

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

MEZOU DJ Mourad

THÈME

Prédiction des Paramètres du Processus d'Usinage par Electroérosion

Soutenue publiquement le 05 / 11 / 2020 devant le jury :

BOUAKBA Mustapha	M.C.A	Université de Ouargla	Président
BELLOUFI Abderrahim	M.C.A	Université de Ouargla	Rapporteur
ABDELKRIM Mourad	M.C.A	Université de Ouargla	Co-Rapporteur
REBIAI Cherif	Professeur	Université de Batna 2	Examineur
BAHLOUL Elhachemi	M.C.A	Université de Batna 2	Examineur
NECIB Djilani	M.C.A	Université d'Eloued	Examineur

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail A ceux qui m'ont éclairé le chemin de la sagesse
et m'ont offert tout ce qui est cher et comble le cœur dans la vie avec une
immense générosité et une tendre affection.*

A toi ma très chère mère.

À ma femme et mes enfants Ibtihel, Abdelmoudjib et Abrar

A mes frères, à mes sœurs et à leurs enfants.

A tous mes amies et nos collègues.

À tous ceux qui m'ont apporté leur aide.

Remerciement

Je remercie Dieu pour m'avoir donné la santé la patience et le courage tout au long du travail.

Je tien à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Dr BELLOUFI Abderrahim. Merci pour votre écoute, vos conseils et vos encouragements qui m'ont été précieux pour mener ce travail à son terme.

Je remercie spécialement Monsieur ABDELKRIM Mourad maître de conférences à l'université de Ouargla d'avoir accepté d'être Co-encadreur de thèse, pour ses précieux conseils qui m'ont permis de concrétiser ce travail.

Je tiens à remercier avec plus grande gratitude Monsieur REBLAI Cherif Professeur à l'université de Batna 2 pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.

Mes remerciements vont également aux : Dr. BAHLOUL Elhachemi, Dr. NECIB Djilani, Dr. BOUAKBA Mustapha pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'en faire partie du jury de soutenance.

Mes sincères remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier BOUREBBOU Amor, BENDIFALLAH Mourad, Fedouï Kamel, Baroura Lazhar, Lahcene MEBARKI et tous mes collègues.

Bien sûr, je n'oublie pas à remercier ma mère, ma petite famille, ma grande famille, mes frères, sœurs et tous mes collègues.

Mourad Mezoudj

Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
CHM		Fraisage chimique
EDM		Usinage par électroérosion
ECM		Usinage électrochimique
EBM		Usinage par faisceau électronique
IBM		Usinage par faisceau ionique
I_p	A	Courant de crête
MA		Mécanique / Abrasion
PBM		Usinage par faisceau de plasma
PCM		Usinage photochimique
T_{on}	μs	Temps d'impulsion
T_{off}	μs	Temps d'arrêt
USM		Usinage par ultrasons
V	Volte	Tension
WJM		Usinage par jet d'eau

Table des Matières

Introduction Générale	1
Chapitre I	
Synthèse bibliographique	
I.1 Introduction	5
I.2 Usinage par électroérosion	5
I.3 Définition du procédé d'usinage par électroérosion	6
I.3.1 Procédés Mécaniques	7
I.3.2 Processus thermiques	7
I.3.3 Procédés chimiques et électrochimiques	8
I.4 Principe du procédé	8
I.5 Mécanisme d'enlèvement de la matière	10
I.5.1 Phase de pré-claquage	11
I.5.2 Phase de claquage	12
I.5.3 Phase de décharge	12
I.5.4 Fin de décharge	13
I.5.5 Phase de post-décharge	13
I.6 Les différentes variantes d'usinage par électroérosion	14
I.6.1 Electroérosion à enfoncement (Die sinking EDM)	14
I.6.2 Électroérosion à fil (Wire EDM)	15
I.6.3 Perçage par électroérosion (Drilling EDM)	15
I.6.4 Fraisage par électroérosion (Milling EDM)	15
I.7 Applications de l'usinage par électroérosion	16
I.7.1 Matériaux traités thermiquement	16
I.7.2 Micro-EDM	16
I.7.3 Céramique	17
I.7.4 Matériaux composites modernes	17

I.8 Paramètres affectant le procédé de l'usinage par électroérosion	17
I.8.1 Paramètres électriques	18
I.8.2 Paramètres non électriques	21
I.9 Revue de littérature	22
I.10 Conclusion	28

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction	29
II.2 Description du matériel utilisé	29
II.2.1 le substrat utilisé	29
II.2.2 Electrode	30
II.2.3 Performances chimiques et physiques	31
II.2.4 Préparation des électrodes	31
II.2.5 Compression uniaxiale	32
II.2.6 Frittage par infiltration	33
II.3 La machine de l'électroérosion	34
II.4 Appareils de mesures utilisées	36
II.4.1 La machine de mesure tridimensionnelle	36
II.4.2 Appareil de mesure de la densité	37
II.4.3 Appareil de mesure de la dureté	38
II.4.4 Mesure de la rugosité	39
II.5 Préparation des essais	39
II.5.1 Polissage et préparation des surfaces	40
II.5.2 Montage de la pièce	40
II.5.3 Montage de l'électrode	40
II.5.4 Préparation du niveau d'érosion	41
II.6 Réalisation des essais	41
II.6.1 Conception d'expériences	41
II.6.2 Démarches à suivre pendant les essais	42

II.7 Détermination du Taux d'enlèvement de matière (MRR)	44
II.8 Détermination du Taux d'usure des électrodes (EWR)	44
II.9 Mesure de la rugosité de surface	45
II.10 Mesure de la surcoupe radiale (ROC)	45
II.11 Mesure de la circularité	46
II.12 Evaluation de la cylindricité	47
II.13 Conclusion	50

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1 Introduction	51
III.2 Présentation des Résultats Des Essais	51
III.2.1 L'influence du courant de décharge sur le taux d'enlèvement de la matière MRR	52
III.2.2 L'influence du temps d'impulsion sur le taux d'enlèvement de la matière (MMR)	53
III.2.3 L'influence du temps d'arrêt sur le taux d'enlèvement de la matière (MMR).	53
III.2.4 L'influence du courant de décharge sur le taux d'usure de l'outil TWR	54
III.2.5 L'influence du temps d'impulsion sur taux de l'usure de l'outil TWR	54
III.2.6 L'influence du courant de décharge et le temps sur la surcoupe radiale ROC	55
III.2.7 L'influence du courant de décharge sur la rugosité de la surface Ra	57
III.2.8 L'influence du temps d'impulsion sur la rugosité de la surface Ra	57
III.2.9 L'influence du temps d'arrêt sur la rugosité de surface Ra	58
III.2.10 L'influence du courant de décharge et temps d'impulsion sur la Circularité	58
III.3 Conclusion	60

Chapitre IV

Prédiction intelligente des performances de l'usinage par électroérosion

IV.1 Introduction	61
IV.2 Modélisation floue	62
IV.2.1 Variables floues	63

IV.2.2 Règles floues	68
IV.2.3 Défuzzification et étude de l'erreur et de la précision des modèles flous	69
IV.3 Résultats	70
IV.3.1 Taux d'enlèvement de matière (MRR)	70
IV.3.2 Taux d'usure de l'outil (TWR)	72
IV.3.3 Taux d'usure	73
IV.3.4 Rugosité de la surface (Ra)	75
IV.3.5 Surcoupe radiale (ROC)	77
IV.3.6 Circularité (CIR)	78
IV.3.7 Cylindricité (CYL)	80
IV.4 Représentations graphiques	82
IV.4.1 Taux d'enlèvement de matière (MRR)	82
IV.4.2 Taux d'usure de l'outil (TWR)	83
IV.4.3 Taux d'usure (EWR)	84
IV.4.4 Rugosité de la surface (Ra)	85
IV.4.5 Surcoupe radiale (ROC)	86
IV.4.6 Circularité (CIR)	87
IV.4.7 Cylindricité (CYL)	88
IV.5 Conclusion	89
Conclusion Générale	90
Perspectives	91
Références Bibliographiques	92

Liste des Figures

Chapitre I Synthèse bibliographique

Figure I.1	Processus EDM montrant la décharge et l'enlèvement de matière	5
Figure I.2	Procédés d'usinage non conventionnels	7
Figure I.3	Principe de l'usinage par électroérosion	8
Figure I.4	Principe de fonctionnement du procédé d'électroérosion	9
Figure I.5	Deux types de configurations pour l'électroérosion : A) configuration verticale et B) découpe au fil	10
Figure I.6	Principe de l'usinage par électroérosion	10
Figure I.7	Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant	11
Figure I.8	Phase de claquage	12
Figure I.9	Phase de décharge	12
Figure I.10	Phase de fin de décharge	13
Figure I.11	Phase de post-décharge	14
Figure I.12	Différentes variantes d'usinage par EE	14
Figure I.13	paramètres de processus d'EDM	18
Figure I.14	Entrefer latéral et entrefer frontal	21

Chapitre II Procédure expérimentale

Figure II.1	Pièce de travail	30
Figure II.2	Les électrodes utilisées pour les expériences	30
Figure II.3	Electrode Cu-W	31
Figure II.4	Poudre de tungstène	32
Figure II.5	La colle (caoutchouc + essence)	32
Figure II.6	Les types de compression uniaxiale	32
Figure II.7	Presse hydraulique	33
Figure II.8	Les opérations séquentielles dans un four de frittage	33
Figure II.9	Comprimée Cupro-tungstène	34
Figure II.10	Electrode	34
Figure II.11	Eléments d'une machine	34
Figure II.12	machine-outil ONA NX4	35
Figure II.13	Génération d'étincelles	35

Figure II.14	Pièce à usinée	36
Figure II.15	Machines à mesurer tridimensionnelle 443 Dual Z	36
Figure II.16	Anneau épiscopique : (Anneau concentrique à la caméra)	37
Figure II.17	Densimètre digitale	38
Figure II.18	Dispositif YDK01	38
Figure II.19	Balance AP 250 D	38
Figure II.20	Duromètre digital AFFRI	39
Figure II.21	Rugosimètre (Mitutoyo-sufftest-211)	39
Figure II.22	Disque de polissage manuel	40
Figure II.23	Fixation de la pièce	40
Figure II.24	Positionnement de l'électrode	40
Figure II.25	Niveaux de diélectrique	41
Figure II.26	Exemple de cavités appliquées sur la pièce	43
Figure II.27	Paramètres d'usinage	44
Figure II.28	Visualisation microscopique de la surface usinée	45
Figure II.29	La circularité	46
Figure II.30	Fenêtre Démarrage rapide	46
Figure II.31	Palpage des points	47
Figure II.32	Affichage de la cible	47
Figure II.33	Cylindricité	48
Figure II.34	Boîte de dialogue Elément automatique-Cylindre	48
Figure II.35	Mesure d'un cylindre	49
Figure II.36	Configuration du montage expérimental	49

Chapitre III

Résultats et discussion

Figure III.1	Variation du taux d'enlèvement de matière en fonction du courant de décharge	52
Figure III.2	Variation du taux d'enlèvement de matière en fonction du temps d'impulsion	53
Figure III.3	Variation du taux d'enlèvement de matière en fonction du temps d'arrêt (T_{off})	53
Figure III.4	Variation du taux de l'usure de l'outil en fonction du courant de décharge	54
Figure III.5	Variation du taux d'usure de l'outil TWR en fonction du temps d'impulsion	54
Figure III.6	Variation du taux d'usure de l'outil (TWR) en fonction du temps d'arrêt	55
Figure III.7	Variation de la surcoupe radiale ROC en fonction du courant de décharge	55

Figure III.8	Variation de la surcoupe radiale ROC en fonction du temps d'impulsion T_{on}	56
Figure III.9	Variation de la surcoupe radiale ROC en fonction du temps d'arrêt T_{off}	56
Figure III.10	Variation de la rugosité de la surface Ra en fonction du courant de décharge	57
Figure III.11	Variation de la rugosité de la surface en fonction de temps d'impulsion T_{on}	57
Figure III.12	Variation de la rugosité de la surface en fonction de temps d'arrêt T_{off}	58
Figure III.13	Variation de la circularité en fonction du courant de décharge	59
Figure III.14	Variation de la circularité en fonction de temps d'impulsion T_{on}	59
Figure III.15	Variation de la circularité en fonction de temps d'arrêt T_{off}	59

Chapitre IV

Prédiction intelligente des performances de l'usinage par électroérosion

Figure IV.1	Système flou	63
Figure IV.2	Variables linguistiques pour le courant (I)	63
Figure IV.3	Variables linguistiques pour la tension (V)	63
Figure IV.4	Variables linguistiques pour le temps d'impulsion (T_{on})	64
Figure IV.5	Variables linguistiques pour le taux d'enlèvement de matière (MRR) .	64
Figure IV.6	Variables linguistiques pour le taux d'usure de l'outil (TWR)	64
Figure IV.7	Variables linguistiques pour le taux d'usure (EWR)	64
Figure IV.8	Variables linguistiques pour la rugosité de la surface (Ra)	65
Figure IV.9	Variables linguistiques pour la surcoupe radiale (ROC)	65
Figure IV.10	Variables linguistiques pour la circularité (CIR)	65
Figure IV.11	Variables linguistiques pour la cylindricité (CYL)	65
Figure IV.12	Fonctions d'appartenance pour les paramètres d'entrée et de sortie pour le premier modèle	67
Figure IV.13	Fonctions d'appartenance pour les paramètres d'entrée et de sortie pour le deuxième modèle	68
Figure IV.14	Variation du taux d'enlèvement de matière expérimental et prévu (MRR) en fonction du nombre d'essais	70
Figure IV.15	Comparaison du taux d'enlèvement de matière (MRR) prévu et expérimental	71
Figure IV.16	Variation du taux d'usure de l'outil expérimental et prévu (TWR) en fonction du nombre d'essais	72
Figure IV.17	Comparaison du taux d'usure de l'outil (TWR) prévu et expérimental ..	73
Figure IV.18	Variation du taux d'usure (EWR) expérimental et prévu en fonction du nombre d'essais	74
Figure IV.19	Comparaison du taux d'usure (EWR) prévu et expérimental	75

Figure IV.20	Variation de la rugosité de surface (Ra) expérimentale et prévue en fonction du nombre d'essais	75
Figure IV.21	Comparaison de la rugosité de surface (Ra) prévue et expérimentale	76
Figure IV.22	Variation de la surcoupe radiale (ROC) expérimentale et prévue en fonction du nombre d'essais	77
Figure IV.23	Comparaison de la surcoupe radiale (ROC) prévue et expérimentale	78
Figure IV.24	Variation de la circularité (CIR) expérimentale et prévue en fonction du nombre d'essais	78
Figure IV.25	Comparaison de la circularité (CIR) prévue et expérimentale	79
Figure IV.26	Variation de la cylindricité (CYL) expérimentale et prévue en fonction du nombre d'essais	80
Figure IV.27	Comparaison de la cylindricité (CYL) prévue et expérimentale	82
Figure IV.28	Variation du taux d'enlèvement de matière prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage	82
Figure IV.29	Variation du taux d'usure de l'outil prédit par logique floue en fonction des paramètres d'usinage	83
Figure IV.30	Variation du taux d'usure de prédit par logique floue en fonction des paramètres d'usinage	84
Figure IV.31	Variation de la rugosité de la surface prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage	85
Figure IV.32	Variation de la surcoupe radiale prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage	86
Figure IV.33	Variation de la circularité prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage	87
Figure IV.34	Variation de la cylindricité prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage	88

Liste des Tableaux

Chapitre II Procédure expérimentale

Tableau II.1	Composition Chimique de l'acier AISI 1095 en % massique	29
Tableau II.2	Caractéristiques Physique de l'acier AISI 1095	29
Tableau II.3	Caractéristiques Mécaniques de l'acier AISI 1095	30
Tableau II.4	Performances chimiques et physiques d'électrodes en cuivre tungstène	31
Tableau II.5	les différents états des surfaces	39
Tableau II.6	Paramètres d'usinage	42

Chapitre III Résultats et discussion

Tableau III.1	Résultats expérimentaux	51
----------------------	-------------------------------	----

Chapitre IV Prédiction intelligente des performances de l'usinage par électroérosion

Tableau IV.1	Paramètres d'usinage	61
Tableau IV.2	Résultats expérimentales	61
Tableau IV.3	Tableau d'inférence	68
Tableau IV.4	Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation du taux d'enlèvement de matière (MRR)	71
Tableau IV.5	Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation du taux d'enlèvement de matière (MRR)	72
Tableau IV.6	Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation du taux d'usure de l'outil (EWR)	74
Tableau IV.7	Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la rugosité de surface (Ra)	76
Tableau IV.8	Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la surcoupe radiale (ROC)	77
Tableau IV.9	Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la circularité (CIR)	79
Tableau IV.10	Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la cylindricité (CYL)	81

Introduction générale

Introduction générale

L'usinage par enlèvement de copeaux a fait l'objet de nombreuses études depuis le début du 20^{ème} siècle, ce qui a permis à ce procédé de rester l'un des plus usités dans l'industrie mécanique. Les techniques d'usinage sont donc en constante évolution, afin de maintenir leurs performances au plus haut niveau et d'être capables de répondre aux nouvelles exigences industrielles, en termes de qualité et de productivité, mais aussi d'impact sur l'environnement et la santé.

Avec la croissance industrielle et technologique, l'utilisation des matériaux durs est augmentée dans les divers secteurs tel que : l'aéronautique, l'ingénierie nucléaire, la médecine,...

Les matériaux durs sont des matériaux nouvellement développés possédant un grand rapport résistance-poids, une grande dureté et une bonne résistance à la chaleur. En raison des exigences de conception strictes, l'usinage de ces matériaux devient très difficile et coûteux par les procédés d'usinage conventionnels. Les besoins de la technologie pour la fabrication et l'usinage de matériaux dur et a grande résistance, conduisent l'usinage moderne à remplacer les processus traditionnels.

Divers problèmes sont survenus avec ces techniques d'usinage conventionnels tels que : le taux d'usure élevé de l'outil de coupe, la génération de chaleur à l'interface d'outil-pièce et l'exigence de la rigidité de l'outil qui pose un problème majeur dans l'usinage conventionnel. En conséquence, les fabricants et les ingénieurs de conception se tournent vers des procédés d'usinage modernes. L'usinage par décharge électrique (EDM : Electrical Machining Discharge) est l'un des plus utiles de ces procédés.

L'acier AISI 1095 est le matériau de choix le plus populaire pour une construction, à la fois économique et écologique. Il possède de très bonnes propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la résistance à la fatigue, légèreté (rapport résistance / poids le plus élevé), résistance à la corrosion, tenue à haute température.

L'usinage de l'acier AISI 1095 traité par des méthodes d'usinage conventionnelles présente certaines difficultés, telles qu'une température de coupe élevée et un taux d'usure de l'outil élevé. Ainsi, l'acier AISI 1095 traité est difficile à usiner par un processus d'usinage conventionnel.

Récemment, les industries d'ingénierie ont placé une forte demande pour des procédés de fabrication non conventionnels. qui peuvent être utilisés pour usiner des matériaux à haute

résistance et durs comme l'acier AISI 1095 traité. L'électroérosion (EDM) est l'une des technologies non traditionnelles qui enlèvent les matériaux de la pièce à travers une série d'étincelles électriques qui se produisent entre la pièce et l'outil de coupe en présence de liquide diélectrique.

Depuis plusieurs années, l'usinage par électroérosion est l'un des procédés importants de la fabrication pour l'usinage des matériaux durs qui sont difficiles à usiner par des procédés classiques. Aujourd'hui l'usinage par électroérosion est le processus le plus approprié pour l'usinage de ces matériaux.

Dans ce procédé, l'enlèvement de la matière peut être réalisé en appliquant une impulsion de voltage entre l'outil et la pièce à usiner. Parce que le procédé EDM ne participe pas de l'énergie mécanique, les caractéristiques mécaniques du matériau telles que la dureté, la résistance mécanique, la ténacité, etc. ne touchent pas le taux d'enlèvement de matière. Par conséquent, les matériaux ayant une mauvaise usinabilité tels que les aciers à outils peuvent être également usinés sans grande difficulté par l'EDM.

L'usinage par électroérosion est une procédure d'usinage commune, entre autres pour les aciers. L'étincelle entre l'électrode et la pièce fait localement fondre le matériau pendant le processus EDM. Le liquide diélectrique chasse alors partiellement le matériau fondu. La structure de surface finale est alors constituée de débris et de gouttes de matériau solidifié. La rugosité de surface résultante dépend principalement du courant de pointe du procédé EDM.

Les mécanismes compliqués du processus d'usinage par électroérosion entraînent une difficulté de la détermination de la formule corrélant les paramètres d'entrée du processus et des performances d'usinage. La modélisation et la surveillance du processus peuvent résoudre le problème de la sélection des paramètres et rendre le processus économique.

Il existe un grand besoin pour le développement de méthodes plus précises pour déterminer les performances de l'usinage par décharge électrique (EDM) ainsi que les erreurs liées aux formes usinées.

La surveillance du processus d'usinage est devenue une étape préliminaire dans les processus de la fabrication mécanique en particulier pour l'usinage par électroérosion. Cependant la surveillance du processus d'électroérosion reste un problème mal défini et repose généralement sur des heuristiques qui sont difficile à modéliser. Par conséquent, l'intelligence artificielle peut être appliquée à des processus tels que l'usinage par électroérosion par le développement des modèles de prévision dans lesquelles les expériences et les connaissances des experts jouent un rôle important.

Il est clair que la construction de modèles de prévision des performances de l'usinage par électroérosion dépend non seulement de la méthode utilisée pour la construction des modèles mais également de la procédure expérimentale suivie. La plupart des travaux de recherche scientifiques sur ce sujet utilisent des données inspirées de la littérature, qui nécessitent plus de développement expérimental pour mesurer les performances d'usinage.

Dans la plupart des travaux scientifiques réalisés, deux ou trois performances d'usinage ont été considérées comme des sorties du système de prédiction. De plus, peu de recherches scientifiques ont déjà abordé le problème des erreurs géométriques associées à l'usinage par électroérosion.

Dans cette thèse, sur la base de tests expérimentales de mesure des performances d'usinage par électroérosion et des erreurs géométriques associées à l'usinage des trous, les effets des paramètres d'usinage sur ces performances et ces erreurs sont prédits avec une méthode intelligente basée sur un système d'inférences floues multi-sorties.

La thèse s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur le procédé d'électroérosion ainsi que les paramètres affectant ce procédé.

Le deuxième chapitre traite la procédure expérimentale et les dispositifs expérimentaux utilisés afin de déterminer l'influence des paramètres d'usinage sur les performances d'usinage et la qualité des pièces produites.

Les différents résultats obtenus à partir des essais réalisés sont présentés et discutés dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre aborde l'étude des performances d'usinage, ainsi que la formulation et l'implantation d'un modèle pour la prédiction des performances d'usinage par électroérosion et les erreurs géométriques associées à l'usinage des trous,

Enfin, une conclusion générale, sur le travail réalisé, parachève ce manuscrit.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

I.1 Introduction

L'usinage par décharge électrique (EDM) est l'un des procédés d'enlèvement de matière non conventionnels les plus largement utilisés. Sa caractéristique unique d'utiliser l'énergie thermique pour usiner des pièces électriquement conductrices quelle que soit la dureté a été son avantage distinctif dans la fabrication de moules, de matrices, d'automobiles, d'aérospatiale et de composants chirurgicaux. De plus, l'EDM ne crée pas de contact direct entre l'électrode et la pièce, ce qui élimine les contraintes mécaniques, les vibrations et les problèmes du l'usinage [1]

Dans ce chapitre nous présenterons une synthèse bibliographique. Après quelques définitions et une brève introduction historique, nous présenterons le phénomène physique de base du processus d'usinage. Puis nous étudierons le procédé à l'échelle habituellement utilisée dans l'industrie, que nous appellerons « électroérosion non conventionnelle ».

I.2 Usinage par électroérosion

L'usinage par décharge électrique (EDM) est un processus d'érosion thermique utilisé pour enlever le matériau par un certain nombre de décharges électriques répétitives de faible durée et de forte densité de courant entre la pièce et l'outil, comme illustré à la figure I.1.

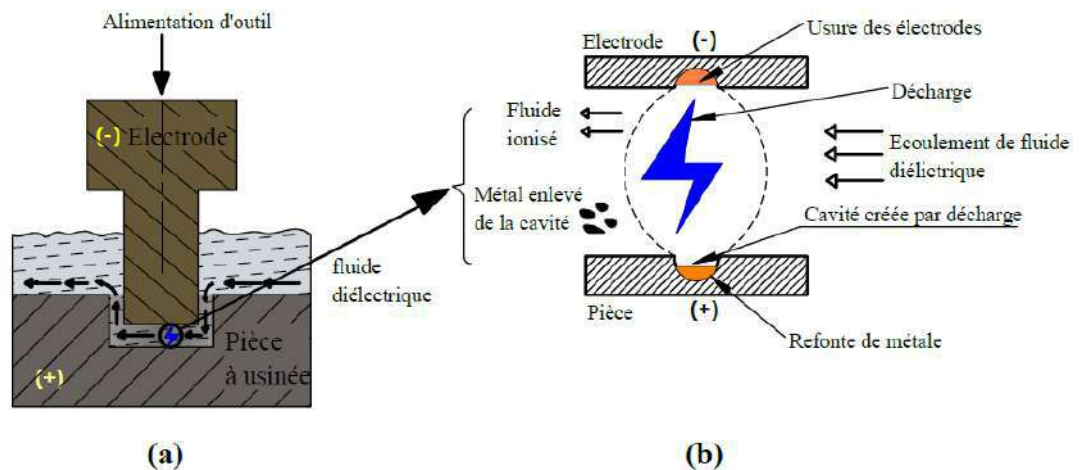


Figure I.1 Processus EDM montrant la décharge et l'enlèvement de matière [2].

L'électrode est déplacée vers la pièce à usinée jusqu'à ce que l'espace soit suffisamment petit pour que la tension appliquée soit suffisamment élevée pour ioniser le diélectrique. Les décharges de courte durée sont générées dans un intervalle diélectrique liquide, qui sépare un outil et une pièce. Le matériau est enlevé avec l'effet érosif des décharges électriques d'un outil et d'une pièce [3]. L'EDM est principalement utilisé pour usiner des alliages et des matériaux résistants aux températures élevées qui sont difficiles à usiner, comme il n'y a pas de contact direct entre la pièce et l'électrode, il n'y a donc pas de forces mécaniques existant

entre la pièce et l'électrode. Les matériaux de grande dureté peuvent être coupés aussi longtemps qu'ils peuvent conduire l'électricité [4]. Les techniques de l'EDM se sont développées dans de nombreux domaines. Les tendances des activités menées par les chercheurs dépendent de l'intérêt des chercheurs et de la disponibilité de la technologie. Dans un livre publié en 1994, Rajurkar [5] a indiqué certaines tendances dans les activités d'EDM : usinage de matériaux avancés, finition de surface de miroirs avec additifs en poudre, EDM et contrôle assistés par ultrasons, et automatisation.

I.3 Définition du procédé d'usinage par électroérosion

Les procédés d'usinage traditionnels sont définis comme un groupe de procédés qui enlèvent les excès de matériau par diverses techniques impliquant une énergie mécanique, thermique, électrique ou chimique ou une combinaison de ces énergies.

Les matériaux extrêmement durs et fragiles sont difficiles à usiner par les procédés d'usinage traditionnels tels que le tournage, le perçage, le façonnage et le fraisage. Les procédés d'usinage non traditionnels, sont utilisés lorsque les procédés d'usinage traditionnels ne permettent pas de réaliser, satisfaisants ou économiques pour des raisons particulières, décrites ci-dessous.

- 1) Matériaux fragiles très durs difficiles à serrer pour l'usinage traditionnel
- 2) Lorsque la pièce est douce ou trop mince
- 3) Lorsque la forme de la pièce est trop complexe.

Les processus d'usinage traditionnels reposent sur un outil ou un matériau abrasif plus dur pour enlever le matériau plus tendre, tandis que les procédés d'usinage non traditionnels tels que l'EDM utilisent une étincelle électrique ou de l'énergie thermique pour éroder les matériaux durs afin de créer la forme souhaitée. Ainsi, la dureté du matériau n'est plus un facteur déterminant pour le processus de l'EDM. Le développement de nouvelles méthodes d'usinage a été toujours l'objectif des scientifiques. Le thème principal de ces efforts est l'amélioration de la qualité de la surface, la réduction des efforts, l'usinage de précision et les considérations économiques. Ces exigences sont remplies par le développement de nouvelles méthodes d'usinage. Dans ces méthodes d'usinage, il n'y a pas de contact direct entre l'électrode et la surface de la pièce, ce qui réduit les forces d'usinage et élimine la nécessité d'utiliser d'un matériau d'outil plus dur. [6]

Les performances et la durée de vie de l'électrode sont améliorées lors de l'usinage de matériaux extrêmement durs grâce au non-contact de l'électrode et de la pièce usinée. Ces nouvelles méthodes d'usinage utilisent différentes énergies de manière contrôlée pendant

l'usinage. Ces techniques d'usinage peuvent être automatisées et programmées pour la fabrication de composants complexes.

Ces processus d'usinage non conventionnels peuvent être classés en fonction du type d'actions d'usinage impliquées dans l'enlèvement de matière de la surface de la pièce. La figure I.2 présente les classifications des procédés d'usinage non traditionnels sur la base de trois interactions, à savoir mécanique, thermique et chimique ou électrochimique.

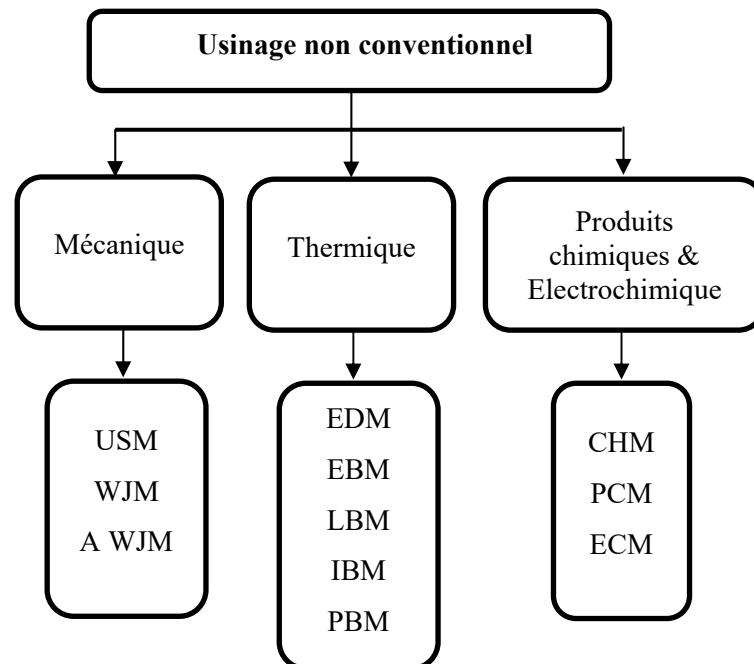


Figure I.2 : Procédés d'usinage non conventionnels [6].

I.3.1 Procédés Mécaniques

L'enlèvement de matière par des procédés mécaniques implique des actions de cisaillement, d'érosion et d'abrasion. Le mécanisme de cisaillement implique un outil de coupe en tant que source d'énergie et l'opération d'usinage est effectuée par contact physique direct de l'électrode avec la pièce. Au cours de ces processus, l'abrasion sur le matériau de travail est créée par la vitesse élevée des particules abrasives ou du fluide. Dans l'usinage par ultrasons (USM) et l'usinage par jet d'eau (WJM), l'enlèvement de matière se produit en raison d'une action mécanique / abrasion (MA). Le milieu d'usinage est constitué de particules solides en suspension dans un milieu abrasif dans le premier tandis qu'un jet de fluide à haute pression est utilisé dans le second.

I.3.2 Processus thermiques

Ces procédés impliquent l'utilité d'un chauffage intense localisé pour la fusion et la vaporisation du matériau à la surface de la pièce. Les sources d'énergie utilisées peuvent être l'énergie d'étincelle, lors de l'usinage par électroérosion (EDM) et de l'usinage par faisceau

de plasma (PBM), la lumière amplifiée lors de l'usinage par faisceau laser (LBM), les électrons dans le cas de l'usinage par faisceau électronique (EBM) ou les ions pour le faisceau ionique Usinage (IBM). Chaque processus nécessite un type de support d'usinage différent.

I.3.3 Procédés chimiques et électrochimiques

Ces processus impliquent l'enlèvement de la matière par le déplacement des ions. À partir de ces processus, les processus chimiques impliquent l'enlèvement des matériaux par dissolution chimique (CD), tandis que les procédés électrochimiques utilisent la dissolution électrochimique pour les éliminer. Le fraisage chimique (CHM) et l'usinage photochimique (PCM) sont des exemples d'usinage chimique. L'usinage électrochimique (ECM) utilise l'action de dissolution électrochimique pour éliminer le matériau par transfert d'ions dans une cellule électrolytique.

I.4 Principe du procédé

Dans l'EDM, une différence de potentiel est appliquée entre l'outil et la pièce. L'électrode et la pièce à usinée doivent tous deux être conducteurs d'électricité. La pièce et l'outil sont immergés dans un fluide diélectrique couramment utilisé : huile EDM, kérosène et eau déionisée, une distance constante est maintenue entre l'outil et la pièce à l'aide de la servocommande, comme illustré à la figure I.3.

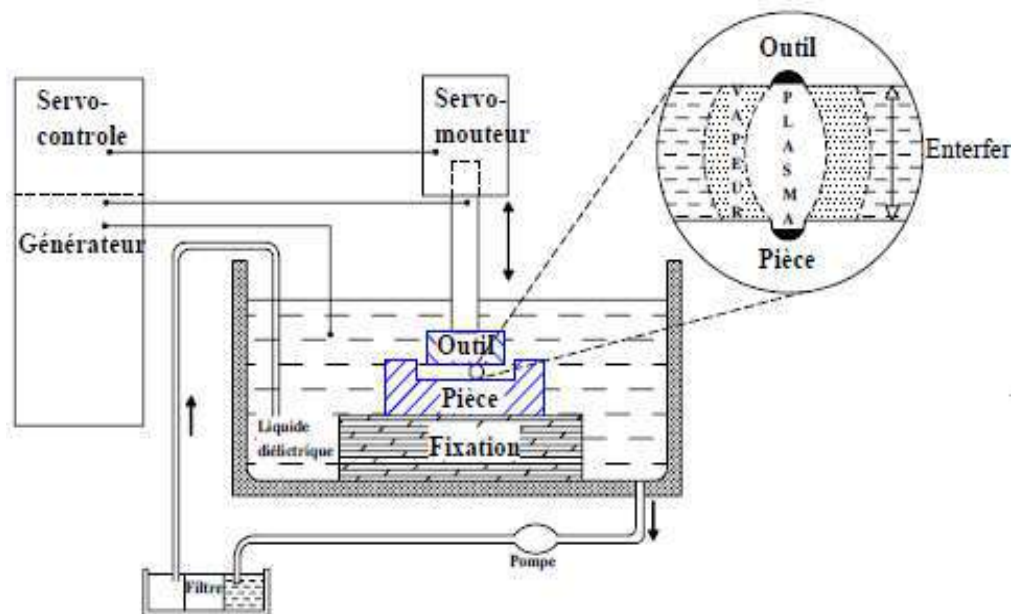


Figure I.3 Principe de l'usinage par électroérosion [7].

Cette distance est déterminée par la tension de claquage (breakdown voltage) du milieu diélectrique (tension pour laquelle le milieu diélectrique passe d'un état isolant à un état conducteur électrique entre l'électrode et la pièce à usiner). [8]

Le processus d'enlèvement de matière pour le procédé d'EDM est un procédé complexe faisant intervenir plusieurs mécanismes électriques et thermiques. Le milieu diélectrique agit à ce moment comme un isolant et le courant électrique ne peut pas circuler entre l'outil et la pièce à usiner (Figure I.4 A). L'électrode est déplacée vers la pièce jusqu'à ce que l'espace soit suffisamment petit pour ioniser le diélectrique. Le milieu diélectrique se polarise, ce qui permet aux charges électriques de se déplacer à travers une colonne de fluide ionisé. Une décharge est ensuite produite à l'endroit où le champ électrique est le plus intense, c'est-à-dire entre les points les plus rapprochés de l'électrode et de la pièce (Figure I.4 B). Au moment de la décharge, une quantité de matériau provenant de l'outil et de la pièce se vaporise et se retrouve en suspension dans le milieu diélectrique (Figure I.4 C).

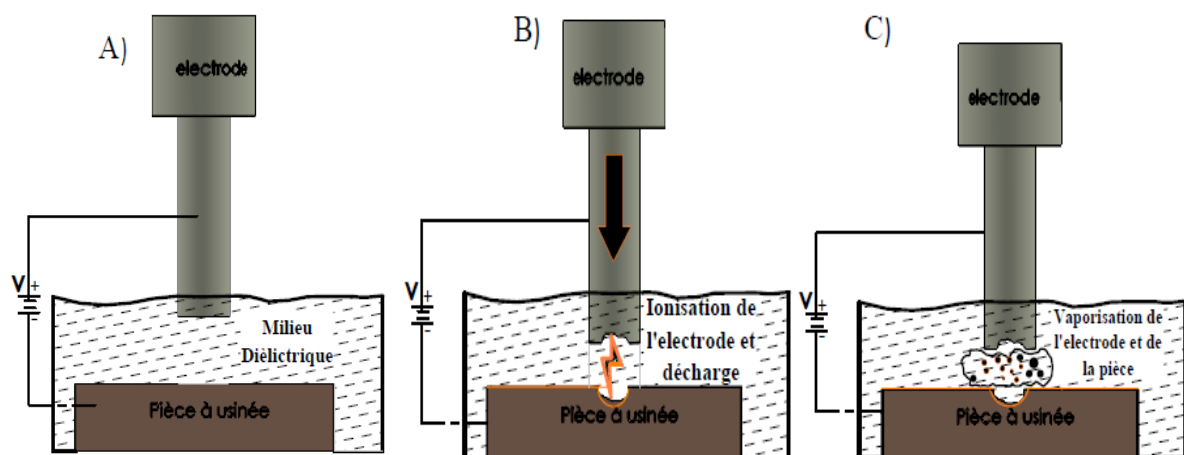


Figure I.4 Principe de fonctionnement du procédé d'électroérosion.

L'électroérosion est utilisée essentiellement de deux façons différentes : la découpe par fil (DCN) et l'usinage par enfonçage [9]. Bien que les deux méthodes utilisent les mêmes principes, il existe encore quelques différences entre elles.

L'usinage par enfonçage (Figure I.5 A) reproduit dans une pièce métallique la forme de l'électrode de façon débouchant (perçage) ou non-débouchant (gravage). La forme donnée à cette électrode est celle qu'aura l'empreinte une fois usinée [10].

La découpe par fil qui consiste à contourner, perpendiculairement à la surface (ou en inclinant légèrement le fil), le profil d'une pièce en déroulant un fil conducteur qui joue le rôle d'électrode ; Elle se fait souvent à partir d'un avant trou dans une pièce, il peut également commencer la découpe à partir d'une face extérieure de la pièce à usiner. La pièce n'est pas nécessairement émergée dans le fluide diélectrique (généralement l'eau déionisée). Pour la coupe au fil, la zone de décharge se trouve entre le côté de l'électrode (fil) et la surface de la pièce à usiner (Figure I.5 B).

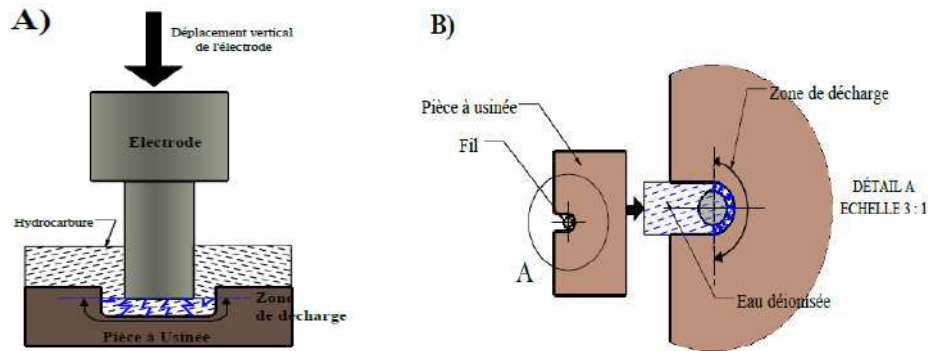


Figure I.5 Deux types de configurations pour l'électroérosion : A) configuration verticale et B) découpe au fil, adapté de [8].

Quant à l'usinage par enfonçage, ce procédé consiste à enlever les matériaux par décharge électrique entre deux électrodes immergées dans un liquide isolant ; l'une des électrodes qui composent l'outil et l'autre une pièce à usiner (**Figure I.6**). Ceux-ci sont séparés les uns des autres par une distance appelée entrefer (gap). L'effet des décharges électriques est le creusement de la pièce, via la création d'un micro-plasma, avec expulsion dans l'entrefer des débris des deux électrodes. Le renouvellement du fluide dans l'entrefer et l'approximation de l'outil et de la pièce permettent de recréer les conditions permettant de nouvelles décharges.

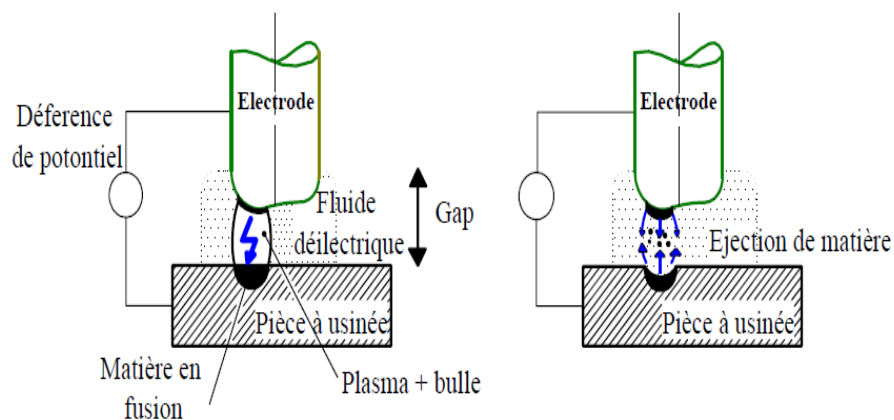


Figure I.6 Principe de l'usinage par électroérosion [11].

I.5 Mécanisme d'enlèvement de la matière

Le mécanisme d'enlèvement de matière du procédé EDM est le principe le plus largement établi est la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique. Pendant le processus d'usinage, les étincelles sont produites entre la pièce et l'outil. L'érosion étant produite par des décharges électriques, l'électrode et la pièce doivent être électriquement conductrices. Ainsi, le processus d'usinage consiste à enlever successivement de petits volumes de matériau de la pièce, fondu ou vaporisé lors d'une décharge. Il est à noter que la

nature physique de l'enlèvement de matière au moyen de décharges électriques est un phénomène complexe,

Plusieurs articles et thèses abordent le déroulement du processus de base. Tout d'abord, Schulze et al. [12] distingue trois étapes majeures dans le processus de décharge comme suit :

- 1) la phase d'amorce
- 2) la phase d'échauffement
- 3) la phase d'enlèvement

Malgré cela, Joseph [13] décrit un processus d'usinage par électroérosion en cinq étapes, celles-ci seront illustrées par une représentation de la tension et du courant aux bornes de l'électrode et de la pièce. Il est important de noter qu'en raison de la courte durée de vie du plasma de sa taille réduite et de la disposition de ses deux surfaces, il est difficile d'utiliser les méthodes classiques de diagnostic du plasma. Ainsi, d'autres méthodes, telles que l'analyse spectrale des émissions lumineuses, qui ont été mises en œuvre notamment par Descoedres et al. [14-16], Ainsi Schumacher et al. [17] sont parvenus à imager les différentes phases de la décharge.

I.5.1 Phase de pré-claquage

La phase de pré-claquage (**Figure I.7**) correspond à l'application d'une différence de potentiel entre les deux électrodes avec une tension de l'ordre de 30 à 250 V [7] de façon à créer un champ électrique puissant (1 à 10 MV/m avec un entrefer de 10 à 500 μm) propice à l'ionisation locale du diélectrique, Au cours de cette phase, des canaux de gaz ionisés, appelés amorces (signes), se développent de manière très rapide et désorganisée d'une électrode à l'autre [18].

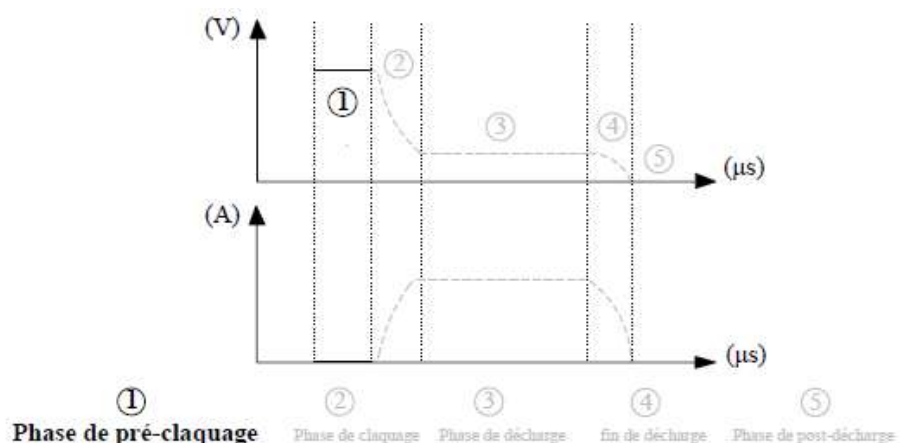


Figure I. 7 Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [13].

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 A. Descoedres [14], lorsque l'amorce atteint l'électrode opposée, toute l'énergie accumulée entre les deux électrodes se décharge en un laps de temps réduit. La tension chute brusquement (**Figure I.8**) sur une durée de 100 ns et le courant augmente. Celui-ci peut atteindre plusieurs ampères. 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.

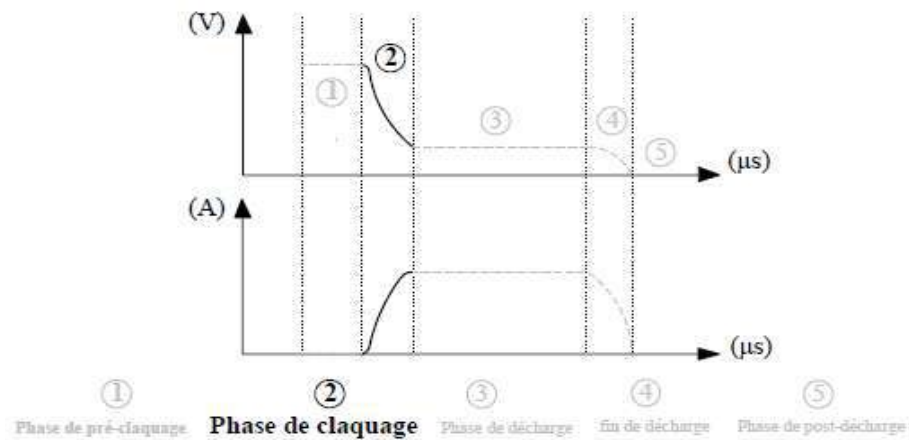


Figure I. 8 Phase de claquage d'après [13].

I.5.3 Phase de décharge

Selon [14, 19, 20], le plasma se développe très rapidement (50 ns) après le claquage et se stabilise. Le courant reste relativement constant (**Figure 1.9**). La lumière émise est particulièrement intense pendant les 500 ns puis elle faiblit. Son intensité dépend du courant.

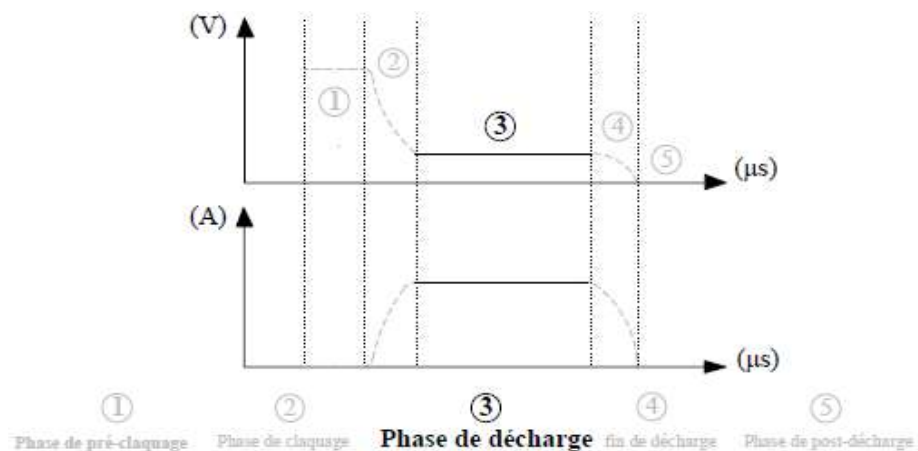


Figure 1.9 Phase de décharge d'après [13].

Pour un entrefer de 10-500 μm , la décharge stimule un volume dont le diamètre est de l'ordre de 100-200 μm [18]. Celui-ci croît légèrement pendant la décharge. La densité de courant est de 10^6 à 10^7 A. cm^{-2} . La chute de tension est localisée près de chaque électrode sur une couche de 10 nm d'épaisseur avec un champ électrique intense de l'ordre de 10^6 V.cm^{-1} .

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.10**). 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.

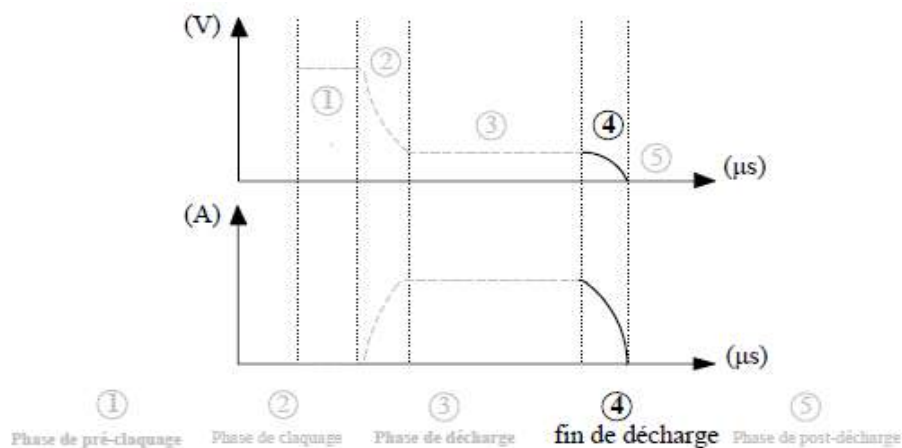


Figure 1.10 Phase de fin de décharge d'après [13].

I.5.5 Phase de post-décharge

Le diélectrique joue un rôle très important au cours de cette étape (figure I.11). Il réduit la température des électrodes entre les impulsions et élimine les débris fondus et nettoie la zone de travail. Leur taille varie d'une expérience à l'autre et dépend des paramètres mais elle est typiquement d'une dizaine de μm [21]. 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.

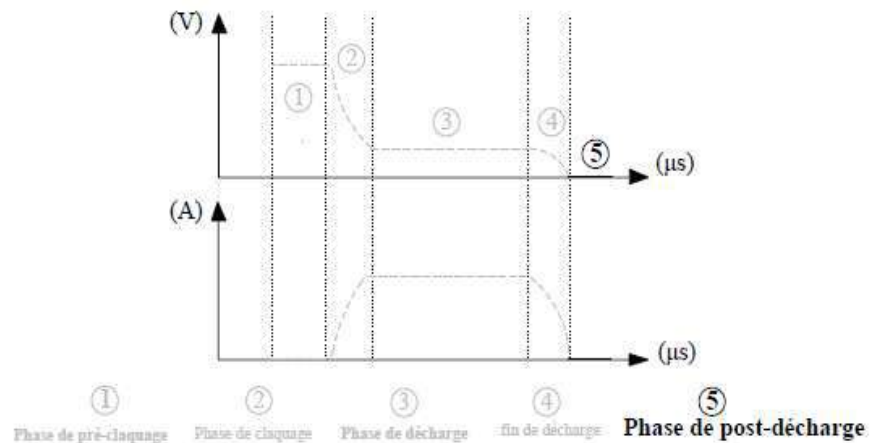


Figure I.11 Phase de post-décharge d'après [13].

I.6 Les différentes variantes d'usinage par électroérosion

Les procédés d'usinage par électroérosion EDM sont classés en fonction de la forme de l'électrode et de son mouvement par rapport à la pièce à usinée [22] (Figure I.12).

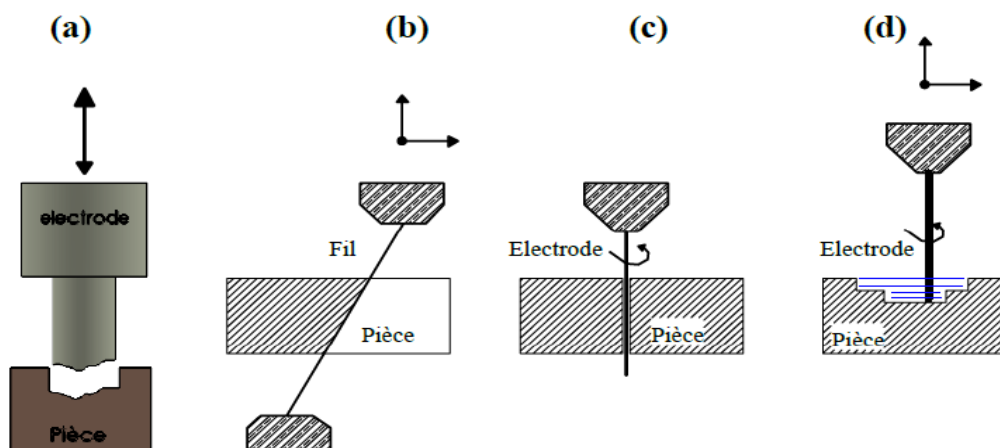


Figure I.12 Différentes variantes d'usinage par EE. (a) Electroérosion par enfonçage, (b) Electroérosion à fil ; (c) perçage par électroérosion et (d) fraisage par électroérosion.

I.6.1 Electroérosion par enfonçage (Die sinking EDM)

Dans le processus d'électroérosion par enfonçage Figure (I.12 a), deux systèmes d'usinage sont appliqués. Dans le premier système, une étincelle électrique contrôlée est répétée jusqu'à ce que la forme de l'électrode soit reproduite sur la surface de la pièce à usiner. Dans le second système, l'électrode se déplace dans l'espace tridimensionnel (3D) pour usiner une forme 3D complexe sur la surface de la pièce [22]. Un hybride des deux systèmes de coupe est toutefois possible, mais reste à signaler. Le procédé d'électroérosion par enfonçage présente une forte augmentation caractéristique de la température (c'est-à-dire de 8000 à 12 000 C°) de la zone d'usinage. Les machines d'EDM sont dotées d'un système de commande unitaire qui contrôle et surveille les variables d'usinage et indique la séquence d'exécution du processus. Une large gamme de matériaux d'électrode est utilisée, dont le choix dépend

également des matériaux de la pièce à usiner ; le cuivre, graphite et le Cupro-tungstène, sont largement utilisés comme matériaux d'électrode dans le processus d'électroérosion par enfonçage. En raison de l'usure de l'électrode, celle-ci est souvent remodelée pour exécuter les opérations de finition. Normalement, ce procédé utilise un fluide diélectrique à base d'hydrocarbures en raison de son effet positif sur le taux d'usure des électrodes (EWR).

I.6.2 Électroérosion à fil (Wire EDM)

L'électroérosion à fil est une autre variante très répandue. Elle consiste à utiliser comme électrode-outil un fil métallique de petit diamètre en mouvement circulation continu suit un chemin bien défini pour couper une pièce, Figure (I.12 b) [1]. Des étincelles discrètes entre le fil et la pièce provoquent une érosion dans la zone d'usinage. Comme dans l'électroérosion par enfonçage, le fil et la pièce n'ont aucun contact pendant l'usinage dans l'électroérosion à fil. De plus, les deux doivent être immergés dans un fluide diélectrique. Le fil utilisé dans ce procédé est un diamètre entre 0.1 et 0.3 mm ; il est généralement constitué de cuivre, de laiton, de matériaux en acier revêtu, ou même de métaux comme le molybdène. Le fil pouvant s'incliner, il est possible de réaliser des pièces avec des dépouilles

I.6.3 Perçage par électroérosion (Drilling EDM)

Il s'agit d'une variante très simple mais très utilisée pour le perçage de trous profonds avec des électrodes cylindriques en mouvement vertical, De plus, elle est creuse, ce qui permet d'envoyer du diélectrique liquide sous pression [23] ; les difficultés étant l'évacuation des débris emprisonnés [24] et l'usure de l'outil. Le mouvement de l'électrode est en plongée (figure I.12 c). L'utilisation de vibrations ou d'ultrasons permet d'améliorer l'efficacité du procédé [25]. D'après M. Sen [26], il est possible de percer des trous de 0,13 à 6,3 mm de diamètre avec un rapport d'aspect de 10 à 20.

I.6.4 Fraisage par électroérosion (Milling EDM)

Le principe du fraisage par électroérosion est une autre variante de l'EDM, dans laquelle une électrode de forme cylindrique standard, Figure I.12 d. Néanmoins, Richard et al [27], ont développé un procédé de fraisage par électroérosion avec des électrodes-outils tubulaires, en bronze ou en cuivre, de diamètre 0,2 à 0,8 mm et de longueur 40 mm. Des mouvements rotatifs aussi bien que planétaires peuvent être appliqués à l'électrode d'outil pour usiner la pièce en fonctionnement par étapes. Ce processus est utilisé sur la configuration de fonçage pour l'usinage de rainures et de profils en escalier pendant l'opération d'usinage,

L'inconvénient se trouve dans la nécessité de compenser l'usure de l'électrode. La géométrie à programmer pour compenser l'usure, est déterminée en fonction d'essais préliminaires. [13]

I.7 Applications de l'usinage par électroérosion

Les applications de l'usinage par électro-décharge (EDM) résident principalement dans l'industrie des moules et matrices, essentiellement lorsqu'elles sont trop dures à usiner (avec des techniques conventionnelles comme le fraisage ou le tournage). Cette section présente certaines des applications d'EDM que l'on trouve couramment dans l'industrie. Il comprend également d'autres intérêts expérimentaux offrant une expansion possible des applications EDM.

I.7.1 Matériaux traités thermiquement

Dans certaines applications, l'EDM a remplacé les procédés d'usinage traditionnels tels que le fraisage d'aciers à outils traités. Le matériau fraisé doit avoir une dureté acceptable inférieure à 30-35 HRC avec des outils de coupe ordinaires [28]. Cependant, l'EDM permet de traiter les aciers à outils à leur dureté maximale avant l'usinage, évitant ainsi les problèmes de variabilité dimensionnelle, caractéristiques du post-traitement [29]. Comme l'EDM n'induit pas de contraintes mécaniques pendant l'usinage, il offre un avantage supplémentaire dans la fabrication de produits complexes. Weng et elle [30] a mené plusieurs expériences réussies impliquant une électrode de 50 μm de diamètre et une multi-électrode pour la production par lots de micro-pièces. La proposition réduit considérablement le temps de production et les coûts de fabrication des électrodes et des pièces.

I.7.2 Micro-EDM

La micro-EDM suit le même principe que l'électroérosion par enfoncement et l'électroérosion à fil ; cependant, elle permet d'enlever de la matière à une micro-échelle pour les composants inférieurs à 100 μm . Ce procédé permet de découper des pièces à micro-échelle, y compris des micro-perçages, des micro-arbres et des microcavités [31]. Le MRR se fera en nanomètres car la pièce usinée est au niveau micro. De manière caractéristique, la micro-EDM fonctionne avec une très faible énergie d'impulsion et nécessite une tension et un courant de plusieurs ordres inférieurs à ceux utilisés dans les procédés d'EDM normaux. Ce procédé peut produire des trous d'un diamètre de l'ordre de 5 μm [1]. L'électroérosion à l'échelle micro est disponible en quatre configurations, à savoir l'électroérosion par enfoncement, l'électroérosion par micro-fil, le perçage et le fraisage. Pour l'électroérosion à microfil, on utilise un fil d'un diamètre inférieur à 20 μm [32].

I.7.3 Céramique

L'EDM des céramiques avancées a été largement accepté par l'industrie de la coupe des métaux en raison des coûts et des caractéristiques d'usinage compétitifs. Il existe différentes qualités de céramiques techniques. Sanchez et al. [33] ont fourni une étude de la littérature sur l'EDM des céramiques avancées, qui ont été couramment usinées par l'USM et le LBM. Dans le même article, ils ont prouvé la faisabilité d'usiner du carbure de bore (B_4C) et du carbure de silicium infiltré de silicium ($SiSiC$) à l'aide d'EDM et de WEDM.

I.7.4 Matériaux composites modernes

Le développement de différents matériaux composites modernes au cours de la dernière décennie a conduit à une expansion des applications d'électroérosion. Yan et al. [34] ont étudié les différents processus d'usinage effectués sur des composites à matrice métallique (MMC) et expérimenté l'usinage de composite $Al_2O_3 / 6061Al$ à l'aide d'EDM rotatif couplé à une électrode en forme de disque. La faisabilité de l'usinage de tôles d'acier composite céramique-métal revêtues de WC-Co (carbure de tungstène-cobalt) par projection plasma a également été examinée [35]. Le revêtement de WC – Co sur des pièces par plasma, la pulvérisation est largement utilisée dans l'industrie automobile et aérospatiale pour prévenir l'érosion et l'usure.

I.8 Paramètres affectant le procédé de l'usinage par électroérosion

De nombreuses tentatives ont été faites par les chercheurs pour l'optimisation de ces paramètres de processus tels que le courant de décharge (I_p), le temps d'activation des impulsions (T_{on}), le temps d'arrêt des impulsions (T_{off}) et la tension en circuit ouvert (V) pour minimiser SR et l'EWR et simultanément l'amélioration du MRR. En règle générale, les paramètres d'usinage sont sélectionnés sur la base de l'expérience de l'opérateur ou des données fournies par les fabricants de machines EDM. Lorsque de telles informations sont utilisées lors de l'usinage par décharge électrique, les performances d'usinage ne sont pas cohérentes. Les données fournies par les fabricants concernant les réglages des paramètres ne sont utiles que pour les aciers les plus couramment utilisés. L'optimisation des paramètres de processus EDM devient difficile en raison du plus grand nombre de variables d'usinage et de légers changements dans un paramètre unique affectent considérablement le processus. Les paramètres importants affectant le procédé d'usinage peuvent être divisés en deux catégories, à savoir les paramètres électriques et non électrique ils sont classés dans la figure I.13.

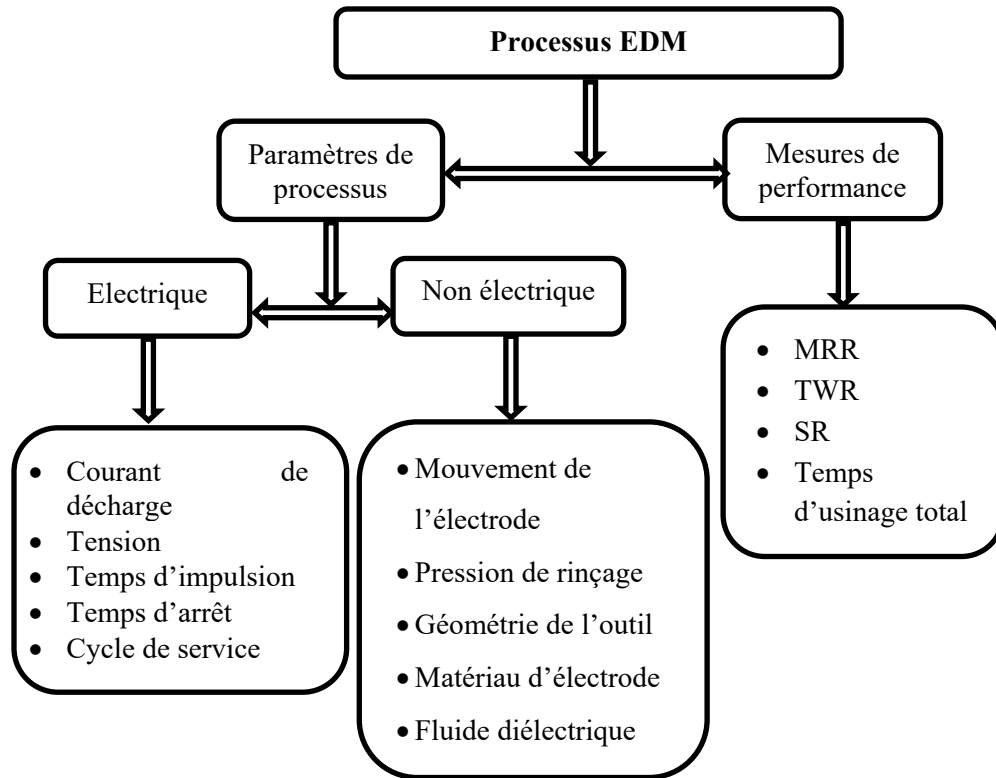


Figure I.13 paramètres de processus d'EDM [36].

I.8.1 Paramètres électriques

Les principaux paramètres électriques sont la tension de décharge, le courant de décharge, la durée et l'intervalle 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 augmentation de la décharge électrique.

a) Courant de décharge

Le courant de décharge est fondamentalement un paramètre d'usinage le plus important dans l'EDM. C'est la quantité d'énergie utilisée dans l'EDM et les mesures en unité d'ampérage. Au cours de chaque impulsion, le courant augmente jusqu'à ce qu'il atteigne un niveau prédéfini, qui est exprimé comme le courant de crête. Dans les procédés d'électroérosion par enfonçage et d'électroérosion à fil, la quantité maximale d'ampérage est régie par la surface de la coupe. Un ampérage plus élevé est utilisé dans les opérations d'ébauche et dans les cavités ou les détails avec de grandes surfaces. Des courants plus élevés amélioreront le MRR, mais au prix de la rugosité de la surface et du taux d'usure de l'outil. Tous ces facteurs sont plus importants dans l'EDM car la cavité usinée est une image miroir de l'électrode de l'outil et une usure excessive nuira à la précision de l'usinage. De nouveaux matériaux d'électrode améliorés, en particulier le graphite, peuvent fonctionner sur des courants élevés sans trop de dommages [1].

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 chute et se stabilise au niveau de l'intervalle 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 [37].

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 (μs). 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 [37]. 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})

C'est la période de temps pendant laquelle aucun usinage n'a lieu, c'est-à-dire la période de temps inactif. Pendant cette période, le fluide diélectrique est autorisé à retirer et nettoyer le matériau fondu de la surface de la pièce, Le cycle est terminé lorsqu'un intervalle d'impulsions suffisant est autorisé avant le début du cycle suivant.

e) Cycle de service

Est un pourcentage du temps de marche par rapport au temps de cycle total pendant l'usinage. Ce paramètre peut être défini comme le rapport entre le temps d'impulsion et le temps de cycle total (temps d'impulsion plus temps d'arrêt). Il indique le degré d'efficacité de

l'opération. Avec l'augmentation du facteur d'utilisation, le temps de fonctionnement des impulsions augmente, ce qui augmente le MRR [38].

$$DC = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{OFF}} \quad (I-1)$$

f) Polarité

La polarité de l'électrode peut être positive ou négative. Mais l'excé 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)

Distance entre l'électrode et la pièce. Cette distance doit être constamment asservie de manière à déclencher les décharges indépendamment de la pollution du milieu [39]. Dans le cas de l'électroérosion par enfonçage, on estime qu'il existe deux types d'entrefer, gap frontal et le gap latéral. La distance outil/pièce qui est principalement dépendante de la tension d'usinage et du diélectrique utilisé (nature, pollution, caractéristiques électriques). Lors d'usinages 3D, il est important et nécessaire de tenir compte des deux entrefers afin de maintenir une résolution d'usinage contrôlée (Figure I.14).

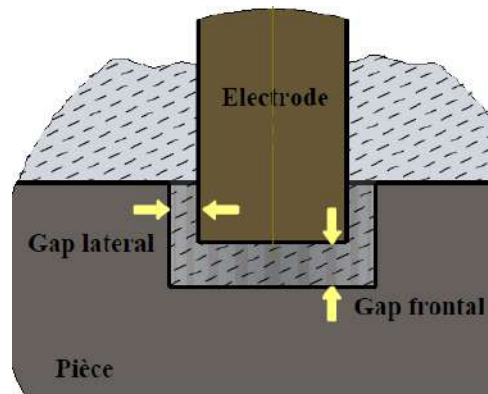


Figure I.14 Entrefer latéral et entrefer frontal [7].

I.8.2 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 [40].

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 [41] 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 [42]. 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 [43].

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 [44].

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. [45].

I.9 Revue de littérature

Une étude approfondie de la littérature a été réalisée pour étudier l'effet paramétrique de l'EDM. Les études menées dans ces articles portent principalement sur les paramètres EDM tels que le courant, la tension, le temps d'impulsion, le rapport cyclique, etc. et comment ceux-ci affectent les caractéristiques d'usinage comme MRR, TWR, Ra, etc.

Hussain Rizvi et al. (2016) [46] ont évalué l'effet du courant de décharge (I_p), du temps d'impulsion (T_{on}), du temps d'arrêt (T_{off}), du facteur de service et de la tension sur le MRR, Ra et sur la fissure superficielle et de la contrainte EDM avec acier AISI 4340. Ils ont utilisé la machine EDM à commande numérique et une électrode cylindrique en cuivre-tungstène de 2 mm de diamètre et de kérosène en tant que fluide diélectrique. La contrainte résiduelle est déterminée par la méthode de diffraction des rayons X. Un microscope électronique à balayage (SEM) est utilisé pour analyser les fissures de surface. La rugosité de surface est mesurée à l'aide d'un instrument de rugosité talysurf. La valeur de MRR et de Ra, ainsi que celle de la fissuration et de la contrainte résiduelle augmentent pour une valeur plus élevée du courant pulsé. Toutefois, lorsque le courant pulsé est trop faible, la densité de surface augmente.

Durgesh Verma et al. (2016) [47] ont évalué l'effet du courant de décharge (I_p), du temps d'impulsion (T_{on}) et de l'intervalle de la tension (V) sur le MRR, TWR et l'élargissement du trou. Ils ont utilisé des pièces d'acier AISI 4147 de 5 mm d'épaisseur et 10 mm de diamètre. Dans cette expérience la machine ZNC EDM est utilisée, du cuivre cylindrique en tant qu'électrode et de l'huile EDM en tant que fluide diélectrique ont été considérés. Dans le cas du MRR, le courant est le facteur le plus significatif avec une contribution de 89,54% et la tension avec une contribution de 2,55%. Les principaux facteurs affectant le TWR sont le courant de crête et le temps d'impulsion. Pour l'élargissement du trou, le courant a une

contribution de 82,67% et la tension une contribution de 2,36%. La conception des expériences est basée sur la matrice orthogonale L9 de Taguchi.

Avinash Sarode et al. (2016) [48] ont évalué l'effet du matériau et de la géométrie de l'électrode dans la performance EDM pour les matrices OHNS en acier. Dans cette expérience la machine EDM et les électrodes en cuivre et en laiton ont été utilisées pour l'usinage des pièces de dimensions 48 x 48 x 8 mm en acier OHNS. Le courant d'entrée, le temps d'impulsion et le cycle de service sont considérés comme paramètre d'entrée et les paramètres MRR, EWR et rugosité de surface sont considérés comme des paramètres de sortie. Ils ont conclu que le cuivre est le meilleur matériau d'électrode car il donne un meilleur état de surface, un MRR élevé et une usure moindre des électrodes, tandis que le laiton est proche du cuivre. Une analyse statistique de la variance (ANOVA) est effectuée pour identifier les paramètres significatifs du processus.

Sumit Raja et al. (2015) [49] ont évalué l'effet de différents paramètres sur l'acier EN 45 avec une électrode de cuivre. Les paramètres d'entrée étaient le courant de crête (I_p), le temps d'impulsion (T_{on}), le temps d'arrêt d'impulsion (T_{off}) et la tension (V) avec trois niveaux différents. Le courant et le temps d'impulsion sont des paramètres hautement significatifs, alors que l'impulsion et le temps sont des facteurs moins importants pour le MRR.

S. Dhanabalan et al. (2015) [50] ont évalué l'effet de différents matériaux d'électrodes sur l'alliage de titane. Dans cette étude la machine SPARKONIX EDM, les électrodes en cuivre, laiton et aluminium de 10 mm de long et 6 mm de diamètre et du kérosène en tant que fluide diélectrique sont utilisés. Le courant est considéré comme paramètre d'entrée tandis que MRR, EWR et la rugosité de surface sont considérés comme paramètre de sortie. Un MRR plus élevé est obtenu en utilisant des électrodes en laiton et en aluminium. Les électrodes en laiton offrent une usure élevée des électrodes, tandis que les électrodes en aluminium et en cuivre offrent une faible usure des électrodes.

Shyam Narayan Pandey et al. (2015) [51] ont évalué l'effet du matériau d'électrode en cuivre, tungstène, cuivre et laiton sur l'usinage des pièces cylindriques en SS-202 de 76 mm de diamètre et de 4 mm d'épaisseur. Ils ont utilisé la machine Electrolux EDM pour réaliser l'ensemble des essais. Le courant d'impulsion (I_p), le temps d'impulsion, le temps d'arrêt d'impulsion sont considérés comme paramètres d'entrée et MRR, EWR en tant que paramètre de sortie. Ils ont trouvé que EWR est moins en utilisant l'électrode de cuivre-tungstène.

Muthuramalingam et al. (2015) [52] ont présenté une modélisation des paramètres du processus et l'influence des paramètres du processus électrique : la forme des impulsions et l'énergie de décharge sur les mesures de performance telles que le taux d'enlèvement de

matière, la rugosité de surface et le taux d'usure des électrodes. D'après les résultats de l'examen, il a été observé que l'efficacité du processus d'usinage peut être améliorée par les paramètres du processus électrique, et seulement moins d'attention a été accordée à l'amélioration de ces paramètres.

Apurba Kumar Roy et al. (2014) [53] ont évalué l'effet de divers paramètres de processus d'usinage par électroérosion sur la rugosité de surface d'un matériau EN41 en utilisant la méthode de Taguchi. Les paramètres d'entrée étaient le courant de crête (I_p), le temps d'impulsion (T_{on}), le temps d'arrêt d'impulsion (T_{off}) et la tension (V). Le courant de décharge a eu un impact plus important sur la rugosité de la surface R_a . L'effet des autres paramètres était significativement moindre et peut être ignoré.

Manas Ranjan Singh et al. (2014) [54] ont étudié l'usinabilité d'Inconel 718 dans l'usinage par décharge électrique. L'usinage est réalisé sur des pièces de l'Inconel 718 d'épaisseur 8 mm et de dimension 10 x 11,5 mm avec une électrode cylindrique en cuivre, laiton et graphite de 13,5 mm de diamètre. Ils ont utilisé la machine d'électroérosion par enfonçage (ECOWIN PS 50ZNC) et l'huile de paraffine pour réaliser l'étude expérimentale. Ils ont conclu que le courant et le temps d'impulsion sont les paramètres importants de l'usinabilité du l'Inconel 718.

Prasad et al. (2014) [55] ont analysé l'effet des paramètres de processus d'EDM sur l'acier AISI D2. Les paramètres d'entrée étaient le courant de crête (I_p), le temps d'impulsion (T_{on}), le temps d'impulsion (T_{off}) et la tension (V). Ils ont trouvé que le temps d'impulsion a une influence importante sur le MRR, la rugosité de surface et l'usure de l'outil.

Pradhan et al. (2014) [56] ont déclaré que l'usinage par décharge électrique est généralement évalué en fonction du taux d'enlèvement de matière (MRR), du taux d'usure de l'outil (TWR), du taux d'usure relatif (EWR) et de la rugosité de surface (SR). Les paramètres de processus qui affectant les mesures de performance du processus d'usinage par EDM sont : le courant de décharge, le temps d'impulsion T_{on} , le temps d'arrêt de l'impulsion T_{off} et le cycle de service.

Singh et al. (2013) [57] Ont étudié l'impact des paramètres de fonctionnement tels que le matériau de la pièce à usiner, le type des électrodes et le type d'environnement cryogéniques et non cryogéniques sur le taux d'enlèvement de métal (MRR) et le taux d'usure de l'outil (TWR). Le traitement cryogénique est utilisé pour augmenter les taux d'enlèvement de matière et réduire l'usure des outils. Il a été constaté que le taux d'usure des outils augmente avec l'augmentation du temps d'arrêt des impulsions, avec l'augmentation du temps d'impulsion de 50 μs à 100 μs produit une augmentation du taux d'enlèvement de matière, avec une diminution du taux d'usure.

Subramanian Gopalakannan et al. (2012) [58] ont évalué l'effet des matériaux des électrodes : cuivre, Copper-tungstène et graphite sur l'usinage par décharge électrique de 316 L et d'aciers inoxydables 17-4 PH. Le paramètre d'entrée était le courant de crête (I_p). Ils ont observé que l'électrode de cuivre donne le meilleur MRR que le graphite, tandis que le cuivre-tungstène donne la plus faible valeur de MRR. Le cuivre-tungstène offre une usure d'électrode relativement faible. Les électrodes en graphite et en cuivre produisent une rugosité de surface comparativement élevée.

Harpuneet Singh (2012) [59] a évalué l'effet des électrodes de cuivre, de chrome et d'aluminium sur l'usinage d'un acier EN-31 sur une machine à décharge électrique à l'aide de la polarité positive. Le Kérosène est utilisé comme diélectrique. Les paramètres d'entrée considérés sont : le courant et le temps d'impulsion et les paramètres de sortie sont : le MRR, TWR, la dureté et la rugosité de la surface. Les résultats indiquent que les électrodes d'Aluminium offrent une rugosité de la surface et une meilleure dureté, tandis que les électrodes en cuivre-chrome offrent un meilleur MRR avec une usure moindre de l'outil. Le taux d'enlèvement de la matière est meilleur pour le cuivre chromé à toutes les valeurs du courant pulsé. La rugosité de la surface augmente avec l'augmentation du courant pour électrode en Aluminium.

Singh et al. (2012) [60] ont utilisés deux matériaux différents de l'électrode : le cuivre et le laiton. Les paramètres d'entrée choisis sont le temps d'impulsion et le temps d'arrêt d'impulsion. Ils ont conclu que taux d'enlèvement de la matière avec les électrodes en laiton augmente avec l'augmentation du temps l'impulsion. Ils ont également constaté que le taux d'enlèvement de la matière avec l'électrode de cuivre diminue de manière significative avec la diminution du temps d'impulsion.

Janmanee et al (2010) [61] ont évalué l'effet de différents matériaux d'électrode dans l'usinage par décharge électrique. Les matériaux utilisés pour l'électrode étaient le graphite, le cuivre-graphite et le cuivre-tungstène. La machine utilisée dans cette étude est la machine CNC FORM-2-LC et les paramètres d'entrée sont : le courant de décharge, temps d'arrêt d'impulsion, temps de circuit ouvert, polarité d'électrode et les paramètres de sortie étaient MRR, EWR, Ra. L'électrode en graphite donne le meilleur MRR et le meilleur Ra mais avec un EWR élevé.

Sharma et al. (2010) [62] Ont étudié les effets des paramètres de la poudre d'aluminium alliée sur : MRR, TWR, taux d'usure en pourcentage et rugosité de la surface en utilisant un EDM à polarité inversée. Les paramètres d'entrée de l'étude sont la taille des grains de

concentration et la poudre d'aluminium. Ils ont constaté que TWR et MRR augmentaient avec l'augmentation de la concentration.

M.P. Jahan et al. (2009) [63] ont étudié le micro-EDM de WC en utilisant différents matériaux d'électrodes. Le paramètre d'entrée était l'intervalle de la tension et les paramètres de sortie étaient : MRR et EWR. Parmi les électrodes testées, ils ont conclu que l'électrode en Ag-W est le meilleur choix pour la micro-électroérosion de finition du WC. Il permet de réduire les valeurs de Ra et de Rmax, ainsi que l'usure des électrodes.

Sameh S. Habib (2009) [64] a étudié paramètres en EDM par l'approche RSM. Les paramètres d'entrée étaient le temps d'impulsion, le courant de pointe, l'intervalle de la tension et les paramètres de sortie étaient le taux d'enlèvement de matière, le taux d'usure des électrodes et l'état de surface. Ils ont constaté que MRR et EWR augmentent avec l'augmentation du nombre d'impulsions, du courant de pointe et relativement avec l'intervalle de la tension.

Lajis et al. (2009) [65] ont utilisé la méthode Taguchi pour étudier l'usinage par électroérosion des céramiques et des carbures de tungstène avec une électrode en graphite. Ils ont utilisé la méthode Taguchi pour préparer le plan expérimental et analyser l'impact de chaque paramètre. Le courant de crête, la tension, la durée de l'impulsion et l'intervalle entre impulsions sont choisis comme paramètres d'entrées. Ils ont constaté que ces paramètres ont un effet significatif sur les caractéristiques d'usinage, tels que : le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure des électrodes (EWR) et la rugosité de surface (Ra). L'analyse par la méthode de Taguchi montre que, d'une manière générale, les courants de crête affectent significativement le EWR et SR. Tandis que la durée des impulsions affecte principalement le MRR.

Boujelbene et al. (2009) [66] ont mené des expériences sur deux machines à décharge électrique pour obtenir un état de surface élevé et d'autres aspects de l'usinage. En faisant des expériences, ils ont découvert que lorsque l'énergie de décharge augmentait, l'impulsion augmentait, la surface devenait plus rugueuse et l'épaisseur de la couche blanche augmentait. Cela se produit à cause de la fusion et de la refonte du matériau.

Payal (2008) [67] a étudié l'effet des paramètres d'enlèvement de matière sur la rugosité de surface (Ra) en ce qui concerne l'analyse structurelle des surfaces affectées. Des travaux pratiques sur des outils en cuivre, en laiton et en fluide diélectrique avec du kérosène en tant qu'électrode en graphite ont été réalisés sur un acier à outils N-31. Une analyse détaillée des caractéristiques structurelles avec microscope électronique à balayage de surface usiné (SEM) et du microscope optique a été réalisée en utilisant le mode d'usinage par électroérosion

(EDM) par micrographie de surface, en comprenant que les échantillons de surface en masse fondue ont été retirés de brouillard d'électrode différent.

Lin et al. (2008) [68] ont étudié l'effet de l'énergie de décharge électrique sur l'usinage de carbure de tungstène cimenté en utilisant une électrode de cuivre électrolytique. Les paramètres d'usinage de l'EDM ont été variés afin d'explorer les effets de l'énergie de décharge électrique sur les caractéristiques d'usinage, telles que MRR, EWR et la rugosité de la surface. De plus, les effets de l'énergie de décharge électrique sur les couches affectées thermiquement, les fissures superficielles et les débris d'usinage ont également été déterminés. Les résultats expérimentaux montrent que le MRR augmente avec la densité de l'énergie de décharge électrique.

Fred L. Amorim et al. (2007) [69] ont évalué l'effet du comportement d'électrodes en graphite et en cuivre (diamètre de 20 mm) sur l'usinage de finition par enfonçage (EDM) des pièces en 'acier à outils AISI P20 de 25 mm de largeur et 15 mm d'épaisseur. La machine ROBOFORM 30 a été utilisée et les paramètres d'entrée étaient le courant de crête (I_p), le temps d'impulsion (T_{on}) et l'intervalle de la tension (V_g) et les paramètres de sortie étaient MRR et TWR. Les taux d'enlèvement de la matière les plus élevés ont été obtenus avec des électrodes de graphite négatives.

K.M. Patel et al. (2007) [70] ont étudié les caractéristiques d'usinage, de l'intégrité de la surface et du mécanisme d'enlèvement de matière du Al_2O_3 -SiCw-TiC avec EDM. Ils ont conclu que la rugosité de la surface et la couche de refonte augmentaient avec le courant et le temps l'impulsion. Le matériau est enlevé en raison de la fusion et de l'évaporation par dissociation et, dans une certaine mesure, de l'oxydation et de la décomposition à courant réduit et de l'orthographe thermique à courant plus élevé.

M. Kiyak et al. (2007) [71] ont effectué des expériences sur la machine AJANEDM982. Ils ont découvert qu'avec un courant et un temps d'activation faibles et un temps d'impulsion élevé, une finition de surface élevée pouvait être produite, mais le MRR serait faible. Cette combinaison est utilisée dans les opérations de finition. Avec un temps d'impulsions élevées, un courant d'impulsion et un temps d'impulsion faibles, ils ont obtenu un MRR élevé, mais une finition de surface faible.

Hwa -Teng Lee et al. (2004) [72] ont fait des expériences et ont découvert que la valeur du MRR et de la rugosité de surface augmentaient avec l'augmentation des valeurs du courant pulsé, mais qu'après certaines valeurs, le MRR et le Ra diminuaient en raison de la dilatation du plasma électrique. Le courant d'impulsion affecte la densité de fissure de surface tandis que la durée d'impulsion influence le degré d'ouverture de la fissure. La contrainte résiduelle

induite par le perçage de trous augmente avec les valeurs croissantes du courant pulsé et du temps pulsé.

Y.S. Liao et al. (2004) [73] ont conçu un circuit générateur d'impulsions en retirant le circuit de décharge haute tension du circuit d'origine. Ils ont constaté qu'un circuit générateur d'impulsions à courant continu de polarité positive peut permettre d'obtenir une meilleure rugosité de surface. Ils ont fait une expérience en faisant varier différents paramètres tels que la tension, le courant, la capacité, des valeurs appropriées ont été choisies et une rugosité de surface de $0,22 \mu\text{m}$ est obtenue.

Rebello et al. (2000) [74] ont présenté une étude expérimentale sur l'effet des paramètres de l'EDM sur le taux d'enlèvement de matière (MRR) et la qualité de surface lors de l'usinage d'alliages de cuivre / béryllium à haute résistance. Les paramètres de traitement pour les régimes rugueux, de finition et de micro-finition ou de polissage ont été analysés

J.C. Rebello et al. (1998) [75] ont réalisé une expérience sur la machine ROBOFORM 200 - «Charmilles» en utilisant l'acier martensitique comme pièce à usiner. Ils ont varié le temps et le courant d'impulsion. De nombreuses techniques expérimentales ont été utilisées pour évaluer l'intégrité de surface. Ils ont constaté que la pénétration et la profondeur des fissures dans la couche de refonte augmentent avec le courant, une couche blanche de cémentite formée au niveau de la couche blanche et différentes zones affectées par la chaleur ont été observées, en fonction de l'énergie d'usinage. La contrainte résiduelle de nature tendue est également déterminée.

Zhang et al. (1997) [76] ont proposé un modèle empirique, utilise à la fois le courant de pointe et la durée d'impulsion, pour l'usinage de la céramique. Ils ont rendu compte que le courant de décharge avait un effet plus important sur le MRR ; tandis que le temps d'impulsion a plus d'influence sur Ra et la couche blanche.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du processus d'usinage par électroérosion et nous avons mis l'accent sur les différents paramètres de ce procédé. Nous avons présenté également une synthèse bibliographique sur les travaux traitant le problème de sélection des paramètres d'usinage par électroérosion.

Chapitre II

Procédure Expérimentale

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous illustrons quelques propriétés physico-chimiques de l'acier à outils, utilisé pour l'ensemble du travail mis en œuvre pour la réalisation des expériences suivi par une présentation des différents matériels et équipements utilisés pour le suivi de l'évaluation du taux de l'enlèvement de la matière, Taux de l'usure de l'outil, l'état de surface et différentes tolérances géométriques (circularité, cylindricité).

Nous présentons également la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

II.2 Description du matériel utilisé

II.2.1 Le substrat utilisé

Comme substrat, nous avons utilisé un acier à outils à usage courant AISI 1095, spécialement conçu pour la fabrication de moules, l'outillage, les plaques d'empreinte, les poinçons et les matrices, ils sont de plus utilisés dans la fabrication de pièces finies ou semi-finies qui sollicite une résistance à l'usure élevée.

a) Composition chimique

La composition chimique de l'acier AISI 1095 est donnée dans le tableau II.1

Tableau II.1 Composition chimique de l'acier AISI 1095 en % massique

Eléments chimiques	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	P (%)	S (%)
AISI 1095	de 0.95 à 1.05	de 0.15 à 0.30	de 0.15 à 0.30	≤ 0.25	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.030	≤ 0.020

b) Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques de l'acier AISI 1095 sont données dans le tableau II.2

Tableau II.2 Caractéristiques métallogique de l'acier AISI 1095

Trempe à Bain de Sel à 820 °C et Revenu A 650 °C	Sorbite
Recuit à 727 C°	Perlite + FE3 C2 (0.8P+ 0.2 FE3 C2)
Trempe à Bain de Sel à 820 °C et Revenu à 400 °C	Troustite de Revenu
Trempe à Bain de Sel (790 à 800 °C)	Structure : Martensite
Revenu (180 à 200 °C)	Structure : Martensite de Revenu
Dureté (HRc) Après Trempe	de 60 à 65 HRc

c) Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 1095 sont données dans le tableau II.3

Tableau II. 3 Caractéristiques Mécaniques de l'acier AISI 1095

Re (N/mm ²)	Rt (N/mm ²)	A (%)
(350 ÷ 550)	(600 ÷ 650)	≥ 20

Les pièces de travail utilisées dans cette étude sont livrées à l'état normalisé, permet après une trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (60 à 65 HRC) ces dernier sont conçue pour une dimension de (50 x 30 x 5) mm ± 0,2 (figure II.1) avec une surface supérieure qui a été hautement définie pour obtenir une véritable planéité, et une densité de 7,78 g / cm³.

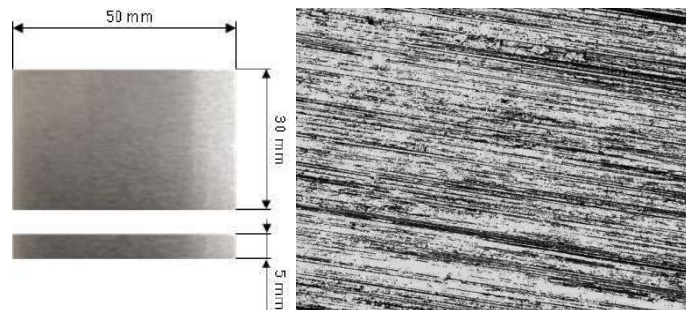


Figure II.1. Pièce de travail

II.2.2 Electrodes

Les électrodes utilisées dans cette étude est du Cupro-tungstène (Figure II.2) un alliage fabriqué à partir du procédé de métallurgie des poudres, à 40 % de cuivre (Cu), avec une taille de grain <150 (μ) et 60 % de tungstène (W) a une taille de grain moyenne comprise entre 20 (μ) et 100 (μ). Cet alliage a des propriétés physiques uniques. Un haut niveau de résistance aux températures est l'un des avantages le plus important du tungstène, tandis que le cuivre augmente la conductivité thermique et électrique.



Figure II.2 Electrodes utilisées pour les expériences

Les électrodes ont été usinées de manière à obtenir une longueur de 50 mm et un diamètre de la partie travaillante 10 ± 0.05 mm, (Figure II.3)

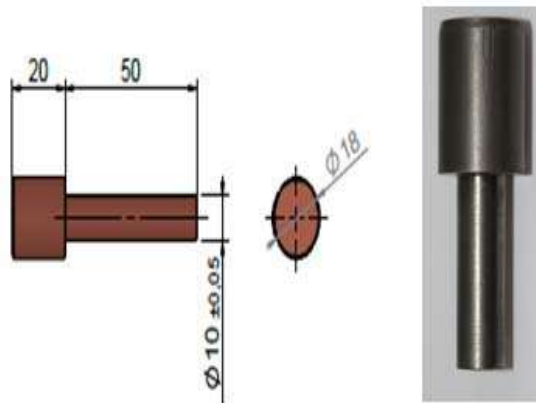


Figure II.3 Electrode Cu-W

II.2.3 Performances chimiques et physiques

Les performances chimiques et physiques de différentes électrodes en cuivre tungstène sont données dans le tableau II.4

Tableau II.4 Performances chimiques et physiques d'électrodes en cuivre tungstène

Caractéristiques	Densité (g/cm ³)	Dureté (HB ≥)	Résistivité électrique	Conductivité Electrique (IACS% ≥)	Résistance à la flexion (Mpa ≥)
Cu50W50	11.85	115	3.2	54	/
Cu45W55	12.3	125	3.5	49	/
Cu40W60	12.75	140	3.7	47	/
Cu30W70	13.8	175	4.1	42	790
Cu25W75	14.5	195	4.5	38	885
Cu20W80	15.2	220	5.0	34	980
Cu15W85	15.9	240	5.7	30	1080
Cu10W90	16.75	260	6.5	27	1160

II.2.4 Préparation des électrodes

Nous apportons de la poudre de tungstène (figure II.4) et la mélangeons avec de la colle pour l'augmentation de la cohésion après pressage, afin de permettre une manipulation sans casse. On aura une bonne répartition de densité lors du pressage, car elle diminue la friction entre les grains et les parois de la matrice.



Figure II.4 Poudre de tungstène

La colle est composée de caoutchouc et d'essence. Pour 1 kg de mélange de poudre, on ajout 100 ml de colle, (voir Figure II.5)



Figure II.5 La colle (caoutchouc + essence)

II.2.5 Compression uniaxiale

La compression à froid des poudres métalliques s'effectue en trois phases (le remplissage, la compression, l'éjection du comprimé) et avec un moyen d'outillage comprenant une matrice et deux poinçons, Figure (II.6) placée sur une table de presse hydraulique. Figure (II.7)

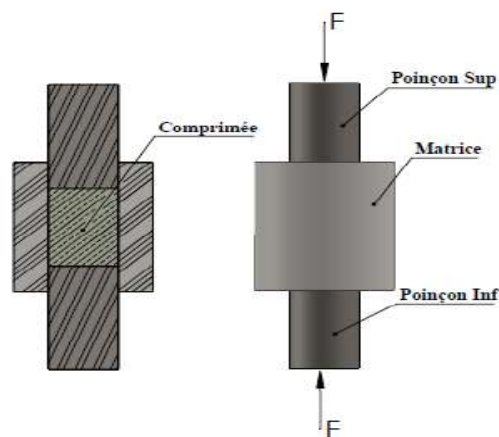


Figure II.6 Les types de compression uniaxiale [77].

Nous remplissons l'espace dans la matrice par la poudre de tungstène, puis nous nous assurons que la poudre a une distribution uniforme à l'intérieur de la matrice.

Le poinçon supérieur ferme la en appuyant sur la poudre de tungstène puis les deux poinçons convergent l'un vers l'autre générant une pression de 14 à 15 MPA.



Figure II.7 Presse hydraulique

II.2.6 Frittage par infiltration

La dernière étape du procédé d'obtention des électrodes consiste à poser des poudres ou des plaques minces de cuivre (Cu) dont le pressage de tungstène (W) est faible ou bien modéré (moyen) ce qui provoque de porosité lors du frittage, le cuivre infiltre dans le tungstène pour joindre les grains.

La durée de vie de l'électrode dépend de l'infiltration de cuivre dans le tungstène, et les propriétés physiques tel que la densité surtout et la dureté aussi les propriétés chimiques tel que la pureté, la granométrie.

Le frittage est effectué à une température plus de 1200°C. Généralement, le cycle de frittage comprend une période de chauffage, puis une période isotherme et enfin un refroidissement, figure II.8. Les taux de chauffage et de refroidissement doivent être contrôlés pour éviter la fissuration des pièces. [78].

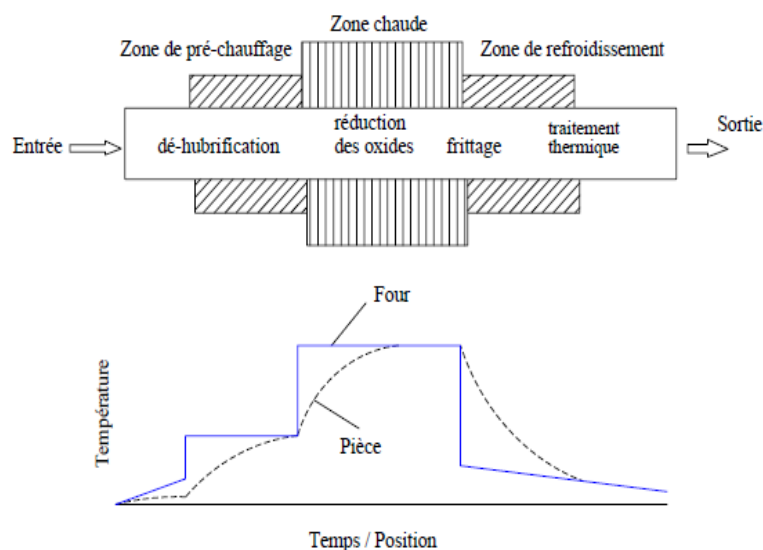


Figure II.8 Les opérations séquentielles dans un four de frittage [78]

Après avoir terminé le frittage et obtenu les pièces comprimées, comme le montre la figure suivante, Figure II.9



Figure II.9 Comprimée Cupro-tungstène

Et ensuite à l'aide d'une machine de tournage, nous obtenons la forme finale de l'électrode comme indiqué dans la figure II.10



Figure II.10 Electrode

II.3 La machine de l'électroérosion

Après la préparation des électrodes, nous operons la machine pour l'usinage par électroérosion (EDM). La machine peut être divisée en plusieurs sous-parties fonctionnelles (figure II.11).

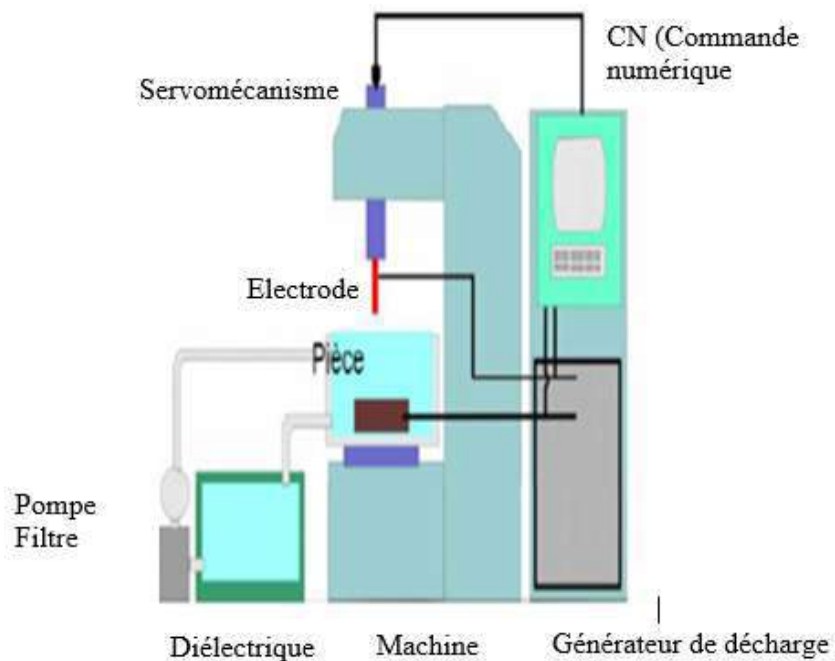


Figure II.11 Eléments d'une machine

Les expériences ont été réalisées dans des conditions industrielles en utilisant une machine-outil ONA NX4 (charge connectée 13.7 KVA, dimension de la table de travail 800 x 600 mm, hauteur de travail maximale 400 mm) qui est une machine à enfoncer comme indiqué sur la figure II.12



Figure II.12 machine-outil ONA NX4

L'EDM est un processus électrothermique qui nécessite un milieu diélectrique, donc la pièce et l'électrode doivent être électriquement conductrice. L'outil est utilisé comme cathode (électrode négative) et la pièce comme anode (électrode positive). Le mécanisme de l'EDM est accompli par la fusion et la vaporisation, de sorte que l'enlèvement de matière a lieu en raison de la génération à haute température ($10000-12000^{\circ}\text{C}$) sur les électrodes (pièce et outil) (figure II.13) causée par l'ionisation (génération d'étincelles) entre l'entrefer des électrodes. Le fluide diélectrique utilisé est le Kérosène.

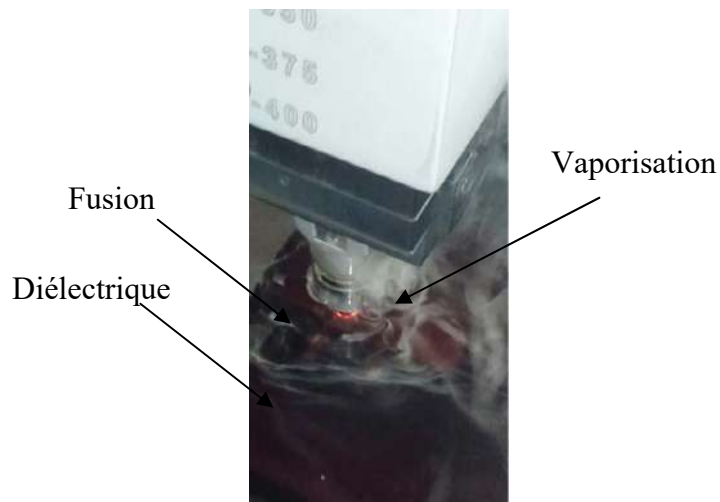


Figure II.13 Génération d'étincelles

Le matériau se retire sous forme de débris de l'outil et de la pièce à usiner et nous obtenons l'empreinte négative de l'outil sur la pièce, comme illustré à la figure II.14.



Figure II.14 Pièce à usinée

II.4 Appareils de mesures utilisées

II.4.1 La machine de mesure tridimensionnelle

La Machine de mesure de coordonnées OPTIV Performance 443 Dual Z (MMT) fabriquée par HEXAGON METROLOGY SAS est utilisée pour la mesure de la circularité. Cette machine combine la mesure optique et tactile dans un seul système, il prend en charge les mesures multi-capteurs à l'aide du capteur de vision, du déclencheur tactile et de la sonde de balayage (figure II.15).

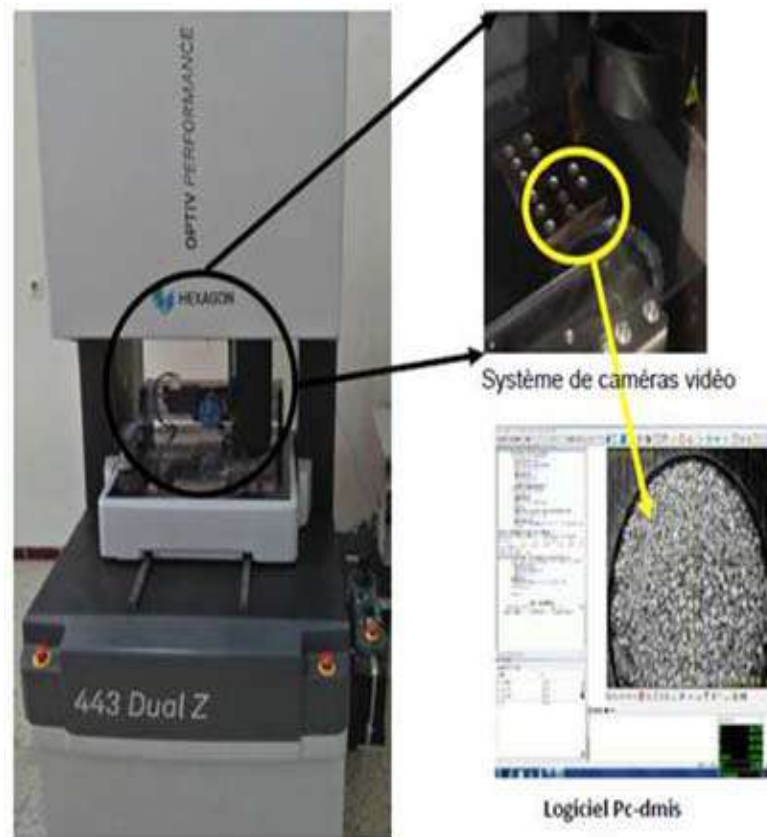


Figure II.15 Machines à mesurer tridimensionnelle 443 Dual Z

Le logiciel de mesure est PC-DMIS Vision. La figure II.16 montre la machine de mesure de coordonnées utilisée pour l'enquête et les résultats d'échantillonnage obtenus en utilisant respectivement la MMT. Il translate les commandes de haut niveau requises pour mesurer des pièces en étapes détaillées nécessaires pour contrôler la machine de mesures de coordonnées (MMT). Les palpeurs vision fournissent une façon rapide d'obtenir beaucoup de points mesurés pour un seul élément, cette méthode est appelée méthode de palpation sans contact. [79]

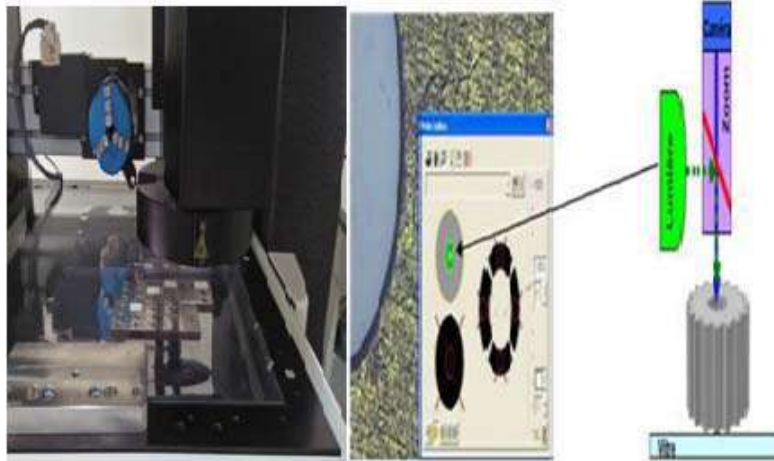


Figure II.16 Anneau épiscopique : (Anneau concentrique à la caméra) [79]

II.4.2 Appareil de mesure de la densité

Afin de déterminer la masse volumique de l'électrode et de la pièce à usiner nous avons utilisé deux méthodes :

La première méthode consiste à utiliser un densimètre : le densimètre digital type **Voyager Pro Modèle : VP6102 C**. figure II.17

Dans la deuxième méthode nous utilisons un dispositif YDK01 avec une balance de type BA 210S, figure II.18. Cette méthode est basée sur le principe d'Archimède :

Un solide immergé dans un liquide est soumis à la force appelée poussée hydrostatique. La valeur de cette force est égale au poids du volume liquide déplacé par l'échantillon. Avec une balance hydrostatique qui permet aussi bien les pesées dans l'air que dans le liquide, il est possible de :

- Déterminer la masse volumique d'un solide si l'on connaît la masse volumique du liquide provoquant cette poussée hydrostatique :

$$\rho = \frac{W(a)\rho(l)}{W(a) - W(l)} \quad (\text{II.1})$$

- Déterminer la masse volumique d'un liquide si l'on connaît le volume du solide immergé :

$$\rho(l) = \frac{G}{V} \quad (\text{II.2})$$

Avec

ρ : Masse volumique du solide

$\rho(l)$: Masse volumique du liquide

W(a) : poids du solide dans l'air

W (l) : poids du solide dans le liquide

G : poussée hydrostatique appliquée au solide immergé

V : volume du solide.



Figure II.18 Dispositif YDK01



Figure II.17 Densimètre digitale

La pièce et l'électrode ont été pesées avant et après l'usinage de chaque expérience sur une balance AP 250 D figure II.19 de précision 0.0001g pour déterminer la perte du poids. Ces valeurs ont été ensuite utilisées pour calculer le taux d'enlèvement de matière et le taux d'usure de l'outil.



Figure II.19 Balance AP 250 D

II.4.3 Appareil de mesure de dureté

Les mesures de dureté Rockwell (HRC) ont été effectuées avec une pointe de diamant en forme de cône et charge de 150N. L'échelle HRC a été utilisée puisqu'elle couvre une plage très intéressante de valeurs de dureté, figure II.20.



Figure II.20 Duromètre digital AFFRI

II.4.4 Mesure de la rugosité

Pour mesurer la rugosité des surfaces de différentes pièces avant l'usinage, un pré-polissage a été effectué à l'aide des papiers abrasifs de granulométrie (400, 800 et 1000) [80]. Le rugosimètre (Mitutoyo-sufftest-211), présenté sur la figure (II.21) est composé d'un stylet qui se déplace mécaniquement sur une surface pour enregistrer une image de la rugosité de la surface sur une longueur d'échantillonnage déterminée, tableau (II.5).

Tableau II.5 les différents états des surfaces

	▽3	▽4	▽5	▽6	▽7	▽8	▽9	▽10	▽11	▽12
Ra	20	10	5	2.5	1.25	0.63	0.32	0.16	0.08	0.04
(μm)	13	6.7	3.3	1.67	0.8	0.4	0.2	0.1	0.053	0.027
Rz	80	40	20	10	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2
(μm)	54	25	13	7.5	4.1	2	1.0	0.6	0.27	0.13

Avec

Ra (μm) : Représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à OX.

Rz (μm) : écart moyen entre le pic le plus haut et le creux le plus bas sur un certain nombre de longueurs analysées.



Figure II.21 Rugosimètre (Mitutoyo-sufftest-211).

II.5 Préparation des essais

La préparation des essais se fait à travers les étapes suivantes :

II.5.1 Polissage et préparation des surfaces

Après traitement thermique Les pièces ont été usinées sur une rectifieuse plane, ensuite un polissage manuel avec des papiers abrasifs est appliqué sur ces pièces afin d'obtenir un bon état de surface (Figure II.22).



Figure II.22 Disque de polissage manuel

II.5.2 Montage de la pièce

La première étape pour l'usinage est la préparation de la pièce. Le montage est effectué à l'aide d'un étau comme il est illustré dans la figure II.23

Chaque pièce possède des points de référence pour l'érosion qui sont appelés cavités. L'usinage effectué dans chaque cavité a ses propres caractéristiques qui sont déterminées par des programmes d'érosion ou cycles d'usinage spécifiques.

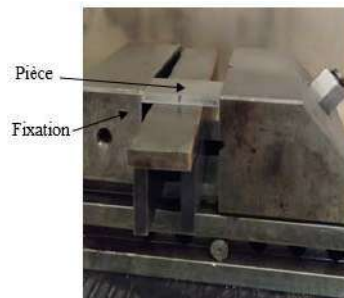


Figure II.23 Fixation de la pièce

II.5.3 Montage de l'électrode

L'électrode utilisée est fixée à l'aide d'un porte-outil comme il est illustré dans la figure II.24. La pièce à usiner et l'électrode doivent être en position perpendiculaire pour un usinage correct.

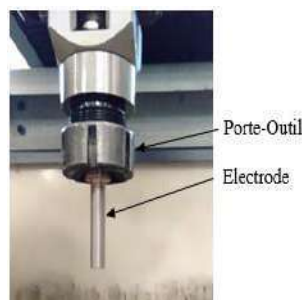


Figure II.24 Positionnement de l'électrode

II.5.4 Préparation du niveau d'érosion

Quand on veut réaliser une cavité, il doit établir auparavant le niveau d'érosion avec lequel nous allons travailler. Pour ce faire nous placerons d'abord la pièce dans le réservoir puis nous remplissons le réservoir jusqu'à ce que le diélectrique couvre le point d'érosion sur plus de 50 mm, à ce moment, si on veut seulement faire cette érosion, la machine exécutera l'érosion et ce niveau sera stocké. Avec la première instruction Quand le diélectrique aura atteint le niveau, le programme s'exécutera, et réalisera la première érosion (figure II.25).

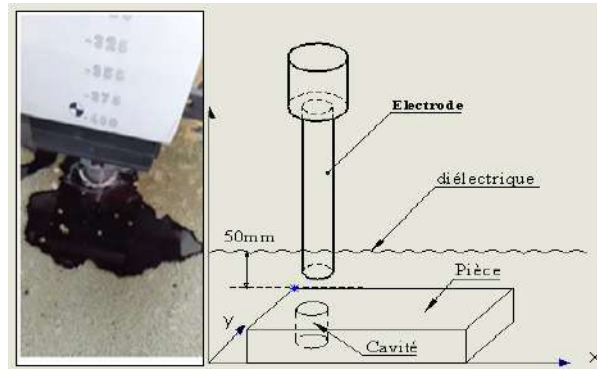


Figure II.25 Niveaux de diélectrique

II.6 Réalisation des essais

II.6.1 Conception d'expériences

Une fois les plaques d'acier préparées, leurs caractéristiques d'usinage sont étudiées avec le procédé EDM, les expériences sont menées sur une machine EDM de type ONA NX4, la polarité de l'électrode et de la pièce à usiner sont respectivement définies comme négative et positive. L'huile de kérosène utilisée comme liquide isolant pendant l'expérimentation. La tension en circuit ouvert est sélectionnée, le courant de décharge, la tension et le temps d'impulsion sont choisis comme paramètres d'entrée et le taux de l'enlèvement de la matière, taux d'usure de l'outil, l'état de surface et les tolérances géométriques : circularité et cylindricité sont choisies comme des paramètres de réponses. Le tableau II.6 montre les plages de variables d'entrée décidées pour mener les expériences.

Tous les essais ont été effectués dans les mêmes conditions environnementales et les opérations d'usinage ont été appliquées sur 25 pièces.

Les paramètres d'usinage utilisés pendant ces essais sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.6 Paramètres d'usinage

N°	Ip (A)	V (Volt)	T _{on} (μs)	T _{off} (μs)	N°	Ip Amp	V (Volt)	Ton (μs)	Toff (μs)
01	0.2	-200	0.5	6	14	32	-80	20	50
02	0.3	-200	2	6	15	32	-80	12	40
03	0.4	-200	2	6	16	48	-80	12	40
04	0.5	-200	3	6	17	48	-80	20	50
05	1	-200	3.2	6	18	48	-80	10	40
06	2	-200	4	6	19	64	-80	10	40
07	12	-80	4	40	20	64	-80	12	50
08	12	-80	12	40	21	64	-80	20	50
09	14	-80	6	40	22	96	-80	12	50
10	14	-80	12	40	23	96	-80	20	50
11	24	-80	10	40	24	128	-80	12	50
12	24	-80	12	40	25	128	-80	20	50
13	32	-80	10	40					

II.6.2 Démarches à suivre pendant les essais

Dans ce qui suit, nous décrirons brièvement les différentes étapes que nous avons suivies lors des essais effectués.

a) Définition de la pièce pour usinage

La préparation de l'usinage commence par une pièce qui doit être usinée. Cette pièce, fixée sur la table de travail, possède des caractéristiques qui sont utilisées pour définir le système de référence. Par conséquent, tous les travaux commencent par la définition de la pièce à usiner.

Une pièce se définit à l'aide des caractéristiques suivantes :

1. Son nom (en option)
2. Les coordonnées de la pièce zéro sur X, Y et Z. Ce point correspond au point d'origine de référence de la pièce et se trouve sur les coordonnées de la machine.
3. Inclinez la pièce par rapport à l'axe X de la machine.
4. La position ou le numéro où sera placée la pièce.

b) Définition de la forme à usinée

Une fois la pièce à usiner définie, il faut définir les points de la pièce à éroder. Ces points sont nommés cavités et sont définis en coordonnées pièce.

Une cavité se définit à l'aide des caractéristiques suivantes :

1. Son nom (en option)
2. Les coordonnées cavité zéro sur X, Y, Z et C en rapport avec le système de référence pièce défini au préalable. Ce point correspond à l'origine de la cavité et est emmagasiné en coordonnées pièce.
3. L'orientation de l'axe d'érosion de la cavité.

La figure II.26 présente un exemple d'une trois cavité appliquée sur une seule pièce pour réaliser le même usinage sur chacune.

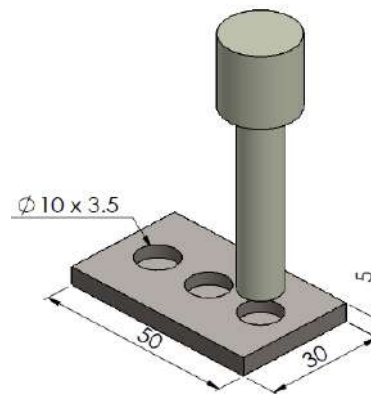


Figure II.26 Exemple de cavités appliquées sur la pièce

c) Définition de l'électrode utilisée

Une fois les références de la pièce et de la cavité définies, il faut définir les électrodes pour l'usinage. Chaque électrode est associée à un fichier incluant toutes les informations relatives à l'électrode [81].

d) Implantation du programme d'usinage

- Profondeur, type de cavité, matériau électrode/pièce, axe d'érosion, électrode à utiliser.
- Choix du critère de travail : vitesse, homogénéité superficielle, usure minimale.
- Définition des paramètres de dégrossissage (figure II.27).
- Définition des paramètres d'usinage (tableau II.6).

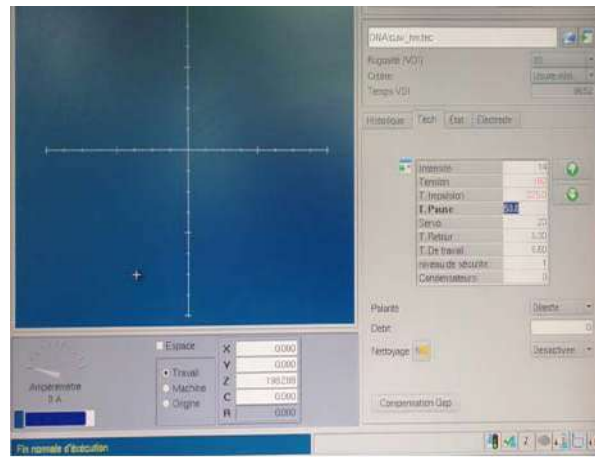


Figure II.27 Paramètres d'usinage

II.7 Détermination du taux d'enlèvement de matière (MRR)

Le poids moyen de matière enlevée de la pièce par unité de temps pendant l'usinage est appelé taux d'enlèvement de matière. Il s'agit de la performance la plus importante car elle détermine directement l'efficacité d'usinage du processus. L'enlèvement de matière est directement lié à l'énergie d'étincelle. Plus l'énergie d'étincelle est élevée, plus le matériau enlevé de la surface usinée est élevé, mais cela a de nombreux effets sur la surface usinée, comme la diminution de la qualité de la surface, la précision dimensionnelle et la formation d'une couche de refonte sur la surface usinée. Par conséquent, un processus d'usinage stable et un réglage paramétrique optimal sont nécessaires pour obtenir un enlèvement de matière plus élevé ainsi qu'une valeur acceptable d'usure des outils et une qualité de surface usinée. Elle est généralement mesurée en mm^3 / min .

Mathématiquement, il peut être exprimé comme

$$MRR = \frac{1000\Delta W_w}{\rho_w T} \quad (\text{II.3})$$

Où

ΔW_w Est la perte de poids du matériau de travail pendant l'usinage,

ρ_w Est la densité du matériau de travail, T est le temps d'usinage et MRR est le taux d'enlèvement de matière.

II.8 Détermination du Taux d'usure des électrodes (EWR)

Pour un usinage précis et rentable, il est essentiel d'identifier et d'estimer les changements qui se produisent dans le matériau de l'outil. La durée de vie du matériau de l'outil joue un rôle important dans l'augmentation de la productivité et, par conséquent, il a un aspect économique important du processus. Un taux d'usure élevé du matériau d'électrode entraîne une interruption pendant l'usinage, ce qui à son tour augmente le temps d'usinage et

diminue la productivité du processus en augmentant le coût d'usinage. Par conséquent, un bon matériau d'outil doit avoir une conductivité électrique élevée pour présenter un faible taux d'usure de l'outil. Le poids moyen du matériau érodé de l'outil par unité de temps pendant l'usinage est appelé taux d'usure de l'outil (TWR). Le processus est assez similaire au taux d'enlèvement de matière, car l'outil et le matériau de travail sont considérés comme un ensemble d'électrodes dans l'EDM. Il est également mesurée en mm^3 / min .

Le taux d'usure des électrodes est défini comme le rapport entre le poids du matériau enlevé du matériau de l'outil par unité de temps et le poids du matériau enlevé de la pièce par unité de temps. Il est généralement exprimé en pourcentage.

$$TWR = \frac{1000\Delta W_t}{\rho_t T} \quad (\text{II.4})$$

$$EWR = \frac{100TWR}{MRR} \quad (\text{II.5})$$

Où ΔW_t est la perte de poids de l'outil pendant l'usinage et ρ_t est la densité du matériau de l'outil.

II.9 Mesure de la rugosité de surface

Dans l'EDM, la résistance à la fatigue du composant usiné est fortement influencée par la qualité de la surface usinée. La qualité de la surface usinée dépend fortement de l'énergie par étincelle et de la dimension des cratères. Plus l'énergie d'étincelle est élevée, plus la formation de cratères est importante. En conséquence, la qualité de surface usinée produite devient médiocre. Généralement, la qualité de la surface usinée est mesurée avec un testeur de rugosité de surface de précision. Elle est mesurée en termes de micromètre.

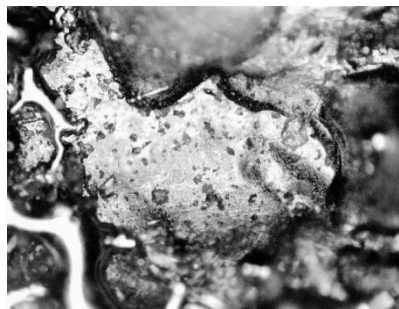


Figure II.28 Visualisation microscopique de la surface usinée.

II.10 Mesure de la surcoupe radiale (ROC)

La surcoupe radiale est exprimée comme la différence de rayon du trou réalisé par rapport au rayon de l'électrode utilisée. Il est donné par l'équation (II.6)

$$ROC = \frac{(D_h - D_T)}{2} \quad (II.6)$$

D_h : Le diamètre du trou ;

D_T : Le diamètre de l'outil ;

II.11 mesure de la circularité

La circularité est un critère important tout en considérant la précision du traitement EDM pour les formes complexes. Il est considéré comme une différence entre les distances radiales du point le plus proche et le plus éloigné du centre géométrique du trou Figure II.29 Pour produire l'ajustement souhaité, le processus EDM est confronté à un défi pour produire zéro de circularité. En raison de l'impact des débris sortant du trou avec le fluide diélectrique sous pression, un trou en haut subit plus d'usure que les autres surfaces du trou et ainsi la circularité se produit toujours dans le processus EDM [82].

La tolérance de forme de circularité détermine la forme de toutes les coupes transversale 2D d'une surface de révolution sans contrôler la taille, l'orientation ou l'emplacement. La surface du cercle en question doit se trouver dans une zone de tolérance délimitée par deux cercles concentriques : la différence entre leurs rayons doit équivaloir à la zone de tolérance indiquée. Toutes les coupes transversales 2D de l'élément doivent être évaluées dans un plan perpendiculaire à l'axe.

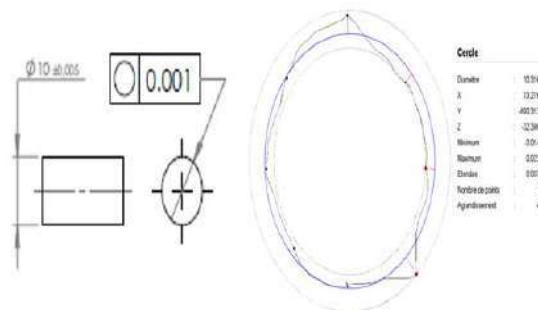


Figure II.29 La circularité

Pour mesurer un cercle automatique Vision à l'aide du mode estimation :

1. Sélectionnez l'option de menu Afficher | Autres fenêtres | Démarrage rapide. La fenêtre Démarrage rapide apparaît (Figure II.30)

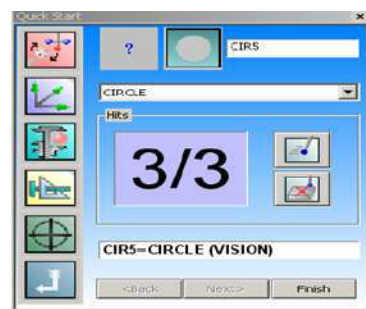


Figure II.30 Fenêtre Démarrage rapide

2. Prenez votre premier palpation sur l'arête de l'élément de cercle à l'aide de la manette de votre machine ou en cliquant avec le bouton gauche sur l'arête des éléments dans la Vidéo. La fenêtre Démarrage rapide fait une mise à jour en affichant un palpation (1/1) dans le tampon et l'élément de POINT estimé.
3. Prenez votre deuxième palpation sur l'arête du cercle de la même façon que le premier, à un endroit différent. La fenêtre Démarrage rapide fait une mise à jour en affichant deux palpations (2/2) dans le tampon et l'élément de DROITE estimé.
4. Prenez votre troisième palpation sur l'arête du cercle de la même façon que les deux premiers, à un endroit encore différent. La fenêtre Démarrage rapide fait une mise à jour en affichant trois palpations (3/3) dans le tampon et l'élément de CERCLE estimé (figure II.31).

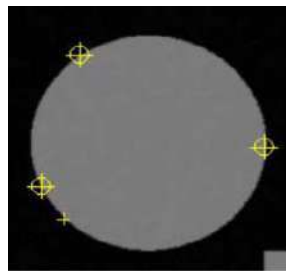


Figure II.31 Palpage des points

5. Cliquez sur le bouton Effacer palpation
6. Une fois que l'élément désiré a été estimé, cliquez sur Terminer
7. Pour afficher la cible d'éléments, cliquez sur le bouton Afficher bascule cible dans l'onglet **Vidéo** de la fenêtre d'affichage graphique (figure II.32).

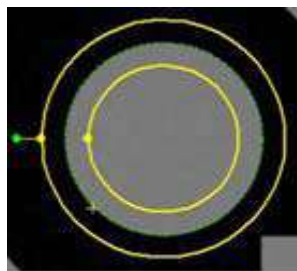


Figure II.32 Affichage de la cible

II.12 Evaluation de la cylindricité

La cylindricité définit la déviation de forme d'un cylindre. La tolérance définit une bande de tolérance comprise entre deux cylindres concentriques dans laquelle la forme réelle du cylindre auquel appliquer la tolérance doit se situer (figure II.33).

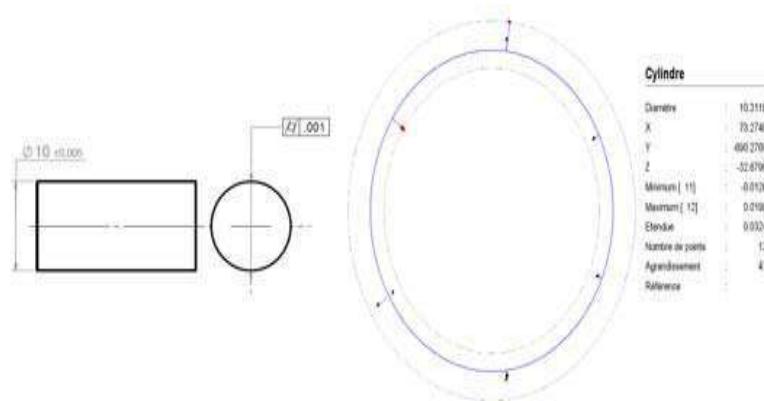


Figure II.33 Cylindricité

L'option de mesure Cylindre vous permet de définir une mesure de cylindre. Ce type de mesure est particulièrement utile lorsque vous devez effectuer les palpées à équidistance sur des cylindres partiels. Le nombre minimum de palpées nécessaires pour mesurer un cylindre automatique est 6 points. [79]

Pour accéder à l'option Cylindre, ouvrez la boîte de dialogue (Figure II.34) Élément automatique pour un cylindre.

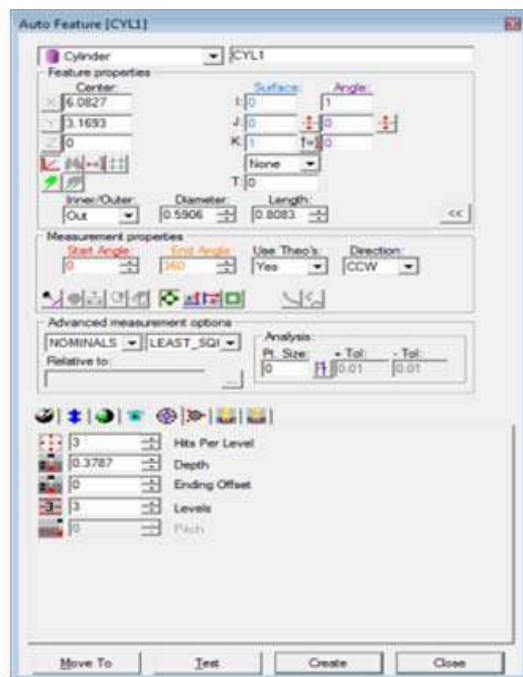


Figure II.34 Boîte de dialogue Élément automatique-Cylindre

Pour créer un cylindre mesuré, vous devez effectuer au moins six palpées sur le cylindre. Les points à prélever doivent être répartis uniformément sur toute la surface. Les trois premiers points prélevés doivent résider sur un plan perpendiculaire à l'axe principal (figure II.35).

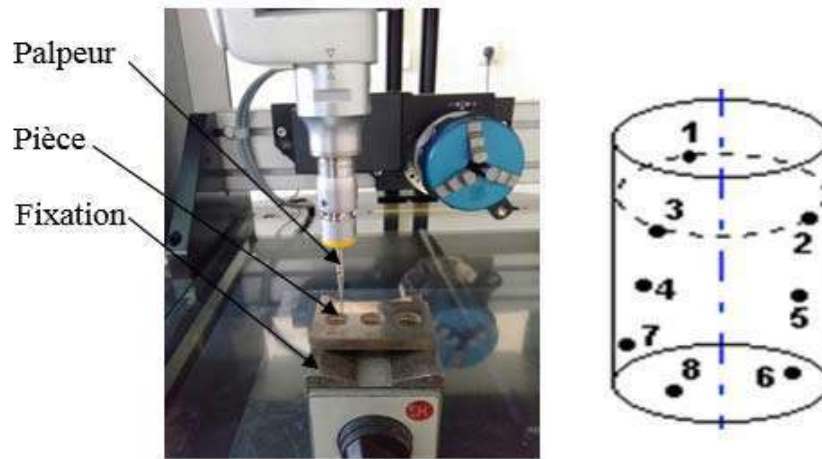


Figure II.35 Mesure d'un cylindre

La configuration du montage expérimental est présentée dans la figure II.36.

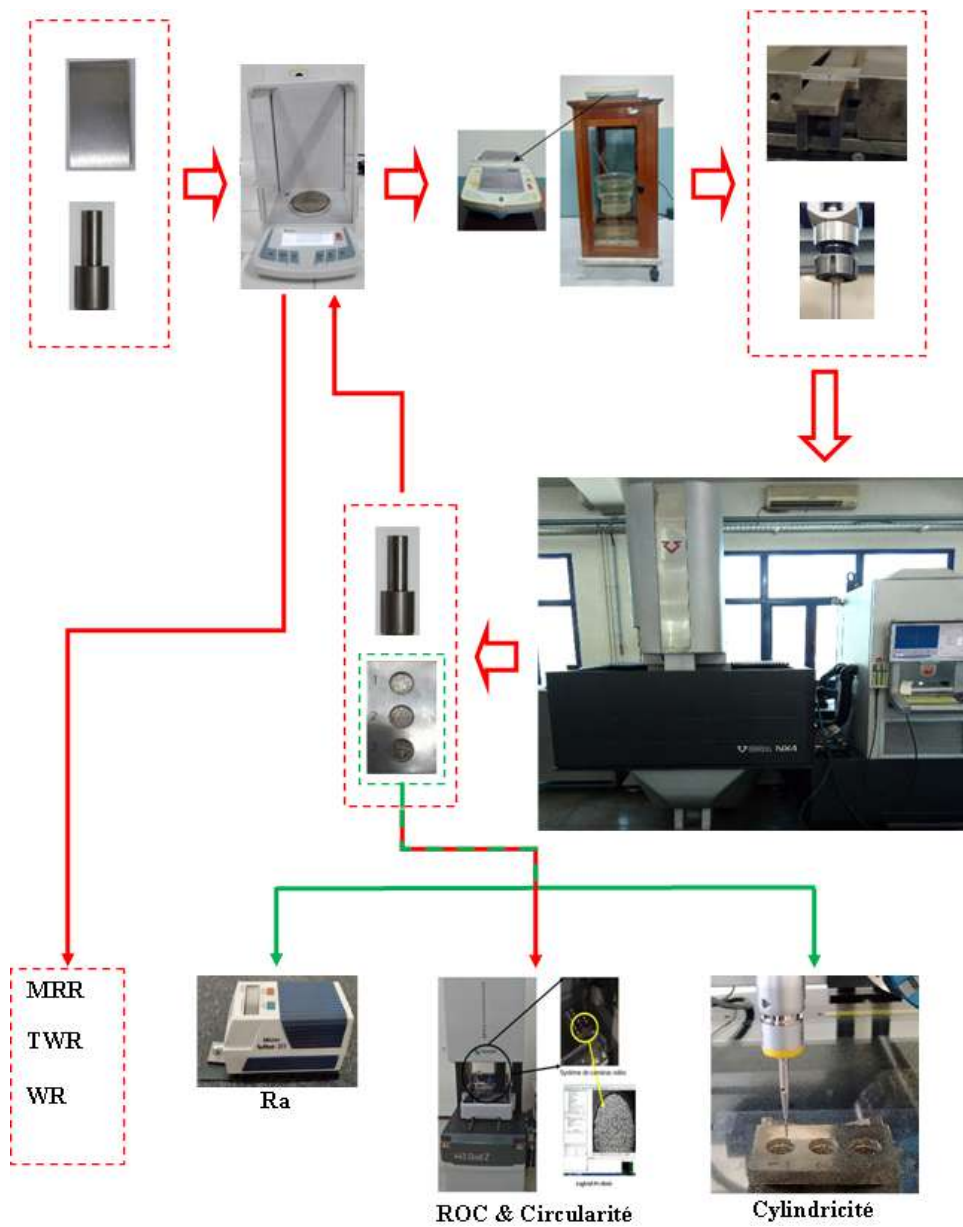


Figure II.36 Configuration du montage expérimental

II.13 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les équipements et le matériel utilisés pour la mesure de différentes performances d'usinage par électroérosion tel que MRR, TWR, l'état de surface et différentes tolérances géométriques (circularité, cylindricité), A cause des difficultés que nous avons trouvées particulièrement.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous discuterons des résultats obtenus à partir des essais expérimentaux, à savoir le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'outil (TWR), le taux d'usure (EWR), le cycle de service (DC), la rugosité de la surface (Ra), la surcoupe radiale (ROC) et la circularité (CIR).

III.2 Résultats des essais

Le tableau III.1 regroupe les résultats obtenus par nos essais. Ce travail est réalisé dans le but d'étudier l'influence des paramètres importants de processus (tension en circuit ouvert, courant de décharge, temps d'impulsion) sur le taux d'enlèvement de matière (MRR), le taux d'usure de l'outil (TWR), le taux d'usure (EWR), le cycle de service (DC), la rugosité de la surface (Ra), la surcoupe radiale (ROC) et la circularité (CIR).

Une large gamme de MRR ($0,00125 \div 57.2003$) mm^3/min , TWR ($-4,29316 \div 4,66164$) mm^3/min , Ra ($0,80 \div 3,83$) μm , ROC ($-0,13 \div 0,11$) mm et la circularité ($0,034 \div 0,16$) mm ont été observés avec différentes paramètres de processus.

Tableau III.1 Résultats expérimentaux

N°	Ip (A)	V (Volt)	T_{on} (μs)	T_{off} (μs)	MRR (mm^3/min)	TWR (mm^3/min)	EWR (%)	DC %	Ra (μm)	ROC (mm)	CIR (mm)
01	0.2	-200	0.5	6	0.0085950	-0.00040021	4.6563390	0,08	0.8	-0.13	0.034
02	0.3	-200	2	6	0.00125409	0.000306176	24.414137	0,25	0.97	-0.09	0.035
03	0.4	-200	2	6	0.01289640	-0.00099348	7.7035659	0,25	0.96	-0.05	0.037
04	0.5	-200	3	6	0.06664283	0.020305699	30.469440	0,33	1.74	-0.05	0.041
05	1	-200	3.2	6	0.21630746	-0.18328824	84.735049	0,35	1.72	0.011	0.049
06	2	-200	4	6	0.37911963	-0.02620861	6.9130195	0,40	2.07	0.012	0.049
07	12	-80	4	40	0.23491203	0.049588679	21.109466	0,09	1.6	0.047	0.05
08	12	-80	12	40	0.50728100	0.090602122	17.860341	0,23	2.25	-0.01	0.05
09	14	-80	6	40	3.15017071	0.53895253	17.108676	0,13	1.72	0.042	0.053
10	14	-80	12	40	4.16761557	0.276297583	6.6296321	0,23	3.34	0.074	0.054
11	24	-80	10	40	7.47502037	1.040213783	13.915865	0,20	2.08	0.054	0.054
12	24	-80	12	40	8.49996289	-2.86952798	33.759300	0,23	3.31	0.065	0.055
13	32	-80	10	40	10.0609279	1.096221346	10.895827	0,20	2.4	0.06	0.056

N°	Ip (A)	V (Volt)	T _{on} (μs)	T _{off} (μs)	MRR (mm ³ /min)	TWR (mm ³ /min)	EWR (%)	DC %	Ra (μm)	ROC (mm)	CIR (mm)
14	32	-80	20	50	10.9222567	0.765860917	7.0119292	0,29	3.83	0.091	0.056
15	32	-80	12	40	11.448173	1.062384799	9.2799505	0,23	2.54	0.069	0.057
16	48	-80	12	40	22.9347725	2.392993245	10.433908	0,23	2.44	0.065	0.062
17	48	-80	20	50	27.4737670	-0.83219031	3.0290360	0,29	3.41	0.095	0.065
18	48	-80	10	40	27.6812269	-0.28913019	1.0444992	0,20	2.6	0.077	0.066
19	64	-80	10	40	28.7713075	3.201338794	11.126845	0,20	2.37	0.068	0.068
20	64	-80	12	50	30.5755395	2.989341283	9.7769044	0,19	1.93	0.077	0.068
21	64	-80	20	50	31.4554504	-1.71046763	5.4377464	0,29	2.86	0.102	0.076
22	96	-80	12	50	33.8768584	4.018672757	11.862589	0,19	2.3	0.065	0.085
23	96	-80	20	50	40.7924755	-1.3136673	3.2203668	0,29	2.44	0.082	0.089
24	128	-80	12	50	49.4688310	4.661642452	9.4233931	0,19	2.63	0.077	0.137
25	128	-80	20	50	57.2003015	-4.29315937	7.5054838	0,29	2.44	0.112	0.16

III.2.1 L'influence du courant de décharge sur le taux d'enlèvement de la matière MRR.

La figure III.1 montre l'effet du courant de décharge sur le taux d'enlèvement de la matière MRR du matériau AISI 1095.

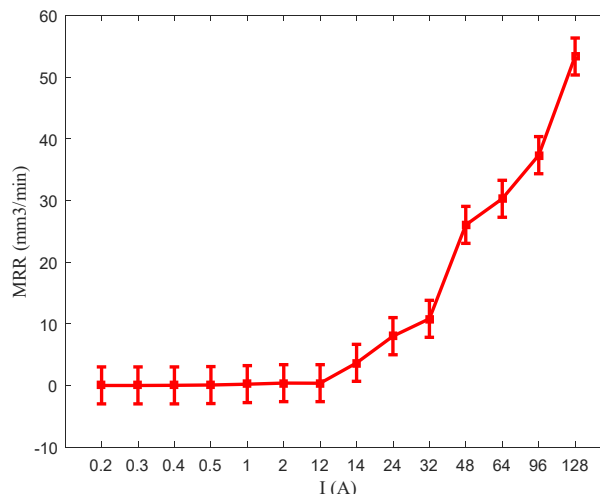


Figure III.1 Variation du taux d'enlèvement de matière en fonction du courant de décharge

La tendance montre en mesure que le courant de décharge augmente, le taux d'enlèvement de matière augmente également. L'électrode donne le taux d'enlèvement de matière le plus élevé de 57,2 mm³/min. L'augmentation du taux d'enlèvement de matière avec l'augmentation du courant de décharge est due à l'augmentation de l'énergie thermique, une

plus grande quantité de matériau est érodée de la pièce, ce qui entraîne une augmentation du taux d'enlèvement de matière. Cependant, il y a une augmentation significative du taux d'enlèvement de matière entre les plages de courant d'impulsion 32 (Amp) ~ 128 (Amp) par rapport à 0.2 (Amp) et 32 (Amp). Ceci est dû au courant de décharge plus élevé qui provoque une érosion rapide du matériau utilisé.

III.2.2 L'influence du temps d'impulsion sur le taux d'enlèvement de la matière (MRR)

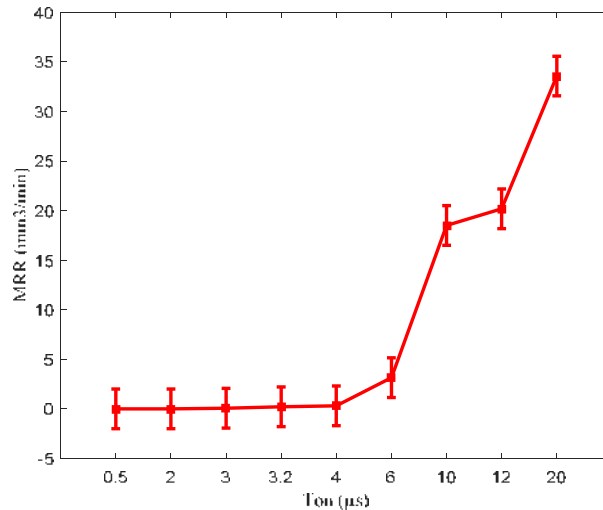


Figure III.2 Variation du taux d'enlèvement de matière en fonction du temps d'impulsion

La figure III.2 montre l'effet du temps d'impulsion T_{on} sur le taux d'enlèvement de matière MRR. Cela montre que la tendance du taux d'enlèvement de matière MRR reste relativement constante avant 4 (μs). L'augmentation du taux d'enlèvement de matière MRR avec l'augmentation du temps d'impulsion après 4 (μs) est due à l'augmentation de l'énergie d'étincelle qui facilite l'action de la fusion et de la vaporisation en raison de la fourniture d'énergie thermique pour une durée plus longue.

III.2.3 L'influence du temps d'arrêt sur le taux d'enlèvement de la matière (MRR)

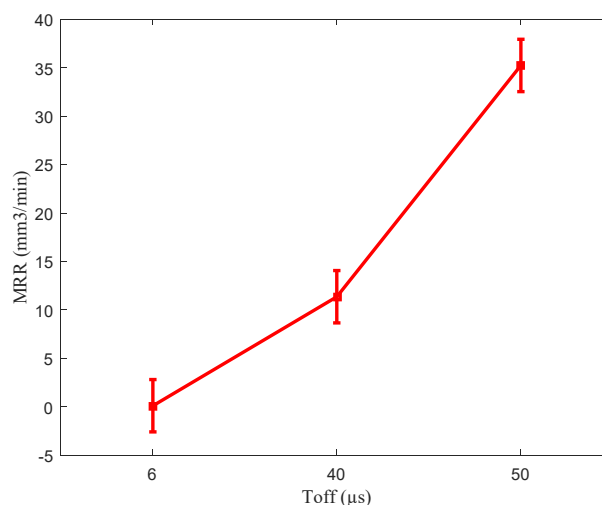


Figure III.3 Variation du taux d'enlèvement de matière en fonction du temps d'arrêt (T_{off})

La figure III.3 montre l'effet du temps d'arrêt (T_{off}) sur le taux d'enlèvement de matière du MRR. Cela montre que la tendance du MRR reste croissante ce qui facilite l'action de la fusion et de la vaporisation.

III.2.4 L'influence du courant de décharge sur le taux d'usure de l'outil TWR

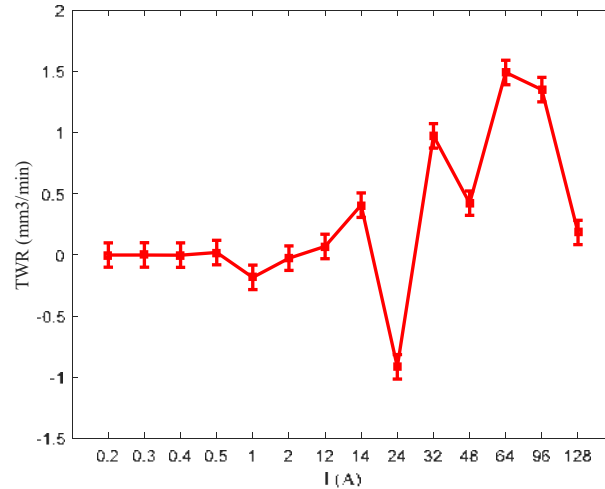


Figure III.4 Variation du taux de l'usure de l'outil en fonction du courant de décharge

La figure III.4 montre l'effet du courant de décharge sur l'usure de l'électrode TWR, principalement en raison de l'influence des électrons à haute densité générés pendant l'usinage à partir du matériau de travail et de l'électrode. Le taux de l'usure de l'outil TWR augmente avec l'augmentation du courant de décharge en raison de son point de fusion élevé. Cela indique que la direction d'usure est toujours relativement constante autour de 24 (Amp). Le TWR de cuivre tungstène est très faible en raison de sa haute résistance aux étincelles. La valeur négative de TWR indique que le poids de l'électrode après la procédure est plus élevé qu'avant l'usinage en raison du dépôt de carbone dans cette zone.

III.2.5 L'influence du temps d'impulsion sur taux de l'usure de l'outil TWR

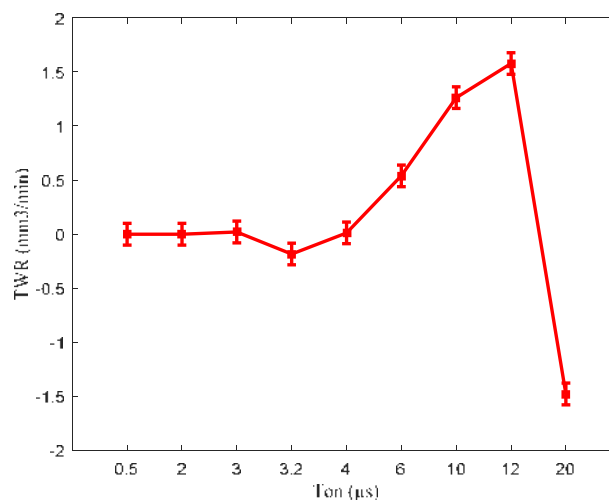


Figure III.5 Variation du taux d'usure de l'outil TWR en fonction du temps d'impulsion

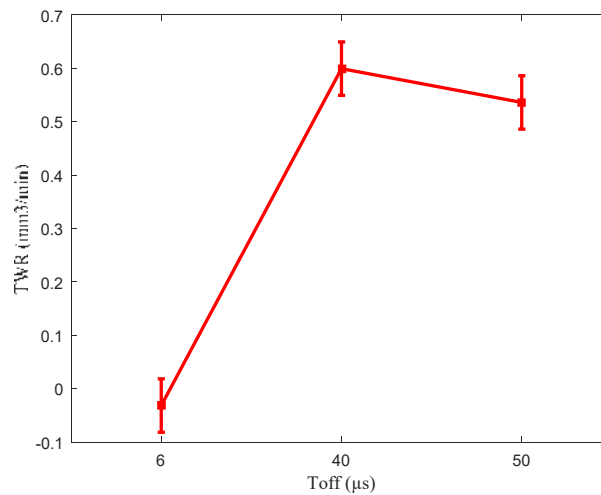


Figure III.6 Variation du taux d'usure de l'outil (TWR) en fonction du temps d'arrêt

L'influence du temps d'impulsion et du temps d'arrêt d'impulsion sur le taux d'usure de l'outil est représentées sur les figures III.5 et III.6 respectivement. Avec l'augmentation du temps d'impulsion et la valeur du taux d'usure du TWR augmente. Dans ce cas également, à mesure que le temps d'impulsion augmente, plus d'énergie thermique est fournie à l'outil et à la zone d'usinage de la pièce, provoquant une usure encore plus grande des matériaux de l'outil. Si on augmente le temps d'impulsion au-delà de 12 (μs) le TWR diminue avec l'augmentation du temps d'impulsion, la possibilité de dépôt de carbone augmente à la surface de la pièce, qui agit comme une couche anticorrosion pour l'électrode ce qui est trouvé dans la référence [83]. Ogun et Akaslan [84] ont également observé une tendance à la baisse dans le TWR avec une augmentation du temps d'impulsion, car le temps de transfert de chaleur était le plus long de l'enfonçage fondu sur la surface du mât d'outil responsable de l'enlèvement de matériau de l'outil.

III.2.6 L'influence du courant de décharge et le temps sur la surcoupe radiale ROC

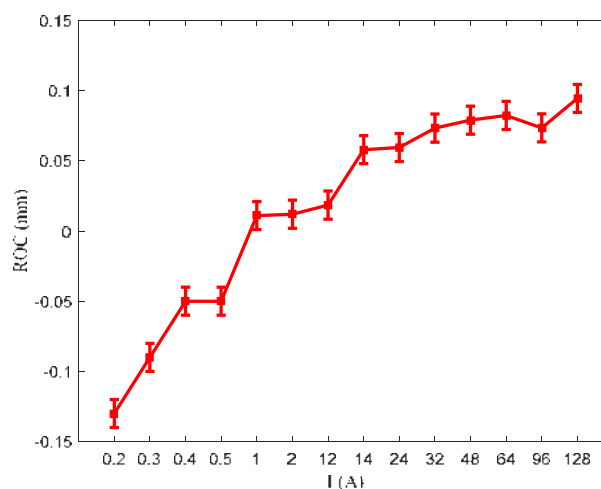


Figure III.7 Variation de la surcoupe radiale ROC en fonction du courant de décharge

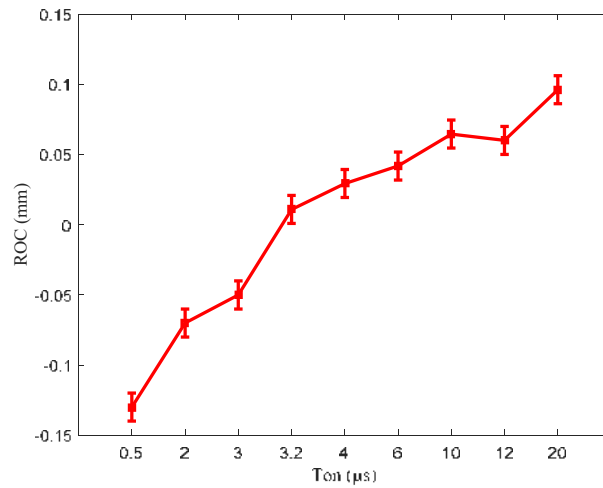


Figure III.8 Variation de la surcoupe radiale ROC en fonction du temps d'impulsion T_{on}

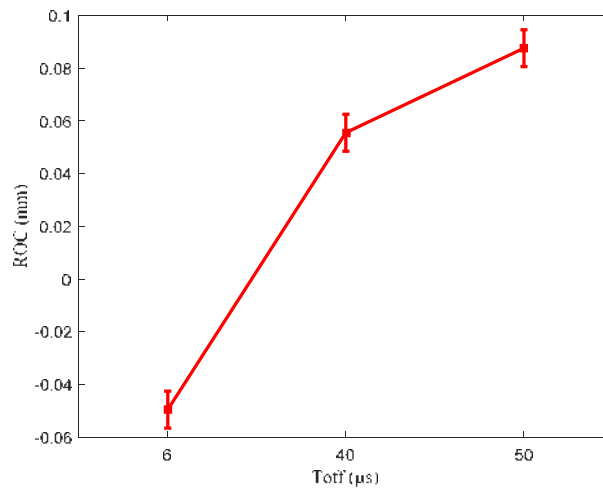


Figure III.9 Variation de la surcoupe radiale ROC en fonction du temps d'arrêt T_{off}

La précision dimensionnelle devient plus importante lorsque des composants à tolérance étroite doivent être produits dans les outils, les matrices et les moules pour le travail de presse, les moules pour l'injection plastique et le moulage sous pression. La surcoupe radiale (gep latéral) est faible à faible courant d'impulsion et donc l'érosion est faible. Les figures (III.7, III.8, et III.9) montrent l'influence du courant et du temps d'impulsion sur la surcoupe radiale des trous réalisés sur une pièce de l'acier AISI 1095. L'électrode donne une surcoupe radiale faible inférieure à 0,1 mm à un courant d'impulsion élevé et une bonne précision dimensionnelle a également été obtenue. En revanche, dans la plage de courant d'impulsion de 0.2 à 1 (Amp) et le temps d'impulsion inférieur à 3.2 (µs), et temps d'arrêt à inférieur à 40 (µs) La coupe radiale est inférieure à 0 et donne la mauvaise acuité dimensionnelle. De là, nous concluons que les coupes radiales dépendent non seulement du courant de décharge, mais également du temps d'impulsion et du temps d'arrêt.

III.2.7 L'influence du courant de décharge sur la rugosité de la surface Ra

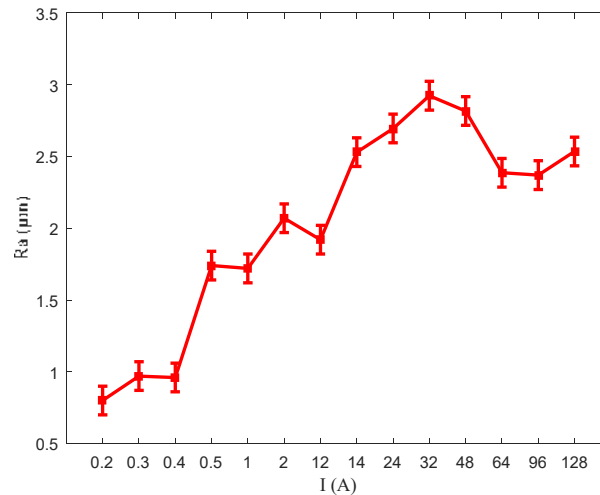


Figure III.10 Variation de la rugosité de la surface Ra en fonction du courant de décharge

La figure III.10 illustre l'effet du courant de décharge sur la rugosité de surface de la pièce usinée. Il a été observé qu'à mesure que le courant de décharge augmente, la rugosité de surface augmente. Les résultats représentés ci-dessus indiquent que pour une plage de courant de décharge entre 0.2 (Amp) et 0.4(Amp), l'électrode présente une meilleure finition de surface. Au-delà d'un courant de décharge de 0.4 (Amp) la rugosité de surface est élevée du fait que l'enlèvement de matière MRR plus élevé s'accompagne de cratères plus grands et plus profonds. L'augmentation du courant de décharge au-delà de 32 (A) provoque de faibles courants de décharge et de l'énergie d'étincelle, ce qui conduit à la formation de petits cratères sur la surface usinée et améliore ainsi l'état de surface ce qui est observé dans le travail de [85]. Par conséquent, l'enfonçage de petites formes et de petits cratères se traduit par une bonne finition de surface.

III.2.8 L'influence du temps d'impulsion sur la rugosité de la surface Ra

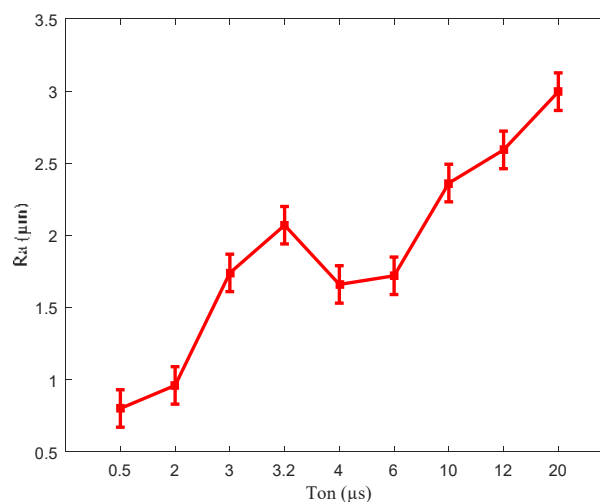


Figure III.11 Variation de la rugosité de la surface en fonction de temps d'impulsion T_{on} .

La figure III.11 illustre l'effet du temps d'impulsion sur la rugosité de surface de la pièce usinée. Il a été observé qu'à mesure que le temps d'impulsion augmente, la rugosité de surface augmente. Les résultats représentés ci-dessus indiquent que pour un temps d'impulsion inférieur à 3 (μs) une meilleure finition de surface a été obtenue. La rugosité de surface est élevée du fait qu'un temps d'impulsion plus élevé s'accompagne de cratères plus grands.

III.2.9 L'influence du temps d'arrêt sur la rugosité de surface Ra

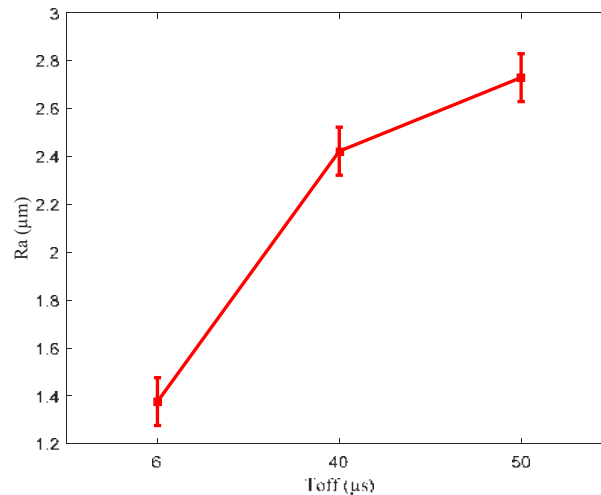


Figure III.12 Variation de la rugosité de la surface en fonction de temps d'arrêt T_{off}

L'influence du temps d'arrêt d'impulsion sur la rugosité de la surface est illustrée à la figure.III.12. À mesure que le temps d'arrêt d'impulsion augmente, la valeur de Ra augmente. En raison de l'augmentation du temps d'arrêt d'impulsion, une énergie plus intense est fournie à l'écart entre l'outil et la pièce, ce qui entraîne une puissante explosion. Cette explosion entraîne des cratères plus profonds à la surface de la pièce et donc une rugosité de surface élevée le même résultat est obtenu dans les travaux de : [86-87].

III.2.10 L'influence du courant de décharge et temps d'impulsion sur la Circularité

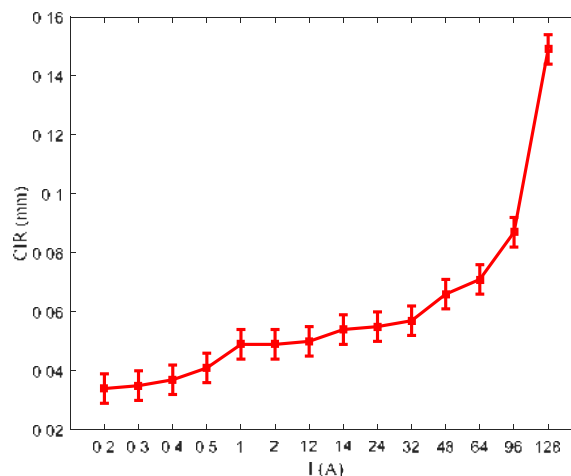


Figure III.13 Variation de la circularité en fonction du courant de décharge

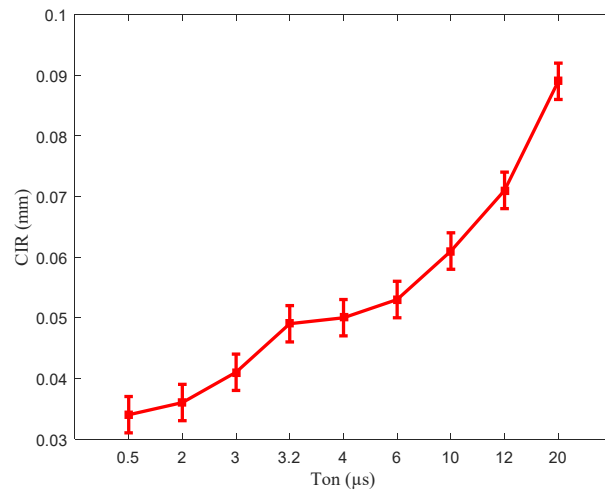


Figure III.14 Variation de la circularité en fonction de temps d'impulsion T_{on}

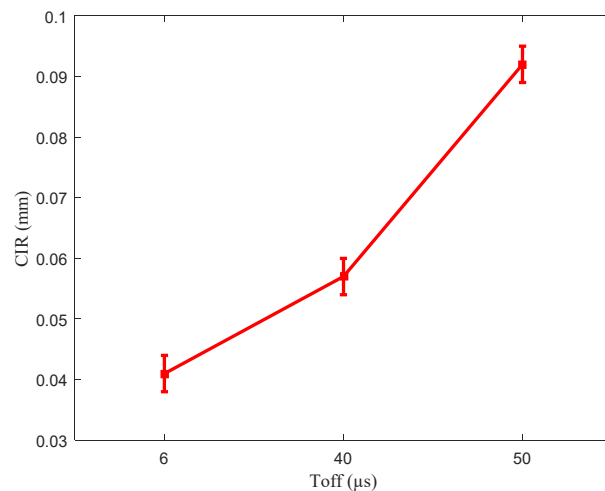


Figure III.15 Variation de la circularité en fonction de temps d'arrêt T_{off}

D'après les (figures III.13, III.14, III.15) on observe que la circularité augmente avec l'augmentation du courant de décharge. Il augmente avec le temps d'impulsion et avec le temps d'arrêt. La variation de la circularité est pareil au MRR, car plus le MRR est élevé, plus la variation de la circularité due à l'évaporation du matériau est importante. L'impulsion activée a un effet substantiel sur les performances d'usinage. Ainsi cette variation accrue de la vitesse d'évaporation provoque une rondeur dans les trous. De même, la variation du courant de décharge décide du degré d'énergie auquel les débris sortant du trou de la surface de la pièce sous le diélectrique sous pression. Cependant, l'énergie accrue des débris n'augmente pas nécessairement la rondeur du trou pour toutes les durées d'impulsion. Le temps d'arrêt d'impulsion est le paramètre de contrôle le moins efficace pour la variation de la circularité.

III.3 Conclusions

L'étude que nous avons réalisée dans ce chapitre nous a conduits à conclure que les résultats obtenus à partir des essais expérimentaux montrent clairement l'effet des paramètres d'entrée tel que le courant de décharge, le temps d'impulsion sur les performances d'usinage. Ils sont les paramètres importants qui affectent le taux de l'usure de l'outil. Donc la diminution de cette dernière nécessite l'amélioration des différents types de propriétés des électrodes.

Chapitre III

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, sur la base d'essais de mesure expérimentaux des performances d'usinage par électroérosion et des erreurs géométriques associées à l'usinage des trous, les effets des paramètres d'usinage, sur ces performances et ces erreurs sont prédits avec une méthode intelligente basée sur un système d'inférence floue à sorties multiples.

Base de données expérimentales

Pour mener cette étude nous avons réalisé vingt-sept (27) autres essais avec les paramètres mentionnés dans le tableau IV.1

Tableau IV.1 Paramètres d'usinage

Paramètres	Unité	Niveaux		
		P	M	G
Courant (I)	(A)	12	14	16
Tension (V)	(Volt)	120	160	200
Temps d'impulsion (Ton)	(μ s)	100	200	400

Les autres paramètres d'usinage à l'exception des trois paramètres ci-dessus sont maintenus constants pendant les 27 essais.

Chaque essai se termine lorsque l'électrode atteint une profondeur de 3,5 mm.

L'étude de la variation de différentes performances, en fonction des paramètres d'usinage, réalisée au cours des vingt-sept essais conduit à trouver les valeurs regroupés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 Résultats expérimentales

Essais	I (A)	V (V)	Ton (μ s)	MRR (mm ³ /min)	TWR (mm ³ /min)	EWR (%)	Ra (μ m)	ROC (mm)	CIR (mm)	CYL (mm)
1	12	120	100	51.48	1.97	3.83	1.45	0.162	0.031	0.0233
2	14	120	100	45.87	2.02	4.40	3.39	0.171	0.0329	0.0258
3	16	120	100	53.83	1.59	2.96	6.05	0.161	0.0388	0.0468
4	12	120	200	48.35	1.74	3.59	1.03	0.211	0.0606	0.0686
5	14	120	200	44.82	1.75	3.90	1.18	0.218	0.0575	0.0389

Essais	I (A)	V (V)	Ton (μ s)	MRR (mm ³ /min)	TWR (mm ³ /min)	EWR (%)	Ra (μ m)	ROC (mm)	CIR (mm)	CYL (mm)
6	16	120	200	45.65	1.93	4.23	1.72	0.207	0.0418	0.0284
7	12	120	400	49.46	2.03	4.11	0.7	0.238	0.0505	0.0703
8	14	120	400	48.52	1.80	3.71	3.27	0.227	0.0592	0.0684
9	16	120	400	55.24	2.02	3.65	1.3	0.251	0.068	0.0628
10	12	160	100	47.03	1.68	3.57	3.05	0.186	0.0462	0.0483
11	14	160	100	39.56	1.31	3.31	3.81	0.189	0.047	0.0395
12	16	160	100	43.61	1.55	3.56	6.42	0.172	0.0458	0.03
13	12	160	200	47.85	1.82	3.20	1.78	0.221	0.0479	0.0493
14	14	160	200	48.44	1.46	3.02	0.46	0.198	0.0329	0.0631
15	16	160	200	48.23	1.25	2.59	2.05	0.241	0.0446	0.0684
16	12	160	400	59.81	1.53	2.01	2.59	0.26	0.0499	0.0696
17	14	160	400	55.93	1.65	2.94	1.88	0.258	0.0416	0.0679
18	16	160	400	55.03	1.33	2.41	6.62	0.256	0.0468	0.0532
19	12	200	100	54.43	1.34	2.46	3.96	0.176	0.067	0.04
20	14	200	100	48.07	0.95	1.97	2.56	0.177	0.0453	0.0316
21	16	200	100	46.75	1.45	3.11	5.06	0.156	0.0371	0.0667
22	12	200	200	57.01	1.76	3.09	6.59	0.219	0.0472	0.0462
23	14	200	200	56.28	1.59	2.82	1.38	0.226	0.0534	0.062
24	16	200	200	59.95	1.09	1.82	2.28	0.24	0.0513	0.0553
25	12	200	400	59.49	1.53	2.57	3.16	0.233	0.0558	0.052
26	14	200	400	52.95	1.22	2.31	1.64	0.248	0.0439	0.0654
27	16	200	400	57.70	1.54	2.67	2.34	0.248	0.0465	0.0436

IV.2 Modélisation floue

Le modèle flou conçu pour prédire diverses performances d'usinage par électroérosion utilise trois entrées et sept sorties (figure IV.1). Le courant (I), la tension (Volt) et le temps

d'impulsion (T_{on}) sont les entrées et la performance de décharge de l'usinage électrique est la sortie du système.

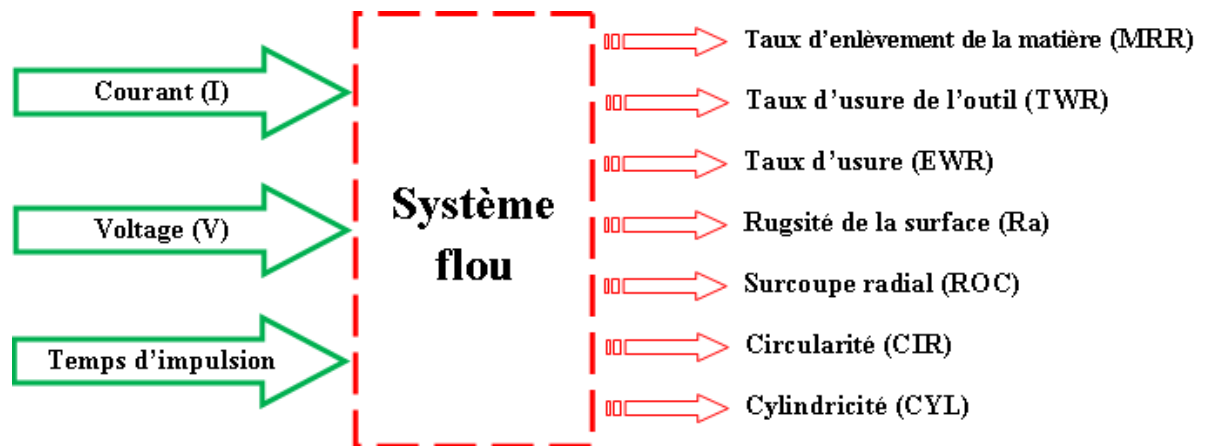


Figure IV.1 Système flou

La première étape de la modélisation des performances d'usinage par décharge électrique consiste à choisir les formes des fonctions d'appartenance pour les variables de processus selon la base de données expérimentale, qui ont été utilisées sur la machine-outil. Les expressions floues pour le courant (I), la tension (V) et le temps d'impulsion (T_{on}) et les performances de l'usinage par décharge électrique: taux d'enlèvement de matière (MRR), taux d'usure de l'outil (TWR), taux d'usure (EWR), rugosité de la surface (R_a), la surcoupe radiale (ROC), la circularité (CIR) et la cylindricité (CYL) sont représentées sur les figures VI.2 à VI.11, respectivement.

IV.2.1 Variables floues

Les valeurs numériques du courant (I) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.2.



Figure IV.2 Variables linguistiques pour le courant (I).

Les valeurs numériques de la tension (V) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.3.



Figure IV.3 Variables linguistiques pour la tension (V).

Les valeurs numériques du temps d'impulsion (Ton) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.4.



Figure IV.4 Variables linguistiques pour le temps d'impulsion (Ton)

Les valeurs numériques du taux d'enlèvement de matière (MRR) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.5.

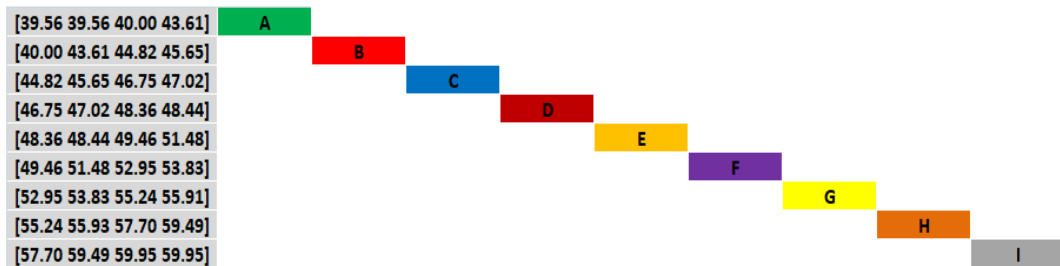


Figure IV.5 Variables linguistiques pour le taux d'enlèvement de matière (MRR)

Les valeurs numériques du taux d'usure de l'outil (TWR) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.6.

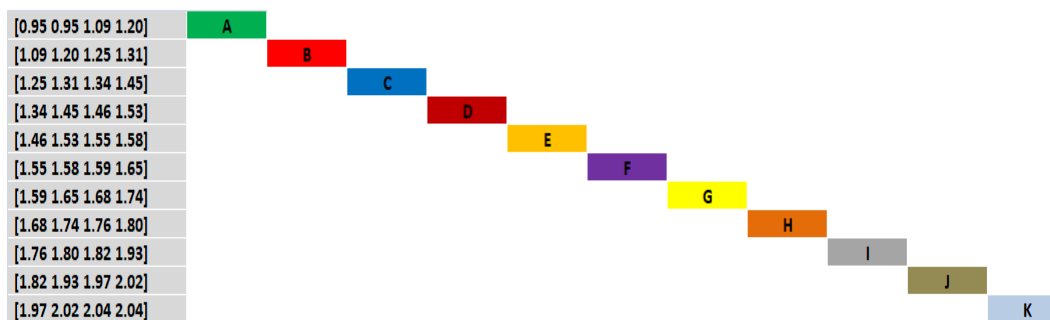


Figure IV.6 Variables linguistiques pour le taux d'usure de l'outil (TWR)

Les valeurs numériques du taux d'usure (EWR) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.7.

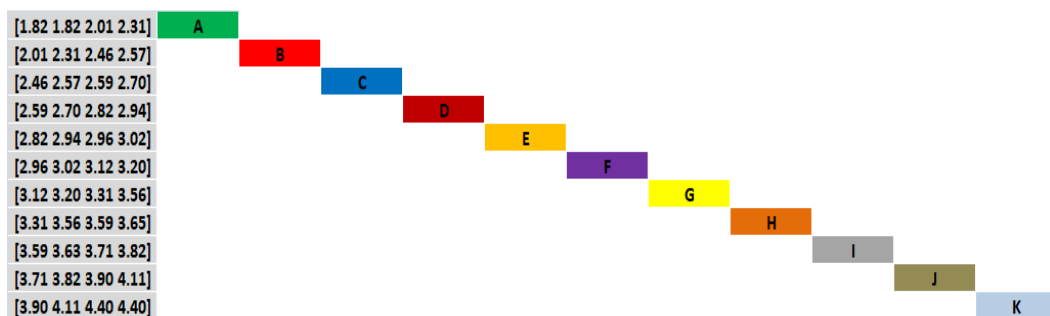


Figure IV.7 Variables linguistiques pour le taux d'usure (EWR)

Les valeurs numériques de la rugosité de la surface (Ra) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.8.

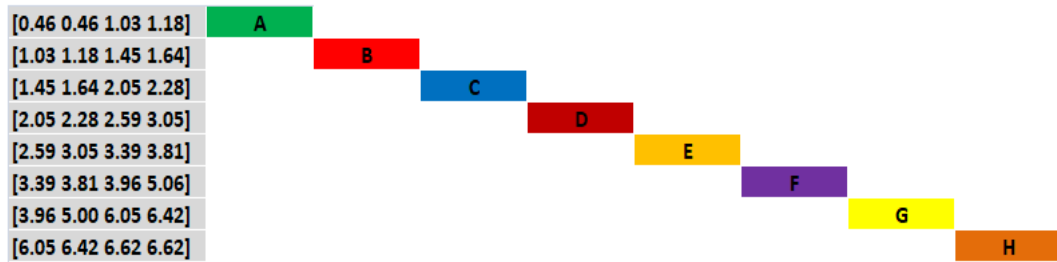


Figure IV.8 Variables linguistiques pour la rugosité de la surface (Ra)

Les valeurs numériques de la surcoupe radiale (ROC) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.9.

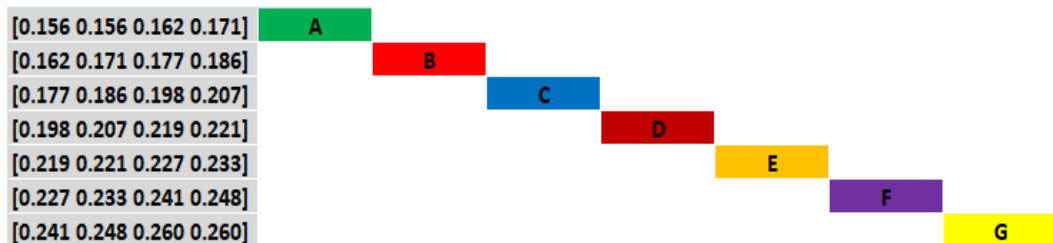


Figure IV.9 Variables linguistiques pour la surcoupe radiale (ROC)

Les valeurs numériques de la circularité (CIR) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.10.

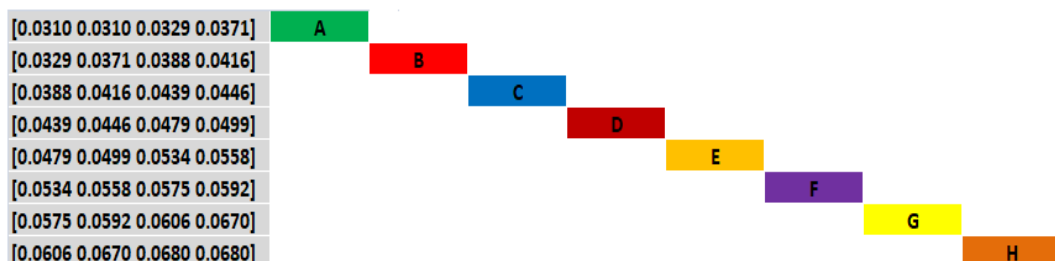


Figure IV.10 Variables linguistiques pour la circularité (CIR)

Les valeurs numériques de la cylindricité (CYL) sont liées par des variables linguistiques comme le montre la figure IV.11.

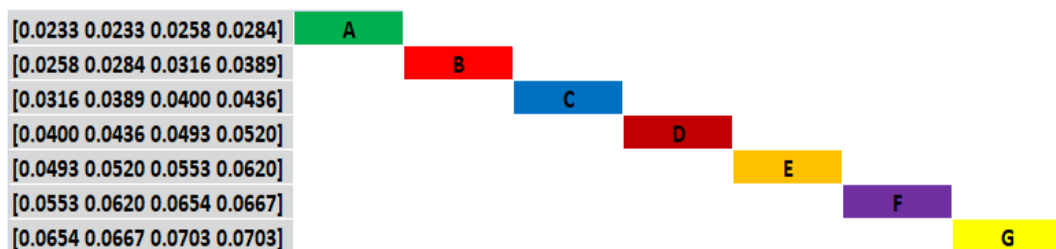


Figure IV.11 Variables linguistiques pour la cylindricité (CYL)

Les fonctions d'appartenance se présentent sous plusieurs formes. Dans cette étude, des fonctions d'appartenance triangulaires pour les variables d'entrée et trapézoïdales pour les

paramètres de sortie ont été utilisées pour la construction du premier modèle. Pour le deuxième modèle, les fonctions d'appartenance gaussiennes pour les variables d'entrée et les fonctions d'appartenance PIMF pour les paramètres de sortie ont été utilisées.

Les fonctions d'appartenance triangulaires pour l'entrée et les fonctions d'appartenance trapézoïdale pour les paramètres de sortie du premier modèle sont illustrées à la figure IV.12.

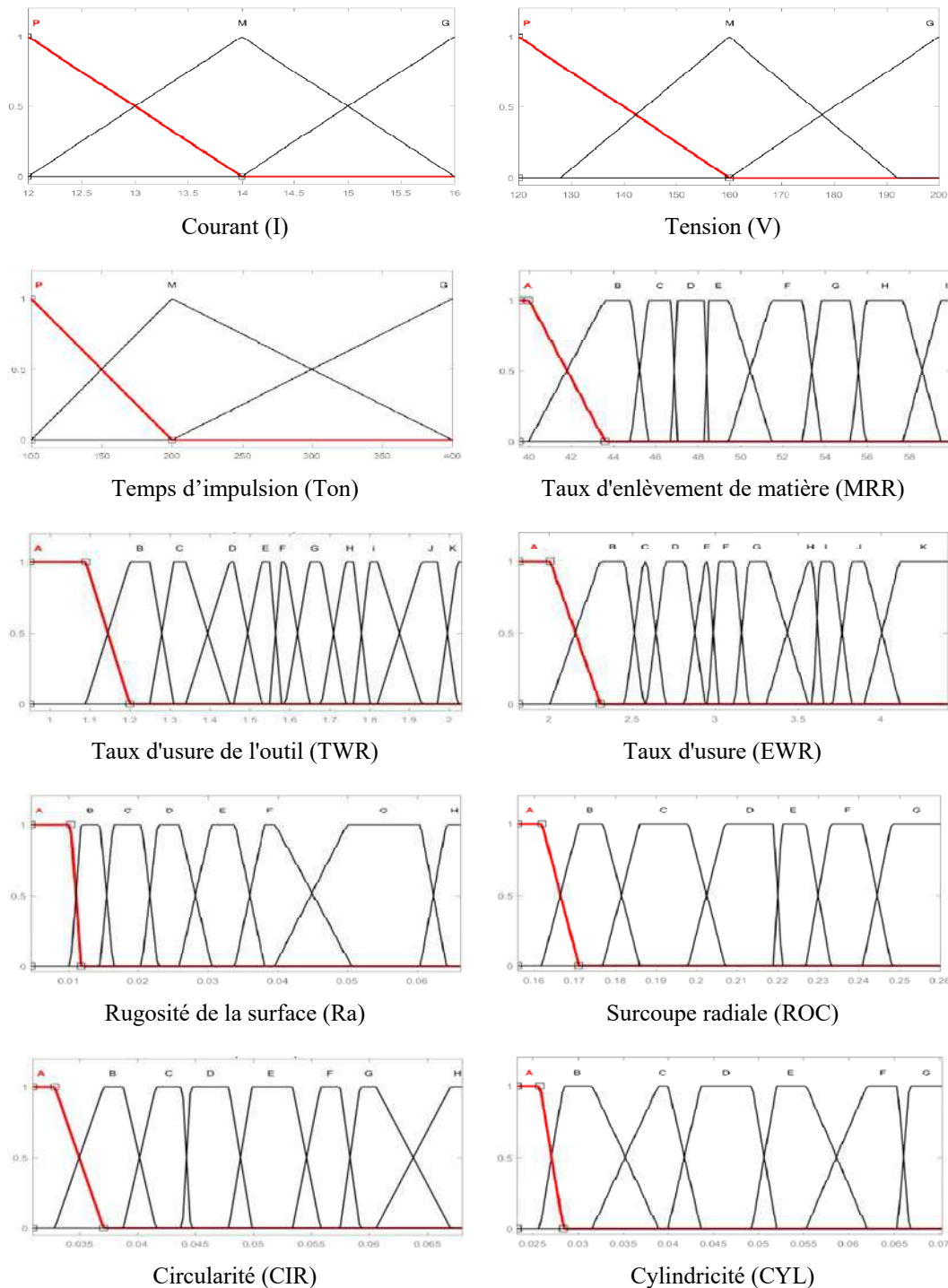


Figure IV.12 Fonctions d'appartenance pour les paramètres d'entrée et de sortie pour le premier modèle

Les fonctions d'appartenance gaussiennes pour l'entrée et les fonctions d'appartenance PIMF pour les paramètres de sortie du deuxième modèle sont illustrées à la figure IV.13.

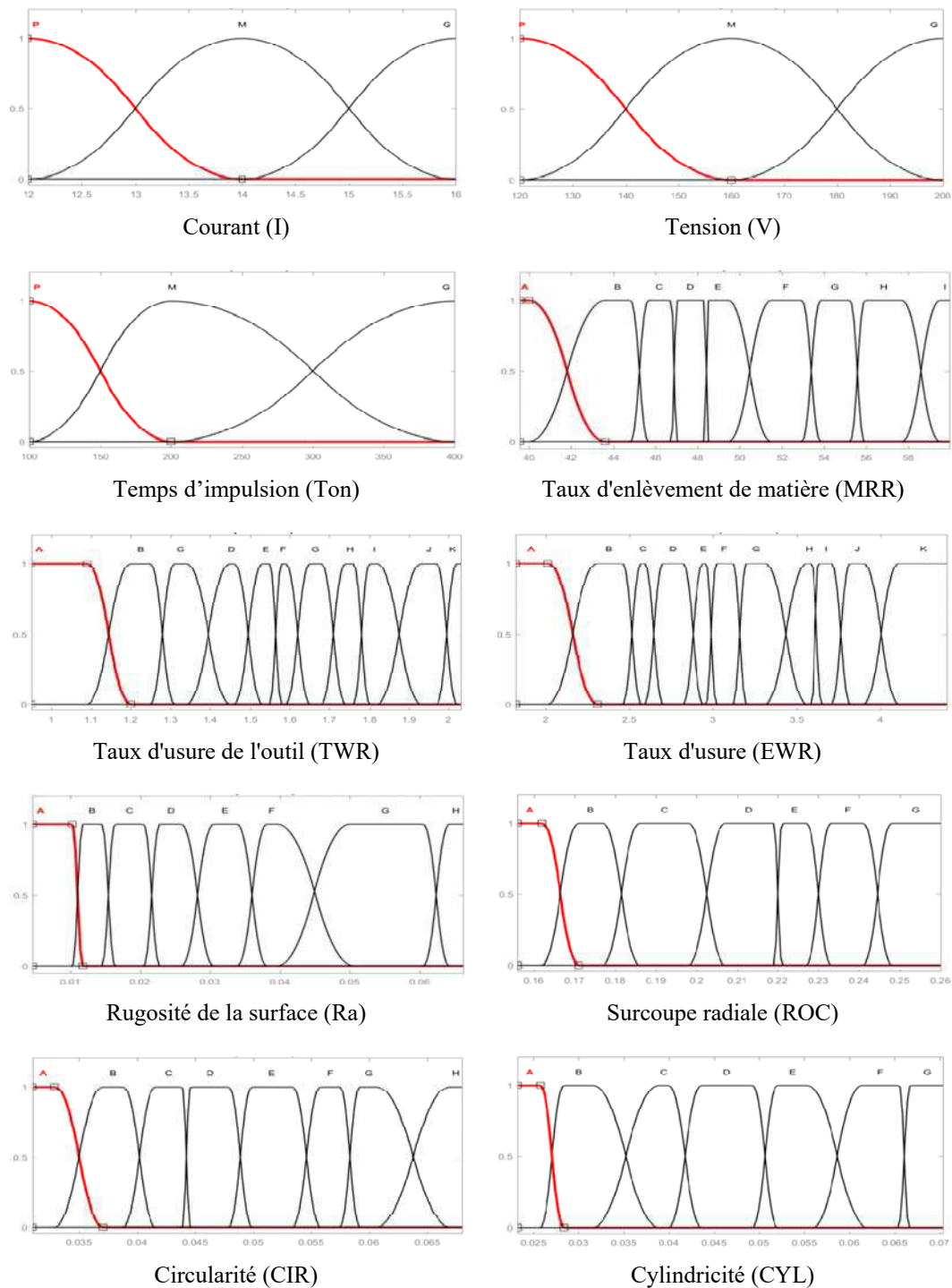


Figure IV.13 Fonctions d'appartenance pour les paramètres d'entrée et de sortie pour le deuxième modèle

IV.2.2 Règles floues

Le modèle flou a été créé à partir de vingt-sept (27) règles floues définies sur la base de travaux expérimentaux (les vingt-sept tests effectués).

Le système flou créé a trois paramètres d'entrée pour produire sept sorties ; les règles floues peuvent être décrites sous forme matricielle. Le tableau IV.3 montre l'ensemble des règles de matrice entre les paramètres d'entrée et les performances de sortie.

Tableau IV.3 Tableau d'inférence

Essais	I (A)	V (V)	Ton (μ s)	MRR (mm^3/min)	TWR (mm^3/min)	EWR (%)	Ra (μ m)	ROC (mm)	CIR (mm)	CYL (mm)
1	P	P	P	F	J	J	B	A	A	A
2	M	P	P	C	K	K	E	B	A	A
3	G	P	P	G	F	E	H	A	B	D
4	P	P	M	D	H	H	A	D	G	G
5	M	P	M	B	H	J	B	D	F	C
6	G	P	M	C	J	K	C	D	C	B
7	P	P	G	E	K	K	A	F	E	G
8	M	P	G	E	I	I	E	E	G	G
9	G	P	G	G	K	I	B	G	H	F
10	P	M	P	D	G	H	E	C	D	D
11	M	M	P	A	C	G	F	C	D	C
12	G	M	P	B	E	H	H	B	D	B
13	P	M	M	E	E	G	C	E	D	D
14	M	M	M	E	D	F	A	C	A	F
15	G	M	M	D	B	C	C	F	D	G
16	P	M	G	I	B	A	D	G	E	G
17	M	M	G	H	G	E	C	G	C	G
18	G	M	G	G	C	B	H	G	D	E
19	P	G	P	G	C	B	F	B	H	C
20	M	G	P	E	A	A	D	B	D	B
21	G	G	P	C	D	F	G	A	B	G
22	P	G	M	H	H	F	H	D	D	D

Essais	I (A)	V (V)	Ton (μ s)	MRR (mm^3/min)	TWR (mm^3/min)	EWR (%)	Ra (μ m)	ROC (mm)	CIR (mm)	CYL (mm)
23	M	G	M	H	F	D	B	E	E	F
24	G	G	M	I	A	A	D	F	E	E
25	P	G	G	I	E	C	E	F	F	E
26	M	G	G	F	B	B	C	G	C	F
27	G	G	G	H	E	D	D	G	D	D

Quelques exemples de règles floues sous forme linguistique sont présentés ci-dessous :

1. If I is (P: low) and V is (P: low) and Ton is (L: low) Then: MMR is (F) and TWR is (J) and EWR is (J) and Ra is (B) and ROC is (A) and CIR is (A) and CYL is (A)
2. If I is (M: average) and V is (P: low) and Ton is (L: low) Then: MMR is (G) and TWR is (F) and EWR is (K) and Ra is (E) and ROC is (B) and CIR is (A) and CYL is (A)
3. If I is (G: high) and V is (P: low) and Ton is (L: low) Then: MMR is (C) and TWR is (K) and EWR is (E) and Ra is (H) and ROC is (A) and CIR is (B) and CYL is (D)
- ⋮
27. If I is (G: high) and V is (G: high) and Ton is (G: high) Then: MMR is (H) and TWR is (E) and EWR is (D) and Ra is (D) and ROC is (G) and CIR is (D) and CYL is (D)

IV.2.3 Défuzzification et étude de l'erreur et de la précision des modèles flous

Le modèle construit utilise un univers continu pour toutes les variables d'entrée et de sortie. Ainsi, l'entrée peut être n'importe quelle combinaison de trois variables (courant, tension et temps d'impulsion) et les sorties sont : taux d'enlèvement de matière (MRR), taux d'usure de l'outil (TWR), taux d'usure (EWR), rugosité de la surface (Ra), surcoupe radiale (ROC), circularité (CIR) et cylindricité (CYL). La défuzzification permet de fusionner les différentes règles générées par le moteur d'inférence pour lui donner une seule valeur de chaque sortie et de transformer cette variable de sortie linguistique en données numériques en calculant l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance.

Sept nouveaux tests qui ne sont pas entrés dans le processus de création de modèle ont été effectués. Il sera utilisé pour vérifier le modèle. Ces tests ont été effectués dans les mêmes conditions que les tests précédents, mais avec des paramètres d'usinage différents.

Pour calculer le pourcentage d'erreur des sept tests, nous utilisons l'équation (IV.1) :

$$e_i = \left[\frac{|Output_{exp} - Output_{pred}|}{Output_{exp}} \right] \times 100 \tag{IV.1}$$

Pour calculer le pourcentage de précision des 10 tests, la formule (IV.2) est utilisée :

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \frac{|Output_{exp} - Output_{pred}|}{Output_{exp}} \right] \times 100 \tag{IV.2}$$

IV.3 Résultats

IV.3.1 Taux d'enlèvement de matière (MRR)

Les résultats de la défuzzification de la première sortie (MRR), sont présentés sur la figure IV.14.

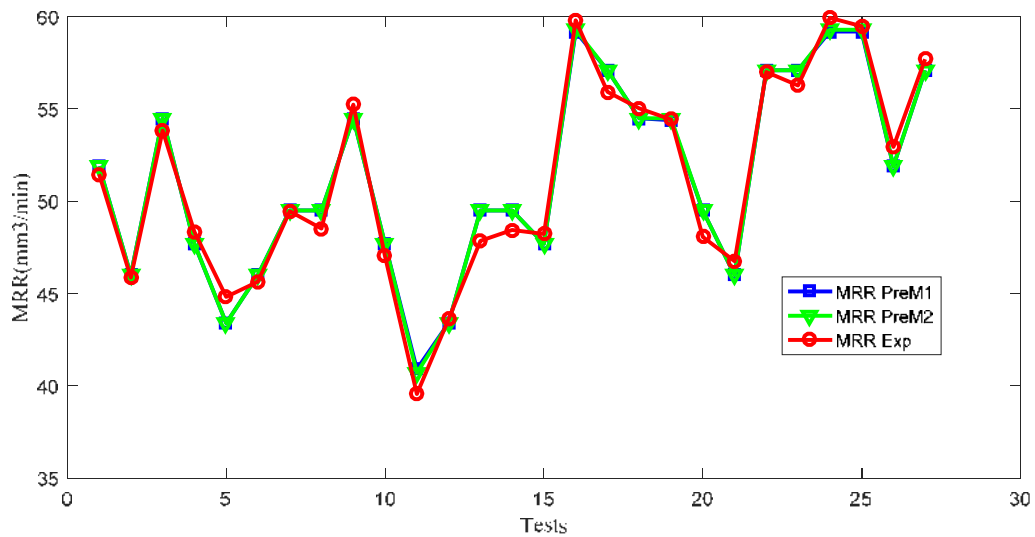


Figure IV.14 Variation du taux d'enlèvement de matière expérimental et prévu (MRR) en fonction du nombre d'essais.

Le tableau IV.4 regroupe les valeurs du taux d'enlèvement de matière (MRR) obtenues avec les deux modèles flous, la précision et le taux d'erreur pour les sept nouveaux tests.

Tableau IV.4 Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation du taux d'enlèvement de matière (MRR)

essais	Paramètres d'usinage			Sortie EXP.	Sortie prédite par le modèle 1			Sortie prédite par le modèle 2		
	I	V	Ton	MRRExp	MRR _{PreM1}	Erreur	Précision	MRR _{PreM2}	Erreur	Précision
	(A)	(V)	(µs)	(mm³/min)	(mm³/min)	%	%	(mm³/min)	%	%
1	12	120	150	50.5838	50.5	0.002	0.998	50.5	0.002	0.998
2	13	120	175	46.7623	46.1	0.014	0.986	45.6	0.025	0.975

3	13	160	250	52.4226	53.6	0.022	0.978	52.3	0.002	0.998
4	14	160	275	53.1973	53.3	0.002	0.998	52.5	0.013	0.987
5	15	200	300	54.2771	55.1	0.015	0.985	55.2	0.017	0.983
6	15	200	350	53.2563	54.8	0.029	0.971	54.7	0.027	0.973
7	16	200	375	56.0005	57.2	0.021	0.979	57.1	0.020	0.980
Erreurs et précisions des modèles (%)						1.511	98.489	1.510	98.490	

La différence de précision des deux modèles montre qu'il est possible d'utiliser l'un ou l'autre avec peu de préférence pour le premier modèle.

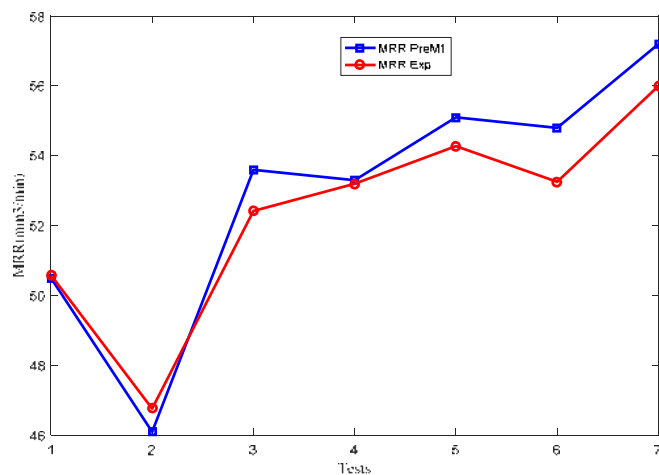


Figure IV.15 Comparaison du taux d'enlèvement de matière (MRR) prévu et expérimental.

La figure IV.15 montre la capacité du modèle flou construit pour prédire le taux d'enlèvement de matière (MRR). Pour les mêmes paramètres d'usinage, le taux d'enlèvement de matière obtenu par le modèle flou et les tests de confirmation sont représentés sur la figure IV.15. Les résultats des tests de confirmation ont montré que le modèle flou construit donne des valeurs de taux d'enlèvement de matière (MRR) proches des valeurs réelles. L'écart maximal et minimal du taux d'enlèvement de matière (MRR) prévu et du taux réel d'enlèvement de matière (MRR) est observé à $0,084 \text{ mm}^3 / \text{min}$ et $1,544 \text{ mm}^3 / \text{min}$, respectivement. La précision prévue du modèle flou construit est de 98,489 %.

IV.3.2 Taux d'usure de l'outil (TWR)

Les résultats de la défuzzification de la deuxième sortie sont illustrés à la figure IV.16.

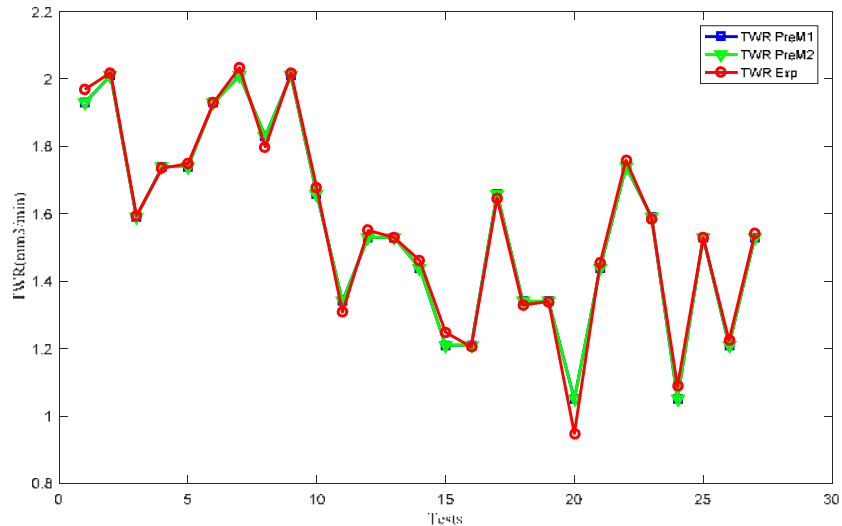


Figure IV.16 Variation du taux d'usure de l'outil expérimental et prévu (TWR) en fonction du nombre d'essais

Le tableau IV.5 regroupe les valeurs du taux d'usure de l'outil (TWR) obtenues avec les deux modèles flous, la précision et le taux d'erreur pour les sept nouveaux tests.

Tableau IV.5 Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation du taux d'usure de l'outil (TWR)

essais	Paramètres d'usinage			Sortie EXP.	Sortie prédite par le modèle 1			Sortie prédite par le modèle 2		
	I (A)	V (V)	Ton (µs)	TWRExp (mm³/min)	TWR _{PreM1} (mm³/min)	Erreur (%)	Précision (%)	TWR _{PreM2} (mm³/min)	Erreur (%)	Précision (%)
1	12	120	150	1.8440	1.86	0.009	0.991	1.86	0.009	0.991
2	13	120	175	1.7914	1.84	0.027	0.973	1.81	0.010	0.990
3	13	160	250	1.3968	1.43	0.024	0.976	1.45	0.038	0.962
4	14	160	275	1.6190	1.52	0.061	0.939	1.51	0.067	0.933
5	15	200	300	1.3540	1.26	0.069	0.931	1.25	0.077	0.923
6	15	200	350	1.3324	1.28	0.039	0.961	1.3	0.024	0.976
7	16	200	375	1.3905	1.38	0.008	0.992	1.48	0.064	0.936
Erreurs et précisions des modèles (%)						3.386	96.614	4.142	95.858	

La précision des deux modèles montre que le premier modèle est plus précis que le deuxième.

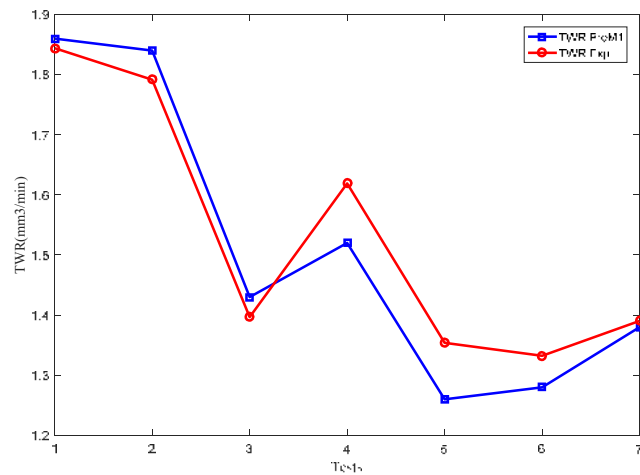


Figure IV.17 Comparaison du taux d'usure de l'outil (TWR) prévu et expérimental.

La figure IV.17 montre la capacité du modèle flou construit à prédire le taux d'usure de l'outil (TWR). Pour les mêmes paramètres d'usinage, le taux d'usure de l'outil obtenu par le modèle flou et les tests de confirmation sont représentés sur la figure IV.17.

Les résultats des tests de confirmation ont montré que le modèle flou construit donne des valeurs de taux d'usure de l'outil (TWR) proches des valeurs réelles. L'écart maximal et minimal des valeurs de taux d'usure prévu (TWR) avec le taux d'usure des outils réels (TWR) est observé à $0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$ et $0,099 \text{ mm}^3/\text{min}$, respectivement. La précision de prédiction du modèle flou construit est de 96,614 %.

IV.3.3 Taux d'usure

Les résultats de la défuzzification de la troisième sortie (EWR) sont illustrés à la figure 18.

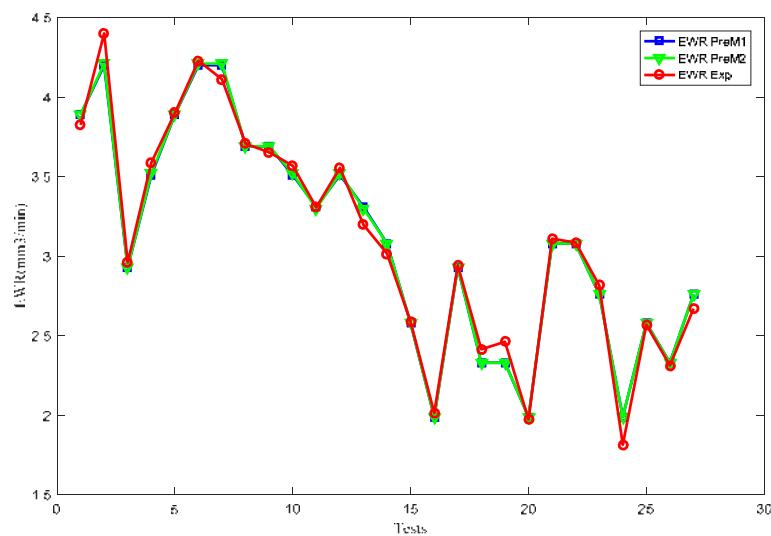


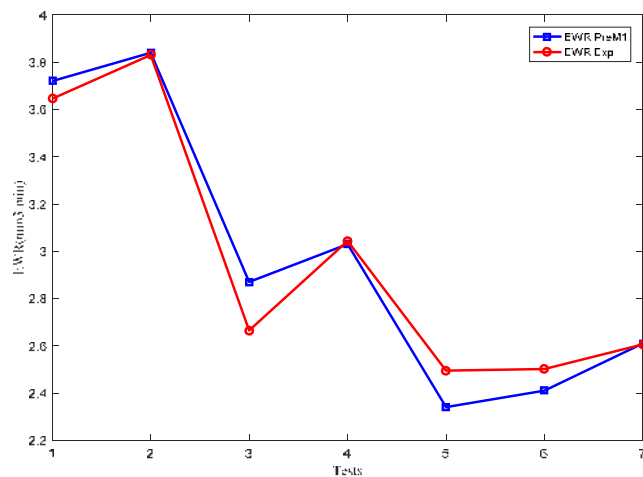
Figure IV.18 Variation du taux d'usure (EWR) expérimental et prévu en fonction du nombre d'essais

Le tableau IV.6 regroupe les valeurs du taux d'usure (EWR) obtenues avec les deux modèles à logique floue, la précision et le taux d'erreur pour les sept nouveaux tests.

Tableau IV.6 Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation du taux d'usure de l'outil (EWR)

essais	Paramètres d'usinage			Sortie EXP.	Sortie prédite par le modèle 1			Sortie prédite par le modèle 2		
	I	V	Ton	EWRExp	EWRE _{PreM1}	Erreur	Précision	EWRE _{PreM2}	Erreur	Précision
	(A)	(V)	(μ s)	(%)	(%)	%	%	(%)	%	%
1	12	120	150	3.6454	3.72	0.020	0.980	3.72	0.020	0.980
2	13	120	175	3.8308	3.84	0.002	0.998	3.79	0.011	0.989
3	13	160	250	2.6645	2.87	0.077	0.923	3	0.126	0.874
4	14	160	275	3.0433	3.03	0.004	0.996	3.04	0.001	0.999
5	15	200	300	2.4947	2.34	0.062	0.938	2.33	0.066	0.934
6	15	200	350	2.5018	2.41	0.037	0.963	2.45	0.021	0.979
7	16	200	375	2.6057	2.61	0.002	0.998	2.72	0.095	0.905
Erreurs et précisions des modèles (%)						2.924	97.076	4.861	95.139	

La précision des deux modèles montre que le premier modèle est plus précis que le deuxième.

**Figure IV.19** Comparaison du taux d'usure (EWR) prévu et expérimental.

La figure IV.19 montre la capacité du modèle flou construit à prédire le taux d'usure (EWR). Pour les mêmes paramètres d'usinage, le taux d'usure (EWR) obtenu par le modèle flou et les tests de confirmation sont représentés sur la figure IV.19.

Les résultats des tests de confirmation ont montré que le modèle flou construit donne des valeurs de taux d'usure (EWR) proches des valeurs réelles. L'écart maximal et minimal des valeurs du taux d'usure (EWR) prévu avec le taux d'usure réel (EWR) est observé à 0,004

% et 0,205 %, respectivement. La précision de prédiction du modèle flou construit est de 97,076 %.

IV.3.4 Rugosité de la surface (Ra)

Les résultats de la défuzzification de la quatrième sortie (Ra), sont présentés sur la figure IV.20.

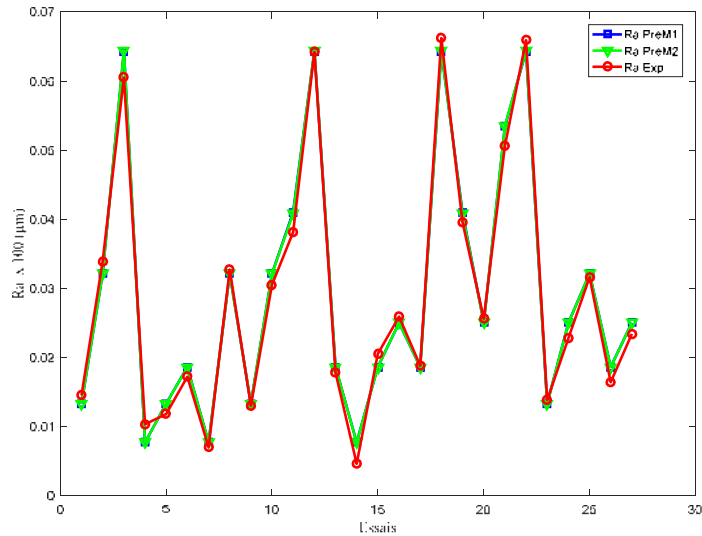


Figure IV.20 Variation de la rugosité de surface (Ra) expérimentale et prévue en fonction du nombre d'essais

Le tableau IV.7 regroupe les valeurs de rugosité de surface (Ra) obtenues avec les deux modèles de logique floue, la précision et le taux d'erreur pour les sept nouveaux tests.

Tableau IV.7 Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la rugosité de surface (Ra)

essais	Paramètres d'usinage			Sortie EXP.	Sortie prédite par le modèle 1			Sortie prédite par le modèle 2		
	I (A)	V (V)	Ton (µs)	RaExp (µm)	Ra _{PreM1} (µm)	Erreur (%)	Précision (%)	Ra _{PreM2} (µm)	Erreur (%)	Précision (%)
1	12	120	150	3.6454	3.72	0.020	0.980	3.72	0.020	0.980
2	13	120	175	3.8308	3.84	0.002	0.998	3.79	0.011	0.989
3	13	160	250	2.6645	2.87	0.077	0.923	3	0.126	0.874
4	14	160	275	3.0433	3.03	0.004	0.996	3.04	0.001	0.999
5	15	200	300	2.4947	2.34	0.062	0.938	2.33	0.066	0.934
6	15	200	350	2.5018	2.41	0.037	0.963	2.45	0.021	0.979
7	16	200	375	2.6057	2.61	0.002	0.998	2.72	0.095	0.905

Erreurs et precisions des modeles (%)

2.924

97.076

4.861

95.139

La precision des deux modeles montre que le premier modele est plus precis que le deuxieme.

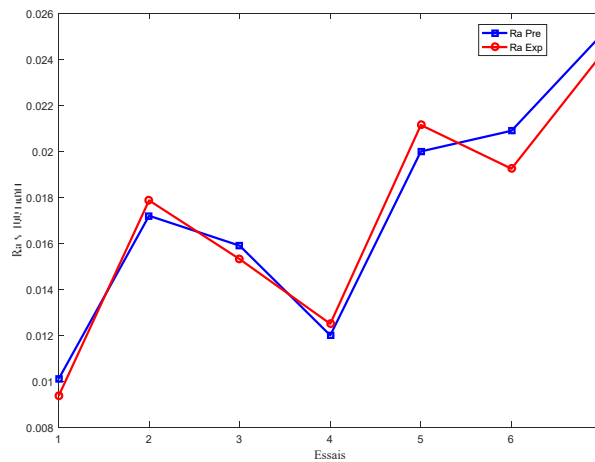


Figure IV.21 Comparaison de la rugosite de surface (Ra) prevue et experimentale.

La figure IV.21 montre la capacite du modele flou construit a predire la rugosite de surface (Ra). Pour les memes parametres d'usinage, la rugosite de surface (Ra) obtenue par le modele flou et les tests de confirmation sont representes sur la figure IV.21.

Les resultats des tests de confirmation ont montre que le modele flou construit donne des valeurs de rugosite de surface (Ra) proches des valeurs reelles. L'ecart maximal et minimal des valeurs de rugosite de surface (Ra) prevues avec la rugosite de surface reelle (Ra) est observe a 0,5 µm et 0,17 µm, respectivement. La precision prevue du modele flou construit est de 97,076%.

IV.3.5 Surcoupe radiale (ROC)

Les resultats de la defuzzification de la cinquieme sortie (ROC), sont presentes sur la figure IV.22.

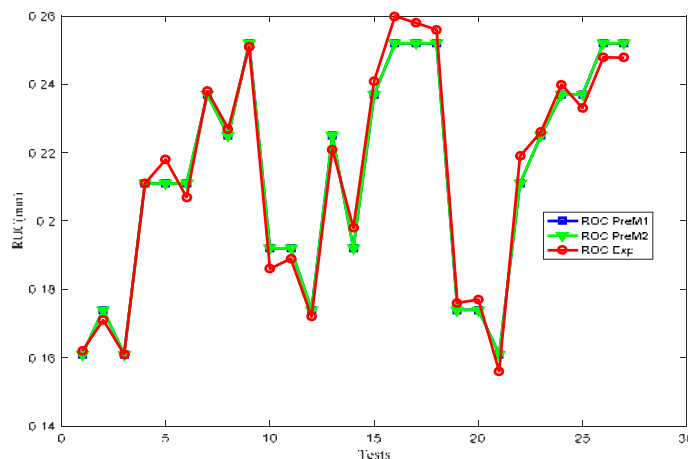


Figure IV.22 Variation de la surcoupe radiale (ROC) experimentale et prevue en fonction du nombre d'essais

Le tableau IV.8 regroupe les valeurs de la surcoupe radiale (ROC) obtenues avec les deux modèles de logique floue, la précision et le taux d'erreur pour les sept nouveaux tests.

Tableau IV.8 Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la surcoupe radiale (ROC)

essais	Paramètres d'usinage			Sortie EXP.	Sortie prédite par le modèle 1			Sortie prédite par le modèle 2		
	I	V	Ton	ROCExp	ROC _{PreM1}	Erreur	Précision	ROC _{PreM2}	Erreur	Précision
	(A)	(V)	(μ s)	(mm)	(mm)	%	%	(mm)	%	%
1	12	120	150	0.174	0.191	0.098	0.902	0.191	0.098	0.902
2	13	120	175	0.187	0.193	0.032	0.968	0.199	0.064	0.936
3	13	160	250	0.205	0.212	0.036	0.964	0.208	0.017	0.983
4	14	160	275	0.218	0.210	0.037	0.963	0.206	0.055	0.945
5	15	200	300	0.234	0.240	0.024	0.976	0.240	0.024	0.976
6	15	200	350	0.248	0.243	0.019	0.981	0.247	0.003	0.997
7	16	200	375	0.242	0.250	0.035	0.965	0.252	0.043	0.957
Erreurs et précisions des modèles (%)						4.004	95.996		4.333	95.667

La précision des deux modèles montre que le premier modèle est plus précis que le deuxième.

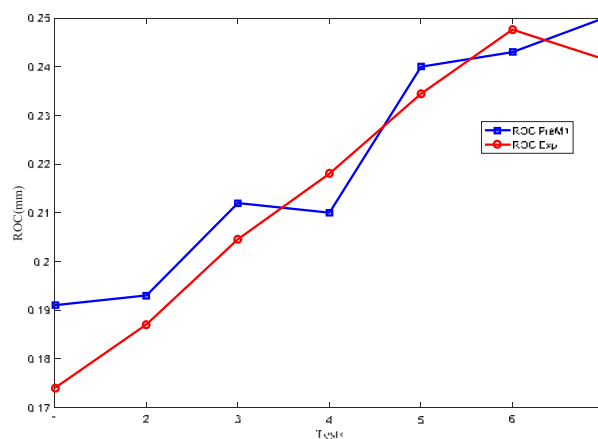


Figure IV.23 Comparaison de la surcoupe radiale (ROC) prévue et expérimentale.

La figure IV.23 montre la capacité du modèle flou construit à prédire la surcoupe radiale (ROC). Pour les mêmes paramètres d'usinage, la surcoupe radiale (ROC) obtenue par le modèle flou et les tests de confirmation sont représentés sur la figure IV.23.

Les résultats des tests de confirmation ont montré que le modèle flou construit donne des valeurs de Radial over cut (ROC) proches des valeurs réelles. L'écart maximal et

minimal des valeurs de sur-coupe radiale (ROC) prévues avec la sur-coupe radiale réelle (ROC) est observé à 0,0047 mm et 0,017 mm, respectivement. La précision prévue du modèle flou construit est de 95,996 %.

IV.3.6 Circularité (CIR)

Les résultats de la défuzzification de la sixième sortie (CIR), sont présentés sur la figure IV.24.

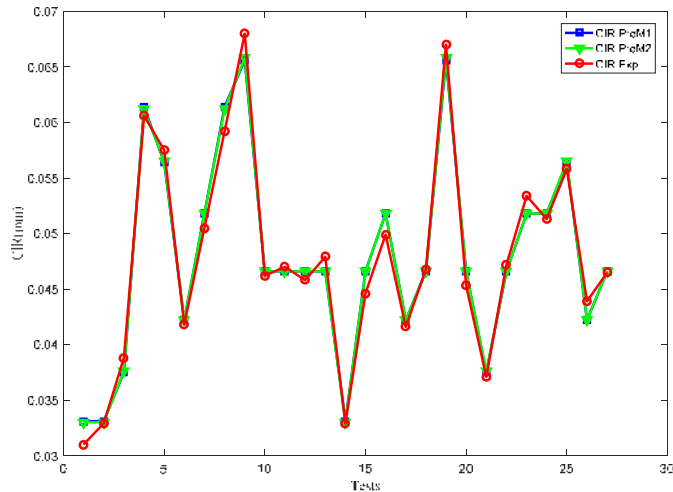


Figure IV.24 Variation de la circularité (CIR) expérimentale et prévue en fonction du nombre d'essais

Le tableau IV.9 regroupe les valeurs de circularité (CIR) obtenues avec les deux modèles de logique floue, la précision et le taux d'erreur pour les sept nouveaux tests.

Tableau IV.9 Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la circularité (CIR)

essais	Paramètres d'usinage			Sortie EXP.	Sortie prédite par le modèle 1			Sortie prédite par le modèle 2		
	I (A)	V (V)	Ton (μs)	CIRExp (mm)	CIR _{PreM1} (mm)	Erreur (%)	Précision (%)	CIR _{PreM2} (mm)	Erreur (%)	Précision (%)
1	12	120	150	0.0534	0.0501	0.062	0.938	0.0497	0.069	0.931
2	13	120	175	0.0575	0.0545	0.052	0.948	0.0566	0.016	0.984
3	13	160	250	0.0453	0.0426	0.060	0.940	0.0417	0.079	0.921
4	14	160	275	0.0388	0.0366	0.057	0.943	0.0358	0.077	0.923
5	15	200	300	0.0472	0.0473	0.002	0.998	0.0474	0.004	0.996
6	15	200	350	0.047	0.0463	0.015	0.985	0.0455	0.032	0.968
7	16	200	375	0.0505	0.0475	0.059	0.941	0.0468	0.073	0.927
Erreurs et précisions des modèles (%)						4.381	95.619	5.016	94.984	

La précision des deux modèles montre que le premier modèle est plus précis que le deuxième.

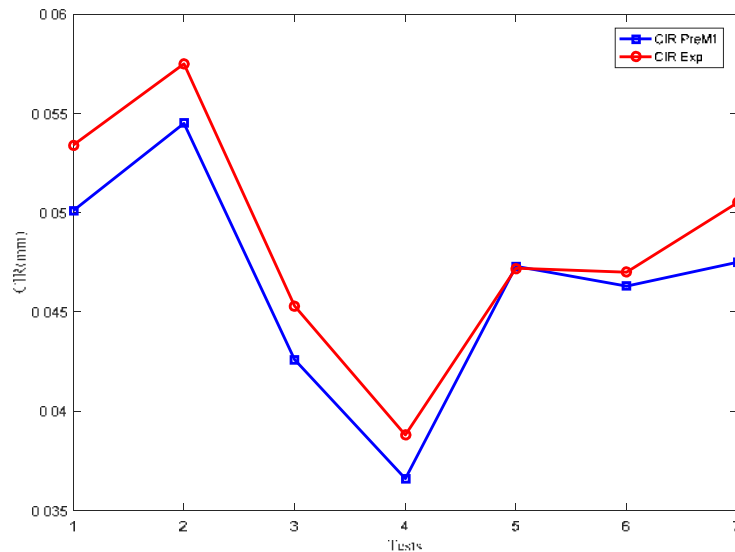


Figure IV.25 Comparaison de la circularité (CIR) prévue et expérimentale.

La figure IV.25 montre la capacité du modèle flou construit à prédire la circularité (CIR). Pour les mêmes paramètres d'usinage, la circularité (CIR) obtenue par le modèle flou et les tests de confirmation sont représentés sur la figure IV.25.

Les résultats des tests de confirmation ont montré que le modèle flou construit donne des valeurs de circularité (CIR) proches des valeurs réelles. L'écart maximal et minimal des valeurs de circularité prédite (CIR) par rapport à la circularité réelle (CIR) est observé à 0,0001 mm et 0,0033 mm, respectivement. La précision de prédiction du modèle flou construit est de 95,619 %.

IV.3.7 Cylindricité (CYL)

Les résultats de la défuzzification de la septième sortie (CYL) sont illustrés à la figure IV.26.

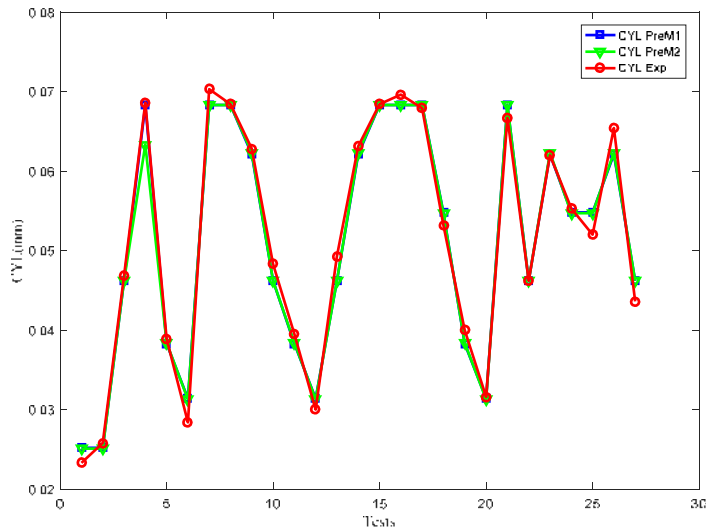


Figure IV.26 Variation de la cylindricité (CYL) expérimentale et prévue en fonction du nombre d'essais

Le tableau IV.10 regroupe les valeurs de cylindricité (CYL) obtenues avec les deux modèles de logique floue, la précision et le taux d'erreur pour les sept nouveaux tests.

Tableau IV.10 Erreur et précision du système flou pour les tests de confirmation de la cylindricité (CYL)

essais	Paramètres d'usinage			Sortie EXP.	Sortie prédite par le modèle 1		Sortie prédite par le modèle 2			
	I	V	Ton	CYLExp	CYL _{PreM1}	Erreur	Précision	CYL _{PreM2}	Erreur	Précision
	(A)	(V)	(µs)	(mm)	(mm)	%	%	(mm)	%	%
1	12	120	150	0.0483	0.0471	0.025	0.975	0.0473	0.021	0.979
2	13	120	175	0.0462	0.0449	0.028	0.972	0.047	0.017	0.983
3	13	160	250	0.0569	0.0549	0.035	0.965	0.0543	0.046	0.954
4	14	160	275	0.062	0.0632	0.019	0.981	0.0632	0.019	0.981
5	15	200	300	0.0569	0.0536	0.058	0.942	0.0537	0.056	0.944
6	15	200	350	0.0532	0.0535	0.006	0.994	0.0535	0.006	0.994
7	16	200	375	0.0493	0.0476	0.034	0.966	0.0466	0.055	0.945
Erreurs et précisions des modèles (%)						2.937	97.063	3.139	96.861	

La précision des deux modèles montre que le premier modèle est plus précis que le deuxième.

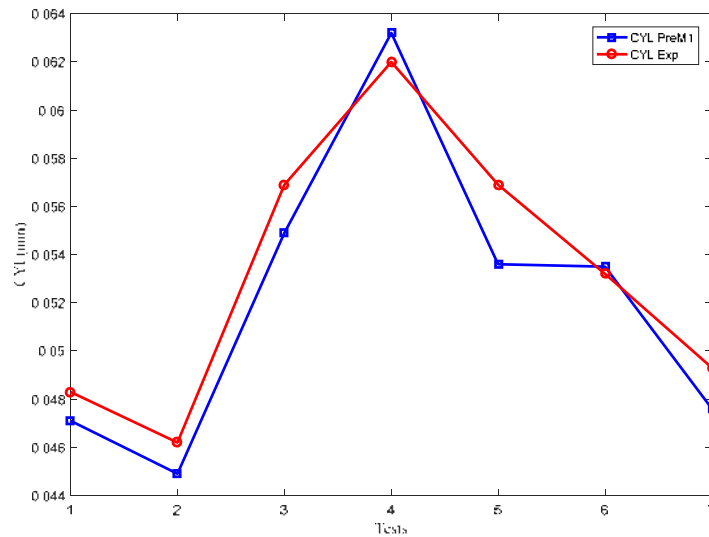


Figure IV.27 Comparaison de la cylindricité (CYL) prévue et expérimentale.

La figure IV.27 montre la capacité du modèle flou construit à prédire la cylindricité (CYL). Pour les mêmes paramètres d'usinage, la cylindricité (CYL) obtenue par le modèle flou et les tests de confirmation sont représentés sur la figure IV.27.

Les résultats des tests de confirmation ont montré que le modèle flou construit donne des valeurs de cylindricité (CYL) proches des valeurs réelles. L'écart maximal et minimal des valeurs de cylindricité prévues (CYL) avec la cylindricité réelle (CYL) est observé à 0,0001 mm et 0,0033 mm, respectivement. La précision de prédiction du modèle flou construit est de 97,063 %.

IV.4 Représentations graphiques

IV.4.1 Taux d'enlèvement de matière (MRR)

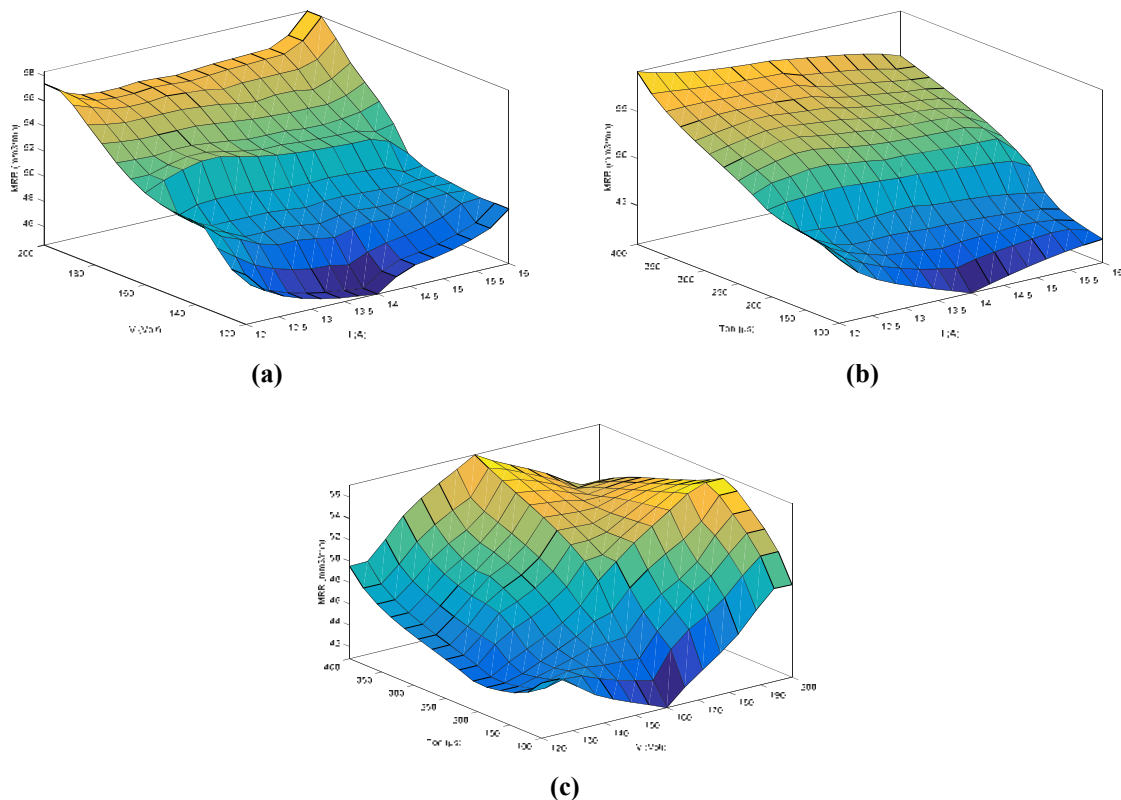


Figure IV.28 Variation du taux d'enlèvement de matière prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage.

L'influence du courant sur le MRR est illustrée aux figures IV.28 (a) et IV.28 (b). On constate sur ces figures que la variation du courant n'est pas significative et reste quasiment stable. Cette tendance peut être due à l'intervalle du courant choisi dans cette étude qui a des niveaux élevés [76,88]. Cette tendance a été observée à des niveaux de courant élevés et, en raison d'une décharge trop importante, est contre-productive, ce qui entraîne une augmentation de la taille du canal plasma au cours du temps pendant la décharge, ce qui entraîne une perte d'énergie dans le diélectrique, ce qui entraîne une réduction dans l'enlèvement de matière. La même observation a été notée par P. Ong et al. [89] et F. Klocke et al [90].

L'influence du temps d'impulsion sur le MRR est illustrée aux figures IV.28 (b) et IV.28 (c). La figure IV.28 (b) montre que l'augmentation du temps d'impulsion entraîne une augmentation significative du MRR. Cette figure montre également la plus forte augmentation du MRR produit dans la région à faible courant. Un temps d'impulsion élevé transfère plus d'énergie de décharge à la pièce et augmente donc le taux d'enlèvement du matériau.

La figure IV.28 (C) montre que le MRR s'avère être maximisé dans la région avec un temps d'impulsion réduit et des valeurs de tension maximales. Bien que la quantité de matière fondue soit faible, mais l'augmentation de la tension entraîne un arrachement rapide de la matière.

Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur le taux d'enlèvement de matière est le temps d'impulsion avec une contribution maximale de 28,37%.

IV.4.2 Taux d'usure de l'outil (TWR)

La figure IV.29 montre une représentation graphique du taux d'usure de l'outil flou (TWR) en fonction des trois paramètres d'usinage.

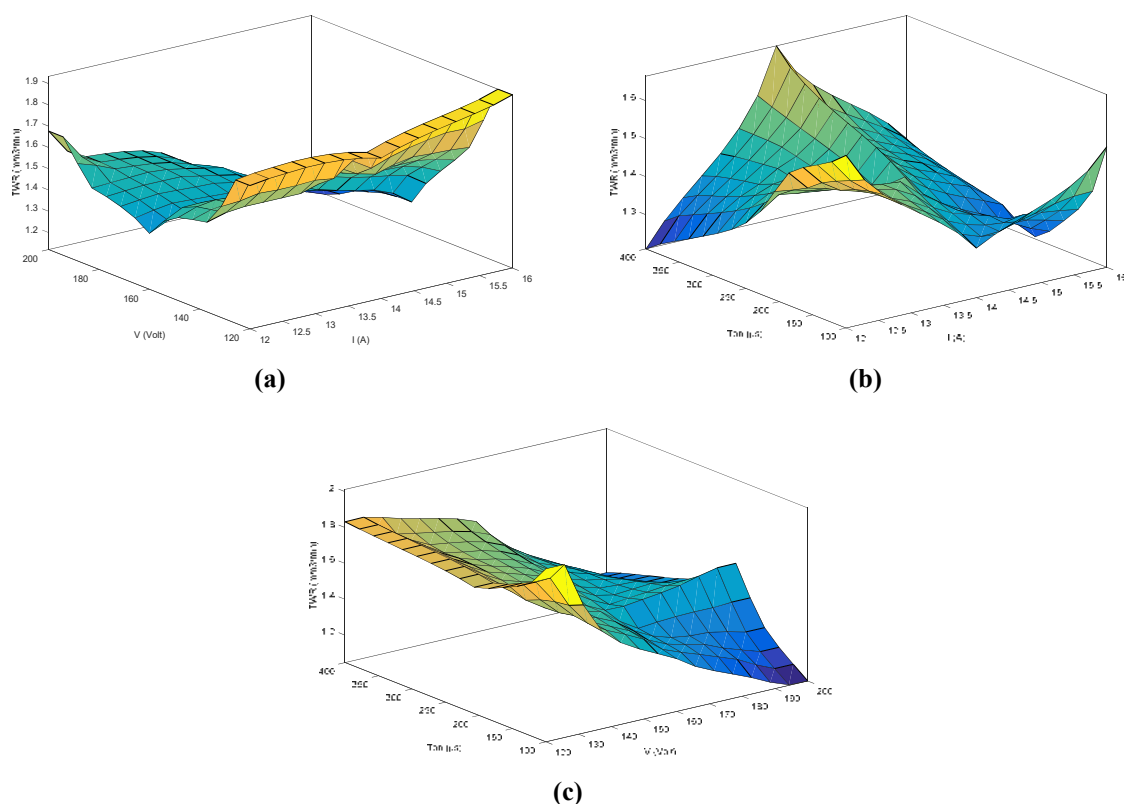


Figure IV.29 Variation du taux d'usure de l'outil prédit par logique floue en fonction des paramètres d'usinage.

La figure IV.29 (a) montre une diminution de l'TWR avec l'augmentation de la tension qui revient selon P. Ong et al. [88] à la diminution du courant participant à l'enlèvement de matière due à la formation d'une couche visqueuse ralentissant l'échange d'espèces dans l'environnement de l'électrode.

Figure IV.29 (b) et IV.29 (c) montrent qu'une augmentation du temps d'impulsion entraîne une réduction de l'EWR. Selon Y.C. Lin et al [91], cela est dû au dépôt du carbone pyrolytique craqué du diélectrique sur l'électrode, ce qui conduit à la formation d'une couche protectrice. En revanche, une augmentation de l'EWR est observée à des courants supérieurs à

14 A (figure IV.29 (b)) et à de petites valeurs de tension (figure IV.29 (c)). Cela est dû au fait que la conductivité de l'électrode est beaucoup plus élevée que la conductivité de la pièce et donc la chaleur dégagée par l'électrode est plus rapide, ce qui est indiqué dans le travail de C.P. Mohanty [92].

Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur le taux d'usure de l'outil (TWR) est la tension avec une contribution maximale de 39,80%.

IV.4.3 Taux d'usure (EWR)

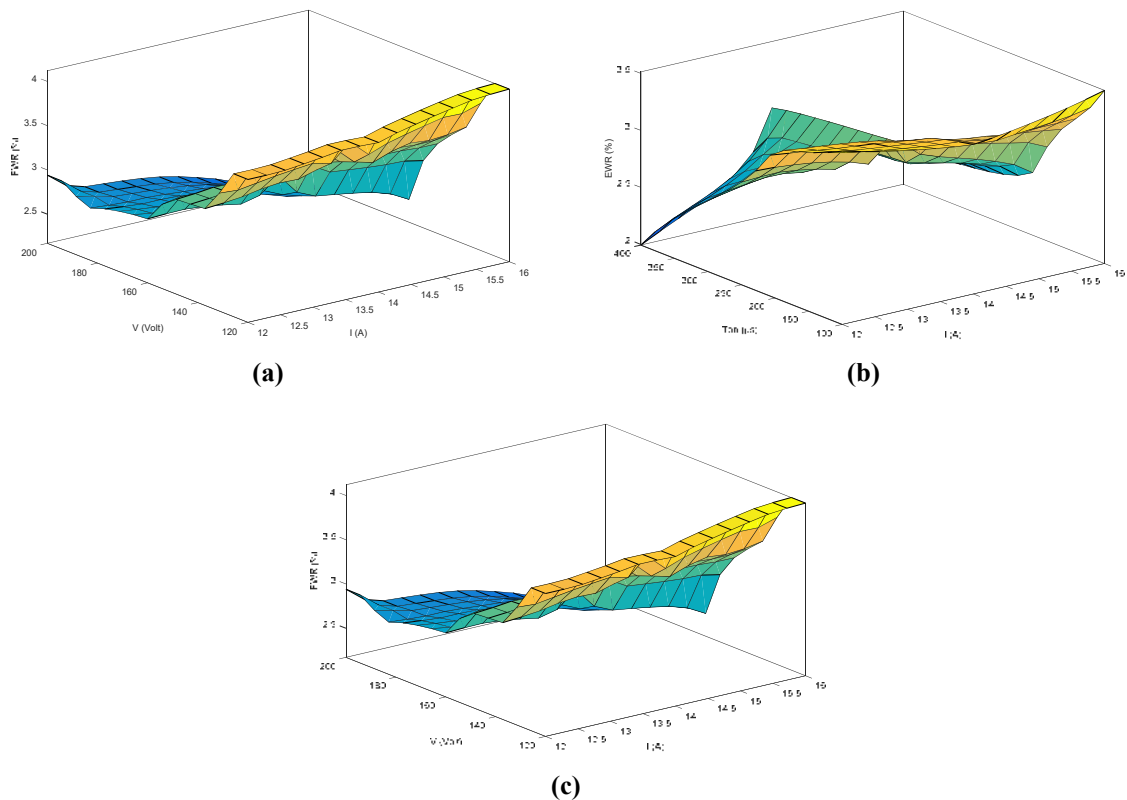


Figure IV.30 Variation du taux d'usure de prédit par logique floue en fonction des paramètres d'usinage.

Les figures 43 (a), 43 (b) et 43 (c) montrent la variation de l'EWR. Et comme EWR représente le rapport entre le taux d'enlèvement d'outil et le taux d'enlèvement de matière, sa variation s'explique par les mêmes raisons de variation du MRR et de l'EWR.

Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur le taux d'usure (EWR) est la tension avec une contribution maximale de 52,62%.

IV.4.4 Rugosité de la surface (Ra)

La figure IV.31 montre graphiquement l'effet du courant (I), de la tension (V) et de temps d'impulsion (Ton) sur la rugosité de la surface.

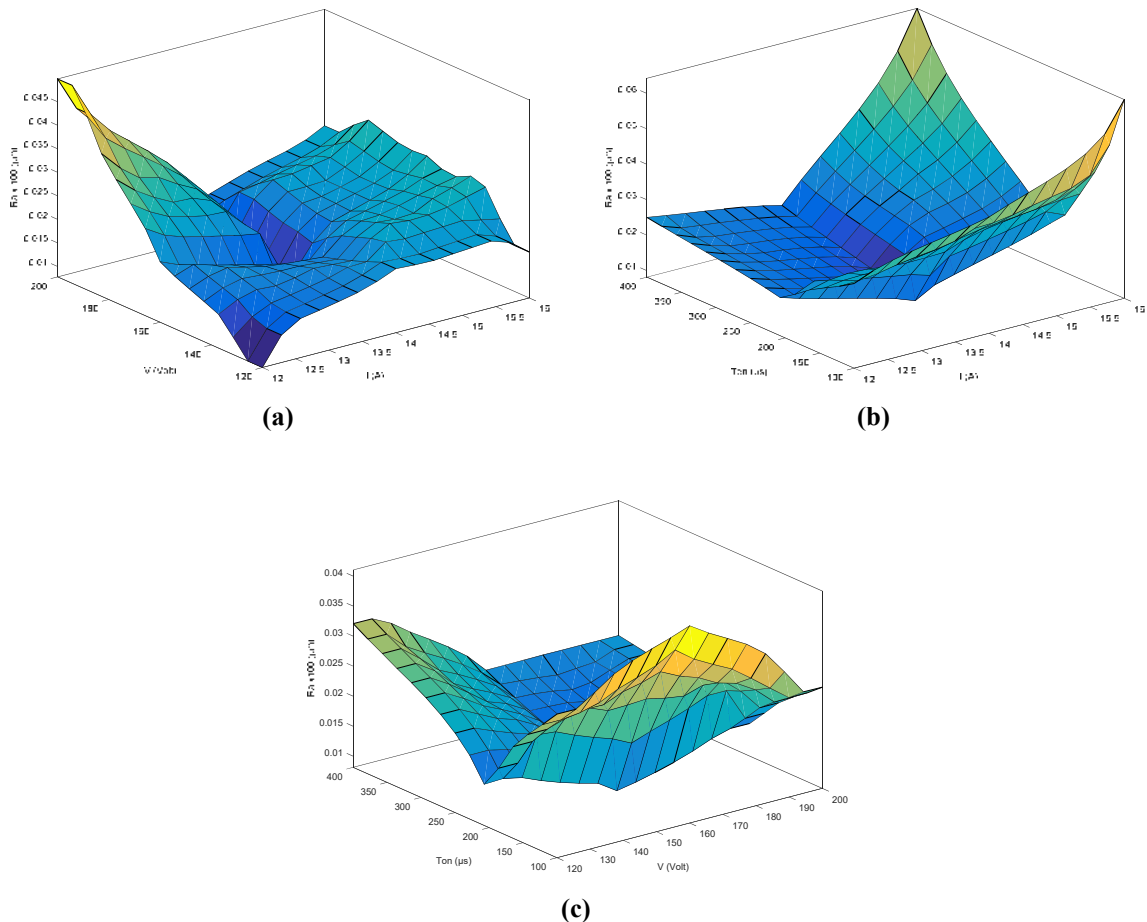


Figure IV.31 Variation de la rugosité de la surface prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage.

Comme le montre la figure IV.31 (a), le tracé de surface se compose de deux régions : une région à forte pente et une région à faible pente. Dans la région à faible pente, la rugosité de la surface augmente progressivement avec la tension. Dans cette région également, la rugosité augmente avec l'augmentation du courant.

Dans la deuxième région $V > 160$ Volt et $I < 14$ A, la rugosité augmente rapidement avec la tension et diminue avec l'augmentation du courant. Cela s'explique par le taux important d'enlèvement de la matière dans ces conditions.

La figure IV.31 (b) montre clairement que la rugosité de la surface est contrôlée par le courant et le temps d'impulsion, ce qui s'explique par la quantité d'énergie appliquée pendant la durée de l'impulsion. Avec une impulsion plus longue et un courant élevé, plus de matériau de la pièce sera fondu. Les cratères résultants seront plus larges et plus profonds, ce qui augmentera la rugosité de la surface. Cependant, un temps d'impulsion extrême avec des valeurs de courant faibles est contre-productif.

La figure IV.31 (c) montre qu'une combinaison des faibles valeurs du temps d'impulsion et des valeurs moyennes de la tension conduit à des valeurs maximales de rugosité de surface.

Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la rugosité de surface (Ra) est le temps d'impulsion avec une contribution maximale de 81,24%.

IV.4.5 Surcoupe radiale (ROC)

La figure IV.32 montre l'évolution de la surcoupe radiale en fonction du courant, de la tension et du temps d'impulsion.

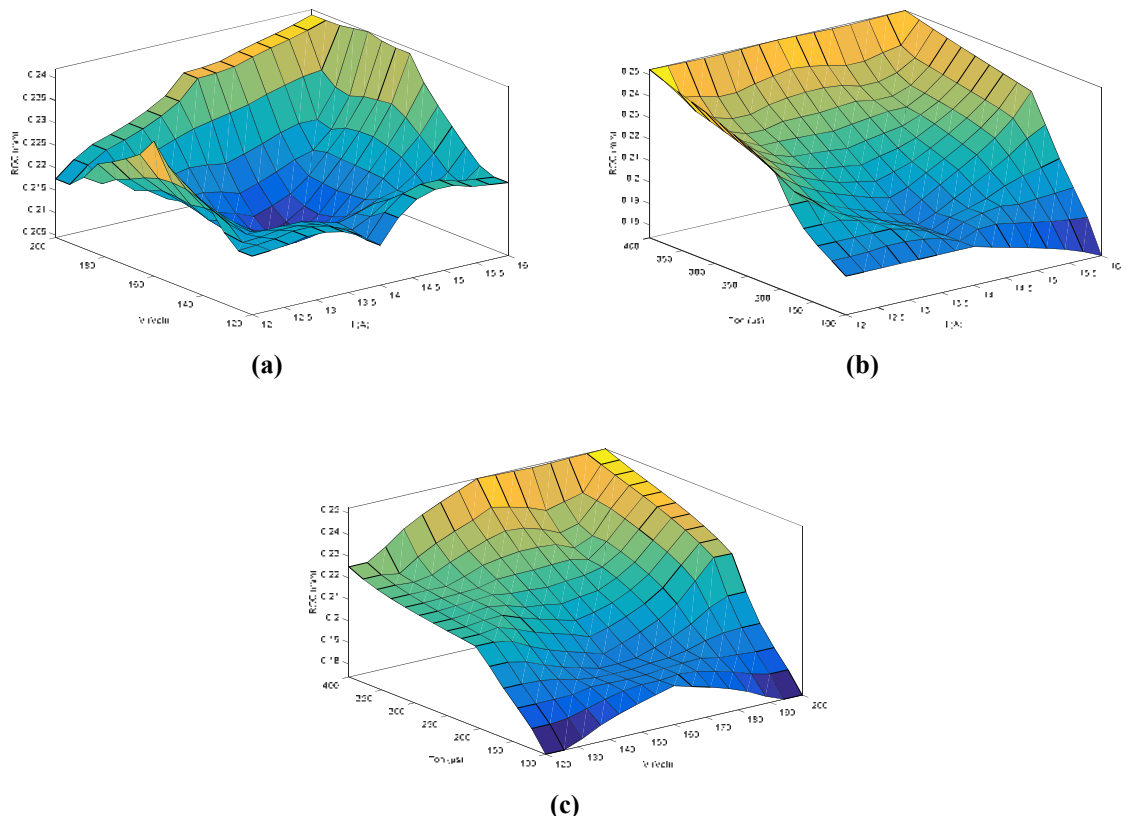


Figure IV.32 Variation de la surcoupe radiale prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage.

Généralement, nous voyons que la valeur de la surcoupe radiale augmente avec le temps d'impulsion.

La figure IV.32 (a) montre que la surcoupe radiale diminue avec l'augmentation du courant et de la tension jusqu'à une valeur de 14 A pour le courant et une valeur de 160 Volts pour la tension. Au-delà de ces valeurs, il y a une légère augmentation de la surcoupe radiale.

La figure IV.32 (b) montre que la surcoupe radiale augmente avec l'augmentation du temps d'impulsion, quelle que soit la valeur du courant.

Une combinaison des valeurs maximales de tension et du temps d'impulsion conduit à des valeurs maximales de surcoupe radiale, comme illustré à la figure IV.32 (c).

Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la surcoupe radiale (ROC) est le temps d'impulsion avec une contribution maximale de 36,11%.

IV.4.6 Circularité (CIR)

La figure IV.33 montre l'évolution de la circularité en fonction du courant, de la tension et de temps d'impulsion.

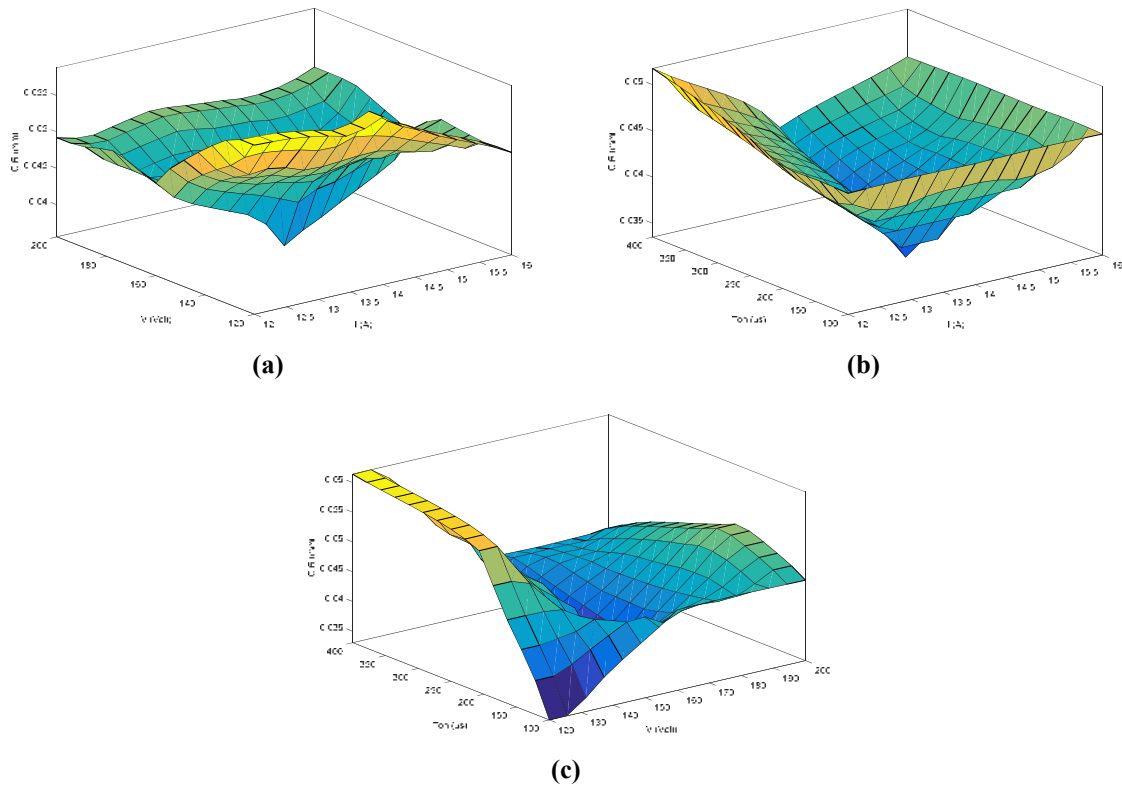


Figure IV.33 Variation de la circularité prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage.

En général, comme le montrent les figures IV.33 (a) et IV.33 (b), la tolérance précise de la circularité est obtenue pour les valeurs moyennes de trois variables ($I = 14$ A, $V = 160$ Volt et $I_{on} = 200$ μ s).

Comme le montre la figure IV.33 (c), la combinaison des valeurs maximales du temps d'impulsion et des valeurs de tension minimale entraîne une augmentation de la tolérance de circularité.

Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la circularité (CIR) est la tension avec une contribution maximale de 49,54%.

IV.4.7 Cylindricité (CYL)

La figure IV.34 montre l'évolution de la cylindricité en fonction du courant, de la tension et de temps d'impulsion.

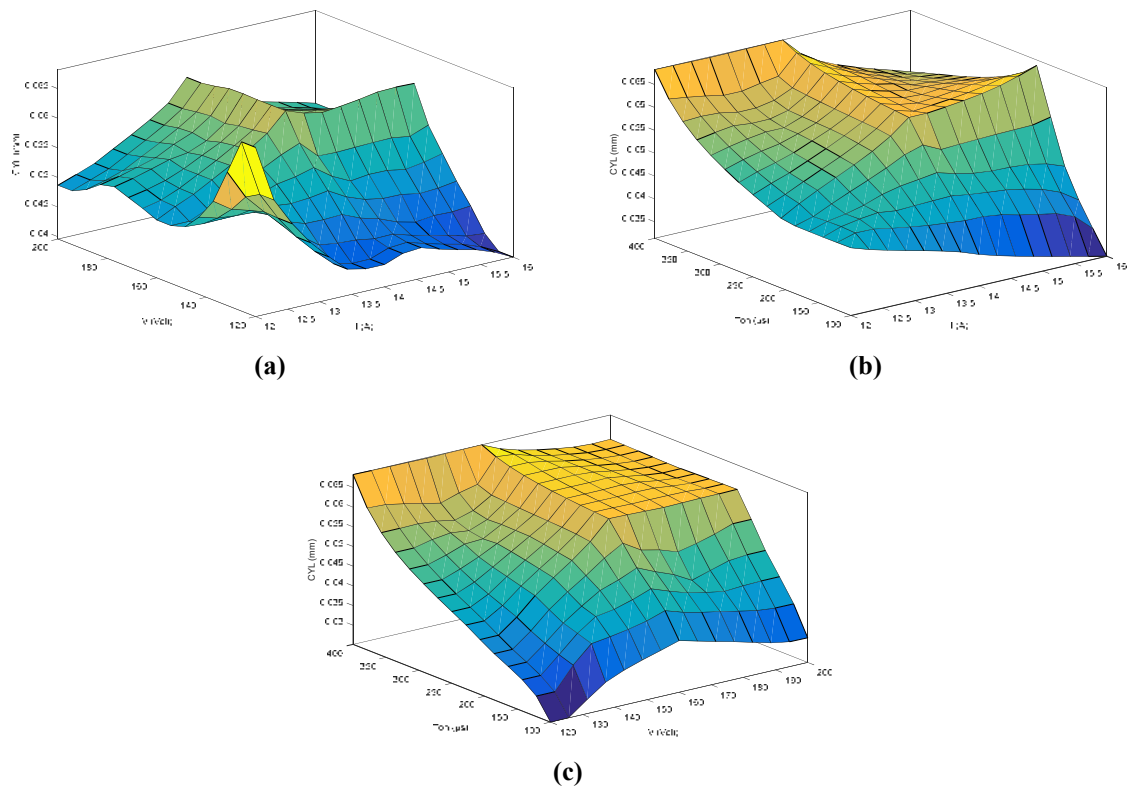


Figure IV.34 Variation de la cylindricité prédite par logique floue en fonction des paramètres d'usinage.

La combinaison des valeurs minimales de tension et du temps d'impulsion avec des valeurs maximales de courant conduit à une cylindricité minimale comme illustré sur les figures IV.34 (a), IV.34 (b). L'augmentation du temps d'impulsion et la tension entraîne une augmentation rapide de la cylindricité jusqu'à une tension de 160 Volts. Au-dessus de cette valeur, la cylindricité se stabilise (figure IV.34 (c)).

Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la cylindricité (CYL) est le temps d'impulsion avec une contribution maximale de 63,10%.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les fonctions d'appartenance et les règles floues développées étaient basées sur des mesures expérimentales des performances de l'usinage par électroérosion. Le modèle flou développé a été vérifié et jugé adéquate avec un niveau de précision de 98,489% pour le taux d'enlèvement de matière (MRR). 96,614% pour le taux d'usure de l'outil (TWR). 97,076% pour le taux d'usure (EWR). 94,715% pour la rugosité de surface (Ra). 95,996% pour la surcoupe radiale (ROC). 95,619% pour la circularité (CIR) et 97,063% pour la cylindricité (CYL). Ce qui démontre que le modèle peut être utilisé pour prédire les performances d'usinage par décharge électrique de l'AISI 1095 acier traité.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Les travaux exécutés dans le cadre de cette thèse ont permis une meilleure compréhension de l'effet de différents paramètres d'entrée sur les performances de l'usinage par électroérosion de l'acier AISI 1095. Le courant de décharge, la tension et le temps d'impulsion ont été considérés comme des variables d'entrée. L'analyse de l'effet des paramètres de processus sur les performances de l'usinage a été effectuée de méthodes : une méthode expérimentale et une méthode basée sur l'intelligence artificielle.

L'étude que nous avons entrepris nous a permis de conclure que :

- L'approche expérimentale utilisée dans ce travail pour mesurer les performances de l'usinage par décharge électrique (EDM) et les erreurs géométriques associées peuvent être utilisées de manière pratique. Elle est utile d'être un moyen économique de suivre l'évolution des performances d'usinage de l'acier traité AISI 1095 avec EDM.
- Les fonctions d'appartenance et les règles floues développées étaient basées sur des mesures expérimentales des performances de décharge électrique d'usinage et des erreurs géométriques associées.
- Les effets des paramètres d'usinage, sur les performances d'usinage par décharge électrique et les erreurs géométriques associées, ont été étudiés et il a été constaté que certains paramètres d'usinage ont un effet plus important que d'autres tels que :
 - Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur le taux d'enlèvement de matière est l'impulsion dans le temps avec une contribution maximale de 28,37%.
 - Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur le taux d'usure de l'outil (TWR) est la tension avec une contribution maximale de 39,80%.
 - Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur le taux d'usure (WR) est la tension avec une contribution maximale de 52,62%.
 - Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la rugosité de surface (Ra) est l'impulsion dans le temps avec une contribution maximale de 81,24%.
 - Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la surcoupe radiale (ROC) est l'impulsion dans le temps avec une contribution

maximale de 36,11%.

- Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la circularité (CIR) est la tension avec une contribution maximale de 49,54%.
- Le facteur le plus influent parmi les trois paramètres d'usinage sur la cylindricité (CYL) est l'impulsion dans le temps avec une contribution maximale de 63,10%.
- L'adéquation du modèle flou a été vérifiée et jugée adéquate avec un niveau de précision de : 98,489% pour le taux d'enlèvement de matière (MRR), 96,614% pour le taux d'usure de l'outil (TWR), 97,076% pour le taux d'usure (WR), 94,715% pour la rugosité de surface (Ra), 95,996% pour la surcoupe radiale (ROC), 95,619% pour la circularité (CIR) et 97,063% pour la cylindricité (CYL), ce qui démontre que le modèle peut être utilisé pour prédire les performances d'usinage par décharge électrique de l'AISI 1095 acier traité.
- La comparaison et la validation des résultats flous avec les résultats des tests expérimentaux ont confirmé la grande précision du modèle. La technique de modélisation floue pourrait être une méthode économique et efficace pour prédire d'autres performances d'usinage par décharge électrique (EDM).
- La stratégie basée sur la qualification de l'opérateur pour sélectionner les paramètres d'usinage pour l'usinage de l'acier traité AISI 1095 peut être décrite par la théorie des ensembles flous.

Perspectives

Dans un travail futur on propose :

- d'élargir cette étude sur d'autre type de matériaux,
- d'étudier l'effet des paramètres d'élaborations des électrodes sur les performances d'usinage,
- d'étudier l'effet des diélectriques utilisés et leur écoulement sur les performances d'usinage.

Par conséquent, il existe une grande opportunité de recherche impliquant les performances d'usinage par électroérosion, et leurs effets sur les processus de production mécanique.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1]. K.H. Ho, S.T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(5): (2003)1287–1300. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7)
- [2]. S.H. Aghdeab, A.I. Ahmed, Effect of Pulse on Time and Pulse off Time on Material Removal Rate and Electrode Wear Ratio of Stainless Steel AISI 316L in EDM, *Eng. & Tech. Journal*, Vol.34, Part (A), No.15, (2016).
- [3]. M.P. Jahan, Y.S. Wong, M. Rahman, A study on the fine-finish die-sinking micro EDM of tungsten carbide using different electrode materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7-8): (2009)3956–3967. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.015>
- [4]. F. Han, L. Chen, D. Yu, X. Zhou, Basic study on pulse generator for micro EDM, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33: (2007) 474–479. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0483-9>
- [5]. M.T. Yan, Y.T. Liu, Design analysis and experimental study of a high frequency power supply for finish cut of wire EDM, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(7): (2009)793–796. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.04.004>
- [6]. V.K. Jain, Magnetic field assisted abrasive based micro-/nano – finishing *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (2009) 6022–6038. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.015>
- [7]. G. Guillaume, Développement d'un Procède d'Usinage par Micro-Electroérosion, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 2012. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00873543>
- [8]. *Mold Finishing & Polishing Manual*, I.T. Quarnstrom Foundation, Society of Plastics Engineers, 1985, second print 1999, pp. IV.4-IV.5.
- [9]. E.C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*, United-State of America, Society of Manufacturing Engineers, 2001, 329 pages.
- [10]. A. Curodeau, L.F. Marceau, M. Richard, J. Lessard, New EDM Polishing and Texturing Process with Conductive Polymer Electrodes, *Journal of Materials Processing Technology* 159 (2005) pp. 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.004>
- [11]. L. Bianchi, E. Regal, Usinage par électroérosion, *Tech. l'ingénieur*, vol. B7310, pp. 2–24, 1987. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01306778v2>
- [12]. H.P. Schulze, M. Läuter, G. Wollenberg, Investigation of the pre-ignition stage in EDM, in *Institute for Fundamental Electrical Engineering and Electromagnetic Compatibility*, 2001

- [13]. C. Joseph, Contribution à l'accroissement des performances du processus de μ EDM par l'utilisation d'un robot à dynamique élevée et de haute précision. thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vol. 3281, 2005.
- [14]. A. Descoedres, characterization of electrical discharge machining plasmas. Thèse N° 3542 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne pour l'obtention du grade de docteur ès sciences, 2006.
- [15]. A. Descoedres, C. Hollenstein, G. Wälder, R. Perez, Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 22, pp. 4066–4073, Nov. 2005.
- [16]. A. Descoedres, C. Hollenstein, R. Demellayer, G. Wälder, Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 184–190, Jun. 2004.
- [17]. B.M. Schumacher, After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 2004, pp. 376–381. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.060>
- [18]. J. Qian, R. P. Joshi, E. Schamiloglu, J. Gaudet, J. R. Woodworth, J. Lehr, Analysis of polarity effects in the electrical breakdown of liquids, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 2, pp. 359–369, Jan. 2006. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/2/018>
- [19]. K. Albinski, K. Musiol, A. Miernikiewicz, S. Labuz, M. Malota, The temperature of a plasma used in electrical discharge machining, *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 5, pp. 736–742, 1996. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/5/4/015>
- [20]. W. Natsu, M. Shimoyamada, M. Kunieda, Study on Expansion Process of EDM Arc Plasma, *JSME Int. J. Ser. C*, vol. 49, no. 2, pp. 600–605, 2006. <https://doi.org/10.1299/jsmec.49.600>
- [21]. G. Vasudevamurthy, T. W. Knight, Effect of system parameters on size distribution of 304 stainless steel particles produced by electrical discharge mechanism, *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 27, pp. 4872–4874, Nov. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.03.070>
- [22]. J.E.A. Qudeiri, A. Zaiout, A.H.I. Mourad, M.H. Abidi, A. Elkaseer, Principles and Characteristics of Different EDM Processes in Machining Tool and Die Steels - Applied Sciences, 2020, 10(6), 2082 <https://doi.org/10.3390/app10062082>
- [23]. S. Sommer, C. & Sommer, Complete EDM Handbook: Wire EDM, RAM EDM, Small Hole EDM, Practical Information for Designers, Engineers, Machinists, Tool and Die Makers, Mold Makers and Others in the Machining Fields. Advance Publ. 2005.
- [24]. M. Munz, M. Risto, R. Haas, Specifics of Flushing in Electrical Discharge Drilling, *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 83–88, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.024>.
- [25]. P. Kuppan, A. Rajadurai, S. Narayanan, Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 38, no. 1–2, pp. 74–84, May 2007. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1084-y>

- [26]. M. Sen, H. Shan, A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 2, pp. 137–152, Feb. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.08.005>
- [27]. J. Richard, R. Demellayer, Micro-EDM-milling Development of New Machining Technology for Micro-machining, *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 292–296, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.023>
- [28]. M. Bayramoglu, A.W. Duffill, Systematic investigation on the use of cylindrical tools for the production of 3D complex shapes on CNC EDM machines, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 34 (3) (1994) 327–339. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)90003-5)
- [29]. A. Arthur, P.M. Dickens, R.C. Cobb, Using rapid prototyping to produce electrical discharge machining electrodes, *Rapid Prototyping J.* 2 (1) (1996) 4–12. <https://doi.org/10.1108/13552549610109036>
- [30]. F.T. Weng, M.G. Her, Study of the batch production of micro parts using the EDM process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 19 (4) (2002) 266–270. <https://doi.org/10.1007/s001700200033>
- [31]. S. Bigot, J.P. Pernot, A. Surleraux, A. Elkaseer, Micro-EDM numerical simulation and experimental validation. In *Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, San Sebastian, Spain, 8–10 October 2013; pp. 55–58. <http://orca.cf.ac.uk/id/eprint/58919>
- [32]. N.M. Abbas, D.G. Solomon, M.F. Bahari, A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2007, 47, 1214–1228. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.08.026>
- [33]. J.A. Sanchez, I. Cabanes, L.N. Lopez de Lacalle, A. Iamikiz, Development of optimum electro discharge machining technology for advanced ceramics, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 18 (12) (2001) 897–905. <https://doi.org/10.1007/PL00003958>.
- [34]. B.H. Yan, C.C. Wang, W.D. Liu, F.Y. Huang, Machining characteristics of Al₂O₃/6061Al composite using rotary EDM with a disklike electrode, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 16 (5) (2000) 322–333. <https://doi.org/10.1007/s001700050164>
- [35]. A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis, D.I. Pantelis, On the electro discharge machining of ceramic plasma-sprayed steel plates, *Ann. CIRP* 41 (1) (1992) 235–238. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61193-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61193-7)
- [36]. C. R. Sanghani. al *Int. A Review of Research on Improvement and Optimization of Performance Measures for Electrical Discharge Machining*, *Journal of Engineering Research and Applications* ISSN: 2248-9622, Vol. 4, Issue 1(Version 2), January 2014, pp.433-450.
- [37]. 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*, No.7, (2005) pp. 329–341. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2005.006836>

- [38]. A. Pandey, S. Singh, Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining. *International Journal of Engineering Science and Technology* Vol. 2(6), (2010) 2172-2191.
- [39]. D. Kremer, Usinage par Electroérosion, *Techniques de L'ingénieur, Traité Génie Mécanique*, BM 7 251, pp 1-22, 1997.
- [40]. J.S. Soni, G. Chakraverti, Study of surfaces and accuracies produced during EDM of high carbon high chromium die steel with rotating electrode. *Indian Journal of Engineering & Materials Science*, Vol. 1, (1994) pp.127-13. <http://hdl.handle.net/123456789/29946>
- [41]. P.M. Lonardo, A.A. Bruzzone, Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM, *Ann. CIRP* 48 (1) (1999) 123– 126. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63146-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63146-1)
- [42]. Y.S. Wong, L.C. Lim, L.C. Lee, Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces, *J. Mater. Process. Technol.* 48 (1995) 299–305. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01662-K](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01662-K)
- [43]. K. Kagaya, Y. Oishi, K. Yada, Micro-electro-discharge machining using water as a working fluid—I: micro-hole drilling, *precision Eng.* 8 (3) (1986) 157–162. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(86\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0141-6359(86)90034-6)
- [44]. R. Singh, J.S. Khamba, Investigation for ultrasonic machining of titanium and its alloys. *J. Mater. Process. Tech.* 183, (2007) 363–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.026>
- [45]. G. Boothroyd, W. Knight. *Fundamentals of machining and machine Tools*. New York: Marcel Dekker; 1989.
- [46]. A. Rizwan, K. M. Moeed, S.A.H. Rizvi, Experimental Analysis of Machining Parameters for EDM of AISI 4340 Steel using Copper-Tungsten Electrode *Science Direct*. (2016)
- [47]. D. Verma, M. F. Hasan, S.A.H. Rizvi, Parametric Optimization of Performance of EDM on Alloy Steel AISI 4147 using Taguchi Approach, *Journal of Thermal Energy Systems (MAT)*. (2016)
- [48]. A. Sarode, A.J. Parmar, U. Pandharkar, S. Junnarkar, Effect of Electrode Material and geometry EDM Performance for OHNS dies steel” *IJAEMS*. 2016
- [49]. S. Raja, K. Kumarb, Optimization and Prediction of Material Removing Rate in Die Sinking Electro Discharge Machining of EN45 Steel Tool, *Science Direct*. (2015) <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.296>
- [50]. S. Dhanabalan¹, K. Sivakumar², C.S. narayanan³, experimental investigation on electrical discharge machining of titanium alloy using copper, brass and aluminum electrodes” *Journal of Engineering Science and Technology*. (2015)
- [51]. S.N. Pandey, S. Alam, An Experimental Investigation of Electrode Wear Rate (EWR) on EDM of SS-202 using Different Electrodes, *IJERT*. (2015)

- [52]. T. Muthuramalingam , B. Mohan, A review on influence of .electrical process parameters in EDM process, archives of civil and mechanical engineering 15(2015) 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.02.009>
- [53]. Vikasa, A.K. Royb, K. Kumarb, Effect and Optimization of various Machine Process Parameters on the Surface Roughness in EDM for an EN41 Material using Grey-Taguchi, Elsevier. (2014)
- [54]. C.P. Mohanty, S.S. Mahapatra, M.R. Singh, An Experimental Investigation of Machinability of Inconel 718 in Electrical Discharge Machining Science Direct. (2014)
- [55]. P.A. Jadhav, B.B. Brokers, S.S. Kulkarni, Analysis and Optimization of Edm Process Parameters for Aisi D2 Steel, International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. (2014)
- [56]. G. Raut, A Review on Optimization of Machining Parameters in EDM. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, pp 893-896. March 2015.
- [57]. H. Singh, A. Singh, “Effect of Pulse on/Pulse Off on Machining of Steel Using Cryogenic Treated Copper Electrode”, International Journal of Engineering Research and Development, Vol. 5, No. 12, pp. 29-34. (2013). <http://www.ijerd.com/paper/vol5-issue12/E05122934.pdf>
- [58]. S. Gopalakannan, T. Senthilvelan “Effect of Electrode Materials on Electric Discharge Machining of 316 L and 17-4 PH Stainless Steels” Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. (2012)
- [59]. H. Singh “Investigating the Effect of Copper Chromium and Aluminum Electrodes on EN-31 Die Steel on Electric Discharge Machine Using Positive Polarity” World Congress on Engineering. (2012)
- [60]. H. Singh, A. Singh, “Effect of Pulse on/Pulse Off Time on Machining of AISI D3 Die Steel Using Copper and Brass Electrode in EDM”, Int. J. of Engg.and Science, Vol. 1, No. 9, pp. 19-22. (2012). <http://www.ijerd.com/paper/vol5-issue12/E05122934.pdf>
- [61]. P. Janmanee (2010) “Performance of Difference Electrode Materials in Electrical Discharge Machining of Tungsten Carbide” ERJ.
- [62]. R.K. Bhushan, S. Kumar, S. Das, “Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite”, Int J Adv Manuf Technol. Vol. 50. pp 459–469. (2010). <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2529-2>
- [63]. M.P. Jahan, “A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrodes materials” Science Direct (Elsevier). (2009) <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.015>
- [64]. S. S. Habib “Study of the parameters in EDM through RSM approach”, (Science Direct) Elsevier. (2009)

- [65]. M.A. Lajis, H.C.D. Radzi, A.K.M. Amin, "The Implementation of Taguchi Method on EDM Process of Tungsten Carbide", European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X. Vol.26, No.4. pp 609-617. (2009). <https://www.researchgate.net/publication/242235040>
- [66]. M. Boujelbene, E. Bayraktar, W. Tebni, S. Ben Salem, "Influence of machining parameters on the surface integrity in electrical discharge machining", Archives of Materials Science and Engineering, volume 37, issue 2, June 2009, 110-116.
- [67]. H.S. Payal, "Analysis of electro discharge machined surfaces of EN-31 tool steel". Niscair Publications. Vol-67, pp 1072-1077, (2008). <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/2537>
- [68]. Y.C. Lin, B. H. Yan, C. C. Wang, H. M. Chow, "Feasibility study of rotary electrical discharge machining with ball burnishing for Al₂O₃/6061Al composite", 23(5): 391–399. (2008). [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00005-5)
- [69]. F.L. Amorim, W. L. Weingaertner "The Behavior of Graphite and Copper Electrodes on the Finish Die-Sinking EDM of AISI P20" Journal of the Brazil Society of Mechanical Science & Engineering. (2007). <https://doi.org/10.1590/S1678-58782007000400004>
- [70]. K.M. Patel, P.M. Pandey, P.V. Rao, "surface integrity and material removal mechanism associated with the EDM of Al₂O₃ ceramic composite, Int. Journal of refractory metals and hard materials 27, issue 5, 2007, 892-899. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2009.05.003>
- [71]. M. Kiyak, O. Cakir, " Examination of machining parameter on surface roughness of EDM of tool steel" Journal of material processing Technology 191, 2007, 141-144. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.008>
- [72]. H.T. Lee, F.C. Hsu, T.Y. Tai,"Study of surface integrity using the small area EDM process with a Copper-Tungsten electrode, material science and engineering A364, 2004, 346-356. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.046>
- [73]. Y.S. Liao, J.T. Huang, Y.H. Chen, " A study to achieve a fine surface finish in wire EDM", Journal of material processing Technology 149, 2004, 165-171. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.034>
- [74]. J.C. Rebelo, A.M. Dias, R. Mesquita, M. Santos, "An experimental study on electro-discharge machining and polishing of high strength copper-beryllium alloys" Journal of Materials Processing Technology, 108(5): (2000) 389-397. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00492-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00492-6)
- [75]. J.C. Rebelo, A.M. Dias, D. Krember, J.L. Lebrun, "Influence of EDM pulse energy on the surface of integrity of martensitic steel", Journal of material processing Technology 84, 1998, 90-96. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00082-X)
- [76]. J.H. Zhang, T.C. Lee, W.S. Lau, , "Study on the electro discharge machining of a hot pressed aluminum oxide based ceramic". Journal of Materials Processing Technology, 63(4): (1997) 908-912. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00012-X)

- [77]. E. Pavier, P. Doremus, Triaxial characterisation of iron powder behaviour. Powder Met.1999. <https://doi.org/10.1179/003258999665693>
- [78]. A. Frachon. Modélisation et simulation numérique de la compression en matrice de poudres métalliques. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [79]. PC - dmis manual vision-43-EN _ Hexmet.”PC- DMIS Core Manual for PC-DMIS 2014 by Hexagon Metrology. pp. 3-9.
- [80]. M. DJAFRI, Etude numérique et expérimentale du comportement tribologique des contacts glissant - application aux freins à disques. Thèse 2015. <http://dspace.univ-usto.dz/handle/123456789/259>
- [81]. Mode opératoire et programmation de la CNC machine d'électroérosion ONA série NX (Version 1.4) PU144002-0609.
- [82]. S. Sivasankar, R. Jeyapaul. Application of grey entropy and regression analysis for modelling and prediction on tool materials performance during EDM of hot pressed ZrB2 at different duty Cycles, Proc. Eng. International. Conf. Model. Optim. Comput. (2012) 38, 3977–3991. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.455>
- [83]. S. Ahmad, M.A. Lajis, Electrical discharge machining (EDM) of Inconel 718 by using copper electrode at higher peak current and pulse duration, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 50 (2013) 12062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/50/1/012062>.
- [84]. C. Ogun, S. Akaslan, The Effect of Machining Parameters on Tool Electrode Edge Wear and Machining Performance In Electric Discharge Machining (EDM), KSME Int. J. Vol. 16 (2002) 46–59. <https://doi.org/10.1007/BF03185155>.
- [85]. M. Kiyak and O. Cakir, “Examination of Machining Pa-rameters on Surface Roughness in EDM of Tool Steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, No. 1-3, 2007, pp. 141-144. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.008>
- [86]. Q.H. Zhang, J.H. Zhang, S.F. Ren, Z.W. Niu, X. Ai, A theoretical model of surface roughness in ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining in gas, 7 (2005) 381–390. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2005.006840>
- [87]. K. Kanlayasiri, S. Boonmung, An investigation on effects of wire-EDM machining parameters on surface roughness of newly developed DC53 die steel, J. Mater. Process. Technol. 187–188 (2007) 26–29. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.220>
- [88]. S. Raj, K. Kumar, Optimization and prediction of material removing rate in die sinking electro discharge machining of EN45 steel tool, Materials Today: Proceedings. 2 (4–5) (2015) 2346-2352. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.296>.
- [89]. P. Ong, C.H. Chong, M. Z. bin Rahim, W. K. Lee, C. K. Sia, M. A. H. bin Ahmad, Intelligent approach for processmodelling and optimization on electrical discharge machining of polycrystalline diamond, Journal of Intelligent Manufacturing. (2020) 31:227–247, <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1443-6>

- [90]. F. Klocke, M. Schwade, A. Klink, D. Veselovac, Analysis of material removal rate and electrode wear in sinking EDM roughing strategies using different graphite grades, *Procedia CIRP*. 6 (2013) 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.079>
- [91]. Y.C. Lin, H.S. Lee, Machining characteristics of magnetic force-assisted EDM. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 48(11) (2008) 1179–1186. <https://doi.org/10.1016/j.ijmac httools.2008.04.004>
- [92]. C.P. Mohanty, S.S. Mahapatra, M.R. Singh, An intelligent approach to optimize the EDM process parameters using utility concept and QPSO algorithm, *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 20 (2) (2017) 552–562. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.003>.

Résumé

Cette étude vise à étudier l'effet des paramètres d'entrées sur les performances de l'usinage par électroérosion. Les paramètres d'usinage pris en compte pour cette étude sont : le courant de décharge, la tension et le temps d'impulsion. Dans ce travail, une approche expérimentale pour mesurer les performances d'usinage par décharge électrique et les erreurs géométriques associées à l'opération d'usinage a été présentée. Un modèle d'inférence flou a été élaboré afin d'étudier l'influence des paramètres d'usinage sur les performances de l'usinage par électroérosion. Les valeurs prédites, avec ce modèle flou, sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec un pourcentage d'erreur moyen d'environ: 1,511% pour le taux d'enlèvement de matière (MRR), 3,386% pour le taux d'usure de l'outil (TWR), 2,924% pour le taux d'usure (EWR), 5,285% pour la rugosité de surface (Ra), 4,004% pour la surcoupe radiale (ROC), 4,381% pour la circularité (CIR) et 2,937% pour la cylindricité (CYL).

Mots clefs : Usinage par électroérosion, les performances d'usinage, erreurs géométriques, prédiction, logique flou.

Abstract

This study aims to study the effect of input parameters on the performance of EDM machining. The machining parameters taken into account for this study are: the discharge current, the voltage and the pulse time. In this work, an experimental approach to measure the electrical discharge machining performance and the geometric errors associated was presented. A fuzzy inference model has been developed to study the influence of machining parameters on the EDM machining performance. The predicted values, with this fuzzy model, are in good agreement with the experimental values, with an average error percentage of: 1,511% for the material removal rate (MRR), 3,386% for the rate tool wear (TWR), 2.924% for the wear rate (EWR), 5.285% for the surface roughness (Ra), 4.004% for the radial overcut (ROC), 4.381% for the circularity (CIR) and 2.937% for cylindricity (CYL).

Key words: Electrical discharge machining, machining performance, geometric errors, prediction, fuzzy logic.

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة تأثير عوامل الإدخال على خصائص التصنيع عن طريق التفريغ الكهربائي. عوامل التصنيع المأخوذة بعين الاعتبار هي: تيار التفريغ، الجهد ووقت النبض. في هذا العمل، تم عرض النهج التجريبي المتبع لقياس خصائص التصنيع عن طريق التفريغ الكهربائي والأخطاء الهندسية المرتبطة بعملية التشغيل. تم تطوير نموذج استدلال ضبابي لدراسة تأثير عوامل الإدخال على خصائص التصنيع. القيم المتنبأ بها بواسطة هذا النموذج الضبابي، تتوافق جيداً مع القيم التجريبية، مع متوسط نسبة خطأ تقارب: 1.511% لمعدل نزع المادة (MRR)، 3.386% لمعدل تآكل الأدوات (TWR)، 2.924% لمعدل التآكل (EWR)، 5.285% لخشونة السطح (Ra)، 4.004% لعمق القطع القطري (ROC)، 4.381% للسماح الدائري (CIR) و 2.937% للسماح الأسطواني (CYL).

الكلمات المفتاحية: التصنيع عن طريق التفريغ الكهربائي، خصائص التصنيع، الأخطاء الهندسية، التنبأ، المنطق الضبابي.

