al, «Experimental Investigation and Optimization of Electric Discharge Machining Process Parameters Using Grey-Fuzzy-Based Hybrid Techniques», *Materials* 2021.
  - [98]. R.Manoj Samson, Ashvin Sridhar, Ranjith, Solomon.Jenoris Muthiya, Joshuva Arockia Dhanraj, Murgayya S.Basavankattimath, Agegnehu Shara Shata, «Experimental Investigation of Heat-Treated Tool on Wire Electric Discharge Machining of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)», *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, p. 11 pages, 2022.
  - [99]. B. Elumalaia, Gowrib, P. Hariharanb, K.V. Arun Pillaib. Elumalaia, «Experimental Investigations on  $\mu$ ED Milling of Inconel 718 with Nano SiC Abrasive Mixed Dielectric» *Materials Researc*, vol. 25(2), 2021.
  - [100]. P. Mathan Kumar, K. Sivakumar, Vinu Kumar S, «Experimental Investigation of electrical discharge machining of Inconel 718 USING A TiB<sub>2</sub>-Cu SINTERED COMPOSITE ELECTRODE» *Materials and technology*, vol. 56(2), p. 131–138, 2022.
  - [101]. Vinothkumar.S, «Electro Thermal Modelling of Micro EDM», *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, vol 23,(5), 2014.
  - [102]. Saurav Datta, Siba Sankar Mahapatra, «Modeling,simulation and parametric optimization of wire EDM process using esponse surface methodology coupled with Grey Taguchi technique», *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2(5) , pp. 162-183, 2010.
  - [103]. Bozdana, A. Tolga, Yilmaz, Oguzhan, Ali Okka, M., Filiz, I. Huseyin, «Mathematical modeling of EDM hole drilling using response surface methodology», *International*

*Conference on Responsive Manufacturing -Green Manufacturing (ICRM) 11-13 January, 2010.*

- [104]. Al Hazza, M., Ndaliman, M., Hasan, M., Ali M., Khan, A, «Modeling the Electrical Parameters in EDM Process of Ti6Al4V Alloy Using Neural Network Method,» *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, vol. 7 (7), pp. 1464-1470, 2013.
- [105]. K. Kumara, R. Ravikumarb, «Modeling and Optimization of Wire EDM Process,» *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 3(3), pp. 1645-1648, 2013.
- [106]. Mithun S. Nair, Kuriachen B., R. Vijayakumar,J. Mathew, «Modelling of Micro Electric Discharge Machining Using FEM,» *Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014)*, 2014.
- [107]. V. Muthukumara, N. Rajesha ,R.N. Rajesha , R. Venkatasamya , A. Sureshababub , N. Senthilkumarc, «Mathematical Modeling for Radial Overcut on Electrical Discharge Machining of Incoloy 800 by Response Surface Methodology,» *ScienceDirect. Procedia Materials Science (ICMPC 2014)*, vol. 6 , p. 1674 –1682, 2014.
- [108]. Raj, J. Laxman and Dr. K. Guru, «Modeling and Analysis of EDM Process Parameters Using Taguchi Technique and Fuzzy Based Modeling,» *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, vol. 4(5) , pp. 473-480, 2014.
- [109]. Mehta, Hardik N, «Modeling of Electrical Discharge Machining Process,» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 4(06), 2015.
- [110]. Husein A. Hegab, Mohamed H. Gadallah and Amal K. Esawi, «Modeling and optimization of Electrical Discharge Machining (EDM) using statistical design,» *Manufacturing Rev. 2015*, vol. 2, pp. 2-21, 2015.
- [111]. S. G. Badekar, B. M. Dabade, «Modeling and optimization of edm process parameters: a review,» *International journal of mechanical engineering and technology (IJMET)*, vol. 6 (2), pp. 30-36, 2015.
- [112]. V. L. Bhambere, S. S. Khandare, «Modeling of wedm process for complex shape using multilayer perceptron and response surface, methodology,» *(IJRET) International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 04(09), 2015.
- [113]. V. L. Bhambere , S. S. Khandare, « modeling of wedm process for complex shape using multilayer perceptron and response surface methodology» *Engineering, Materials Science.2015*
- [114]. Y. G. J.F. Liu, «Thermal Modeling of EDM with Progression of Massive Random Electrical Discharges,» *Procedia Manufacturing*, vol. 5, p. 495–507, 2016.
- [115]. G. Puthumana, «Micro-EDM process modeling and machining approaches for minimum tool electrode wear for fabrication of biocompatible micro components,» *journal of machine Engineering* , vol. 17, pp. 97-111, 2017.

- [116]. J. Edwin Raja Dhas. G. Ramanan, «Response Surface Modeling and Grey Relative Analysis to Optimize the Wire Edm Machining Parameters with Multiple Response Characteristics,» *International Journal of Control Theory and Applications*, vol. 10 (27) , pp. 11 Pages, 2017.
- [117]. Shivam Kumar Singh. S. C. Jayswal., «Modeling and optimization of EDM Process Parameters on Machining of Inconel 686 using RSM,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 13(11) , pp. 9335-9344, 2018.
- [118]. M. S. S. P. Muthusamy Prabu, «Modeling of machining parameters for MRR and TWR in EDM characteristics on Al/10 wt-% TiB2 composites,» *MP Materials Testing*, vol. 61(6), pp. 559-566, 2019.
- [119]. M. A. M. and. F. Kolahan, «Modeling and optimization of the electrical discharge machining process based on a combined artificial neural network and particle swarm optimization algorithm,» *Mechanical Engineering*, vol. 27(3), pp. 1206-1217, 2020.
- [120]. Sushant B. Patil, Swarup S. Deshmukh, Vijay S. Jadhav, Ramakant hrivastava, «Modeling and Parametric Optimization of Process Parameters of Wire Electric Discharge Machining on EN-31 by Response Surface Methodology,» *In book: Trends in Manufacturing and Engineering Management*, pp. 51-65., 2021.
- [121]. A. S. B. R. V. and. M. R. V. Muthu Kumar, «Multi Response Optimization of Machining Parameters of Wire-EDM using Grey Relational Analysis in the Taguchi Method,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 5 (13), p. 2325–2338, 2010..
- [122]. S. M. T. R. L.Savadamuthu, «Multi characteristic Optimization in Wire cut EDM by Using Taquchi Data Envelopment Analysis Based Ranking Methodology,» *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, vol. 7(3), pp. 468-473, 2013.
- [123]. G. R. and. P. V. Ramaiah, «Multiple process parameter optimization of wire electrical discharge machining on Inconel 825 using Taguchi grey relational analysis,» *he International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, p. 1249–1262, 2013.
- [124]. S. K. S. Kasinath Das Mohapatra, «Parametric Optimization of Wire EDM Process for Gear Cutting,» *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, vol. 1(3), pp. 78-84, 2014.
- [125]. V. Muthukumar, Suresh babu A,R. Venkatasamy, N. Senthilkumar, «An Accelerated Particle Swarm Optimization Algorithm on Parametric Optimization of WEDM of Die-Steel,» *J. Inst. Eng. India Ser. C*, vol. 96(1), pp. 49-56, 2014.
- [126]. T. K. B. Milan Kumar Das, «Optimization of Surface Roughness in WEDM Process Using Artificial Bee Colony Algorithm,» *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 9 (26), pp. 8748-8751, 2014.
- [127]. S. P. Vikram Singha, «Optimization of WEDM parameters using Taguchi technique and Response Surface Methodology in machining of AISI D2 Steel,» *Procedia Engineering*, vol. 97, p. 1597 – 1608, 2014.

- [128]. N. K. J. Kapil Gupta, «Analysis and optimization of micro-geometry of miniature spur gears manufactured by wire electric discharge machining,» *Precision Engineering*, vol. 38(4), pp. 728-737, 2014.
- [129]. Hardik A. Patel Dr. Md. Najibullah Prof. B C Khatri S. P. Patel, «A Review on Parametric Optimization in Wire Electric Discharge Machining,» *International Journal for Scientific Research & Development-IJSRD*, vol. 3(10), pp. 925-929, 2015.
- [130]. B. H. B. and. G. V. Kumar, «grey fuzzy based optimization of tool wear and process cost in wedm of AMMC,» *International Journal of Engineering Researches and Management Studies*, vol. 3(12), 2016.
- [131]. S. M. B. P. S. Banerjee, «Optimization of WEDM Process Parameters of EN47 Spring Steel Based On Roughness Using Taguchi Method,» *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 13( 3), pp. 46-50, 2016.
- [132]. P. V. V. P. S. S. K. Pallavi. S. Karande, «Controlling The Tool Wear for EDM While Offering Statistical Treatment and Optimization Techniques for Problem Solving – Experimentation,» *International Journal of Informative & Futuristic Research*, vol. 3(6), pp. 2075-2087, 2016.
- [133]. P. V. V. P. S. S. K. Javed Mujawar, «Process Optimization Using DOE for Realizing the Optimum Value of Surface Roughness Over EDM Experimentation,» *International Journal of Informative & Futuristic Research-IJIFR*, vol. 3(6), pp. 2064-2074, 2016.
- [134]. D. D. H. Mayank M. Ghodasara, «Parametric optimization on Wire EDM for the WPS Die Steel-IJSTE,» *International Journal of Science Technology & Engineering*, vol. 2(10), 2016.
- [135]. S. K. T. N. N. M.Chandrasekaran, «Optimization of EDM process in machining micro holes for improvement of hole quality,» *Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 39(4), 2016.
- [136]. P. J. R. Riteshkumar Paghdal, «Optimization of Process Parameters on Performance of Wire Cut Electrical Discharge Machining on H13 Tool Steel,» *IJSTE International Journal of Science Technology & Engineering*, vol. 3(10), 2017.
- [137]. S. S. K.D. Mohapatra, «parametric optimization and experimental analysis of wire edm responses in a gear cutting process,» *International Journal For Technological Research In Engineering*, vol. 5(4), 2017.
- [138]. D. R. O. V. Chand, «Process Parameter Optimization for EDM Machined Stainless Steel,» *IJSRD-International Journal for Scientific Research & Development*, vol. 5(10), pp. 19-22, 2017.
- [139]. A. K. Srivastava, «Statistical Optimization of wire-EDM during Processing of Hybrid MMC,» *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, vol. 8(6), pp. 783-792, 2018.
- [140]. M. B. R. C. T. Munish Giri, «Optimization of Cutting Rate for EN 1010 Low Alloy Steel on WEDM Using Response Surface Methodology,» *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)*, vol. 4(7), 2018.

- [141]. K. S. S. J. A. A. and. P. M. R. Shanmuga Prakash, «Parameters optimization of copper powder mixed dielectric and pure dielectric medium in wire electrical discharge machining of AISI D3 steel,» *AIP Conference Proceedings*, vol. 2128(1), 2019.
- [142]. I. R. M. M. A. Amor BOUREBBOU, «Optimization of electrical discharge machining using response surface methodology coupled with genetic algorithm,» *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 20(1/2022), 202.
- [143]. T. Akıncioğlu, «Optimization of Multiple Performance Characteristics in The Electrical Discharge Machining of the Tigr2,» *Facta Universitatis Series Mechanical*, vol. 20(2), pp. 237-253, 2022.
- [144]. M. and. H. B. A. Zohoor, «Application of electrical discharge machining for machining of semiconductor materials,» *Mechanical Engineering*, vol. 21 (4), pp. 1341 - 1346, 2014.
- [145]. S. and. M. D. Panda, «Optimization of multiple response characteristics of EDM process using Taguchibased grey relational analysis and modified PSO,» *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, vol. 14 (3), pp. 123-148, 2015.
- [146]. D. B. Nouara, «Régression Linéaire simple et multiple,» Bejaia-Algerie: Université Abderrahmane MIRA-Bejaia Faculté des sciences économiques, 2016.
- [147]. D. O. S. T. C. Rafał Swiercz, «Multi Response Optimization of Electrical Discharge Machining Using the Desirability Function,» *Micromachines (Basel)*, vol. 10(1), 2019.
- [148]. C. R. S. al, «A Review of Research on Improvement and Optimization of Performance Measures for Electrical Discharge Machining,» *Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 4(1), pp. 433-450, 2014.
- [149]. C. Mancel, «Modélisation et résolution de problèmes d'optimisation combinatoire issus d'applications spatiales,» Toulouse, Français: Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes Automatique / Robotique. INSA de Toulouse, 2004.
- [150]. Rabah.Dahmani, «Optimisation d'un procédé d'usinage par micro électroérosion, » Lyon: These de l'universite de lyon délivrée par l'universite clude bernard lyon1, 2015.
- [151]. W. M. H. Taoufik Kamoun, «Modélisation du débit de matière enlevée et de l'usure de l'électrode en usinage par électro érosion d'enfonçage,» *ResearchGate Conference: JRST'2015*, 2015.
- [152]. G. C. V. P.G. Benardos, «Predicting surface roughness in machining: a review,» *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43 , p. 833–844., 2003.
- [153]. B. Nahak, «A Review on Optimization of Micro EDM Machinin Performances,» *International Journal of Engineering Research*, vol. 6 (5), pp. 242-246, 2017.
- [154]. M. E. E. L. Fourment, «Optimisation multi-objectifs `a base de méta modèle pour des applications en mise en forme,» *Mecanique & Industries* , vol. 11, p. 223–233, 2010.
- [155]. B. Rabie, «Optimisation par Essaim de Particules Application à un système complexe, » Algerie-Batna : Université Batna 2 Faculté de Technologie Département d'Électronique, 2015.

- [156]. R. MADIOUNI, «Contribution à la synthèse et l'optimisation multi-objectif par essais particuliers de lois de commande robuste RST de systèmes dynamiques, » paris France : Université paris.mstic, 2016.
- [157]. A. E. Dor, «Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire Applications en segmentation d'images et en électronique, » Paris-Est: Université Paris-Est, 2012.
- [158]. V. and. F. N. Miranda, «New evolutionary particle swarm algorithm applied to voltage/VAR control,» *In Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference*, p. 1–6 pages, 2002.
- [159]. M. and. C. C. A. Reyes-Sierra, «Multi-Objective Particle Swarm Optimizers : A Survey of the State-of-the Art,» *International Journal of Computational Intelligence Research*, vol. 2(3) , p. 287– 308, 2006.
- [160]. S. Z. and. C. C. A. Martinez, «A Multiobjective Particle Swarm Optimizer Based on Decomposition,» *In The 13th annual Genetic and Evolutionary Computation Conference,Dublin*, p. 69–76, 2011.
- [161]. C. A. and. L. M. S. Coello.Coello, «MOPSO : A proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization,» *In Proceedings of the Evolutionary Computation (CEC'02)Washington*, vol. 2, p. 1051–1056, 2002.
- [162]. J. McCaffrey, «Artificial Intelligence - Particle Swarm Optimization,» *MSDN Magazine Issues*, vol. 26(08), 2011.
- [163]. H. X. and. E. RC, «Multi-objective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization,» *In: Proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation (CEC 2002) Honolulu, Hawaii, USA*, p. 1677–1681, 2002.
- [164]. E. R. C. and. S. Y. Hu X, «Particle swarm with extended memory for multi objective optimization,» *In Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium Indianapolis,Indiana, USA, IEEE Service Center*, pp. 193-197, 2003.
- [165]. A. T. and. A. M, «Modified PSO algorithm for multi-objective optimization of the cutting parameters,» *Prod Eng Res Devel*, vol. 6(6), pp. 569-576, 2012.
- [166]. A. T, «Multi-objective particle swarm algorithm for the posterior selection of machining parameters in multi-pass turning,» *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 33(4), pp. 259-265, 2021.
- [167]. B. Z. and. Y.-j. C, «Multiple objective particle swarm optimization technique for economic load dispatch,» *Journal of Zhejiang University Science*, vol. 6(5), pp. 420-427, 2005.
- [168]. R. C. Kennedy J and Eberhart, «Particle swarm optimization,» *Proceeding of IEEE int.Conference on neural networks, Perth, Australia,IEEE service center, Pscataway*, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.

- [169]. A. M. and. M. H. Ameer T, «Optimisation des paramètres de coupe en utilisant l'algorithme à essaim de particule,» *Matériaux and techniques*, vol. 95, pp. 371-380, 2007.
- [170]. G. S. P, «Optimization of PID gains by particle swarm optimization in fuzzy based automatic control,» *Electr Power Syst Res*, vol. 72, p. 203–212, 2004.
- [171]. V. Barichard, «Approche Hybride pour les Problèmes Multi-objectif, » France : l'école doctorale d'Angers, 2003.
- [172]. Y. C. Patrick Siarry, «Optimisation multiobjectif,» *Eyrolles*, 2002.
- [173]. M. Ehrgott, «Multicriteria optimization,» *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, vol. 491, 2000.
- [174]. K. D. and. T. Goel, «A Hybrid Multi-objective Evolutionary Approach to Engineering Shape Design,» *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Vols. %1 sur %2(LNCS,volume 1993), p. 385–399, 2001.
- [175]. A. Berro, «Optimisation multiobjectif et stratégies d' évolution en environnement dynamique,» Toulouse-France: Thèse doctorale présentée à l'université des sciences sociales, 2001.
- [176]. M. A. H. M. T Ameer, «Optimisation des paramètres de coupe en utilisant l'algorithme a essaim de particules,» *Matériaux & techniques*, vol. 95 (6), pp. 371,380, 2007.
- [177]. S. J. and. M. Middendorf, «A hierarchical particle swarm optimizer,» *Congress on Evolutionary Computation (CEC'2003) Camberra, Australia*, p. 770–776, 2003.
- [178]. A. T, «Optimisation du processus d'usinage en utilisant la méthode des essaims de particules,», Biskra, Algérie: Thèse doctorale présentée à l'Université Mohamed Khider,, 2016.

## العنوان: اختيار وتحسين معلمات عملية التشغيل بالتفريغ الكهربائي للمواد الصلبة

### ملخص:

دراستنا تركزت على تحسين معايير التشغيل باستخدام تقنية التفريغ الكهربائي (EDM) من خلال مزيج من الانحدار الخطي المتعدد وطريقة تحسين باستخدام سرب الجسيمات. استعملنا آلة تفريغ كهربائي بالغمر ONA NX4 من خلال تعديل معلمات رئيسية مثل تيار الاشتعال (I) والجهد (V) وزمن النبضة (Ton). وتم تحديد ثلاثة أهداف رئيسية: رفع معدل إزالة المواد (MRR)، زيادة مدة عيش القطب (TWR)، وتقليل خشونة سطح Ra لفولاذ AISI 1095. قمنا بـ 27 تجربة تشغيل، لتعديل هذه المعلمات لوضع نماذج حسابية تنبؤية لـ MRR و TWR و Ra. أظهرت النتائج أن التحسين باستخدام سرب الجسيمات كان فعالاً في تصميم معلمات الإدخال في عملية التفريغ الكهربائي. وأثبتنا أن الجمع بين تحسين باستخدام سرب الجسيمات والانحدار الخطي المتعدد كان أسلوباً فعالاً في تحسين معايير التشغيل بواسطة التفريغ الكهربائي. لا حضنا أيضاً أن تيار الاشتعال (I) كان له التأثير الأكبر في العملية التشغيلية من بين المعلمات المدروسة، يليه الزمن والجهد. لتحقيق هذا التحسين، تم تطوير نماذج حسابية معتمدة على الانحدار الخطي لتوقع MRR و TWR و Ra استناداً إلى معلمات العملية. أظهرت هذه النماذج دقة عالية مقارنة بالنتائج التجريبية، بدقة تبلغ 97% لـ MRR و 94% لـ TWR و 82% لـ Ra.

**الكلمات الرئيسية:** تقنية التفريغ الكهربائي (EDM)، أداء التشغيل، أخطاء هندسية، الانحدار الخطي المتعدد، سرب الجسيمات.

### Title: Selection and Optimization of Electrical Discharge Machining Parameters for Hard Materials"

#### Abstract

The study aimed to optimize Electrical Discharge Machining (EDM) parameters using a combined approach of multiple linear regression and particle swarm optimization. The research was conducted on an ONA NX4 sinking electrical discharge machine by modifying key parameters such as discharge current (I), voltage (V), and pulse duration (Ton). Three main objectives were established: maximizing Material Removal Rate (MRR), increasing Tool Wear Rate (TWR), and minimizing the surface roughness Ra of AISI 1095 steel.

Twenty-seven machining experiments were conducted, adjusting these parameters to establish predictive mathematical models for MRR, TWR, and Ra. The results showed that particle swarm optimization was effective in modeling the input parameters of the Electrical Discharge Machining process. The combination of particle swarm optimization and multiple linear regression proved to be an effective method for optimizing EDM parameters.

It was observed that among the studied parameters, the spark current (I) had the most significant influence on the machining process, followed by time and voltage. To achieve this optimization, mathematical models based on linear regression were developed to predict MRR, TWR, and

Ra based on process parameters. These models demonstrated high accuracy compared to experimental results, with an accuracy of 97% for MRR, 94% for TWR, and 82% for Ra.

**Key words:** Electrical Discharge Machining (EDM), Machining Performance, Geometric Errors, Multiple Linear Regression, Particle Swarm.

## **Titre : Sélection et Optimisation des Paramètres du Procédé d'Usinage par Décharges Electriques pour les Matériaux Durs**

### **Résumé**

L'objectif de cette étude était d'améliorer les paramètres du processus d'usinage par électroérosion (EDM) en combinant la régression linéaire multiple et la méthode d'optimisation par essaim de particules. La recherche a été menée sur une machine à électroérosion par enfonçage ONA NX4, en ajustant des paramètres clés tels que le courant de décharge (I), la tension (V) et le temps d'impulsion (Ton). Trois principaux objectifs ont été définis : maximiser le taux d'enlèvement de matière (MRR), prolonger la durée de vie de l'électrode (TWR) et minimiser la rugosité de surface Ra de l'acier AISI 1095.

Vingt-sept essais d'usinage ont été réalisés en modifiant ces paramètres pour établir des modèles mathématiques prédictifs pour MRR, TWR et Ra. Les résultats ont indiqué que l'approche d'optimisation par essaim de particules était efficace pour modéliser les paramètres d'entrée du processus d'électroérosion. La combinaison de cette méthode avec la régression linéaire multiple s'est avérée être une approche efficace pour optimiser les paramètres de l'EDM. Il a été observé que parmi les paramètres examinés, le courant d'étincelle (I) avait l'influence la plus significative sur le processus d'usinage, suivi du temps et de la tension.

Pour parvenir à cette optimisation, des modèles mathématiques basés sur la régression linéaire ont été développés pour prédire MRR, TWR et Ra en fonction des paramètres du processus. Ces modèles ont démontré une précision élevée par rapport aux résultats expérimentaux, atteignant une exactitude de 97 % pour MRR, 94 % pour TWR et 82 % pour Ra.

**Mots-clés :** Usinage par électroérosion (EDM). Performances d'usinage. Erreurs géométriques. Régression linéaire multiple. Essaims de particules.