

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Application de l'électroérosion à fil dans la fabrication de pièces
complexes pour l'industrie

TAIBI Abdallah

Sous la direction de **Dr. ZEROUDI Nasreddine** ENP, et
Ingénieur. LAHLAH Karim ENP

Présenté et soutenu publiquement le (30/06/2025)

Composition du jury :

Président :	Dr. SAIDI Djamel	ENP
Promoteur :	Dr. ZERROUDI Nasreddine	ENP
Examineur :	M. SEDJAL Hamid	ENP
Invité :	Pr. BOUAZIZ Mohamed	ENP
Invité :	M. BENBRAIKA Mohamed	ENP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Application de l'électroérosion à fil dans la fabrication de pièces
complexes pour l'industrie

TAIBI Abdallah

Sous la direction de **Dr. ZEROUDI Nasreddine** ENP, et
Ingénieur. LAHLAH Karim ENP

Présenté et soutenu publiquement le (30/06/2025)

Composition du jury :

Président :	Dr. SAIDI Djamel	ENP
Promoteur :	Dr. ZERROUDI Nasreddine	ENP
Examineur :	M. SEDJAL Hamid	ENP
Invité :	Pr. BOUAZIZ Mohamed	ENP
Invité :	M. BENBRAIKA Mohamed	ENP

ملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير معايير التشغيل على جودة القطع الناتجة عن استخدام تقنية القطع بالتفريغ الكهربائي بالسلك، وذلك بهدف تصنيع قطع معقدة بدقة عالية. تم إجراء التجارب باستخدام تصميم تجريبي من نوع تاجوتشي وتحليل التباين باستخدام انوفا، على آلة تفريغ كهربائي. كما تم تنفيذ تطبيق صناعي على شكل جناح إيروديناميكي. أظهرت النتائج أن مدة النبضة وسرعة السلك لهما تأثير كبير على الأداء. وقد تم تحديد إعدادات مثالية لتحسين جودة التشغيل. يؤكد هذا العمل فعالية تقنية التفريغ الكهربائي بالسلك في قطاع الصناعات الجوية ويفتح المجال لتحسينات مستقبلية عبر أنظمة تحكم ذكية.

الكلمات المفتاحية

القطع بالتفريغ الكهربائي بالسلك، جودة السطح، تصميم التجارب، تحليل التباين، التحكم الذكي، الصناعة الجوية.

Abstract

This research aims to study the effect of machining parameters on the cutting quality obtained through wire electrical discharge machining, with the objective of manufacturing complex parts with high precision. Experiments were conducted using a Taguchi design of experiments and analysis of variance, on an electrical discharge machine. An industrial application was carried out on an aerodynamic profile. The results showed that pulse duration and wire speed have a significant impact on performance. Optimal settings were identified to enhance cutting quality. This work confirms the effectiveness of wire EDM technology in the aerospace industry and paves the way for future improvements through intelligent control systems.

Keywords

Wire electrical discharge machining, surface quality, design of experiments, analysis of variance, intelligent control, aerospace indust.

Résumé

Cette étude vise à analyser l'influence des paramètres de coupe sur la qualité obtenue par la technique de coupe par décharge électrique à fil, dans le but de fabriquer des pièces complexes avec une grande précision. Les essais ont été réalisés en utilisant une méthode expérimentale de type Taguchi et une analyse de la variance, sur une machine de décharge électrique. Une application industrielle a été effectuée sur un profil aérodynamique. Les résultats ont montré que la durée de l'impulsion et la vitesse du fil ont un impact significatif sur les performances. Des réglages optimaux ont été identifiés pour améliorer la qualité de coupe. Ce travail confirme l'efficacité de cette technologie dans le secteur de l'aéronautique et ouvre la voie à des améliorations futures par des systèmes de contrôle intelligents.

Mots-clés

Coupe par décharge électrique à fil, qualité de surface, plan d'expériences, analyse de la variance, contrôle intelligent, industrie aéronautique.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant qui m'a accordé la force, la patience et la persévérance pour mener à bien ce travail.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur DJEMAI Hamid, directeur de l'entreprise ORFEE BCR, pour sa collaboration et pour m'avoir permis de réaliser mes travaux dans son entreprise dans de très bonnes conditions, ainsi qu'à toute l'équipe du Laboratoire de Génie Mécanique pour leur accueil chaleureux et leur assistance technique.

Je remercie sincèrement Dr. ZEROUDI Nasreddine, mon encadrant, pour son accompagnement, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce projet de fin d'études. Ses orientations ont été précieuses pour la réussite de ce travail.

J'exprime également toute ma reconnaissance à Ingénieur LAHLAH Karim pour son soutien technique, sa disponibilité et les échanges constructifs qui ont grandement enrichi ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur BENBRIKA Mohamed pour sa précieuse intervention et son soutien, grâce auxquels j'ai pu intégrer l'entreprise BCR pour effectuer mon stage et mes essais expérimentaux. Son aide m'a été essentielle pour la concrétisation de ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury, le président Pr. SAIDI Djamel et l'examineur M. SEDJAL Hmid, nous espérons que vous apprécierez ce travail.

Je n'oublie pas de remercier l'ensemble de mes enseignants du département de Génie Mécanique pour la qualité de la formation qu'ils m'ont dispensée durant mon cursus.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance à ma famille et à mes amis pour leur soutien moral, leurs encouragements constants et leur compréhension pendant cette période de travail intense.

TAIBI Abdallah

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À ceux qui m'ont éclairé le chemin de la sagesse
et m'ont offert tout ce qui est cher dans la vie,
avec une immense générosité et une tendre affection.

À toi, ma très chère mère.

À toi, mon très cher père.

À ma famille.

À tous mes amis et mes collègues.

À tous ceux qui m'ont apporté leur aide, de près ou de loin.

Que ce travail soit l'expression de ma profonde reconnaissance et de mon sincère
respect.

Table des matières

Listes des Figures

Listes des Tableaux

Liste des symboles

INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
I. Etat de l'art sur l'usinage par électroérosion	17
I.1 Introduction	18
I.2 Classification des procédés d'usinage non conventionnels	18
I.3 Historique du procédé EDM.....	19
I.4 Définition du procédé d'usinage par EDM.....	20
I.5 Principe physique de EDM.....	21
I.6 Mécanisme d'enlèvement de la matière	26
I.6.1 Phase de pré-claquage	27
I.6.2 Phase de claquage	28
I.6.3 Phase de décharge.....	29
I.6.4 Fin de décharge.....	29
I.6.5 Phase de post-décharge.....	30
I.7 Les types d'usinage par EDM	31
I.7.1 L'électroérosion par enfonçage (DSEDM)	32
I.7.2 L'électroérosion par fil (WEDM)	32
I.7.3 Le fraisage par électroérosion.....	33
I.7.4 Tournage par électroérosion	34
I.7.5 Le meulage par électroérosion (EDG).....	34
I.7.6 Le meulage par électroérosion à fil (WEDG).....	35
I.8 Principe de l'électroérosion à fil.....	36
I.9 Paramètres influençant le procédé d'usinage par WEDM	37
I.9.1 Paramètres électriques dans WEDM	37
I.9.2 Paramètres non électriques (mécanique) en WEDM.....	40
I.10 Applications de l'usinage par WEDM.....	41
I.10.1 Usinage de matériaux à haute dureté	42
I.10.2 Fabrication de micro-pièces et composants de précision	42
I.10.3 Application dans l'usinage des céramiques et composites.....	42

I.10.4 Fabrication d'électrodes et composants pour EDM enfonçage	42
I.10.5 Sélection des matériaux compatibles avec le WEDM	42
I.11 Caractéristiques de l'électroérosion à fil (WEDM)	43
I.12 Avantages et inconvénients du procédé WEDM	45
I.13 Conclusion	45
II. Plan d'expériences et Analyse ANOVA	46
II.1 Introduction	47
II.2 La méthode du plan d'expériences DOE	47
II.2.1 Définition du DOE	47
II.2.2 Concepts fondamentaux	48
II.2.3 Types de plans d'expériences	49
II.2.4 Justification du choix du plan utilisé	50
II.2.5 Étapes de mise en œuvre du DOE [27].	51
II.2.6 Modélisation de la réponse	51
II.2.7 Outils logiciels pour la mise en œuvre du DOE	52
II.2.8 Avantages du DOE dans l'ingénierie	52
II.3 Analyse de la variance (ANOVA)	53
II.3.1 Définition de l'ANOVA	53
II.3.2 Principe de l'ANOVA	53
II.3.3 Paramètres statistiques utilisés	54
II.3.4 Conditions de validité de l'analyse	56
II.3.5 Intérêt de l'ANOVA dans notre étude	57
II.4 Conclusion	57
III. Procédures expérimentales	58
III.1 Introduction	59
III.2 Présentation de l'entreprise ORFEE BCR	59
III.2.1 Type de fabrication	61
III.2.2 Missions et objectifs	61
III.2.3 Produits de l'ORFEE-BCR [26].	61
III.3 Enjeux du projet	62
III.4 Objectif de l'étude	63
III.5 Présentation de la machine d'électroérosion type ROPOFIL 290P	63
III.6 Optimisation expérimentale en WEDM pour l'usinage de formes complexes	64

III.6.1 Matériau utilisé dans l'étude	64
III.6.2 Plan d'expériences (DOE)	65
III.6.3 Conception de la pièce d'essai	68
III.6.4 Génération du G-code avec CAMWorks	69
III.6.5 Mise en marche de la machine ROBOFIL 290P et exécution de l'usinage	74
III.6.6 Méthode de calcul des paramètres de réponse	78
III.7 Usinage d'un profil complexe de type NACA pour l'industrie aéronautique.....	81
III.7.1 Objectif.....	82
III.7.2 Conception de la pièce	82
III.7.3 Mise en marche de la machine ROBOFIL 290P et exécution de l'usinage	86
III.7.4 Calcul des paramètres de réponse	88
III.8 Conclusion	90
IV. Résultat et discussion	91
IV.1 Introduction.....	92
IV.2 Résultats des essais	92
IV.3 Analyse statistique des résultats.....	93
IV.3.1 Analyse de la réponse : MRR (mm ³ /min).....	93
IV.3.2 Analyse de la réponse : Ra (µm)	97
IV.3.3 Analyse de la réponse : Rz (µm)	100
IV.3.4 Analyse de la réponse : ΔL (mm)	104
IV.3.5 Analyse de la réponse : Temps usinage (min).....	107
IV.3.6 Résumé des Résultats Principaux	111
IV.3.7 Optimisation des réponses par la méthode de désirabilité.....	112
IV.3.7.1 Objectifs de l'optimisation	112
IV.3.7.2 Résultats de l'optimisation	112
IV.3.7.3 Prédiction des réponses et évaluation de la robustesse de la solution optimale	113
IV.3.8 Validation expérimentale de la solution optimale.....	116
IV.4 Application industrielle potentielle des résultats	116
IV.5 Conclusion	119
Conclusion Générale	121
Références Bibliographiques	123

Listes des Figures

Figure I. 1- (a) Premiers tests de décharges érodantes et (b) cercles d'impacts d'érosion de la cathode découverts par Joseph Priestley [2].	19
Figure I. 2 Équipement d'usinage par EDM [3].	21
Figure I. 3 Les étincelles produites par un générateur [3].	21
Figure I. 4 Génération de l'Étincelle Initiale [4].	22
Figure I. 5 Formation du canal ionisé et amorçage de la décharge électrique [4].	22
Figure I. 6 Phase de formation de l'étincelle et du canal plasma [4].	23
Figure I. 7 Phase de formation du plasma et de fusion du matériau [4].	23
Figure I. 8 Phase d'implosion de la bulle gazeuse et expulsion du matériau fondu [4].	24
Figure I. 9 Phase de refroidissement et de nettoyage du gap [4].	24
Figure I. 10 Phase de pré-ionisation et amorçage [19].	25
Figure I. 11 Phase de formation et développement du canal plasma [19].	25
Figure I. 12 Phase d'érosion, expulsion et évacuation [19].	25
Figure I. 13 Procédé physique d'EDM d'après [3].	26
Figure I. 14 Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [2].	28
Figure I. 15 Phase de claquage d'après [2].	28
Figure I. 16 Phase de décharge d'après [2].	29
Figure I. 17 Phase de fin de décharge [2].	30
Figure I. 18 Phase de post-décharge d'après [2].	31
Figure I. 19 Différentes variantes d'usinage par EDM. (a) Electroérosion par enfonçage, (b) Électroérosion à fil ; (c) perçage par électroérosion et (d) fraisage par électroérosion [2].	31
Figure I. 20 Electroérosion par enfonçage [1].	32
Figure I. 21 L'électroérosion par fil (WEDM) [1], [2].	32
Figure I. 22 Processus EDM montrant la décharge et l'enlèvement de matière.	33
Figure I. 23 Le fraisage par électroérosion [1].	34
Figure I. 24 Tournage par électroérosion [1].	34
Figure I. 25 Le meulage par électroérosion [1].	35
Figure I. 26 EDG avec pièce tournante [1].	35
Figure I. 27 Le meulage par électroérosion à fil WEDG [1].	35
Figure I. 28 Principe d'usinage par Electro-érosion à fil. (a) Vue d'ensemble ; (b) Zoom sur la zone d'interaction avec ablation par décharges électriques.	36
Figure I. 29 Illustration de l'influence de la polarité sur le MRR d'après [16].	39
Figure II. 1 Signification de l'acronyme ANOVA.	53
Figure III. 1 Vue du siège social de l'entreprise ORFEE BCR.	60
Figure III. 2 Produits phares (plats de service).	61

Figure III. 3 Évier en acier inoxydable	61
Figure III. 4 Gamme de couverts produits.....	62
Figure III. 5 Ustensiles ménagers [26].	62
Figure III. 6 Vue d'ensemble de la machine ROBOFIL 290P.....	64
Figure III. 7 Interface de Minitab : accès au module DOE - Taguchi.	66
Figure III. 8 Définition des niveaux de facteurs dans Minitab.	67
Figure III. 9 Sélection de la matrice L9 pour l'expérience Taguchi.	67
Figure III. 10 Conception de la pièce d'essai sur SolidWorks.	68
Figure III. 11 Définition des paramètres machine dans CAMWorks.	69
Figure III. 12 Paramètres du Stock Manager définis dans CAMWorks.	69
Figure III. 13 Sélection du matériau de la pièce dans CAMWorks.....	70
Figure III. 14 Configuration de l'opération EDM dans CAMWorks.	70
Figure III. 15 Définition de l'EDM Part Setup dans CAMWorks.....	71
Figure III. 16 Génération du plan d'opérations et du chemin d'outil.....	71
Figure III. 17 Sélection du point de départ de découpe pour un contour.	72
Figure III. 18 Définition du point de départ dans l'interface 2 Axis Contour.	72
Figure III. 19 Contours définis pour l'ensemble des essais.....	73
Figure III. 20 Simulation du parcours d'outil dans CAMWorks.	73
Figure III. 21 Génération du code G final pour la machine ROBOFIL 290P.	74
Figure III. 22 Processus de transfert du fichier G-code vers la machine ROBOFIL 290P via une clé USB.	74
Figure III. 23 Montage de la pièce à usiner sur la table de la ROBOFIL 290P.	75
Figure III. 24 Recherche et chargement du G-code de la pièce sur la machine ROBOFIL 290P.	75
Figure III. 25 Vérification des paramètres technologiques (vitesse, intensité, pression de rinçage, etc.).....	76
Figure III. 26 Simulation à blanc (dry run) du parcours d'outil.	76
Figure III. 27 Lancement de l'usinage réel avec activation du système diélectrique.....	77
Figure III. 28 Surveillance en temps réel de l'opération d'usinage.....	77
Figure III. 29 Fin de l'usinage et nettoyage de la pièce.	78
Figure III. 30 Inspection visuelle et dimensionnelle de la pièce usinée.....	78
Figure III. 31 Mesure de la rugosité de surface avec un rugosimètre.	79
Figure III. 32 Enregistrement du temps d'usinage sur l'interface ROBOFIL : CL1 pour le début de la simulation et CL2 pour le début de la coupe de la cavité carrée.....	79
Figure III. 33 Générateur de profil aérodynamique NACA à 4 chiffres (Profil NACA 2412).	82
Figure III. 34 Importation des coordonnées du profil NACA 2412 dans SolidWorks.....	83
Figure III. 35 Création de la courbe spline du profil NACA 2412 à partir des points de coordonnées	83
Figure III. 36 Fermeture du contour du profil NACA 2412 pour générer une surface usinable.	84

Figure III. 37	Modélisation finale du profil aérodynamique NACA 2412 sur SolidWorks. ...	84
Figure III. 38	Simulation du parcours d'outil pour le profil NACA 2412 dans CAMWorks.	85
Figure III. 39	Génération du code G final pour l'usinage du profil NACA 2412	85
Figure III. 40	Montage du brut contenant le profil NACA 2412 sur la machine ROBOFIL .	86
Figure III. 41	Simulation à blanc du parcours de découpe du profil NACA 2412	87
Figure III. 42	Surveillance en temps réel de l'usinage du profil NACA 2412	87
Figure III. 43	Fin d'usinage et nettoyage de la pièce usinée (profil NACA 2412).	88
Figure III. 44	Mesure de la rugosité de surface du profil NACA 2412 à l'aide d'un rugosimètre.	88
Figure III. 45	Temps d'exécution des pièces NACA 2412 affichés sur l'écran de la machine : à gauche (Pièce 1), à droite (Pièce 2).....	89
Figure IV. 1	L'équation de régression pour le MRR.....	95
Figure IV. 2	Diagrammes des valeurs résiduelles pour MRR (mm ³ /min).....	96
Figure IV. 3	L'équation de régression ajustée pour Ra.	99
Figure IV. 4	Diagrammes des valeurs résiduelles pour Ra (µm).....	100
Figure IV. 5	Indicateurs statistiques du modèle pour Rz (µm).....	101
Figure IV. 6	Équation de régression ajustée pour Rz.	102
Figure IV. 7	Diagrammes des valeurs résiduelles pour Rz (µm).....	103
Figure IV. 8	Équation de régression ajustée pour ΔL (mm).	106
Figure IV. 9	Diagrammes des résidus pour ΔL (mm).....	106
Figure IV. 10	Équation de régression ajustée pour Temps usinage (min).	109
Figure IV. 11	Diagrammes des valeurs résiduelles pour Temps usinage (min).....	110
Figure IV. 12	Diagramme d'optimisation multi-réponses.	115
Figure IV. 13	Application industrielle de profil NACA 2412.	117
Figure IV. 14	Illustration d'un modèle expérimental comportant un rotor à aubages, observé au sein du laboratoire énergétique de l'ENP).	118

Listes des Tableaux

Tableau I. 1 Procédés d'usinage non conventionnels.....	19
Tableau I. 2 Décomposition de la décharge de type "spark" [5].....	27
Tableau I. 3 Principaux paramètres du procédé WEDM [13], [14], [15].	37
Tableau I. 4 MRR/TWR en fonction de la polarité des électrodes d'après [16].	39
Tableau I. 5 Liste de matériaux utilisables en WEDM [22].	43
Tableau I. 6 Domaines d'utilisations de l'EE d'après GF Agie / Charmilles.	44
Tableau I. 7 Avantages et inconvénients du procédé WEDM [23], [24], [25].	45
Tableau III. 1 Composition chimique de type X155CrVMo12-1/G [26].....	64
Tableau III. 2 Propriétés physiques et mécaniques [26].....	65
Tableau III. 3 Paramètres d'usinage sélectionnés.	65
Tableau III. 4 Définition des facteurs et niveaux dans le plan Taguchi sous Minitab.....	67
Tableau III. 5 Afficher les plans disponibles.	67
Tableau III. 6 Matrice expérimentale composée de 9 essais (Taguchi L9).	68
Tableau III. 7 Résultats de la précision dimensionnelle.	80
Tableau III. 8 Résultats expérimentaux obtenus lors de l'usinage par électroérosion à fil....	81
Tableau III. 9 Résultats de la précision dimensionnelle pour les deux pièces NACA 2412 usinées.....	89
Tableau IV. 1 Résultats expérimentaux obtenus lors de l'usinage par électroérosion à fil....	92
Tableau IV. 2 Résultats de l'ANOVA pour la réponse MRR	93
Tableau IV. 3 Indicateurs statistiques du modèle linéaire général pour la réponse MRR.....	94
Tableau IV. 4 Estimation des coefficients du modèle linéaire général pour la réponse MRR.	94
Tableau IV. 5 Résultats de l'ANOVA pour la réponse Ra.....	97
Tableau IV. 6 Indicateurs statistiques du modèle linéaire général pour Ra.....	98
Tableau IV. 7 Estimation des coefficients du modèle linéaire général pour la réponse Ra....	98
Tableau IV. 8 Résultats de l'ANOVA pour la réponse Rz (μm).....	101
Tableau IV. 9 Estimation des coefficients du modèle pour la réponse Rz (μm).	102
Tableau IV. 10 Résultats de l'ANOVA pour la réponse ΔL (mm).	104
Tableau IV. 11 Indicateurs statistiques du modèle pour ΔL (mm).	104
Tableau IV. 12 Coefficients estimés pour ΔL (mm).	105
Tableau IV. 13 Résultats de l'ANOVA pour la réponse Temps usinage (min).....	107
Tableau IV. 14 Indicateurs statistiques du modèle pour Temps usinage (min).	108
Tableau IV. 15 Coefficients estimés pour Temps usinage (min).	108
Tableau IV. 16 Paramètres d'optimisation et plages cibles des réponses.....	112
Tableau IV. 17 Solution optimale d'usinage obtenue par la méthode de désirabilité.	113
Tableau IV. 18 Résultats de la prévision des réponses multiples et IC associés.....	114

Liste des symboles

Symbole	Origine du symbole	Signification en français	Unité
T_{on}	Time on	Durée d'impulsion (temps de décharge active)	μs
T_{off}	Time off	Temps d'arrêt entre deux impulsions	μs
I_p	Peak current	Courant de décharge	A
V	Voltage	Tension appliquée	V
S	Speed	Vitesse d'avance du fil	mm/min
d_f	Fil diameter	Diamètre du fil	mm
MRR	Material Removal Rate	Taux d'enlèvement de matière	mm ³ /min
t_u	Usinage time	Temps total d'usinage	min
R_a	Roughness average	Rugosité moyenne de surface	μm
R_z	Roughness maximum height	Hauteur moyenne maximale de rugosité	μm
ΔL	Delta Length	Écart dimensionnel (précision dimensionnelle)	mm
F	F-statistic (Fisher)	Valeur F de Fisher dans l'analyse de variance	Sans unité
p	p-value	Niveau de signification statistique	Sans unité
R^2	Coefficient of determination	Coefficient de détermination	% ou sans unité
σ	Standard deviation	Écart-type	Même unité que la variable mesurée
EE	//	Électroérosion	Sans unité
SCE	Sum of Squares for Error	Somme des carrés des écarts	Variable
ddl	Degree of freedom	Degrés de liberté	Sans unité
CM	Mean Square	Carré moyen	Variable
D	Desirability	Désirabilité globale	[0 – 1]
Gap	Inter-electrode gap	Entrefer entre fil et pièce	mm
TWR	Tool Wear Rate	Taux d'usure de l'outil	mm ³ /min
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining	Usinage par électroérosion à fil	Sans unité
ANOVA	Analysis of Variance	Analyse de la variance (méthode statistique)	Sans unité
DOE	Design of Experiments	Plan d'expériences (méthode de conception expérimentale)	Sans unité
EDM	Electrical Discharge Machining	Usinage par électroérosion	Sans unité
CNC	Computer Numerical Control	Commande numérique par ordinateur	sans unité
DC	Duty Cycle	Cycle de service (rapport cyclique)	%
DSEDM	Die-Sinking EDM	Électroérosion par enfonçage	sans unité

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'industrie moderne est confrontée à des exigences de plus en plus strictes en matière de précision, de qualité de surface, de productivité, et de complexité géométrique des pièces fabriquées. Pour répondre à ces exigences, les procédés d'usinage non conventionnels, tels que l'électroérosion à fil, se sont imposés comme des solutions efficaces dans de nombreux secteurs industriels de haute technologie, notamment l'aéronautique, l'automobile, le domaine biomédical, et la fabrication des moules et matrices [1].

L'électroérosion à fil est un procédé d'usinage non traditionnel qui repose sur l'enlèvement de matière par des décharges électriques successives entre une électrode-fil et une pièce conductrice, plongées dans un fluide isolant. Ce procédé permet l'usinage de matériaux très durs et de formes géométriques complexes, sans contact mécanique, tout en garantissant une précision dimensionnelle élevée et un excellent état de surface [1].

Malgré les avantages importants du WEDM, la maîtrise de ses paramètres reste un enjeu majeur pour l'optimisation des performances du procédé. En effet, les paramètres d'usinage comme la durée d'impulsion (Ton), le temps de pause (Toff), la vitesse du fil, la tension, et la nature du fluide ont une influence directe sur la qualité des pièces produites : précision, rugosité, taux d'enlèvement de matière (MRR), etc. Il est donc nécessaire de comprendre et d'analyser l'effet de ces paramètres pour proposer des conditions d'usinage optimales [1].

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective d'optimisation et a pour objectif principal l'analyse de l'effet des paramètres de l'électroérosion à fil sur la qualité d'usinage des pièces complexes, en utilisant la machine AgieCharmilles.

Pour ce faire, une méthodologie scientifique sera suivie, s'appuyant sur une démarche expérimentale rigoureuse et une analyse statistique par la méthode ANOVA, afin d'identifier les facteurs significatifs influençant la réponse.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie rigoureuse sera suivie :

1. Une étude bibliographique approfondie sur le procédé WEDM et ses paramètres d'influence.
2. La mise en place d'un plan d'expériences structuré (DOE), et l'utilisation de l'analyse de variance (ANOVA).
3. La réalisation des essais expérimentaux sur la machine et la collecte des données.

4. L'analyse des résultats, interprétation des effets, et proposition de conditions optimales.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- **Chapitre 1** : Présente un état de l'art sur l'électroérosion à fil, son fonctionnement, ses applications et les paramètres d'influence.
- **Chapitre 2** : Expose les fondements théoriques et statistiques de la méthodologie expérimentale adoptée. Il comprend la présentation du DOE, les raisons de son choix, ainsi que les principes de ANOVA utilisée pour évaluer l'influence des paramètres d'usinage.
- **Chapitre 3** : Décrit en détail la mise en œuvre des essais. On y présente les matériaux et équipements utilisés, les conditions d'usinage, ainsi que le tableau du plan d'expériences appliqué.
- **Chapitre 4** : Présente et analyse les résultats expérimentaux obtenus à l'aide des outils statistiques. Il contient les interprétations issues de l'analyse ANOVA, les graphiques associés, et une discussion critique sur l'effet des paramètres étudiés.
- **Conclusion générale** : Récapitule les principaux résultats de l'étude, souligne les apports du travail réalisé, et propose des perspectives d'amélioration ou de recherches futures dans le domaine de l'usinage par électroérosion à fil.

Ce travail permettra de mettre en évidence les paramètres les plus influents du procédé WEDM, d'améliorer la compréhension de ses mécanismes physiques et de proposer des conditions de coupe optimales pour une application industrielle efficace.

CHAPITRE I

Etat de l'art sur l'usinage par électroérosion

I.1 Introduction

L'usinage par électroérosion EDM est un procédé d'usinage non conventionnel d'enlèvement de matière largement utilisé pour usiner des pièces de forme complexe dans des matériaux conducteurs. Son principe repose sur l'érosion thermique localisée provoquée par des décharges électriques successives entre une électrode et une pièce immergée dans un liquide diélectrique [1].

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous intéressons particulièrement à WEDM, une variante du procédé EDM, qui se distingue par l'utilisation d'un fil conducteur tendu servant d'électrode. Cette technologie est devenue indispensable pour la fabrication de pièces de haute précision dans les domaines de l'aéronautique, de la fabrication de moules, de l'industrie médicale ou encore des micro-technologies.

L'avantage principal du WEDM réside dans sa capacité à produire des géométries complexes avec une très grande précision, sans contact mécanique, réduisant ainsi les contraintes résiduelles et les risques de déformation. De plus, cette méthode permet l'usinage de matériaux très durs, tels que les alliages réfractaires ou les aciers traités thermiquement, que les procédés d'usinage conventionnels ont du mal à traiter efficacement [1].

Ce chapitre présente un état de l'art détaillé sur le procédé EDM, en mettant l'accent sur la technologie WEDM, ses principes de fonctionnement, ses paramètres influents, ses applications industrielles, ainsi que ses avantages et limitations. Cette analyse bibliographique constitue une base essentielle pour la compréhension et l'optimisation expérimentale du procédé dans le cadre de notre étude.

I.2 Classification des procédés d'usinage non conventionnels

Les procédés d'usinage dits non conventionnels se distinguent des méthodes classiques par leur mode d'enlèvement de matière, qui ne repose pas sur une interaction purement mécanique entre un outil coupant et la pièce. Ils peuvent être classés selon la nature principale de l'énergie mise en œuvre durant le processus. Ainsi, ces procédés se regroupent en trois grandes catégories :

- les procédés à action mécanique,
- les procédés à action thermique,
- les procédés à action chimique ou électrochimique.

Le Tableau I.1 ci-dessous présente cette classification en illustrant les principales technologies associées à chaque type d'interaction.

Tableau I. 1 Procédés d'usinage non conventionnels.

Usinage non conventionnels		
Mécanique	Thermique	chimique ou électrochimique
1. Usinage par ultrasons (USM). 2. Usinage par jet d'eau (WJM). 3. Usinage par jet d'eau abrasif (AWJM).	1) Usinage par décharge électrique (EDM). 2) Usinage par faisceau d'électrons (EBM). 3) Usinage par faisceau laser (LBM). 4) Usinage par faisceau d'ions (IBM). 5) Usinage par faisceau de plasma (PBM).	1. Usinage chimique (CHM). 2. Usinage photochimique (PCM). 3. Usinage électrochimique (ECM)

I.3 Historique du procédé EDM

Le phénomène d'érosion par décharges électriques a été découvert en 1776 par l'anglais Joseph Priestley . La figure ci-dessous montre la première expérience réalisée par celui-ci avec la machine que lui avait envoyée Alessandro Volta. Suite à la création d'une décharge électrique entre deux sphères, Priestley observa le creusement de la matière sous la forme d'une cavité entourée de petits cratères brillants [2].

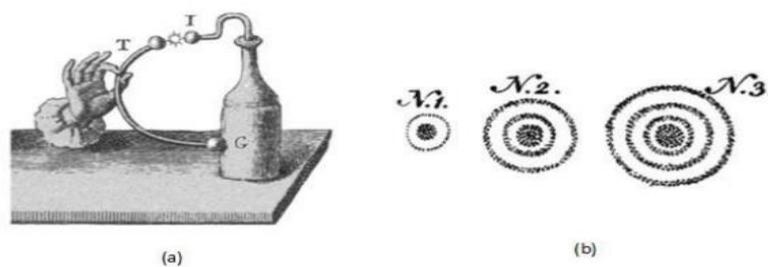


Figure I. 1- (a) Premiers tests de décharges érodantes et (b) cercles d'impacts d'érosion de la cathode découverts par Joseph Priestley [2].

En 1943, ils mirent au point un liquide diélectrique, provoquant l'érosion de ces derniers. On nomme un tel procédé l'usinage par étincelage érosif, ou électroérosion en français et «electrical discharge machining» en anglais. La société suisse AGIE, bientôt suivie par CHARMILLES, développa une machine d'usinage par électrode massive en 1954: c'est la technique d'électroérosion par enfonçage ou «die sinking electrical discharge machining». En 1969, AGIE développa une machine d'usinage par fil : c'est la technique d'électroérosion par fil ou «wire electrical discharge machining», à laquelle est consacré le présent travail. Les fils utilisés étaient en cuivre ou en laiton [1]. En 1977, le savant anglais PRIESTLEY avait constaté l'effet érosif des décharges électriques. En faisant des recherches pour éliminer cet effet érosif, les savants Russes B.R et N.I. LAZARENKO eurent l'idée d'exploiter l'effet destructeur des décharges pour développer un procédé contrôlé d'usinage des métaux [1]. En 1979, la société CHARMILLES déposa un brevet permettant d'augmenter la vitesse d'usinage du procédé en utilisant un fil revêtu de zinc. Puis en 1980, elle déposa un brevet portant sur un fil revêtu en zinc, et traité thermiquement [1]. Depuis les années 1980, l'électroérosion a connu des avancées majeures grâce à l'intégration du contrôle numérique (CNC), à l'amélioration des fils utilisés, au développement de modèles de simulation, ainsi qu'à l'émergence de techniques comme le Micro-EDM et l'EDM à sec. L'intelligence artificielle et les algorithmes d'optimisation ont également permis d'augmenter la précision et l'efficacité du procédé [1].

I.4 Définition du procédé d'usinage par EDM

EE appelée aussi EDM est un procédé d'usinage qui consiste à enlever de la matière dans une pièce en utilisant des décharges électriques. Cette technique se caractérise par son aptitude à usiner tous les matériaux conducteurs de l'électricité (métaux, alliages, etc.) quelle que soit leur dureté. Pour usiner par EE, quatre éléments sont nécessaires (Figure I.2): [3].

- Une électrode
- Une pièce
- Un diélectrique (liquide isolant électrique)
- De l'électricité

EE est particulièrement adaptée à la réalisation des empreintes des moules pour l'injection. Elle est aussi utilisée pour obtenir un état de surface granité (dû à l'étincelage). De l'eau ou une huile diélectrique spéciale est utilisée dans le bac où la pièce usinée est immergée. Elle est continuellement filtrée. Dans le cas de l'eau, elle est aussi dé-ionisée par une résine [3].



Figure I. 2 Équipement d'usinage par EDM [3].

Electroérosion

Les étincelles produites par un générateur forment une succession de cratères sur la pièce à intervalles réguliers. Chaque étincelle produit une température entre 8.000 et 12.000°C. La dimension du cratère dépend de l'énergie produite par le générateur. Les étincelles peuvent varier de peu de microns jusqu'à 1 mm [3].

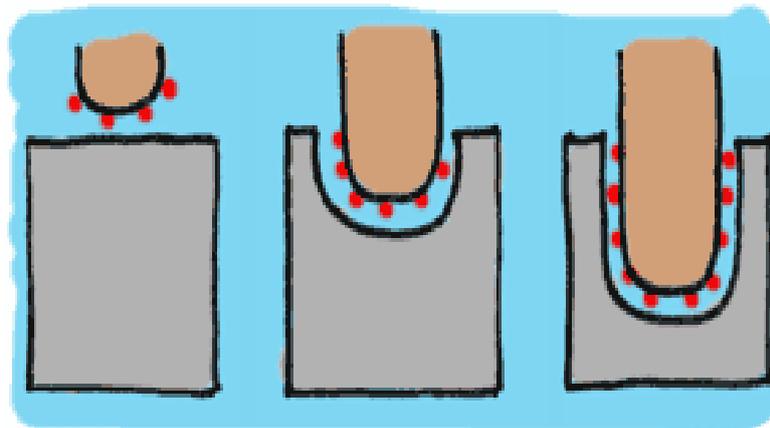


Figure I. 3 Les étincelles produites par un générateur [3].

I.5 Principe physique de EDM

Le procédé d'usinage par électroérosion repose sur un phénomène physique complexe d'enlèvement de matière, basé sur la génération de décharges électriques contrôlées entre une électrode et une pièce conductrice. Ces deux éléments sont immergés dans un fluide diélectrique, un liquide faiblement conducteur, qui joue un rôle essentiel dans le déroulement du processus [4].

Le phénomène peut être décrit en 6 phases :

1^{ère} phase : Phase de génération de l'étincelle

Pour générer une étincelle entre l'outil et la pièce, une tension supérieure à la tension de claquage est appliquée au gap (espace entre l'outil et la pièce) [4].

Cette tension de claquage dépend, entre autres, de :

- la distance entre l'outil et la pièce au point le plus proche ;
- la capacité isolante du fluide diélectrique.

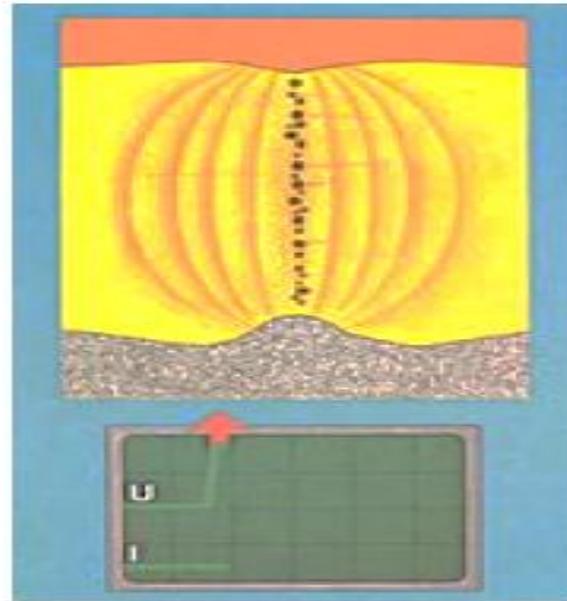


Figure I. 4 Génération de l'Étincelle Initiale [4].

2^{ème} phase : Phase d'ionisation du gap

Sous l'effet du champ électrique dans le « gap » au point de la distance la plus courte, les ions positifs et les électrons libres sont accélérés jusqu'à une vitesse élevée et, très rapidement, forment un canal ionisé électriquement conducteur [4].

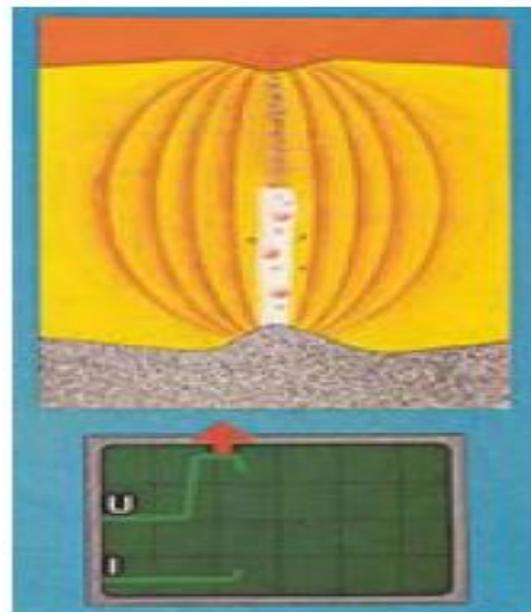


Figure I. 5 Formation du canal ionisé et amorçage de la décharge électrique [4].

3^{ème} phase : Formation de l'étincelle et du plasma

À ce moment, le canal rempli de particules ionisées devient conducteur. Le courant électrique peut donc circuler entre l'outil et la pièce. Cela provoque la formation d'une étincelle intense, accompagnée d'une chaleur très élevée (jusqu'à 10000 °C). Sous cet effet thermique, un plasma se forme dans la zone de décharge c'est un gaz très chaud et ionisé qui joue un rôle clé dans l'enlèvement de la matière [4].

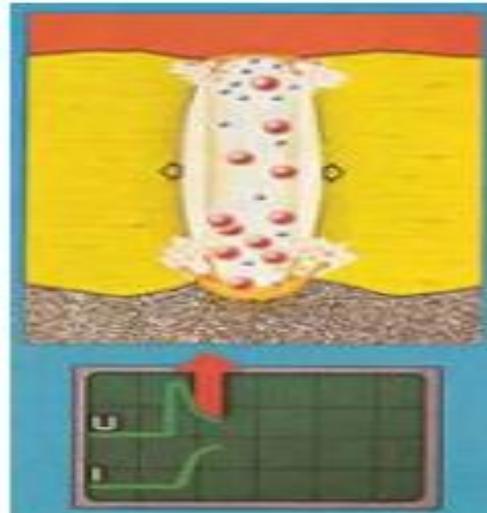


Figure I. 6 Phase de formation de l'étincelle et du canal plasma [4].

4^{ème} phase : Phase de formation du plasma et de fusion du matériau

Le plasma atteint rapidement une température très élevée entre 8000° et 12000 °C, se dilate sous l'effet de nombreux impacts de particules chargés et cause une fusion instantané de la matière sur la surface de l'outil et de la pièce. En même temps, grâce à l'évaporation de la matière fondue et du fluide diélectrique, une bulle de gaz se dilate et augmente sa pression.

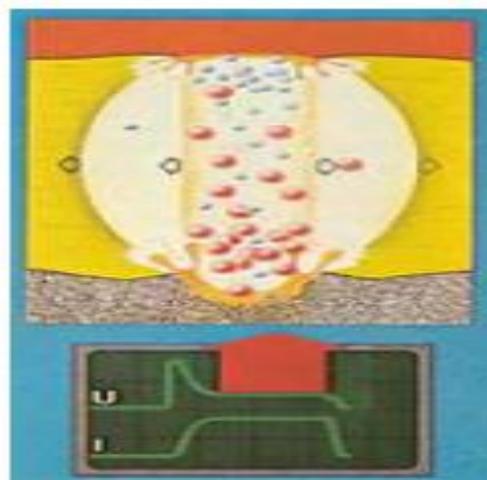


Figure I. 7 Phase de formation du plasma et de fusion du matériau [4].

5^{ème} phase : Phase d'implosion de la bulle gazeuse et expulsion du matériau fondu

Au moment où le courant est interrompu, la bulle de gaz implose en raison de la chute brutale de la température, générant des forces dynamiques qui cause l'expulsion de la matière fondue du cratère [4].

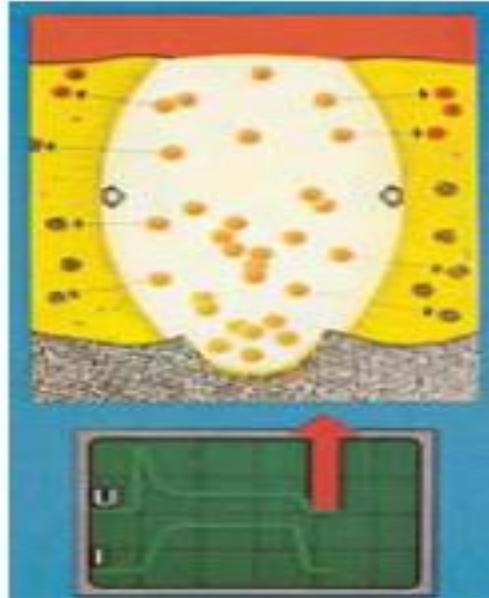


Figure I. 8 Phase d'implosion de la bulle gazeuse et expulsion du matériau fondu [4].

6^{ème} phase : Phase de refroidissement et de nettoyage du gap

La matière fondue est résolidifiée dans le fluide diélectrique sous la forme de petites boules et emportée par l'arrosage [4].

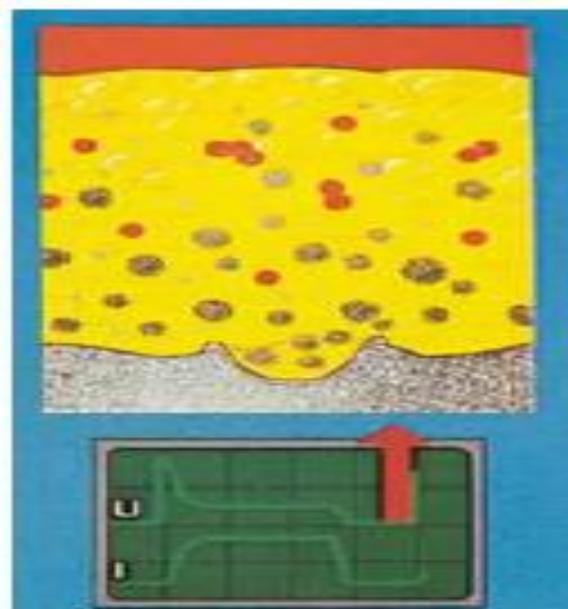


Figure I. 9 Phase de refroidissement et de nettoyage du gap [4].

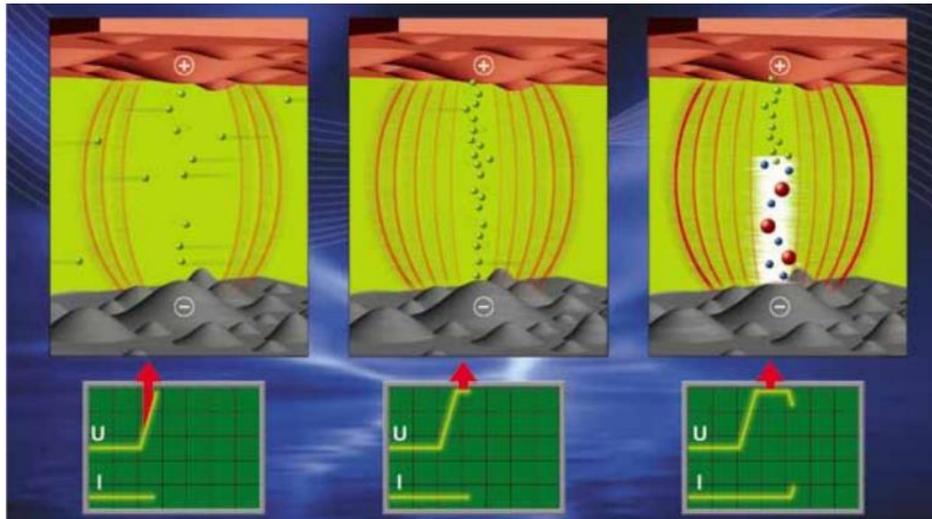


Figure I. 10 Phase de pré-ionisation et amorçage [19].

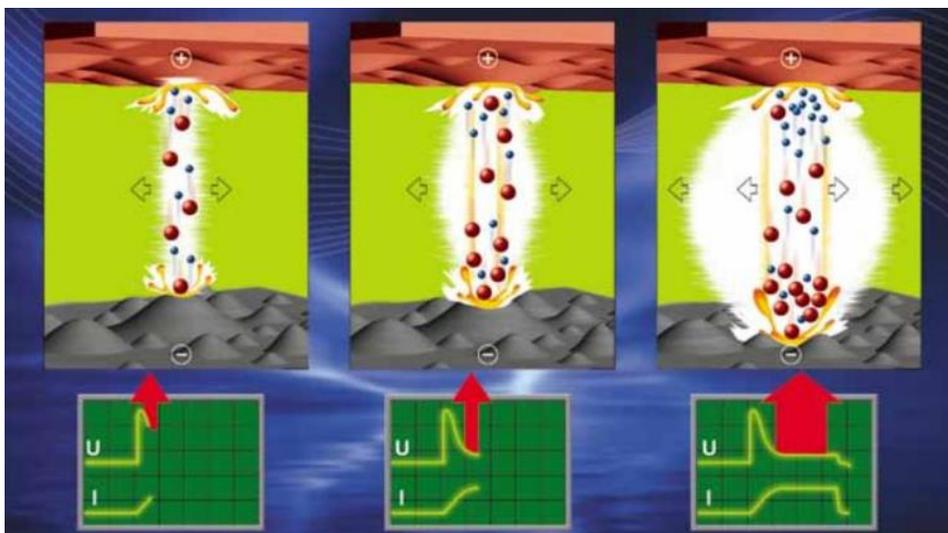


Figure I. 11 Phase de formation et développement du canal plasma [19].

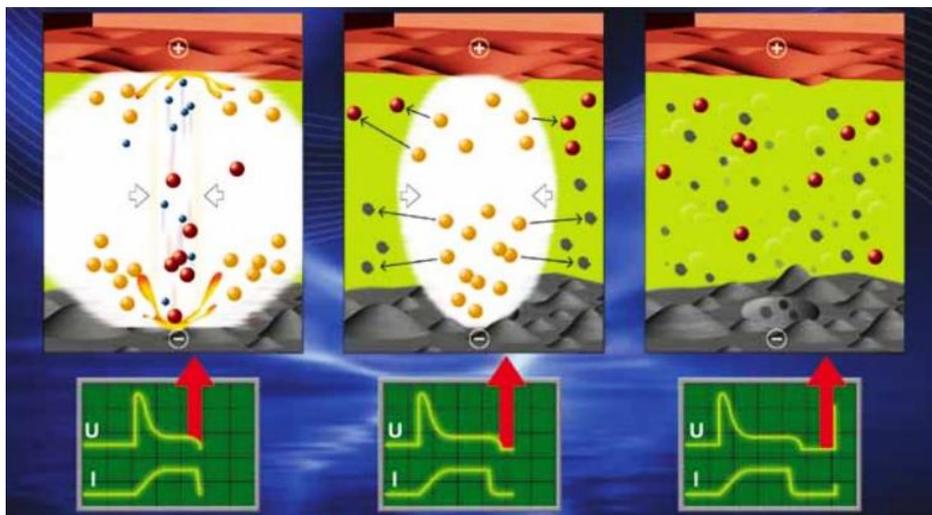


Figure I. 12 Phase d'érosion, expulsion et évacuation [19].

Donc le procédé d'EE comprend 6 phases : [3].

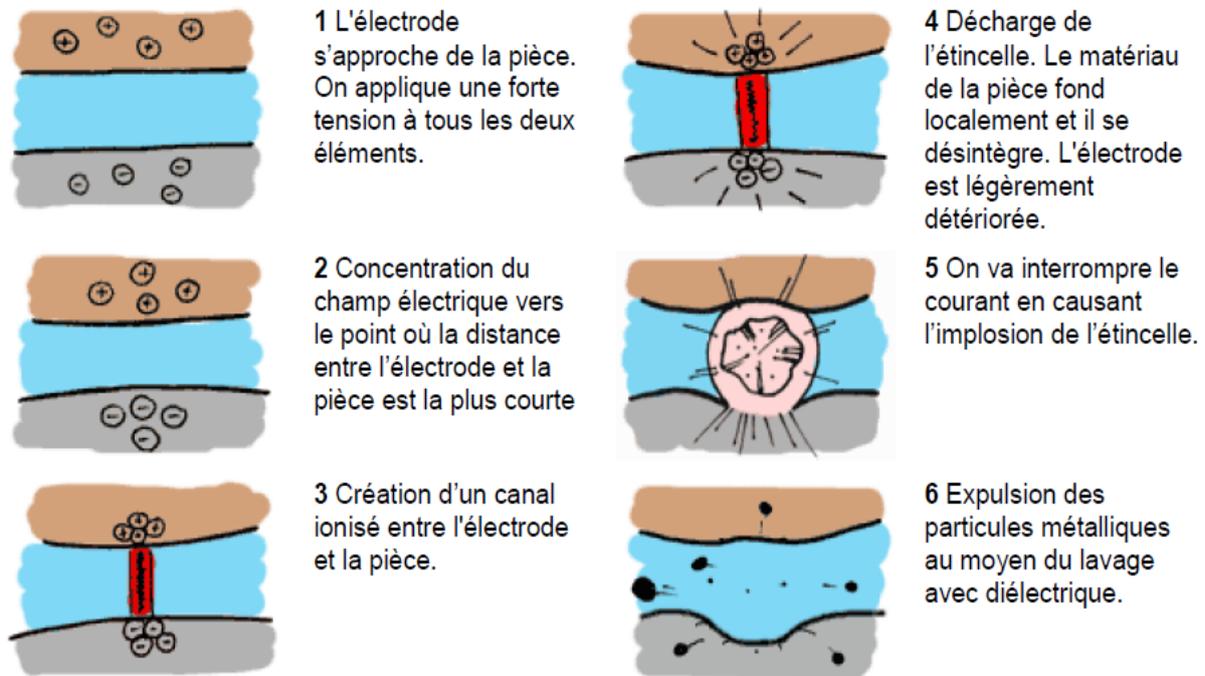


Figure I. 13 Procédé physique d'EDM d'après [3].

I.6 Mécanisme d'enlèvement de la matière

Le mécanisme d'enlèvement de matière dans le procédé d'électroérosion (EDM) repose essentiellement sur la conversion de l'énergie électrique en énergie thermique. Lors de l'usinage, des étincelles successives sont générées entre l'outil (électrode) et la pièce à usiner, toutes deux devant être électriquement conductrices. Chaque décharge produit une élévation locale de température extrêmement élevée, suffisante pour faire fondre ou vaporiser de petites quantités de matière. Ces micro-volumes de matériau sont alors expulsés de la zone d'usinage sous l'effet des forces thermiques et hydrodynamiques, assurant ainsi une érosion progressive de la pièce.

Il convient de noter que le phénomène d'enlèvement de matière par décharges électriques est complexe et fait l'objet de nombreuses recherches. D'après les travaux de Schulze et al. [5], le processus de décharge peut être décomposé en trois étapes principales :

- Phase d'amorce,
- Phase d'échauffement,
- Phase d'enlèvement.

Les différentes étapes du phénomène de décharge électrique de type "spark" sont synthétisées dans le Tableau I.2.

Tableau I. 2 Décomposition de la décharge de type "spark" [5].

Phase d'amorce	Phase d'échauffement	Phase d'enlèvement
<ul style="list-style-type: none"> • Phase de pré-décharge (Conditions initiales) • Amorçe • Claquage du diélectrique à la tension appliquée. • Fin de la phase : Tension d'érosion 	<ul style="list-style-type: none"> • Période de développement complet du canal plasma • Échauffement de l'outil et de la pièce • Fin de la phase : Coupure de l'impulsion du générateur 	<ul style="list-style-type: none"> • Phase de fusion (Énergie à l'entreferr) • Effondrement du canal plasma • Enlèvement des débris • Temps de repos / Régénération de l'entreferr • Pré-amorce pour la prochaine décharge

Malgré cela, Joseph [1] 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 oeuvre notamment par Descoeudres et al. [6-7] Ainsi Schumacher et al. [8] sont parvenus à imager les différentes phases de la décharge.

I.6.1 Phase de pré-claquage

La phase de pré-claquage (Figure I.14) correspond à l'application d'une différence de potentiel entre les deux électrodes avec une tension de l'ordre de 30 à 250 V 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 [2].

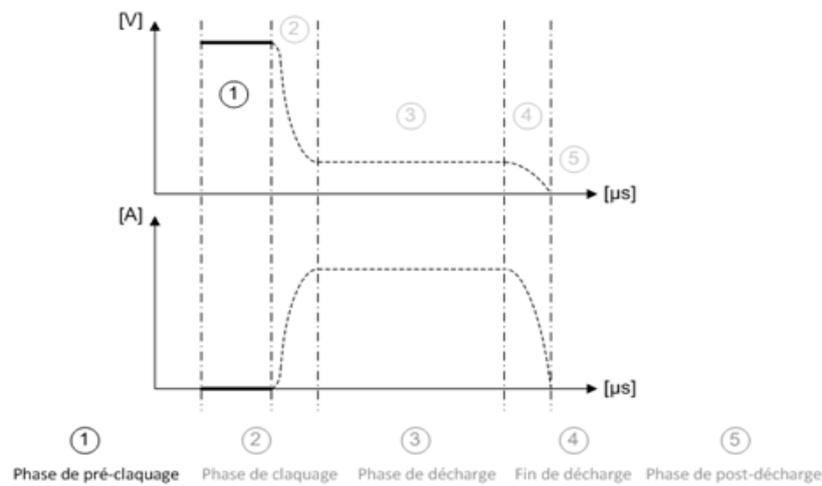


Figure I. 14 Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [2].

I.6.2 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 [6], 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.15) sur une durée de $100 \mu\text{s}$ et le courant augmente. Celui-ci peut atteindre plusieurs ampères. C'est à ce moment-là, entre 100 et $200 \mu\text{s}$ 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 [2].

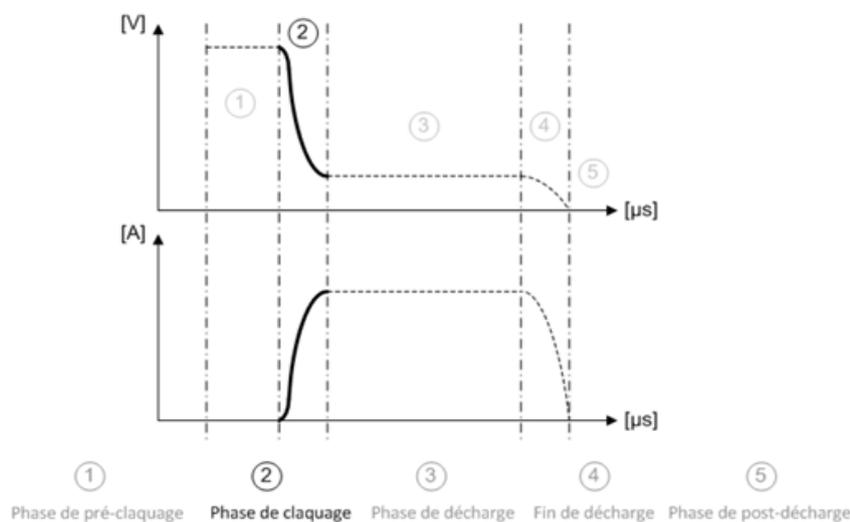


Figure I. 15 Phase de claquage d'après [2].

I.6.3 Phase de décharge

Selon [3, 9, 10], le plasma se développe très rapidement ($50 \mu\text{s}$) après le claquage et se stabilise. Le courant reste relativement constant (Figure I.16). La lumière émise est particulièrement intense pendant les $500 \mu\text{s}$ puis elle faiblit. Son intensité dépend du courant.

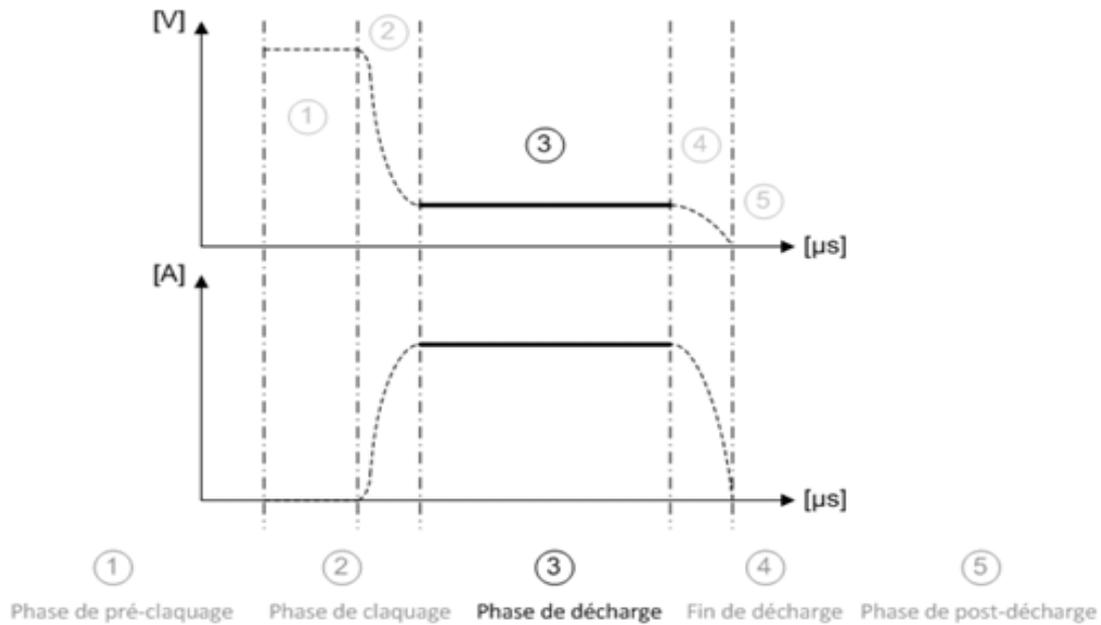


Figure I. 16 Phase de décharge d'après [2].

Pour un entrefer de $10\text{-}100 \mu\text{m}$, la décharge stimule un volume dont le diamètre est de l'ordre de $100\text{-}200 \mu\text{m}$. 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 $10 \mu\text{m}$ d'épaisseur correspondant à la longueur de Debye avec un champ électrique intense de l'ordre de 10^6 V.cm^{-1} . Des bulles de vapeur sont générées aussi bien dans l'eau que dans l'huile et sont dues à la chaleur libérée par le plasma [2].

I.6.4 Fin de décharge

À la fin de la décharge, le plasma n'est plus alimenté en énergie, ce qui entraîne l'interruption du courant entre les deux électrodes et la rupture de la connexion (voir Figure I. 17). Le plasma s'effondre rapidement sous l'effet de la pression du fluide diélectrique et disparaît. Pendant cette phase, une émission lumineuse est souvent observée, provenant de particules métalliques incandescentes qui rayonnent comme un corps noir. Selon les mesures rapportées dans [6], la température de ces particules est d'environ 2200 K , ce qui indique qu'elles sont à l'état liquide au début de la phase de post-décharge.

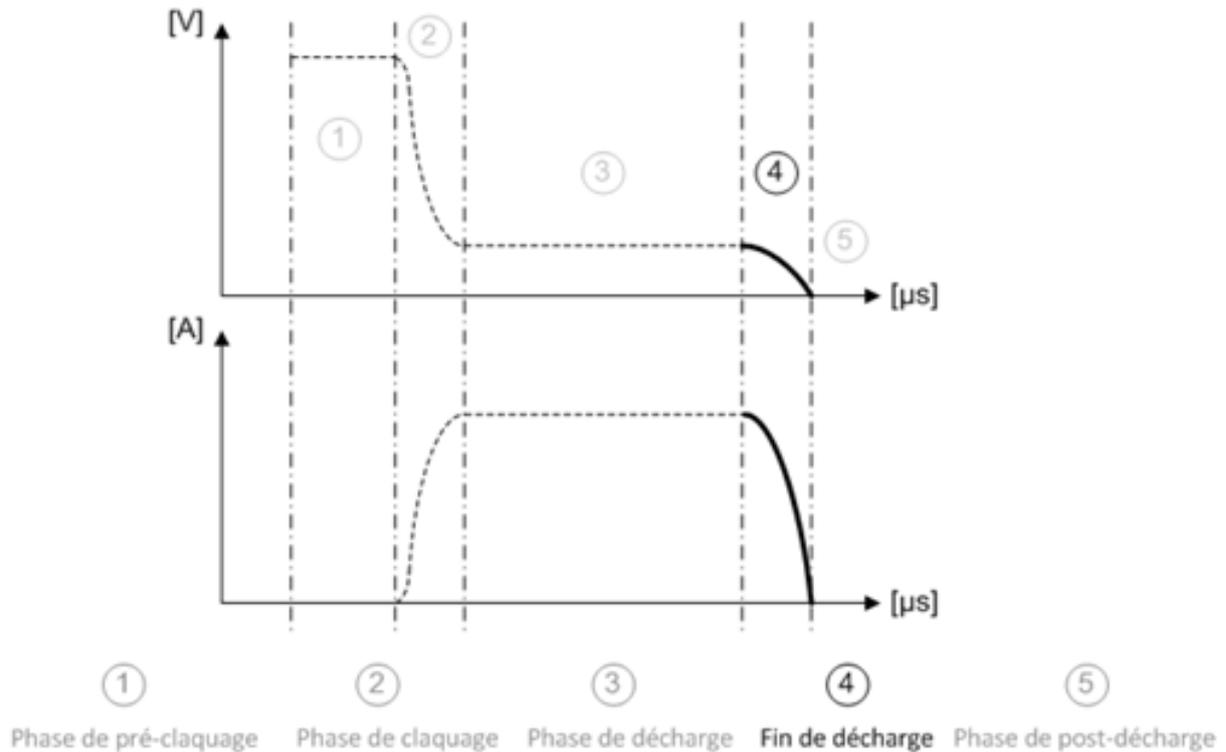


Figure I. 17 Phase de fin de décharge [2].

I.6.5 Phase de post-décharge

Pendant cette phase, le fluide diélectrique joue un rôle essentiel (voir Figure I.18). Il sert à refroidir l'outil et la pièce entre chaque impulsion électrique, et permet également d'évacuer les particules de matière fondues créées par les décharges.

Sous l'effet du liquide, ces particules prennent une forme sphérique, et leur taille est généralement de l'ordre de quelques dizaines de micromètres [11], bien qu'elle puisse varier selon les paramètres de l'usinage.

La vitesse d'évacuation des débris dépend du débit du fluide diélectrique. Un bon rinçage est crucial pour conserver une bonne conductivité du fluide et assurer un claquage fiable à la prochaine étincelle.

En revanche, si les débris ne sont pas correctement éliminés, le fluide devient moins isolant, ce qui perturbe le processus et diminue la qualité d'usinage.

Pour améliorer cette évacuation, des mouvements vibratoires ou rotatifs sont parfois appliqués à l'électrode, comme le montrent plusieurs études [12]. Ces techniques permettent d'optimiser l'usinage et d'obtenir une meilleure qualité de surface.

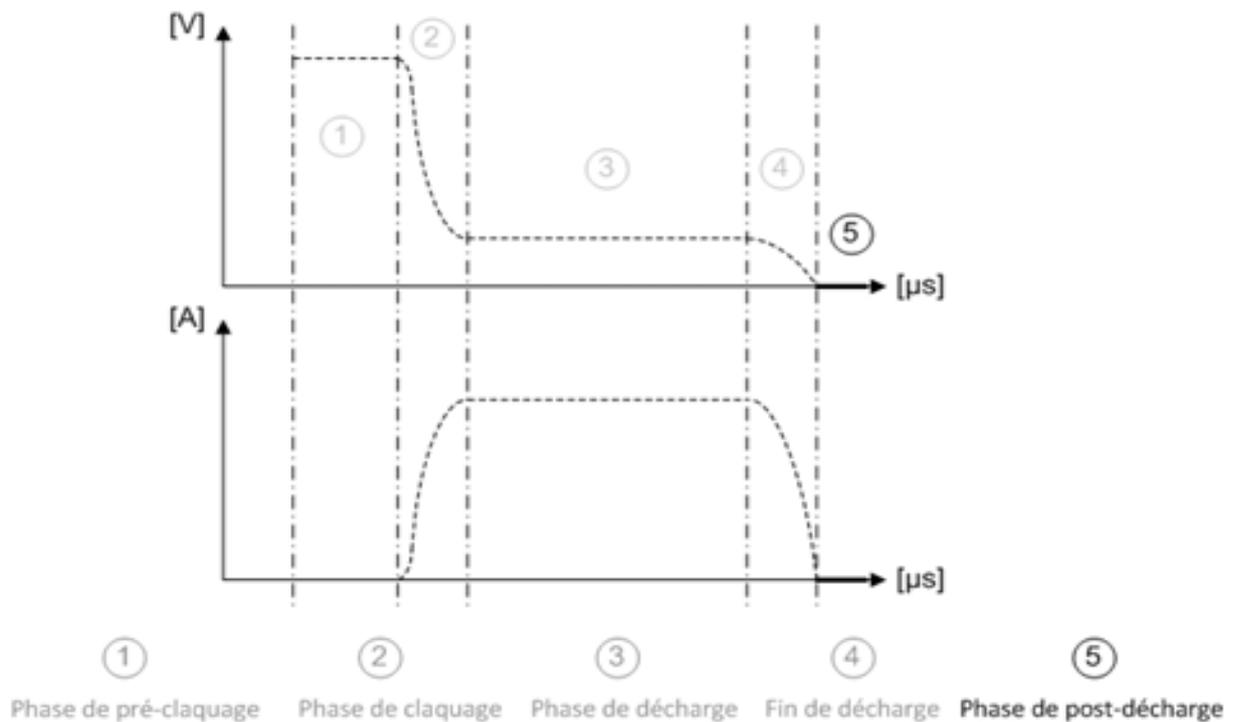


Figure I. 18 Phase de post-décharge d'après [2].

I.7 Les types d'usinage par EDM

Il existe beaucoup de types de machines et d'applications qui utilisent le principe de l'électroérosion. Ci-dessous, nous passons en revue les procédés EDM les plus connus. Dans le cadre de l'électroérosion non conventionnelle, les méthodes d'usinage sont classées en fonction de deux critères principaux : la forme de l'électrode-outil et son mouvement relatif par rapport à la pièce à usiner [1] et [2].

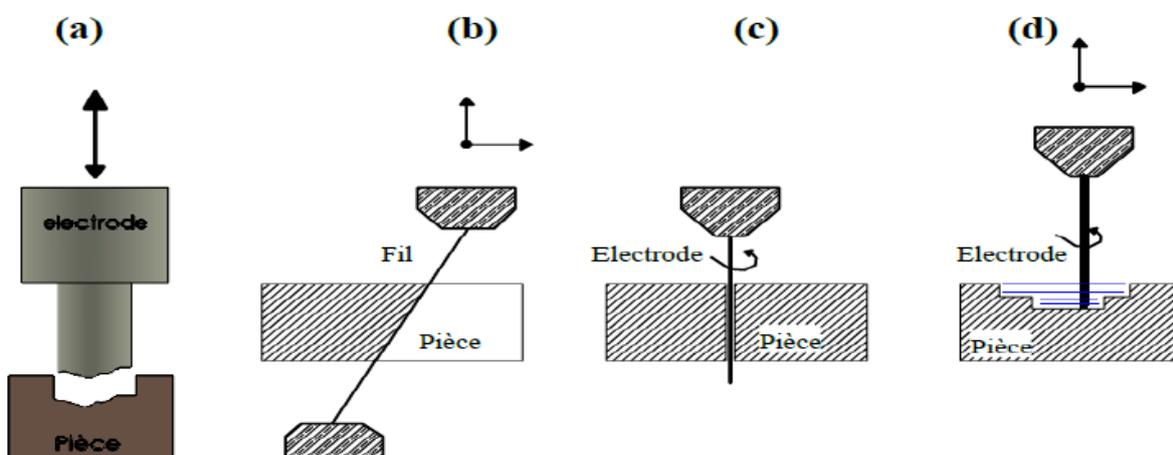


Figure I. 19 Différentes variantes d'usinage par EDM. (a) Electroérosion par enfonçage, (b) Electroérosion à fil ; (c) perçage par électroérosion et (d) fraisage par électroérosion [2].

I.7.1 L'électroérosion par enfonçage (DSEDM)

DSEDM Type original ou conventionnel de système EDM nommé également die-sinking ou érosion par enfonçage. Les machines à plongée sont appelées sinker, plonge ou encore vertical EDM. L'électroérosion par enfonçage dans sa forme la plus simple, reproduit la forme de l'outil électrode dans la pièce à usiner. Les machines standards actuelles sont dotées de 4 axes X,Y,Z et C interpolés, [1] ce qui permet d'usiner des formes plus complexes que la simple reproduction de l'électrode outil. Les électrodes sont le plus souvent en cuivre ou en graphite.

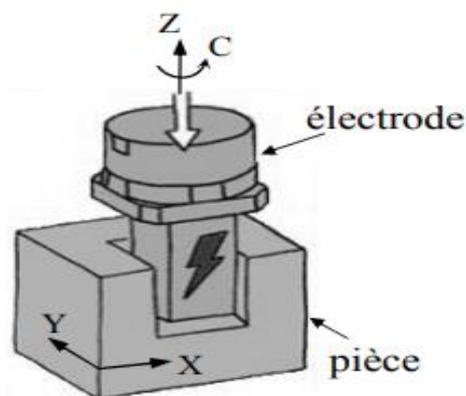


Figure I. 20 Electroérosion par enfonçage [1].

Applications: moules d'injection, étampage (matrices de frappe), outils d'extrusion, matrices de compactage de poudre, ...[1].

I.7.2 L'électroérosion par fil (WEDM)

L'électroérosion par fil (Wire Electrical Discharge Machining, WEDM) est un procédé largement utilisé qui emploie un fil électrode diamètre de $30\ \mu\text{m}$ à $350\ \mu\text{m}$ ($0.03\ \text{mm}$ à $0.35\ \text{mm}$) pour découper des formes complexes dans la pièce (voir Figure I.21). Le mouvement relatif entre le fil et la pièce est contrôlé par une commande numérique (CNC), permettant une découpe précise et traversante [1].

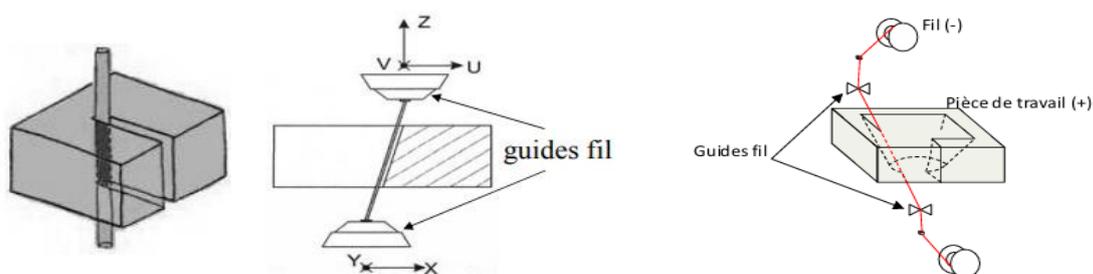


Figure I. 21 L'électroérosion par fil (WEDM) [1], [2].

De l'eau déionisée est utilisée comme fluide diélectrique pour évacuer les particules érodées et refroidir la zone de travail. Pour initier l'usinage, le fil doit soit entrer par le bord de la pièce, soit passer par un trou pré-percé. Les machines modernes disposent de 5 axes (X, Y, U, V, Z) interpolés, ce qui permet d'usiner des formes coniques en inclinant le fil [1].

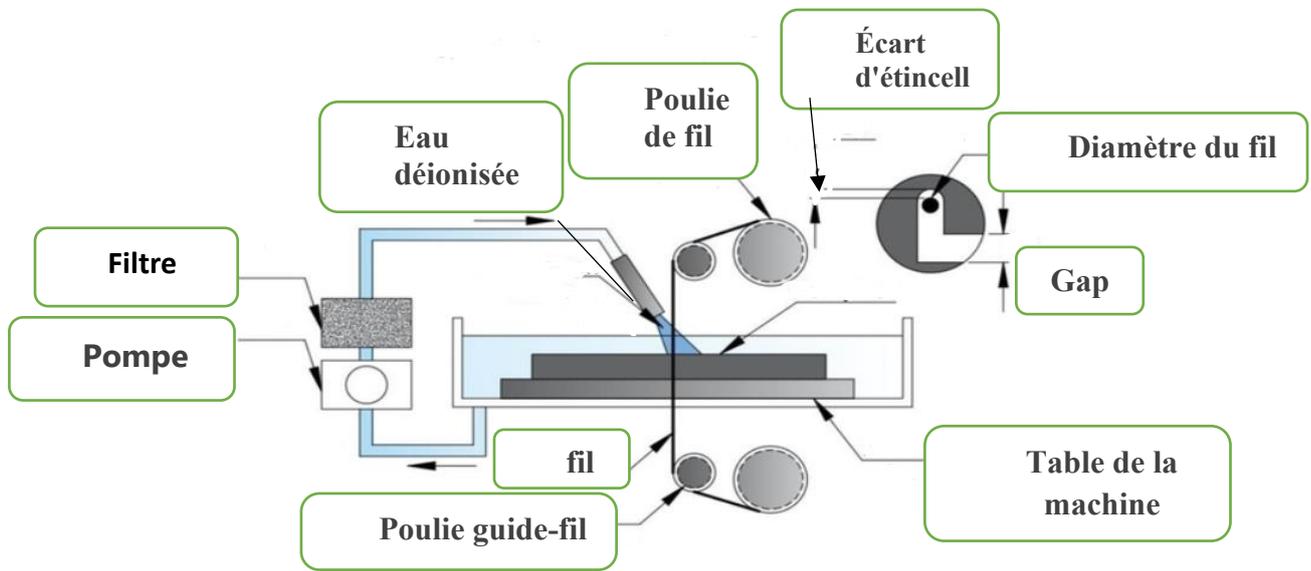


Figure I. 22 Processus EDM montrant la décharge et l'enlèvement de matière.

Applications: Matrices de découpage, matrices d'extrusion, poinçons de découpe, moules, électrodes pour les machines EDM à enfonçage, micro-usinage (pièces d'horlogerie)...[1].

I.7.3 Le fraisage par électroérosion

Le fraisage par électroérosion utilise une électrode cylindrique rotative qui se déplace selon une trajectoire programmée, similaire à une fraise traditionnelle. Des électrodes tubulaires (voir Figure I. 23) permettent la circulation d'un fluide diélectrique, facilitant l'évacuation des débris érodés [1].

Comparé à l'électroérosion par enfonçage, ce procédé présente l'avantage d'utiliser des électrodes cylindriques standard, évitant ainsi le recours à des électrodes complexes et coûteuses. Cependant, il nécessite une compensation de l'usure de l'électrode (voir Figure I.21). Pour usiner une cavité, comme un moule, plusieurs passes successives sont effectuées pour atteindre la profondeur souhaitée. La compensation de l'usure est déterminée à partir d'essais préliminaires, et la compensation en temps réel reste un sujet de recherche actif [1].

Applications:

- Fabrication de moules et de matrices.

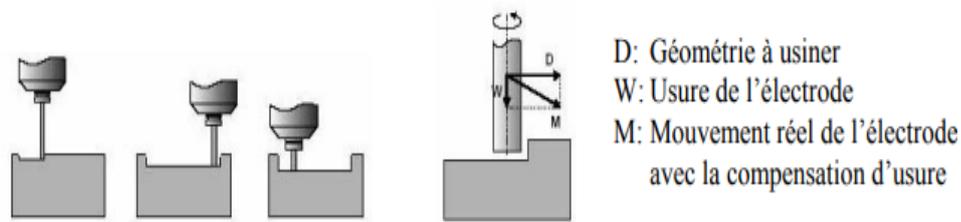


Figure I. 23 Le fraisage par électroérosion [1].

I.7.4 Tournage par électroérosion

Une électrode outil de forme est reproduite sur une pièce tournante par un déplacement linéaire de manière à compenser l'usure [1].

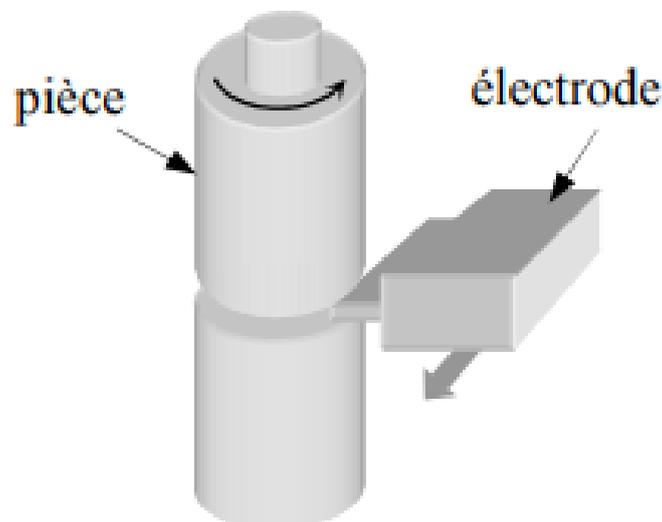


Figure I. 24 Tournage par électroérosion [1].

Applications: formage d'électrodes disques ou de pièces cylindriques de petites dimensions.

I.7.5 Le meulage par électroérosion (EDG)

EDG Ce processus est également appelé Rotary EDM ou EDM Grinding. Il utilise une électrode cylindrique tournante à la manière d'une meule (Figure I. 25). L'utilisation d'une électrode rotative en graphite, permet de réduire les coûts élevés dus à l'usinage de meules en diamant (corindon) et l'absence de contact mécanique inhérent à l'électroérosion, évite de déformer les pièces délicates. Pour l'érosion de pièces cylindriques, la rotation de ces dernières, combinée avec une électrode tournante permet d'obtenir une grande vitesse relative entre les deux (Figure I. 26). Cette particularité influence le processus et en particulier augmente la vitesse d'usinage [1].

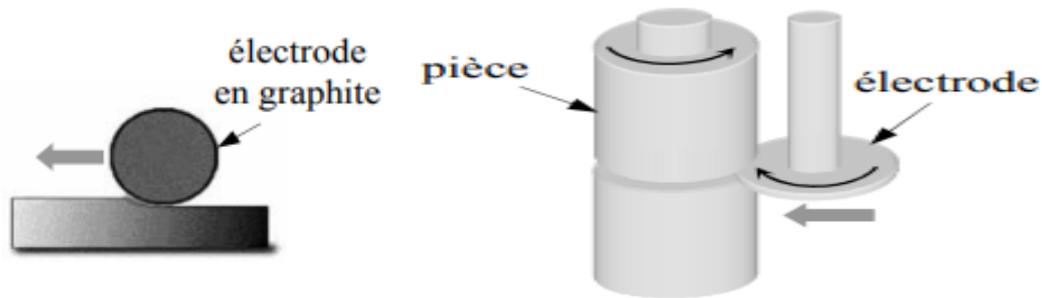


Figure I. 25 Le meulage par électroérosion [1]. **Figure I. 26** EDG avec pièce tournante [1].

Applications: usinages de micro-canaux, alternative pour aiguiser des outils en carbure ou en diamant [1].

I.7.6 Le meulage par électroérosion à fil (WEDG)

Le meulage par électroérosion à fil WEDG est une technique développée dans les années 1980 au Japon par Masuzawa. Il s'agit d'une variante de l'électroérosion à fil conventionnelle, où le fil est guidé près de la zone d'usinage pour réduire les oscillations et améliorer la précision [1]. Contrairement à l'EDG traditionnel, le WEDG offre une plus grande flexibilité pour créer des géométries complexes sans devoir compenser l'usure de l'électrode. En effet, le fil, qui avance à une vitesse constante (environ 15 mm/min), est constamment renouvelé.

En intégrant un système WEDG à une machine d'électroérosion par enfonçage, il est possible de fabriquer et d'utiliser des électrodes directement sur la même machine [1]. Cette approche élimine les erreurs de positionnement liées au serrage et simplifie les manipulations.

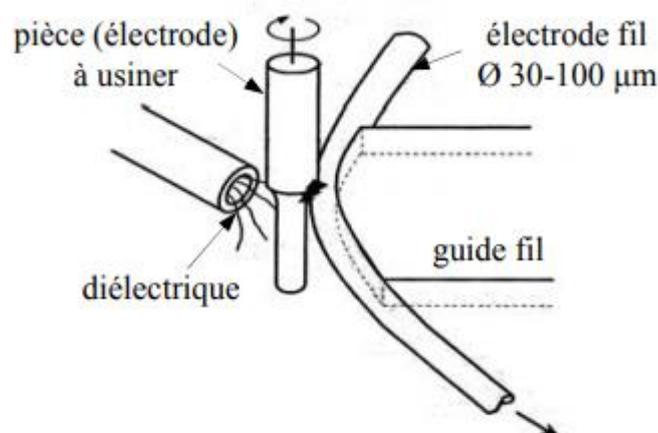


Figure I. 27 Le meulage par électroérosion à fil WEDG [1].

Applications: fabrication d'électrodes cylindriques ou à géométrie simple de petites dimensions [1].

Parmi les différentes variantes de l'électroérosion, la technique d'électroérosion par fil (WEDM) s'est imposée comme l'une des plus précises et efficaces pour l'usinage de formes complexes. Grâce à ses capacités de coupe fine et sans contact, elle occupe aujourd'hui une place centrale dans les procédés d'usinage de haute précision. Dans ce qui suit, nous allons détailler le principe, les caractéristiques, ainsi que les avantages de ce procédé.

I.8 Principe de l'électroérosion à fil

- Un fil conducteur de diamètre fin (typiquement 0,25 mm), agit comme une électrode-outil.
- La pièce à usiner doit être conductrice électriquement.
- Une tension élevée est appliquée entre le fil et la pièce.
- Le fil ne touche jamais la pièce : un entrefer très petit (environ 0,01 à 0,05 mm) est maintenu.
- Lorsqu'un arc électrique se produit à travers ce petit entrefer, cela génère une étincelle qui fait fondre et évaporer localement la matière.
- Un liquide diélectrique (souvent de l'eau déionisée) est injecté pour :
 - refroidir la zone de coupe,
 - évacuer les débris métalliques,
 - isoler électriquement entre deux étincelles.

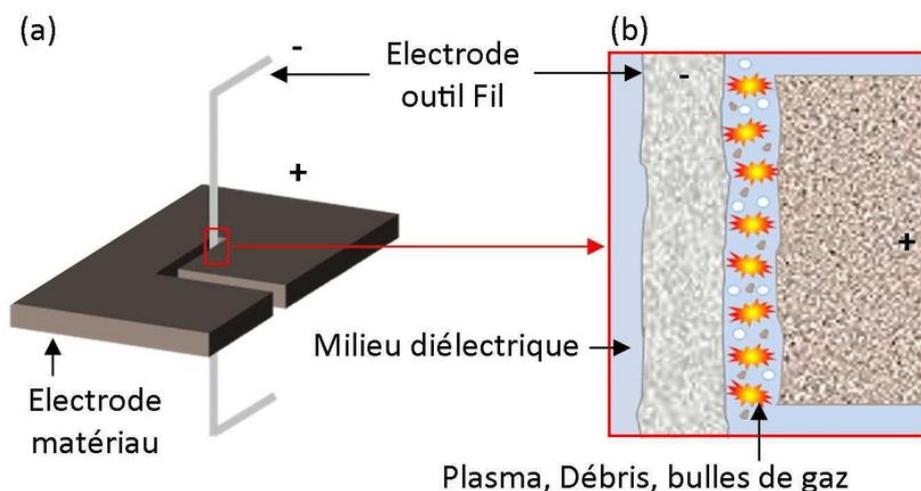


Figure I. 28 Principe d'usinage par Electro-érosion à fil. (a) Vue d'ensemble ; (b) Zoom sur la zone d'interaction avec ablation par décharges électriques.

I.9 Paramètres influençant le procédé d'usinage par WEDM

Dans le procédé WEDM, plusieurs paramètres influencent directement la qualité de l'usinage, le taux d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité de surface (SR) et la précision géométrique. Ces paramètres incluent notamment la vitesse d'avance du fil, la tension du fil, le courant de décharge, la durée d'impulsion (T_{on}), le temps d'arrêt (T_{off}), ainsi que le débit du fluide diélectrique. L'optimisation de ces paramètres est essentielle pour obtenir des performances élevées, notamment dans l'usinage de pièces de haute précision.

En pratique, ces réglages sont souvent définis via des tables technologiques fournies par les constructeurs de machines, mais une optimisation expérimentale reste souvent nécessaire pour des matériaux ou formes complexes. Le tableau suivant présente une classification des principaux paramètres intervenant dans le procédé WEDM [13] :

Tableau I. 3 Principaux paramètres du procédé WEDM [13], [14], [15].

Processus WEDM		
Paramètres de processus		Mesures de performance
Electrique	Non électrique	<ul style="list-style-type: none"> • MRR • TWR • SR • Temps d'usinage total • Précision dimensionnelle.
<ul style="list-style-type: none"> • Courant de décharge • Tension • Temps d'impulsion • Temps d'arrêt • Cycle de service 	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse d'avance du fil, • Tension du fil, • Débit du fluide diélectrique, • Type de fil (matériau, diamètre), • Épaisseur de la pièce, • Mode de rinçage 	

I.9.1 Paramètres électriques dans WEDM

Dans le procédé WEDM, plusieurs paramètres électriques influencent directement la qualité d'usinage, le taux d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité de surface (SR) ainsi que la précision dimensionnelle. Les principaux paramètres électriques sont : la durée d'impulsion (T_{on}), le temps d'arrêt (T_{off}), le courant de décharge, la tension, et le cycle de service. Ces paramètres définissent l'énergie délivrée lors de chaque étincelle et, par conséquent, la manière dont la matière est enlevée [13].

a) Courant de décharge (I_p)

Le courant détermine l'intensité de l'énergie appliquée pendant chaque impulsion. Un courant plus élevé entraîne un MRR plus élevé, mais peut aussi provoquer une rugosité accrue et des défauts thermiques sur la pièce [13].

b) Tension de décharge (V)

Elle correspond à la tension appliquée entre le fil et la pièce. Une tension plus élevée augmente la distance inter-électrode (gap), favorisant une meilleure évacuation des débris. Toutefois, une tension excessive peut rendre le processus instable [13].

c) Durée d'impulsion (T_{on})

C'est la période pendant laquelle l'étincelle est active. Une durée plus longue permet de retirer plus de matière, mais au détriment de la qualité de surface et de la précision [13].

d) Temps d'arrêt (T_{off})

Ce temps est critique pour la stabilité du processus. Il permet au diélectrique d'éliminer les résidus fondus. Un T_{off} trop court entraîne des arcs électriques, tandis qu'un T_{off} trop long réduit la productivité [13].

e) Cycle de service (DC)

Il est défini par la formule :

$$DC = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (I.1)$$

Un cycle élevé augmente le MRR, mais risque de dégrader la surface si le rinçage est insuffisant [13].

f) Polarité

La polarité de l'électrode peut être positive ou négative, mais la majorité de la matière est enlevée du côté positif. Lorsque la décharge se produit, elle traverse l'espace entre l'électrode et la pièce, générant des températures élevées qui vaporisent le matériau sur les deux surfaces, [13], [14]. Le canal de plasma est composé de flux ioniques et électroniques. Les électrons, plus légers que les ions, réagissent plus rapidement, ce qui entraîne une usure principalement du côté anodique. Cela réduit l'usure de l'électrode-outil, ce qui est particulièrement avantageux

lors des opérations de finition avec des temps d'impulsion courts. Cependant, pour des décharges plus longues, la proportion de flux ioniques augmente, ce qui peut entraîner une usure accrue de l'outil [13], [14]. La polarité est généralement déterminée expérimentalement et dépend du matériau de l'outil, du matériau de la pièce, de la densité de courant et de la durée des impulsions. Les alimentations modernes utilisent des impulsions de polarité inversée à intervalles réguliers pour éviter les arcs électriques [15].

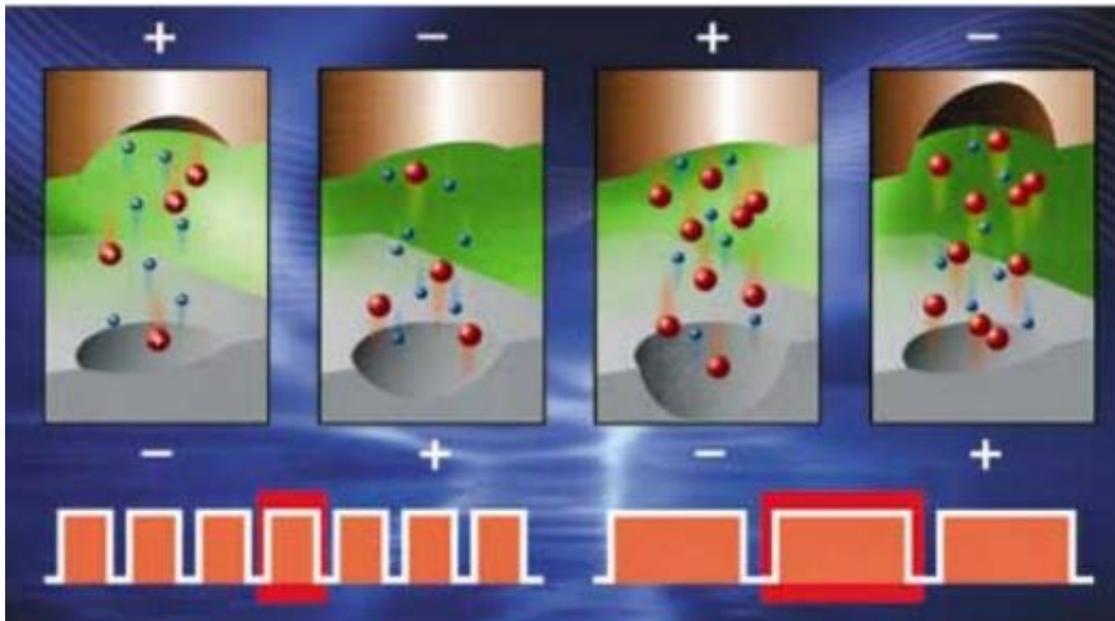


Figure I. 29 Illustration de l'influence de la polarité sur le MRR d'après [16].

Le tableau I.4 résume de façon qualitative l'enlèvement de matière de la pièce et le taux d'usure constaté selon la polarité.

Tableau I. 4 MRR/TWR en fonction de la polarité des électrodes d'après [16].

Polarité	Décharges courtes		Décharges longues	
	MRR	TWR	MRR	TWR
Pièce (+) / Outil (-)	+	-	-	+
Pièce (-) / Outil (+)	-	+	+	-

g) Gap (Entrefer)

Dans WEDM, l'entrefer est automatiquement contrôlé pour maintenir des décharges efficaces. Il est influencé par la tension et la nature du fluide diélectrique (eau déionisée dans le cas de WEDM) [13].

I.9.2 Paramètres non électriques (mécanique) en WEDM

Dans le procédé WEDM, les paramètres non électriques jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des performances telles que le taux d'enlèvement de matière (MRR), la rugosité de surface (SR) et la largeur de coupe (kerf). Ces paramètres incluent la vitesse d'avance du fil, la tension du fil, le débit du fluide diélectrique, le diamètre du fil et les conditions de rinçage.

a) Vitesse d'avance du fil (S)

La vitesse d'avance du fil, généralement exprimée en mm/min, influence directement la stabilité du processus d'usinage. Une vitesse trop élevée peut entraîner une rupture du fil, tandis qu'une vitesse trop faible peut réduire le MRR. Des études ont montré qu'une vitesse d'avance optimale améliore la productivité sans compromettre la qualité de surface [17].

b) Tension du fil

La tension appliquée au fil affecte la précision dimensionnelle et la rectitude de la coupe. Une tension inadéquate peut provoquer des déviations du fil, affectant la qualité de l'usinage. Une tension optimale assure une coupe précise et réduit l'usure du fil [13], [17].

c) Débit du fluide diélectrique

Le fluide diélectrique, généralement de l'eau déionisée en WEDM, est essentiel pour évacuer les débris et refroidir la zone d'usinage. Un débit adéquat améliore la stabilité de l'arc électrique et la qualité de surface. Un débit insuffisant peut entraîner une accumulation de débris, affectant négativement le processus [17].

d) Diamètre du fil

Le diamètre du fil influence la largeur de coupe (kerf) et la précision de l'usinage. Des fils de plus petit diamètre permettent des coupes plus fines et une meilleure précision, mais peuvent être plus susceptibles à la rupture. Le choix du diamètre dépend des exigences spécifiques de l'application [17].

e) Conditions de rinçage

Le rinçage efficace de la zone d'usinage est crucial pour éliminer les particules érodées et maintenir la stabilité du processus. Des conditions de rinçage optimales préviennent les

courts-circuits et améliorent la qualité de surface. Des études ont montré que le rinçage par le bas est plus efficace pour évacuer les débris dans certaines configurations [17].

g) Épaisseur de la pièce

L'épaisseur de la pièce à usiner est un paramètre non électrique influençant significativement la performance du procédé d'électroérosion par fil. Une pièce plus épaisse nécessite un temps d'usinage plus long et peut affecter la stabilité de l'arc électrique et l'efficacité de l'évacuation des débris [17].

- **Rôle** : détermine la durée d'interaction entre le fil-électrode et la matière, ainsi que la dissipation thermique.
- **Impact sur le MRR** : un accroissement de l'épaisseur augmente le temps de coupe, ce qui peut réduire le taux d'enlèvement de matière par unité de temps.
- **Impact sur la précision** : une pièce trop épaisse peut engendrer des variations thermiques importantes et provoquer des erreurs de forme (défauts géométriques).
- **Impact sur la stabilité du processus** : une mauvaise gestion du rinçage pour des pièces épaisses peut entraîner une accumulation de débris, causant des courts-circuits et réduisant la qualité de surface.
- **Solution technique** : adapter le régime de rinçage, réduire la vitesse d'avance et ajuster la tension pour assurer un usinage stable.

Ces paramètres non électriques, bien que souvent négligés par rapport aux paramètres électriques, ont une influence significative sur les performances du procédé WEDM. Une compréhension approfondie et une optimisation de ces paramètres sont essentielles pour améliorer la qualité de l'usinage et la productivité.

Pour une analyse plus détaillée et des données expérimentales spécifiques, veuillez consulter l'article [17].

I.10 Applications de l'usinage par WEDM

L'usinage par électroérosion à fil (WEDM) est une variante de l'EDM qui utilise un fil conducteur en mouvement comme électrode pour découper des pièces très dures avec une grande précision. Grâce à l'absence d'efforts mécaniques, WEDM est particulièrement adapté

à l'usinage de formes complexes, de cavités étroites et de matériaux à haute dureté, souvent inaccessibles par les méthodes conventionnelles.

I.10.1 Usinage de matériaux à haute dureté

Le WEDM est couramment utilisé pour découper des aciers trempés, carbures, alliages de titane, superalliages et autres matériaux présentant une dureté élevée. Contrairement à l'usinage classique, il permet de travailler ces matériaux sans traitement thermique préalable ni usure excessive des outils. Par exemple, l'usinage de matrices et d'outillages d'estampage ou d'injection plastique est largement réalisé par WEDM pour garantir la précision dimensionnelle et la qualité de surface finale [18].

I.10.2 Fabrication de micro-pièces et composants de précision

La technologie WEDM permet de réaliser des découpes extrêmement fines avec des fils de diamètre aussi petit que 20 μm . Elle est donc largement utilisée dans les industries de la micro-mécanique, de l'horlogerie, des instruments médicaux, et des connecteurs électroniques de précision. Par exemple, des pièces micro-mécaniques pour implants médicaux ou des moules de micro-injection peuvent être produits avec des tolérances inférieures au micron [19].

I.10.3 Application dans l'usinage des céramiques et composites

Bien que les céramiques soient isolantes, certaines formulations dopées ou recouvertes de couches conductrices peuvent être usinées par WEDM. Par exemple, des recherches ont montré que des matériaux comme le SiSiC (Silicon-infiltrated Silicon Carbide) ou les composites céramique-métal peuvent être découpés efficacement par WEDM après métallisation de la surface [20].

I.10.4 Fabrication d'électrodes et composants pour EDM enfonçage

Une autre application stratégique de WEDM est la fabrication d'électrodes complexes destinées à l'EDM enfonçage. Grâce à sa capacité à produire des formes très détaillées et des géométries complexes, WEDM est souvent utilisé pour préformer des électrodes de cuivre ou de graphite avec une grande précision [21].

I.10.5 Sélection des matériaux compatibles avec le WEDM

Le procédé WEDM est principalement réservé aux matériaux électriquement conducteurs. Le tableau suivant présente certaines propriétés physiques et thermiques clés pour une sélection de matériaux industriels, souvent utilisés ou étudiés dans le cadre du WEDM :

Tableau I. 5 Liste de matériaux utilisables en WEDM [22].

Matériaux	Masse volumique (Kg/m ³)	Module de Young (GPa)	Conductivité électrique (10 ⁶ S.m ⁻¹)	Température de fusion (°C)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Acier inoxydable	8000	200	1,32	1510	15
Titane	5410	115	1,8	1668	21,9
Ti6Al4V	4430	114	0,58	1630	6,6
WC	14950	600	5	2800	60 / 80
TiC	4900	440	0,000125	3160	21
Hastelloy	8220	200	0,9	1320 / 1350	12 / 20
Inconel	8440	209	1	1390 / 1425	13,2
Diamant	3520	1220	10 ⁻⁷	3550	2000
Molybdène	10200	329	18.7	2620	140
Silicium	2330	140*	10 ^{-9**}	1414	150

Remarque : Seuls les matériaux ayant une conductivité électrique suffisante (généralement $> 10^{-2} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$) sont usinables par WEDM sans traitement préalable. Des matériaux comme le TiC, le diamant ou le silicium peuvent nécessiter un revêtement métallique ou une activation de surface (comme la métallisation ou le dopage) pour rendre le procédé efficace.

Analyse :

- Matériaux très bien adaptés au WEDM : Molybdène, WC, aciers, Inconel, Titane.
- Matériaux problématiques ou non usinables directement : TiC, diamant, silicium → nécessitent des traitements de surface ou des variantes spécifiques du procédé.
- Critère critique : La conductivité électrique reste la condition de base pour déclencher une décharge électrique efficace entre le fil et la pièce.

I.11 Caractéristiques de l'électroérosion à fil (WEDM)

La découpe par électroérosion à fil (WEDM) se distingue comme une technologie d'usinage de haute précision, particulièrement adaptée à la fabrication de pièces complexes dans des matériaux conducteurs, même lorsqu'ils présentent une dureté extrême. Contrairement à l'usinage mécanique classique, le WEDM est un procédé sans contact mécanique, où la matière est enlevée par des étincelles successives générées entre un fil conducteur (généralement en laiton ou en zinc) et la pièce.

Cette absence d'effort mécanique permet d'éviter la déformation des pièces minces ou fragiles, tout en autorisant l'usinage de matériaux à haute dureté (comme le carbure de tungstène, le titane, l'Inconel, etc.) à leur état traité.

En outre, le WEDM offre des tolérances serrées et une excellente qualité de surface, ce qui le rend incontournable pour les secteurs où la précision est critique. Grâce à ces atouts, le WEDM est largement utilisé dans des domaines industriels de pointe, comme illustré dans le Tableau I.6 ci-dessous, d'après GF Agie/Charmilles :

- **Automobile** : usinage de bagues, buses d'injection, matrices de formage.
- **Aéronautique** : découpe de joints, aubes de compresseurs, pièces en superalliages.
- **Médical** : réalisation d'implants, de prothèses sur mesure en alliages biocompatibles.
- **Horlogerie** : fabrication de micropièces et de poinçons complexes.
- **Énergie** : usinage de composants de turbines, notamment en matériaux réfractaires.
- **Électronique** : découpe de masques, moules de plasturgie de précision, circuits métalliques fins.

Tableau I. 6 Domaines d'utilisations de l'EE d'après GF Agie / Charmilles.

Automobile	Aérospatial	Médical	Horlogerie	Énergie	Électronique
Roulement, buses d'injections	Pièces moulées, Joints compresseur	Implants, prothèse	Micropièces, poinçons	Turbines	Moules de plasturgie, masques
					
					

Ces applications montrent clairement que le WEDM est non seulement une alternative viable à l'usinage conventionnel, mais aussi une solution technologique avancée pour les défis actuels en fabrication de précision.

I.12 Avantages et inconvénients du procédé WEDM

Tableau I. 7 Avantages et inconvénients du procédé WEDM [23], [24], [25].

Avantages	Inconvénients
❖ Usinage de matériaux très durs (jusqu'à 60-70 HRC) sans usure rapide.	✗ Procédé lent, surtout pour les grandes pièces ou les matériaux épais.
❖ Aucune contrainte mécanique sur la pièce (procédé sans contact).	✗ Ne fonctionne que sur les matériaux électriquement conducteurs.
❖ Très grande précision dimensionnelle (tolérance jusqu'à $\pm 2 \mu\text{m}$).	✗ Épaisseur minimale du fil limite les rayons intérieurs et les détails fins.
❖ Qualité de surface excellente (R_a jusqu'à $0,2 \mu\text{m}$ avec plusieurs passes).	✗ Formation de couche blanche (recast layer) pouvant affecter les propriétés mécaniques.
❖ Capacité à produire des formes complexes et géométries internes.	✗ Consommation importante de fil (jetable) → coût récurrent.
❖ Peu ou pas de post-traitement thermique requis.	✗ Requiert un système de filtration et de diélectrique coûteux.
❖ Adapté à la micro-fabrication (micro-WEDM).	✗ Moins efficace pour les matériaux peu conducteurs ou composites isolants.

I.13 Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de présenter un cadre théorique solide sur le procédé d'usinage par électroérosion, en mettant en évidence ses principes de fonctionnement, ses variantes, ainsi que les paramètres influençant ses performances. Cette étude bibliographique a permis de mieux comprendre les avantages de cette technologie, notamment dans la fabrication de pièces complexes aux formes géométriques difficiles à réaliser par des méthodes d'usinage conventionnelles.

Dans le chapitre suivant, nous introduirons les fondements théoriques et méthodologiques de notre approche expérimentale. Nous y présenterons les principes du plan d'expériences (DOE) et de l'analyse de la variance (ANOVA), les raisons justifiant leur choix, ainsi que leur utilité pour étudier de manière rigoureuse l'effet des paramètres d'usinage sur les réponses mesurées.

CHAPITRE II

Plan d'expériences (DOE) et analyse ANOVA

II.1 Introduction

Dans toute démarche scientifique expérimentale, il est essentiel de suivre une méthodologie rigoureuse permettant de planifier, de conduire et d'analyser les essais de manière efficace. L'usinage par WEDM, en tant que procédé complexe influencé par de nombreux paramètres, nécessite une approche structurée pour comprendre l'effet de ces paramètres sur les performances d'usinage. Le DOE constitue un outil statistique puissant permettant d'organiser les essais de manière optimale, tout en minimisant le nombre d'expériences nécessaires. Grâce à cette méthode, il devient possible de déterminer quels facteurs ont une influence significative sur les réponses mesurées, et d'identifier les interactions éventuelles entre ces facteurs.

Parallèlement, ANOVA est une technique statistique complémentaire qui permet d'évaluer la significativité des effets observés. Elle aide à quantifier l'impact de chaque paramètre, à valider les modèles expérimentaux, et à tirer des conclusions fiables à partir des données collectées.

Dans ce chapitre, nous présenterons les fondements théoriques du plan d'expériences et de l'analyse ANOVA. Nous expliquerons les principes de base, les raisons ayant motivé leur choix dans le cadre de notre étude, ainsi que leur utilité pour l'interprétation rigoureuse des résultats expérimentaux issus du procédé WEDM.

II.2 La méthode du plan d'expériences DOE

II.2.1 Définition du DOE

DOE est une méthode statistique qui permet d'organiser, de manière structurée et rationnelle, une série d'essais expérimentaux dans le but d'étudier l'effet de plusieurs facteurs simultanés sur une ou plusieurs réponses mesurées. Il repose sur des principes mathématiques permettant de modéliser les relations entre les variables d'entrée (facteurs) et les variables de sortie (réponses), tout en minimisant le nombre d'expériences nécessaires [27].

Les objectifs principaux du DOE sont les suivants :

- Identifier les facteurs significatifs influençant les réponses.
- Étudier les interactions entre facteurs.
- Construire un modèle prédictif du comportement du système.

- Optimiser les conditions de fonctionnement d'un procédé.
- Réduire le nombre d'expériences sans perte d'information utile.
- Améliorer la fiabilité et la reproductibilité des résultats expérimentaux.

II.2.2 Concepts fondamentaux

La compréhension du plan d'expériences repose sur plusieurs notions essentielles qui permettent de structurer l'expérimentation et d'en interpréter les résultats de manière rigoureuse.

a) Facteurs et réponses

Dans un plan d'expériences, on appelle facteurs les variables contrôlées par l'expérimentateur et susceptibles d'influencer les résultats. Par exemple, dans le procédé WEDM, des facteurs typiques peuvent être : le temps d'impulsion (Ton), le temps de pause (Toff), ou encore la vitesse d'avance du fil. La réponse est la grandeur mesurée à l'issue de chaque essai, comme le taux d'enlèvement de matière (MRR) ou la rugosité de surface (Ra).

b) Niveaux d'un facteur

Chaque facteur est étudié à plusieurs niveaux, qui correspondent à des valeurs discrètes ou continues choisies dans un domaine d'étude donné. Par exemple, le facteur "Ton" peut être étudié à trois niveaux : 0.4 μ s, 1 μ s, 1.2 μ s [27].

c) Types de facteurs

Selon Jacques Goupy, on distingue plusieurs types de facteurs [27]:

- Facteurs continus (ex. : température, vitesse)
- Facteurs discrets (ex. : type d'électrode, matériau)
- Facteurs ordonnables (ex. : bas, moyen, haut)
- Facteurs booléens (ex. : marche/arrêt)

d) Espace expérimental

L'espace expérimental est défini par l'ensemble des combinaisons possibles des niveaux des facteurs. Chaque combinaison correspond à un point expérimental dans un espace à plusieurs dimensions (un axe par facteur). Ces points constituent le cœur du plan d'expériences.

e) Variables codées

Afin de faciliter les calculs et la comparaison entre facteurs de natures différentes, on utilise des variables centrées réduites (aussi appelées variables codées). Cela consiste à attribuer la valeur -1 au niveau bas d'un facteur, +1 au niveau haut, et 0 au niveau central. Cette codification permet de normaliser les données et d'unifier l'analyse statistique [27].

f) Surface de réponse

La surface de réponse est une représentation graphique ou mathématique de la relation entre les facteurs et la réponse. L'objectif du DOE est de modéliser cette surface de manière à prédire les résultats et identifier les conditions optimales [27].

II.2.3 Types de plans d'expériences

Le choix du type de plan d'expériences dépend de plusieurs éléments : le nombre de facteurs à étudier, le nombre de niveaux par facteur, les ressources disponibles (temps, matières, essais), ainsi que les objectifs de l'étude (criblage, modélisation, optimisation, etc.).

Voici les principaux types de plans utilisés dans l'industrie et la recherche expérimentale.

1. Plans factoriels complets

Les plans factoriels complets consistent à tester toutes les combinaisons possibles des niveaux de chaque facteur. Par exemple, avec 3 facteurs à 2 niveaux chacun, on réalise $2^3 = 8$ essais. Le nombre total d'expériences est donné par la formule: (nombre de niveaux)^{nombre de facteurs}. Ce type de plan permet de mesurer tous les effets principaux et les interactions entre facteurs, mais devient rapidement coûteux dès que le nombre de facteurs augmente [27].

2. Plans factoriels fractionnaires

Pour réduire le nombre d'essais, on peut utiliser des plans factoriels fractionnaires, qui n'explorent qu'une partie des combinaisons possibles. Ces plans sont utiles lors des phases de criblage pour identifier les facteurs les plus influents, mais ils ne permettent pas toujours de détecter toutes les interactions [27].

3. Plans Taguchi

Les plans orthogonaux de Taguchi, basés sur des matrices standards (L4, L8, L9, L16...), sont largement utilisés en ingénierie pour leur simplicité de mise en œuvre. Ils permettent une analyse robuste des effets des facteurs sur la variabilité des réponses, tout en limitant le nombre

d'essais. L'approche Taguchi intègre également la notion de rapport signal/bruit (S/N) pour améliorer la stabilité des procédés [27].

4. Plans pour surfaces de réponse (RSM)

Les plans de surface de réponse visent à modéliser de façon fine la réponse en fonction des facteurs, en utilisant des polynômes d'ordre 2 (quadratiques). Ces plans, comme les plans central composite (CCD) ou Box-Behnken, sont particulièrement utiles pour optimiser un procédé après avoir identifié les facteurs significatifs [27].

5. Plans de criblage

Ces plans, tels que les plans de Plackett-Burman, sont conçus pour tester un grand nombre de facteurs avec un nombre minimal d'essais. Ils permettent de repérer rapidement les facteurs qui ont un effet notable sur la réponse, en vue d'un affinement ultérieur [27].

II.2.4 Justification du choix du plan utilisé

Le procédé WEDM est influencé par un grand nombre de paramètres d'usinage, dont les effets peuvent être complexes et parfois interactifs. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à trois facteurs principaux : la durée d'impulsion (Ton), le temps de pause (Toff), et la vitesse d'avance du fil (S), chacun étudié à trois niveaux [27].

L'utilisation d'un plan factoriel complet aurait nécessité la réalisation de $3^3 = 27$ essais, ce qui représente un temps d'usinage et des ressources importants. Afin de réduire cette charge expérimentale tout en conservant une structure d'analyse rigoureuse, nous avons opté pour un plan Taguchi de type L9 (3^3).

Ce plan repose sur une matrice orthogonale permettant de répartir les niveaux de chaque facteur de manière équilibrée et indépendante. Il offre ainsi une estimation fiable des effets principaux de chaque facteur, tout en limitant le nombre total d'expériences à 9 essais seulement, ce qui est particulièrement avantageux dans un contexte académique et industriel à contraintes.

De plus, l'approche Taguchi est bien adaptée à l'analyse de procédés complexes comme le WEDM, où la variabilité des réponses (telles que le MRR ou la rugosité Ra) peut être influencée par plusieurs paramètres simultanés. Ce type de plan est largement utilisé dans le domaine de l'optimisation des procédés industriels pour sa robustesse, sa simplicité de mise en œuvre, et sa capacité à fournir des résultats interprétables rapidement.

Ainsi, le plan Taguchi L9 constitue un compromis optimal entre rigueur statistique, économie d'essais, et pertinence des résultats dans le cadre de notre étude.

II.2.5 Étapes de mise en œuvre du DOE [27].

1. Définir l'objectif de l'étude : exploration, modélisation ou optimisation.
2. Sélectionner les facteurs et leurs niveaux.
3. Choisir le plan adapté selon le type de facteurs, le budget et le niveau de précision souhaité.
4. Construire la matrice expérimentale : tableau listant les combinaisons à tester.
5. Réaliser les expériences dans des conditions contrôlées.
6. Analyser les résultats à l'aide de la méthode ANOVA.
7. Modéliser la réponse et optimiser le procédé.

II.2.6 Modélisation de la réponse

L'objectif fondamental d'un plan d'expériences est de construire un modèle mathématique capable de représenter la relation entre les facteurs étudiés et les réponses mesurées. Ce modèle permet non seulement de prévoir le comportement du procédé dans l'ensemble du domaine expérimental, mais aussi d'identifier les conditions optimales de fonctionnement. Dans le cadre de notre étude, où nous avons considéré trois facteurs (Ton, Toff, S), le modèle mathématique associé peut être exprimé sous la forme d'un polynôme de premier ordre (modèle linéaire) [27]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \beta_2 \cdot X_2 + \beta_3 \cdot X_3 + \varepsilon \quad (\text{II. 1})$$

où :

- Y est la réponse mesurée (par exemple, MRR ou Ra),
- X_1, X_2, X_3 sont les variables codées représentant respectivement Ton, Toff et la vitesse d'avance du fil,
- β_0 est l'ordonnée à l'origine (valeur moyenne de la réponse),
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ sont les coefficients représentant l'effet de chaque facteur,

- ε est l'erreur aléatoire associée aux variations non expliquées par le modèle.

Lorsque les effets de second ordre ou les interactions entre facteurs deviennent significatifs, le modèle peut être étendu pour inclure des termes quadratiques ou croisés [27]:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum \beta_{ij} x_i^2 + \varepsilon \quad (\text{II.2})$$

II.2.7 Outils logiciels pour la mise en œuvre du DOE

L'application pratique des plans d'expériences a été grandement facilitée par le développement de logiciels statistiques spécialisés. Ces outils permettent de concevoir des plans adaptés aux objectifs de l'utilisateur, d'analyser les données expérimentales, et de modéliser les réponses à l'aide de surfaces mathématiques [27].

Parmi les logiciels les plus utilisés dans le domaine industriel et académique, on peut citer :

- **Minitab**: largement utilisé pour les analyses statistiques, la génération de plans factoriels, Taguchi, et l'analyse ANOVA.
- **JMP**: propose une interface graphique puissante pour la visualisation interactive des données, la création de surfaces de réponse, et la régression non linéaire.
- **Design-Expert**: très utilisé pour les plans de surfaces de réponse (RSM), l'optimisation multi-réponses et les plans D-optimaux.
- **MODDE**: spécialisé dans les applications de développement et de formulation (plans de mélanges, D-optimaux, criblage).

Ces logiciels permettent de générer automatiquement les plans les plus adaptés au problème posé, de gérer des contraintes spécifiques, de calculer les coefficients du modèle par régression, et de visualiser les résultats à travers des surfaces de réponse ou des graphiques interactifs.

II.2.8 Avantages du DOE dans l'ingénierie

Le plan d'expériences (DOE) offre plusieurs avantages majeurs en ingénierie. Il permet de réduire le nombre d'essais tout en maximisant l'information obtenue, d'identifier les facteurs les plus influents ainsi que leurs interactions, et d'optimiser les performances des procédés. Contrairement aux méthodes empiriques, il apporte une approche structurée, reproductible et statistiquement valide [27].

II.3 Analyse de la variance (ANOVA)

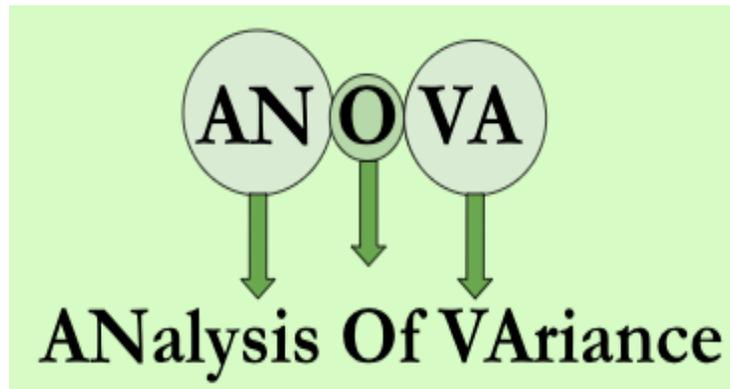


Figure II. 1 Signification de l'acronyme ANOVA.

II.3.1 Définition de l'ANOVA

L'analyse de la variance, ou ANOVA, est une méthode statistique développée pour déterminer si les différences observées entre les moyennes de plusieurs groupes sont statistiquement significatives. Elle est particulièrement utile lorsqu'on souhaite analyser l'effet de plusieurs facteurs expérimentaux sur une ou plusieurs réponses mesurées [27].

Dans le contexte des plans d'expériences, l'ANOVA permet de quantifier l'influence individuelle de chaque facteur ainsi que les éventuelles interactions entre facteurs sur une réponse donnée. Elle repose sur le principe de décomposer la variabilité totale observée dans les données en deux composantes principales : [27].

- la variabilité expliquée par le modèle, c'est-à-dire celle qui est due aux facteurs étudiés,
- la variabilité résiduelle, ou erreur expérimentale, qui correspond aux variations non expliquées par les facteurs.

L'ANOVA permet ainsi d'évaluer la part de la variation totale de la réponse qui peut être attribuée à chaque facteur, en comparant les variances, à travers un test statistique basé sur la distribution de Fisher (F-test) [27].

II.3.2 Principe de l'ANOVA

Le principe fondamental de l'ANOVA repose sur la comparaison de variances. L'idée est d'évaluer si la variabilité observée dans une réponse (par exemple, MRR ou Ra) peut être expliquée par les changements des niveaux des facteurs étudiés, ou si elle est simplement due au hasard [27].

Concrètement, l'ANOVA divise la variabilité totale des données en deux composantes :

- La variabilité entre les groupes (variabilité expliquée) : due aux effets des facteurs (Ton, Toff, S...),
- La variabilité intra-groupe (variabilité résiduelle) : due à des erreurs expérimentales ou des fluctuations aléatoires.

Un rapport F (statistique de Fisher) est alors calculé en comparant la variance moyenne due aux facteurs à celle due à l'erreur :

$$F = \frac{MCE_{\text{facteur}}}{MCE_{\text{erreur}}} \quad (\text{II. 3})$$

Où :

- MCE_{facteur} : Moyenne des Carrés des Écartés due au facteur étudié
- MCE_{erreur} : Moyenne des Carrés des Écartés due à l'erreur résiduelle.

Si ce rapport est suffisamment élevé, on conclut que le facteur a un effet significatif sur la réponse. Ce test est renforcé par le calcul de la p-value, qui permet de juger si les différences observées sont statistiquement significatives (généralement si $p < 0,05$) [27].

II.3.3 Paramètres statistiques utilisés

L'analyse de la variance (ANOVA) repose sur une série de paramètres statistiques qui permettent de mesurer et de comparer les sources de variation présentes dans les données expérimentales [27].

Ces paramètres sont généralement organisés dans un tableau ANOVA, et chacun d'eux joue un rôle précis dans l'évaluation de l'effet des facteurs étudiés.

Voici les principaux paramètres :

a) SCE : Somme des Carrés des Écartés

La SCE mesure la variabilité totale observée dans la réponse. Elle est divisée en deux composantes :

- SCE_{facteur} : due aux effets des facteurs étudiés,
- SCE_{erreur} : due aux fluctuations aléatoires (bruit, incertitudes...).

b) ddl : Degrés de liberté

Les degrés de liberté représentent le nombre de valeurs indépendantes disponibles pour estimer une variance. Par exemple :

- Pour un facteur à k niveaux : $ddl_{\text{facteur}} = k - 1$,
- Pour l'erreur : $ddl_{\text{erreur}} = (N - 1) - \sum(K_i - 1)$ (II. 4)

Où, K est le nombre de niveaux du facteur étudié et N est le nombre total d'essais.

c) MCE : Moyenne des Carrés des Écarts

C'est la variance moyenne associée à chaque source de variation, obtenue par :

$$MEC = \frac{SCE}{ddl} \quad (\text{II. 5})$$

- SCE_{facteur} : variation moyenne expliquée par le facteur
- SCE_{erreur} : variation moyenne résiduelle (bruit)

d) F : Statistique de Fisher

La valeur de F permet de comparer l'effet du facteur à la variabilité due au hasard. Elle est calculée par :

$$F = \frac{MCE_{\text{facteur}}}{MCE_{\text{erreur}}} \quad (\text{II. 6})$$

Plus cette valeur est élevée, plus l'effet du facteur est considéré comme significatif.

e) p-value

La p-value indique la probabilité que l'effet observé soit dû au hasard.

- Si $p < 0,05$, l'effet est statistiquement significatif à un niveau de confiance de 95 %.
- Si $p \geq 0,05$, l'effet n'est pas significatif.

Ces paramètres sont calculés automatiquement à l'aide de logiciels spécialisés tels que Minitab®, JMP® ou Design-Expert®, et permettent d'interpréter les résultats de manière rigoureuse et objective [27].

II.3.4 Conditions de validité de l'analyse

Pour que les résultats obtenus par ANOVA soient statistiquement fiables et interprétables, certaines hypothèses fondamentales doivent être respectées. Ces conditions assurent que les conclusions tirées à partir des valeurs de F et des p-values ne soient pas biaisées [27].

Voici les principales conditions de validité de l'ANOVA :

1. Normalité des résidus

Les résidus (écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs ajustées par le modèle) doivent être normalement distribués. Cette condition peut être vérifiée à l'aide :

- du test de normalité (Shapiro-Wilk, Anderson-Darling...),
- ou visuellement par un graphique de probabilité normale (Henry's plot).

2. Homogénéité des variances

Les variances des groupes comparés doivent être à peu près égales. Si la variance d'un groupe est très différente des autres, cela peut fausser les résultats de l'ANOVA. On peut vérifier cette condition avec :

- un test de Levene,
- ou un graphique des résidus vs valeurs ajustées.

3. Indépendance des erreurs

Les erreurs expérimentales doivent être indépendantes les unes des autres. Cela signifie que la valeur obtenue à une expérience ne doit pas influencer celles des autres. On vérifie cette condition en examinant les résidus en fonction de l'ordre d'exécution.

4. Additivité du modèle

Le modèle linéaire de l'ANOVA suppose que les effets des facteurs sont additifs, c'est-à-dire que l'effet combiné de deux facteurs est égal à la somme de leurs effets individuels. Si cette condition est violée, il faut envisager un modèle avec interactions ou termes quadratiques.

Remarque : Dans cette étude, la vérification de ces conditions a été réalisée à l'aide de graphes de résidus et d'outils statistiques disponibles dans le logiciel Minitab. Les résultats seront présentés dans le chapitre IV.

II.3.5 Intérêt de l'ANOVA dans notre étude

Dans le cadre de cette étude expérimentale portant sur l'usinage par WEDM, ANOVA joue un rôle central dans l'interprétation des résultats obtenus à partir du plan d'expériences Taguchi L9.

Le procédé WEDM étant influencé par plusieurs paramètres d'usinage, notamment la durée d'impulsion (Ton), le temps de pause (Toff) et la vitesse d'avance du fil (S), il est essentiel de déterminer, de manière objective, lesquels de ces facteurs ont un effet significatif sur les performances d'usinage.

L'ANOVA permet ainsi de :

- ✓ Identifier les facteurs ayant une influence statistiquement significative sur les réponses étudiées, telles que le taux d'enlèvement de matière (MRR) et la rugosité de surface (Ra).
- ✓ Quantifier la contribution relative de chaque paramètre à la variation totale de la réponse.
- ✓ Vérifier la validité du modèle expérimental, en évaluant la part d'erreur et la robustesse des résultats.
- ✓ Orienter l'optimisation du procédé en se concentrant sur les paramètres les plus déterminants.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche expérimentale adoptée, en mettant l'accent sur la méthode des DOE et ANOVA. Le choix d'un plan Taguchi L9 a été justifié par sa capacité à étudier l'influence de plusieurs paramètres avec un nombre limité d'essais. Les principes de l'ANOVA ont également été exposés afin de fournir un cadre statistique fiable pour l'interprétation des résultats.

Dans le chapitre suivant, nous passerons à la mise en œuvre pratique de cette méthodologie. Nous y décrirons les équipements utilisés, les matériaux sélectionnés, les conditions opératoires choisies, ainsi que le déroulement des essais conformément au plan d'expériences établi.

CHAPITRE III

Procédure Expérimentale

III.1 Introduction

Dans le cadre de la partie appliquée de mon Projet de Fin d'Études, j'ai intégré l'entreprise BCR, spécialisée dans la fabrication de pièces mécaniques complexes. Cette immersion m'a offert l'occasion de travailler dans un environnement industriel réel et d'appliquer concrètement les connaissances acquises durant ma formation, en particulier dans le domaine de l'électroérosion à fil.

Au sein de l'entreprise, j'ai pu travailler sur une machine d'électroérosion à fil de technologie avancée, en participant activement aux différentes étapes de fabrication de pièces de précision. Ce contexte m'a offert l'opportunité de me familiariser avec les exigences du travail en atelier, les contraintes liées à la production industrielle, ainsi que les méthodologies d'optimisation des paramètres d'usinage.

Dans ce chapitre, je présenterai tout d'abord l'environnement industriel de l'entreprise BCR et les principales caractéristiques de la machine utilisée. Je détaillerai ensuite les différentes étapes de préparation et de réalisation des opérations d'électroérosion à fil, en mettant l'accent sur le choix des paramètres technologiques, la stratégie d'usinage adoptée, et les résultats obtenus. Enfin, une analyse critique des performances du procédé sera proposée, afin d'identifier les points forts et les éventuelles pistes d'amélioration.

III.2 Présentation de l'entreprise ORFEE BCR

La filiale ORFEE BCR (Bureau de Conception et de Réalisation) est une entreprise industrielle algérienne spécialisée dans la production, le développement et la commercialisation d'articles de table ainsi que d'éviers de cuisine en acier inoxydable [26].

- **Localisation**

La filiale ORFEE est située à :

- 70 Km à l'est d'Alger
- Dans la wilaya de Boumerdes, à 30 Km du chef-lieu de la wilaya
- À 3 Km de la Daira de Bordj Menaiel

- **Date de création** : 1er Janvier 2001.

- **Activité** : Production, développement et commercialisation d'articles de table, éviers de cuisine en acier inoxydable.

- **Patrimoine immobilier** : 89.300 m² dont 28.800 m² bâti.

- **Capacité de production** : 32.000.000 pièces et 200.000 éviers de cuisine/an.

- **Personnel** : 286 agents :
 - 38 cadres
 - 139 de maîtrises
 - 109 d'exécutions

Grâce à ses infrastructures modernes, son organisation efficace et ses ressources humaines qualifiées, ORFEE BCR constitue un environnement professionnel idéal pour la mise en œuvre d'activités expérimentales liées à la technologie de WEDM [26].



Figure III. 1 Vue du siège social de l'entreprise ORFEE BCR.

La filiale ORFEE est née le 1er janvier 2001, suite à la restructuration de BCR, dotée d'organes de gestion et de contrôle réglementaire.

Une politique qualité a été définie par l'entreprise, qui consiste en premier lieu à la satisfaction du client envers les produits ORFEE-BCR, donc une amélioration constante de la qualité, Partant de ce principe de base, l'entreprise a mis en place un système de management qualité (SMQ) conformément au référentiel ISO 9001 V.2000. En décembre 2003, le certificat a été remis à BCR par AFAQ. Désormais, les produits BCR sont fabriqués sous le système assurance qualité conforme à la norme ISO 9001. La filiale est également certifiée en 2005 par AFAQ ISO 14001 version 2004 [26].

NB : les versions ISO 9001:2000 et ISO 14001:2004 sont aujourd'hui remplacées respectivement par les normes ISO 9001:2015 et ISO 14001:2015.

III.2.1 Type de fabrication

La politique de production de la filiale fait appel à une fabrication dite de produits catalogués en séries. Le produit est parfaitement défini. Il est identifié avant la réception du programme des ventes (commandes du client).

À la fin du processus de transformation, les produits sont stockés dans les magasins appropriés. Le stock des produits finis sert de régulation entre la demande de la clientèle variable et l'offre rigide des moyens de production [26].

III.2.2 Missions et objectifs

Les missions conférées à la filiale ORFEE sont les suivantes : [26].

- Assurer d'une manière autonome et indépendante la production d'articles ménagers, à savoir les produits : plats, coupes, couteaux, cuillères, fourchettes, louches, brochettes et éviers de cuisine en acier inoxydable de qualité supérieure, à base de Chrome, de Nickel et d'argent.
- Fabriquer en quantité et en qualité les produits de la gamme au meilleur coût de revient.

III.2.3 Produits de l'ORFEE-BCR [26].



Figure III. 2 Produits phares (plats de service)

Figure III. 3 Éviers en acier inoxydable.

**Figure III. 4** Gamme de couverts produits.**Figure III. 5** Ustensiles ménagers [26].

III.3 Enjeux du projet

Les enjeux de ce projet résident dans la nécessité d'améliorer la qualité de découpe des pièces mécaniques complexes en recourant à la technologie d'électroérosion à fil (Wire EDM). Ce procédé, bien qu'il soit reconnu pour sa grande précision, reste fortement influencé par plusieurs paramètres électriques et mécaniques, notamment :

- l'intensité du courant,
- la vitesse d'avance du fil,
- la tension d'alimentation,
- et les caractéristiques du liquide diélectrique.

Le principal défi consiste à optimiser ces paramètres afin de :

- Minimiser la rugosité de surface,
- Réduire le temps de coupe,
- Éviter l'apparition de défauts tels que les bavures, les microfissures ou les erreurs dimensionnelles.

L'enjeu majeur est donc de trouver un compromis optimal entre la qualité de coupe, le coût de production et le temps d'usinage, tout en respectant les exigences industrielles en termes de conformité, de précision et de reproductibilité.

III.4 Objectif de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'optimiser les paramètres d'usinage par électroérosion à fil afin de produire des pièces mécaniques complexes présentant une qualité de surface élevée et un temps d'usinage réduit.

Pour atteindre cet objectif, les axes d'analyse retenus sont les suivants :

- Les paramètres électriques : intensité du courant, tension d'alimentation, Temps entre deux impulsions et durée des impulsions ;
- Les paramètres mécaniques : vitesse d'avance du fil, pression et circulation du liquide diélectrique ;
- L'état de surface obtenu : rugosité moyenne (Ra) mesurée sur les zones usinées ;
- Le temps total d'usinage : mesuré pour chaque opération ou série de coupes ;
- La précision dimensionnelle : écart entre les dimensions théoriques et mesurées sur les pièces finales.

III.5 Présentation de la machine d'électroérosion type ROPOFIL 290P

La machine d'électroérosion à fil (Wire EDM) de haute précision est de type ROPOFIL 290P, spécifiquement conçue pour l'usinage de pièces complexes dans divers secteurs industriels. Son principe de fonctionnement repose sur l'utilisation d'un fil métallique tendu, à travers lequel circule un courant électrique contrôlé, permettant ainsi de réaliser des découpes extrêmement fines et précises dans des matériaux conducteurs.



Figure III. 6 Vue d'ensemble de la machine ROBOFIL 290P.

III.6 Optimisation expérimentale des conditions de coupe en WEDM pour l'usinage de formes complexes

III.6.1 Matériau utilisé dans l'étude

Le matériau utilisé pour la réalisation de la pièce complexe dans cette étude est un acier allié de type X155CrVMo12-1/G, conforme à la norme DIN 1.2379 (équivalent au D2 Tool Steel selon la classification américaine AISI) [26].

Il s'agit d'un acier à outils hautement allié au chrome, vanadium et molybdène, largement utilisé dans les applications nécessitant une résistance élevée à l'usure, une bonne ténacité et une stabilité dimensionnelle lors des traitements thermiques [26].

a. Composition chimique typique (% en masse) :

Tableau III. 1 Composition chimique de type X155CrVMo12-1/G [26].

Élément	C	Cr	Mo	V	Mn	Si
%	1.50 – 1.60	11.0 – 13.0	0.70 – 1.00	0.70 – 1.00	0.20 – 0.60	0.20 – 0.40

b. Caractéristiques principales : [26].

- **Dureté à l'état traité** : jusqu'à 60 – 62 HRC.
- **Bonne résistance à l'abrasion** : grâce à une forte teneur en carbures de chrome.
- **Excellente stabilité dimensionnelle** après traitement thermique.

- **Bonne aptitude à l'usinage par électroérosion (EDM)** grâce à sa conductivité suffisante et sa structure homogène.

c. Propriétés physiques et mécaniques (à l'état traité thermiquement) :

Tableau III. 2 Propriétés physiques et mécaniques [26].

Propriété	Valeur typique
Densité	$\approx 7.7 - 7.8 \text{ g/cm}^3$
Dureté (après trempe + revenu)	58 – 62 HRC
Conductivité thermique	$\approx 20 - 25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (selon la température)
Module d'élasticité (Young)	$\approx 210 \text{ GPa}$
Température maximale de service	$\approx 500 \text{ }^\circ\text{C}$ (selon traitement)
Ténacité	Moyenne à bonne (meilleure que HSS)
Usinabilité par EDM	Excellente grâce à sa microstructure
La limite d'élasticité	1000 MPa (1000 N/mm ²).

III.6.2 Plan d'expériences (DOE)

a) Paramètres d'usinage sélectionnés

Les paramètres variables considérés sont les suivants :

Tableau III. 3 Paramètres d'usinage sélectionnés.

Paramètres	Niveau 1 (bas)	Niveau 2 (moyenne)	Niveau 3 (haut)
A (Durée d'impulsions)	0.4 μs	1 μs	1.2 μs
B (Temps entre deux impulsions)	3.8 μs	4.8 μs	5.8 μs
S (vitesse d'avance du fil)	4 mm/min	10 mm/min	30 mm/min

b) Calcul du nombre d'expériences dans un plan factoriel complet

Dans un plan factoriel complet, le nombre total d'expériences nécessaires est déterminé selon la formule suivante :

$$\text{Nombre d'expériences} = (\text{nombre de niveaux})^{\text{nombre de facteurs}} \quad (\text{III. 1})$$

Dans notre cas, nous avons considéré 3 facteurs, chacun ayant 3 niveaux. Ainsi, le nombre total d'essais requis dans un plan complet serait :

$$\text{Nombre d'expériences} = 3^3 = 27 \text{ expériences.}$$

Ce nombre élevé représente une charge expérimentale importante en termes de temps, de ressources et de coûts. Pour pallier cette contrainte, une méthode de réduction du nombre d'expériences a été adoptée c'est la méthode Taguchi.

C) Justification du choix de la méthode Taguchi

Lors de la phase initiale de conception du plan d'expériences, l'utilisation d'un plan factoriel complet avec 3 facteurs à 3 niveaux aurait nécessité la réalisation de $3^3 = 27$ expériences, ce qui représente un coût élevé en termes de temps, de ressources et d'usinage. Pour réduire significativement le nombre d'essais tout en conservant une capacité d'analyse satisfaisante, nous avons opté pour la méthode Taguchi, qui propose des matrices orthogonales optimisées. Ainsi, le plan final retenu est basé sur la matrice Taguchi L9, la matrice correspondante était L9 (9 essais), ce qui demeurait relativement important dans notre contexte expérimental. permettant de réaliser 9 expériences seulement, tout en assurant une analyse pertinente des effets principaux des paramètres choisis.

d) Génération du plan d'expériences avec Minitab

Le plan d'expériences a été généré à l'aide du logiciel **Minitab**, qui propose des outils intégrés pour la conception expérimentale selon la méthode **Taguchi**.

Les principales étapes sont résumées comme suit:

1) Accès au module : Stat > DOE > Taguchi > Créer un plan de Taguchi

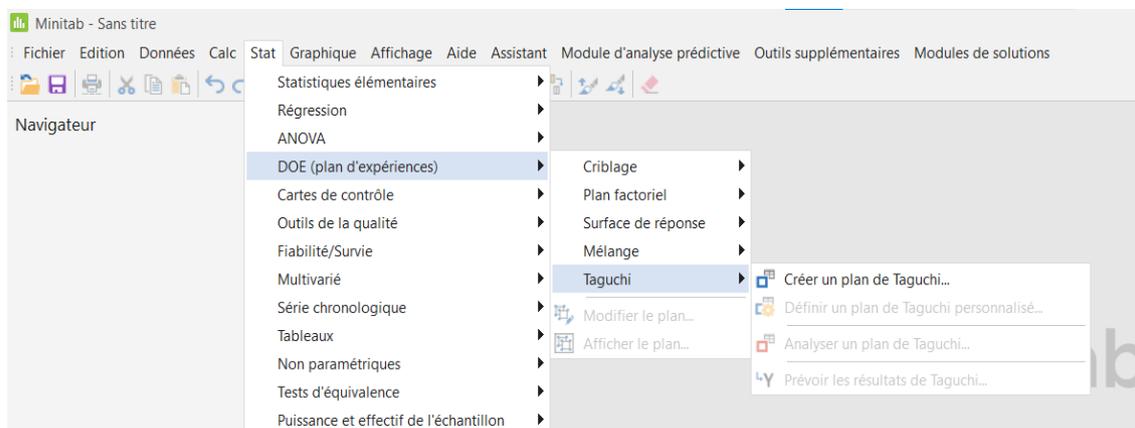


Figure III. 7 Interface de Minitab : accès au module DOE - Taguchi.

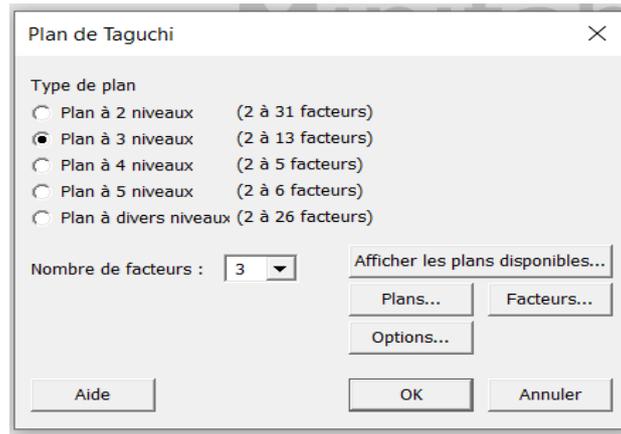


Figure III. 8 Définition des niveaux de facteurs dans Minitab.

Tableau III. 4 Définition des facteurs et niveaux dans le plan Taguchi sous Minitab.

Facteur	Nom	Valeurs des niveaux	Colonne	Niveaux
A	A (Durée d'impulsi	0,4 1 1,2	1	3
B	B (Temps entre de	3,8 4,8 5,8	2	3
C	S (vitesse d'avanc	4 10 30	3	3

Tableau III. 5 Afficher les plans disponibles.

Plans	A un niveau plans			
	2 niveaux	3 niveaux	4 niveaux	5 niveaux
L4	2-3			
L8	2-7			
L9		2-4		
L12	2-11			
L16	2-15			
L16			2-5	
L25				2-6
L27		2-13		
L32	2-31			

A un niveau
 Mixte à 2-3 niveaux
 Mixte à 2-4 niveaux

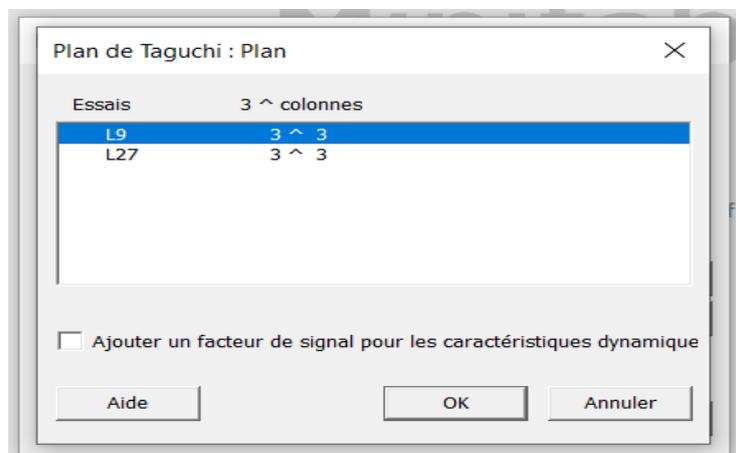


Figure III. 9 Sélection de la matrice L9 pour l'expérience Taguchi.

2) Le logiciel a alors généré automatiquement une matrice orthogonale Taguchi L9, constituée de 9 combinaisons expérimentales distinctes. Chaque configuration a été testée en répétant les conditions d'usinage, et les résultats ont été mesurés pour les variables suivantes : MRR, Ra, TUL (taux usure de l'outil), temps d'usinage et la précision dimensionnelle.

Tableau III. 6 Matrice expérimentale composée de 9 essais (Taguchi L9).

Récapitulatif du plan

Tableau de Taguchi L9(3³)
 Facteurs : 3
 Essais : 9

Colonnes du répertoire L9(3⁴) : 1 2 3

↓	C1	C2	C3	C4
	A (Durée d'impulsions)	B (Temps entre deux impulsions)	S (vitesse d'avance du fil)	
1	0,4	3,8	4	
2	0,4	4,8	10	
3	0,4	5,8	30	
4	1,0	3,8	10	
5	1,0	4,8	30	
6	1,0	5,8	4	
7	1,2	3,8	30	
8	1,2	4,8	4	
9	1,2	5,8	10	
10				

III.6.3 Conception de la pièce d'essai

La conception géométrique de la pièce d'essai a été réalisée sur SolidWorks, avec les caractéristiques suivantes :

- Bloc principal : 100 × 100 × 24 mm
- Neuf cavités d'essai : 10 × 10 × 24 mm chacune, intégrées dans le même bloc
- Point de départ de coupe défini par un trou circulaire de diamètre 5 mm

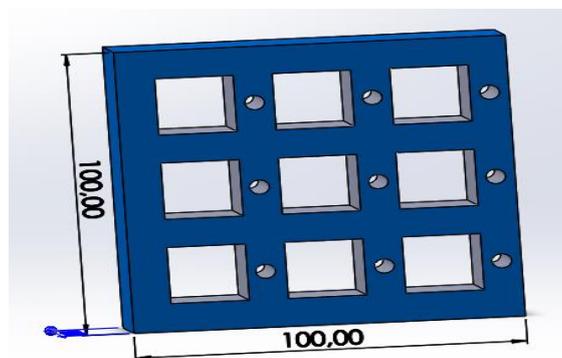


Figure III. 10 Conception de la pièce d'essai sur SolidWorks.

III.6.4 Génération du G-code avec CAMWorks

L'environnement CAMWorks a été utilisé pour la simulation d'usinage et la génération du code G. La procédure adoptée comprend les phases suivantes:

1) Définition des paramètres machine :

Machine > Edit definitions > Wire EDM-Metric > Select > Ok.

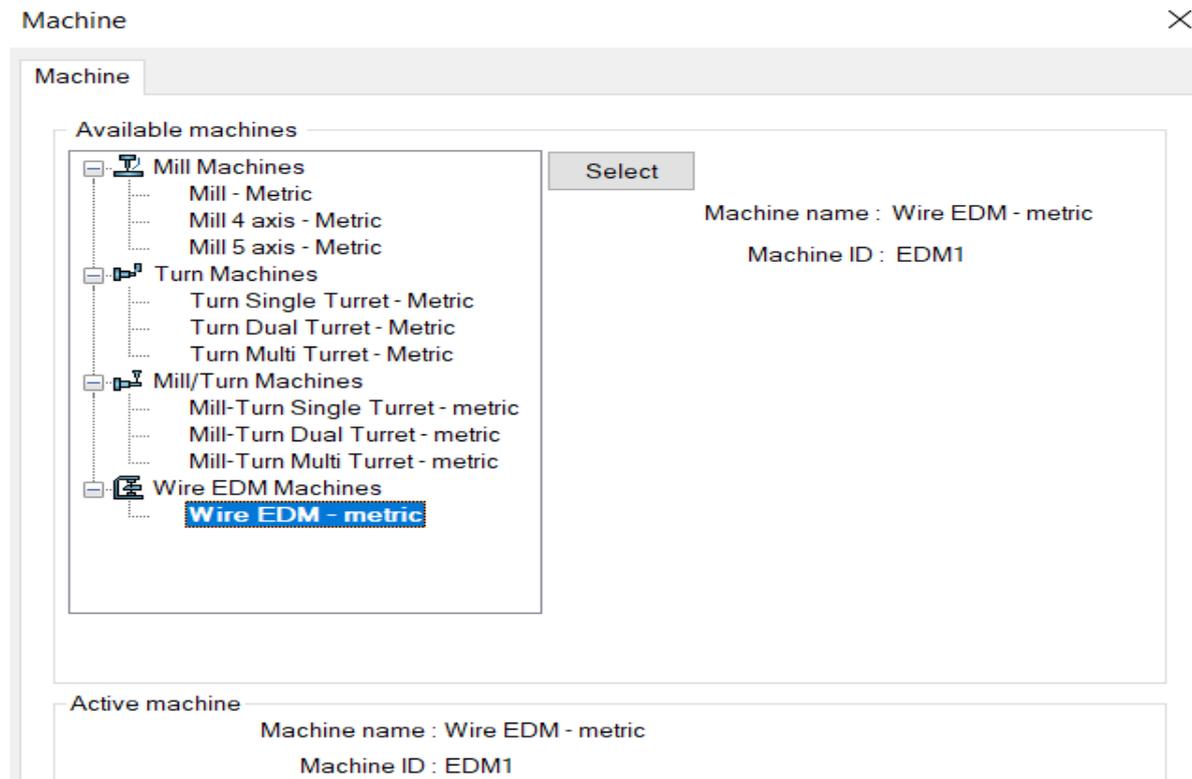


Figure III. 11 Définition des paramètres machine dans CAMWorks.

2) Définition des paramètres de gestion le brut.

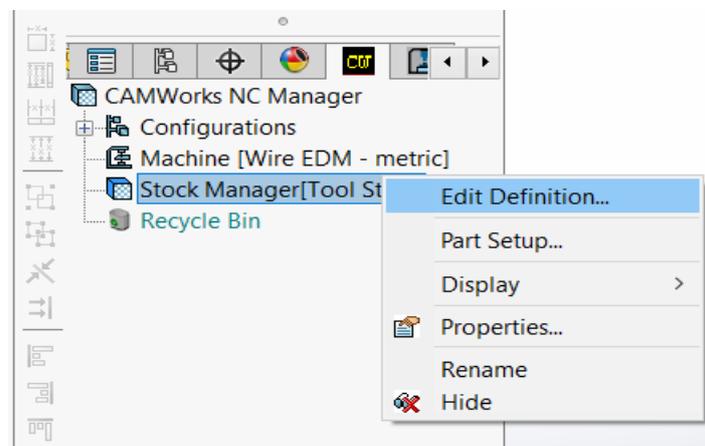


Figure III. 12 Paramètres du Stock Manager définis dans CAMWorks.

3) Sélection du matériau de la pièce.

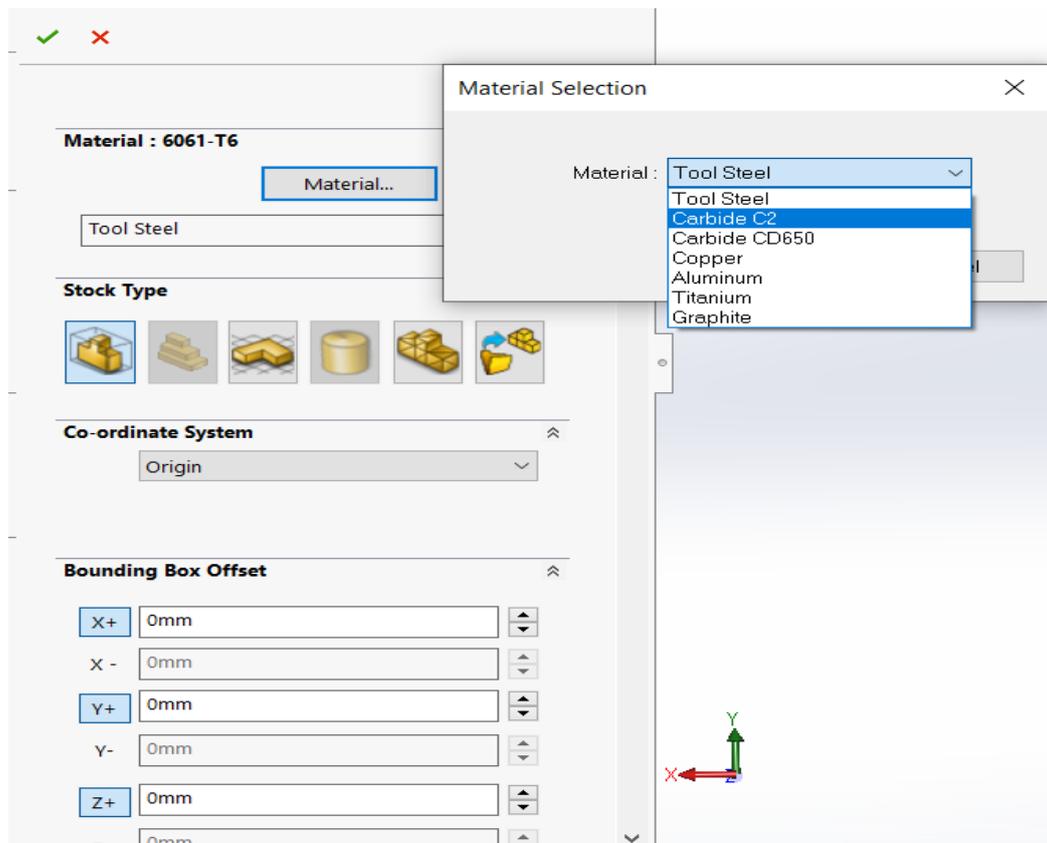


Figure III. 13 Sélection du matériau de la pièce dans CAMWorks.

4) Configuration de l'opération EDM.

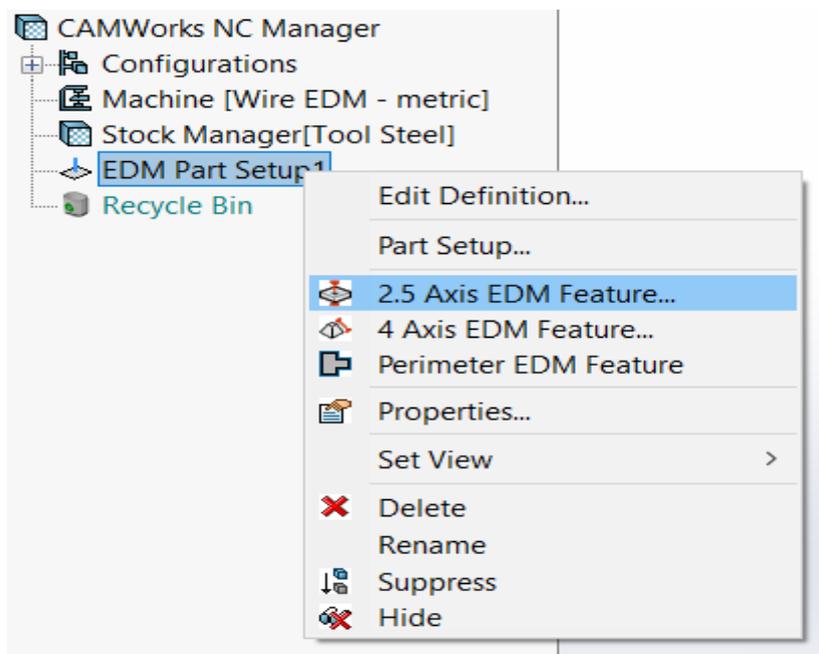


Figure III. 14 Configuration de l'opération EDM dans CAMWorks.

5) Définition du "EDM Part Setup".

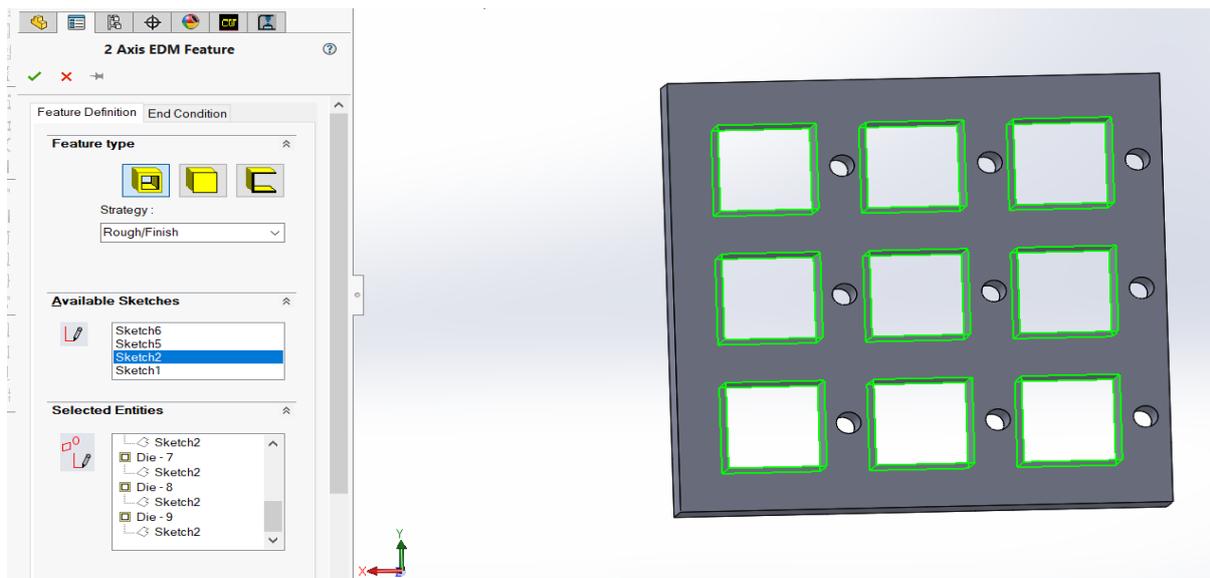


Figure III. 15 Définition de l'EDM Part Setup dans CAMWorks

6) Génération du plan d'opérations et du parcours outil (Toolpath).

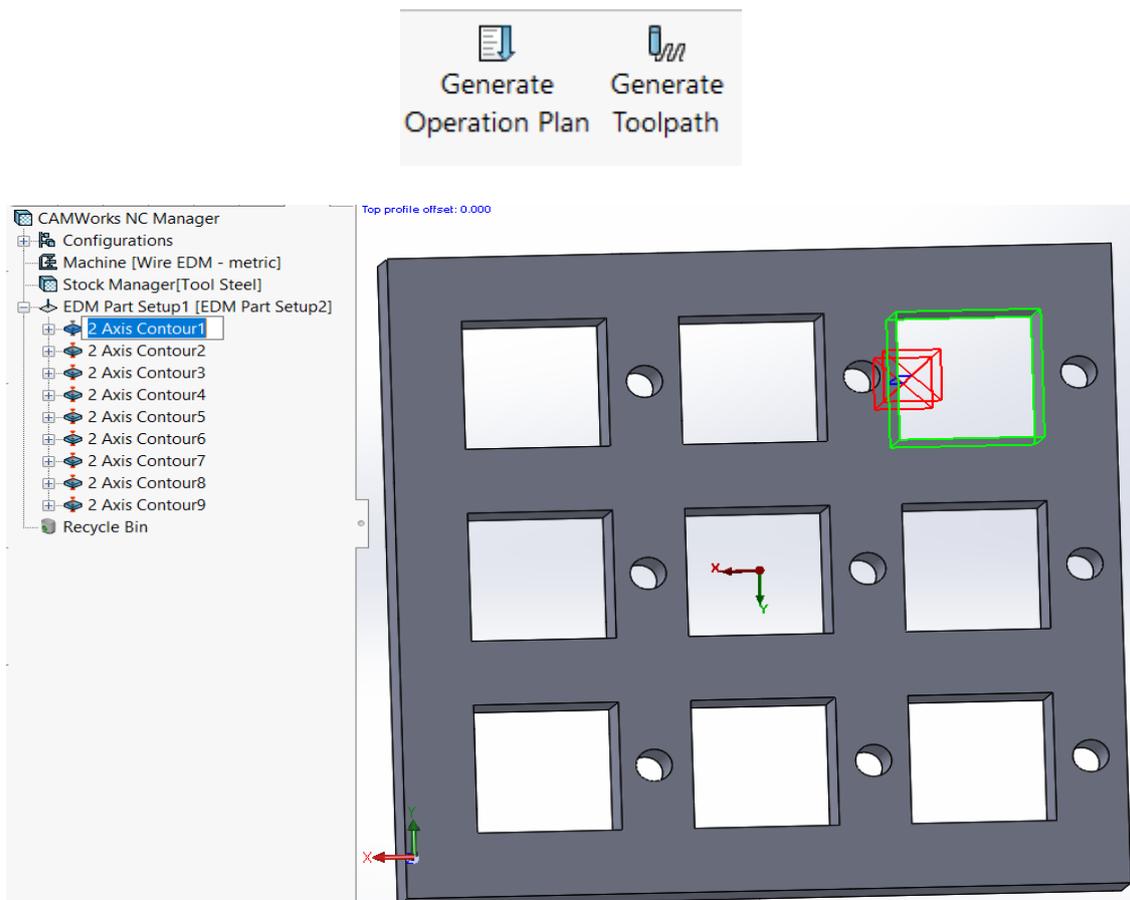


Figure III. 16 Génération du plan d'opérations et du chemin d'outil.

7) Sélection du point de départ de découpe via :

2 Axis Contour 1 > Edit definition > Select point

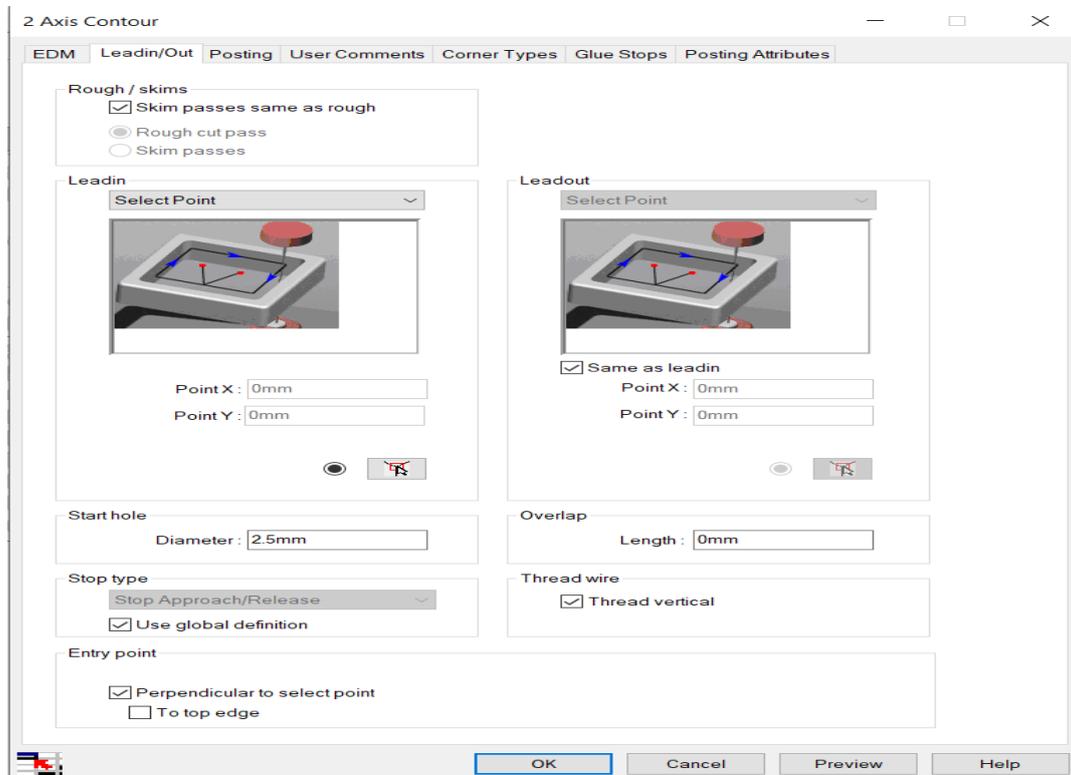


Figure III. 17 Sélection du point de départ de découpe pour un contour.

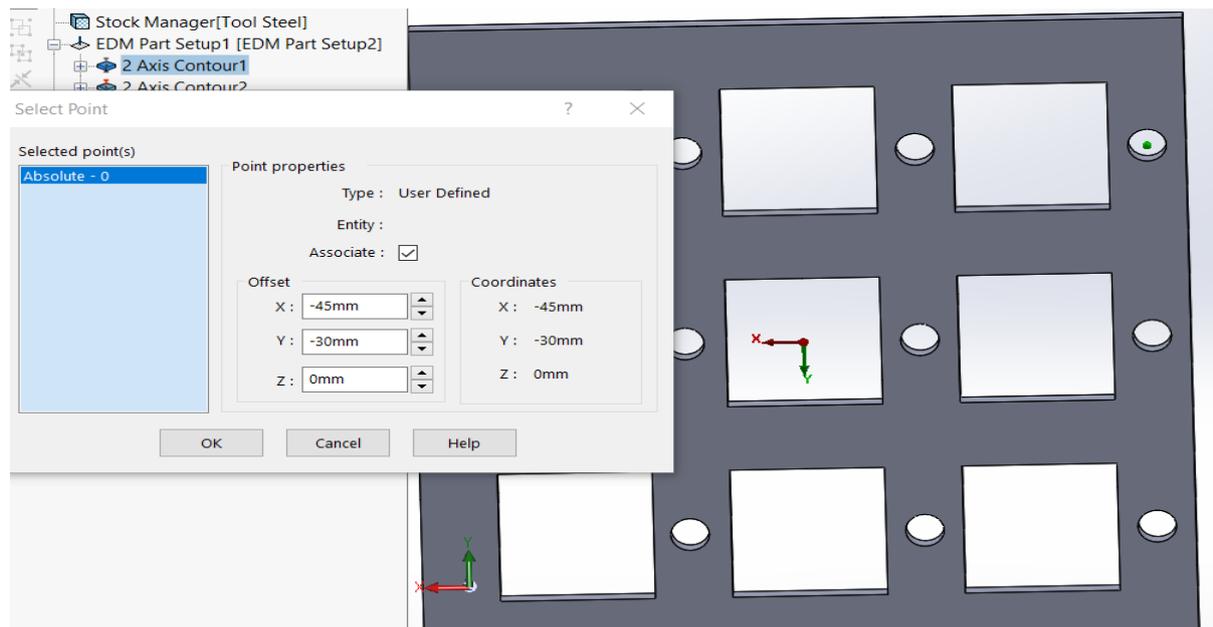


Figure III. 18 Définition du point de départ dans l'interface 2 Axis Contour.

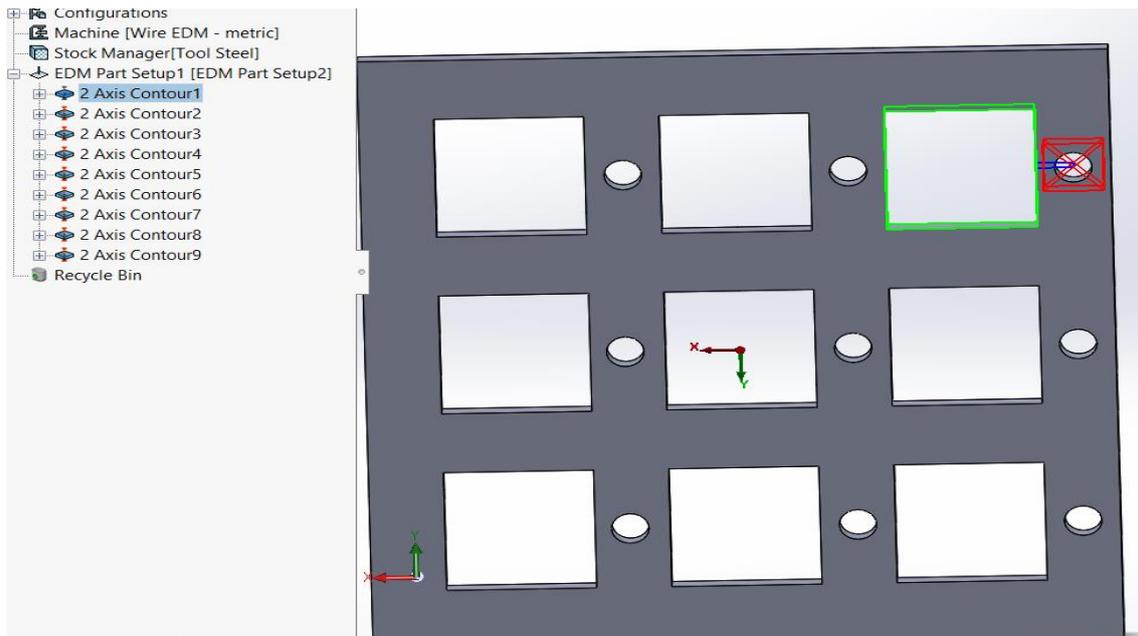


Figure III. 19 Contours définis pour l'ensemble des essais.

➤ Même chose pour les autres contours.

8) Pour la simulation, Dans l'interface de CAMWorks, nous avons accédé à :

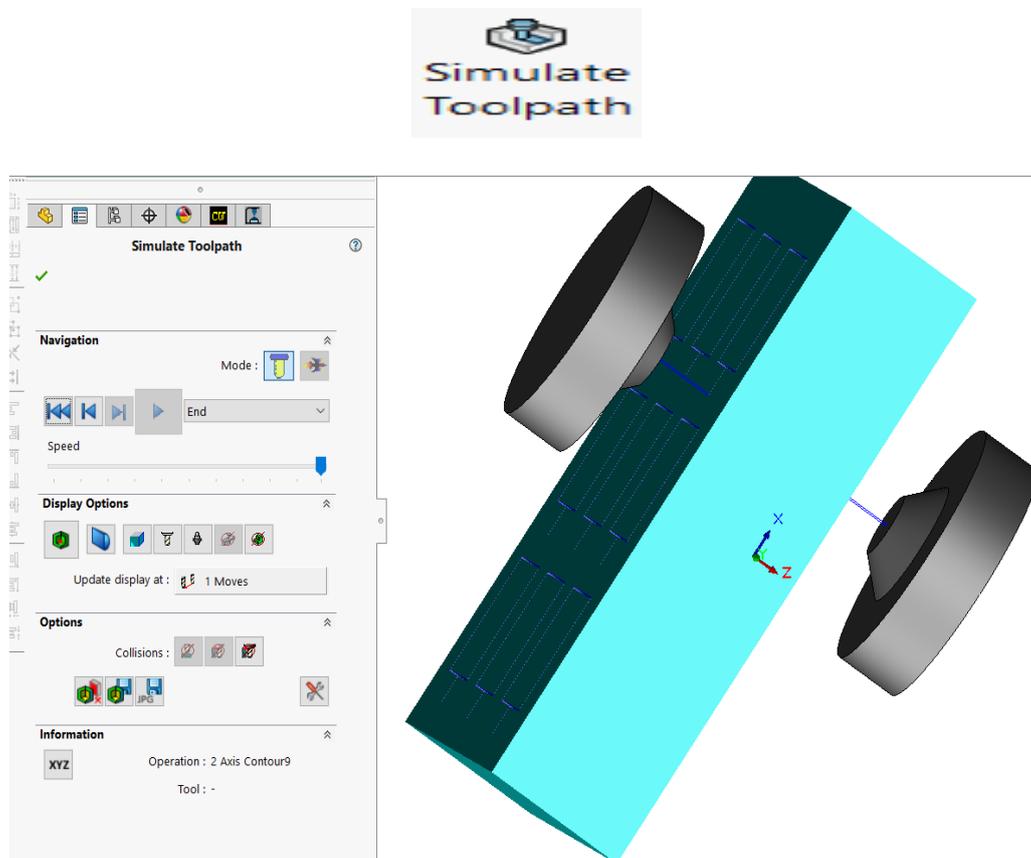


Figure III. 20 Simulation du parcours d'outil dans CAMWorks.

9) Enfin, le code G final est généré et préparé pour l'exécution sur la machine ROBOFIL 290P.

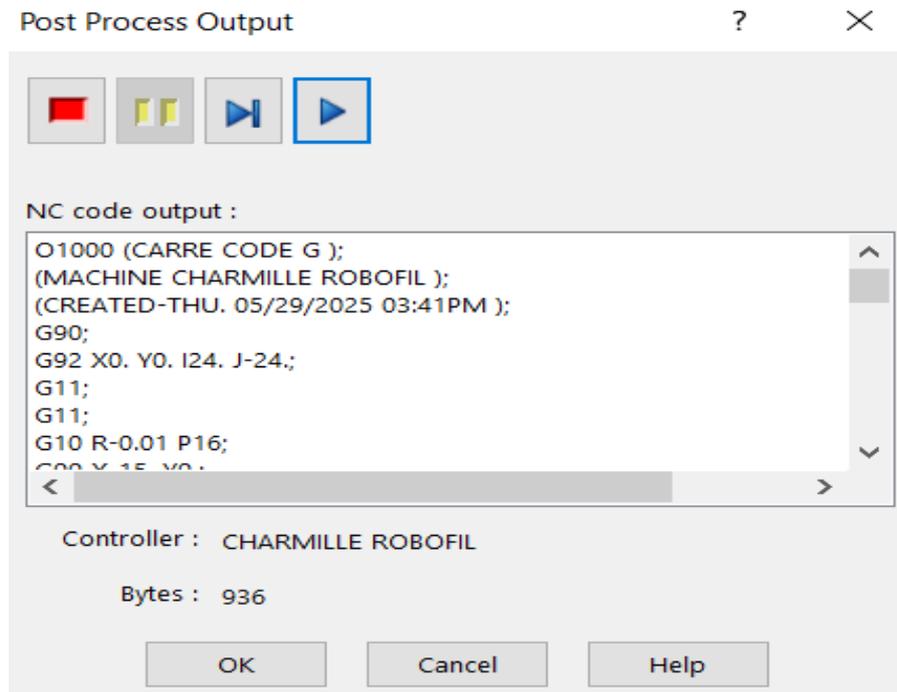


Figure III. 21 Génération du code G final pour la machine ROBOFIL 290P.

III.6.5 Mise en marche de la machine ROBOFIL 290P et exécution de l'usinage

Après la génération du code G via CAMWorks, l'étape suivante consiste à transférer ce code vers la machine ROBOFIL 290P afin de lancer l'usinage.

La démarche suivie est structurée en plusieurs étapes:

1. Transfert du code G

Le fichier G-code ISO est transféré à la machine à l'aide d'une clé USB,



Figure III. 22 Processus de transfert du fichier G-code vers la machine ROBOFIL 290P via une clé USB.

2. Préparation de la machine

- Vérification du niveau du liquide diélectrique (eau déionisée).
- Montage de la pièce à usiner sur la table de travail.
- Alignement de la pièce avec l'origine programmée (zero pièce).
- Mise en tension du fil électrode et vérification de son alignement.



Figure III. 23 Montage de la pièce à usiner sur la table de la ROBOFIL 290P.

3. Chargement du programme

- Ouverture de l'interface CNC sur la ROBOFIL 290P.
- Chargement du programme G-code précédemment transféré.

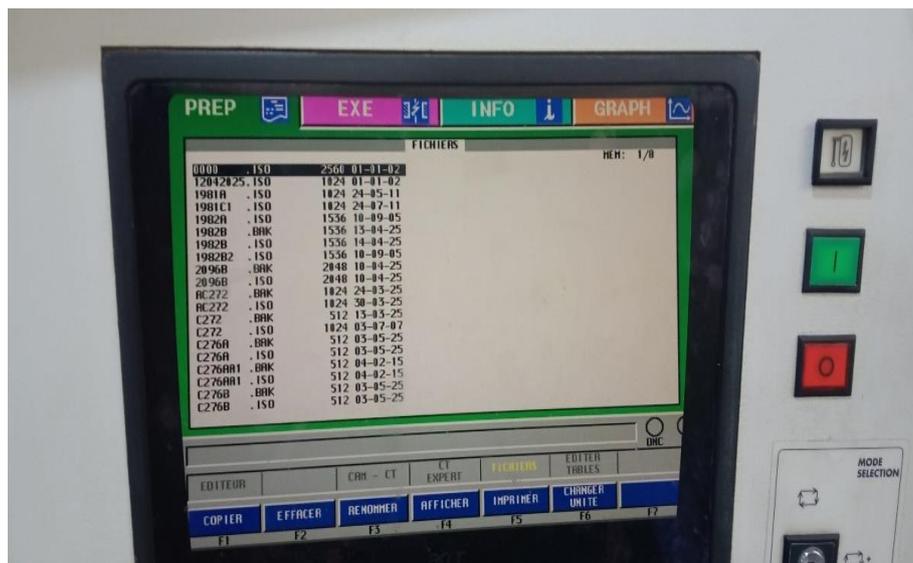


Figure III. 24 Recherche et chargement du G-code de la pièce sur la machine ROBOFIL 290P.

- Vérification de la compatibilité des paramètres : vitesse, intensité, pression de rinçage.



Figure III. 25 Vérification des paramètres technologiques (vitesse, intensité, pression de rinçage, etc.).

4. Simulation à blanc (dry run)

Avant d'engager la découpe réelle :

- Exécution d'un test de parcours sans étincelage.
- Observation de la trajectoire de coupe et vérification de l'absence d'interférence.

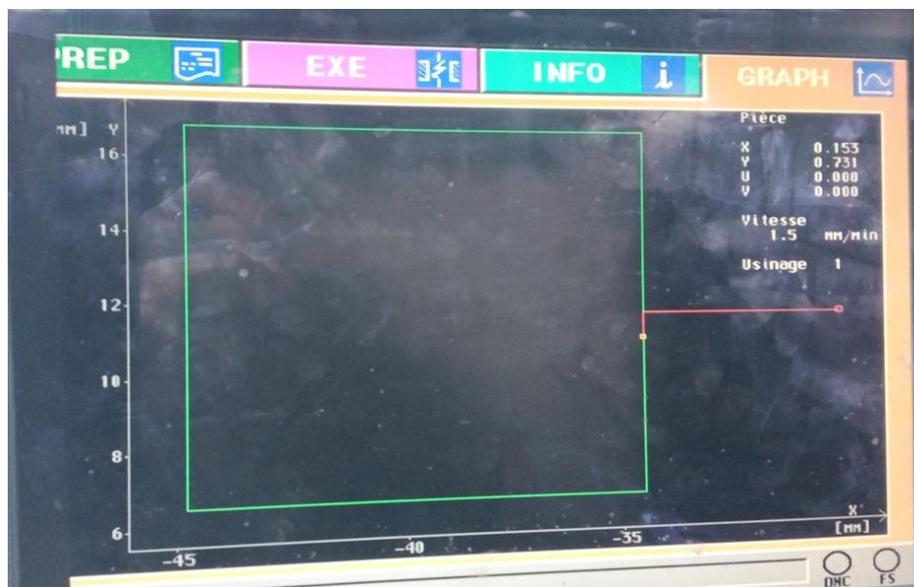


Figure III. 26 Simulation à blanc (dry run) du parcours d'outil.

5. Lancement de l'usage

- Activation du système diélectrique.
- Lancement de l'usage avec les paramètres expérimentaux.

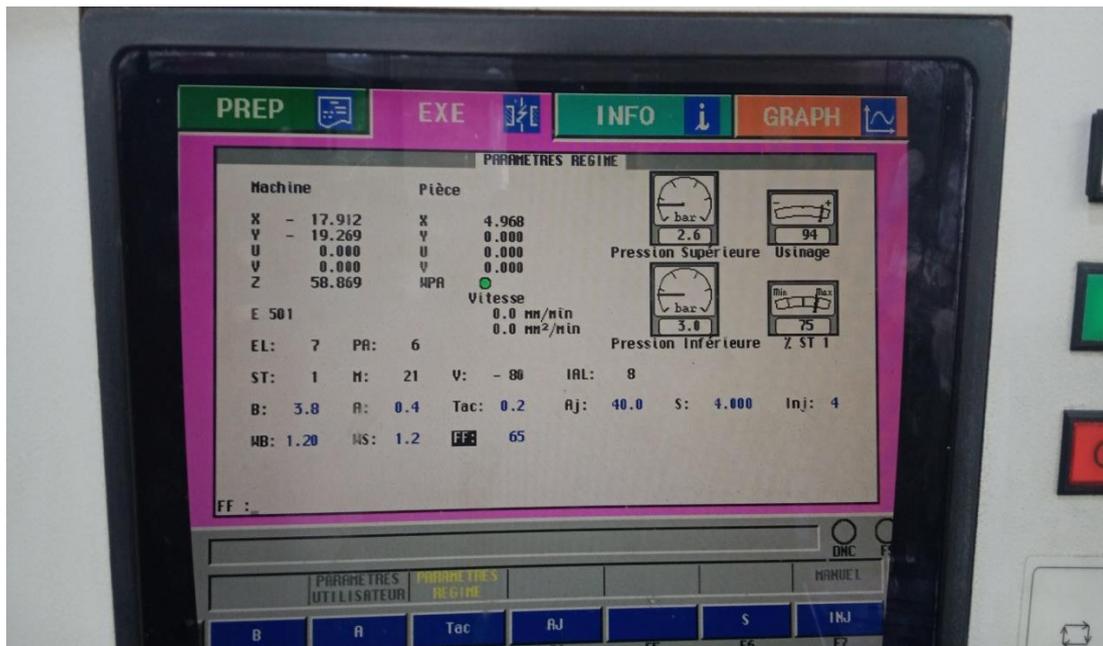


Figure III. 27 Lancement de l'usinage réel avec activation du système diélectrique.

- Surveillance de l'opération en temps réel (étincelles, température, trajectoire du fil, etc.).

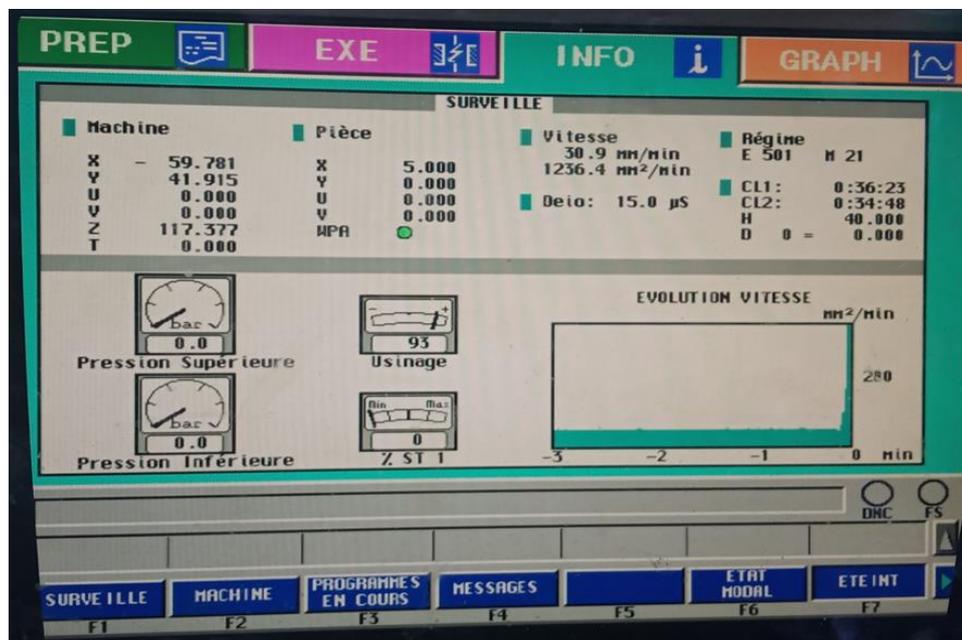


Figure III. 28 Surveillance en temps réel de l'opération d'usinage.

6. Fin d'usinage et nettoyage

- Arrêt automatique ou manuel à la fin du programme.

- Nettoyage de la pièce.



Figure III. 29 Fin de l'usinage et nettoyage de la pièce.

- Inspection visuelle et dimensionnelle pour évaluer la précision et la qualité de surface.

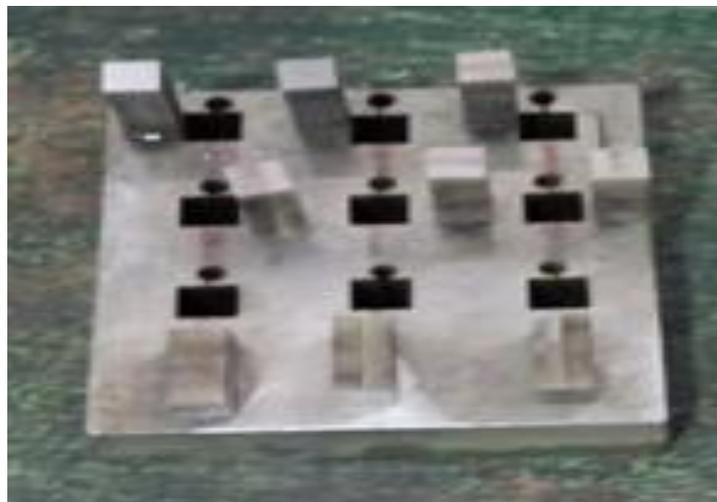


Figure III. 30 Inspection visuelle et dimensionnelle de la pièce usinée

III.6.6 Méthode de calcul des paramètres de réponse

a) Rugosité de surface (R_a)

La rugosité moyenne (R_a) a été mesurée à l'aide d'un rugosimètre après chaque opération de découpe. Les mesures ont été prises sur la surface usinée dans le sens de l'avance du fil.

Pour chaque pièce, trois mesures ont été effectuées à différents endroits, puis une moyenne a été calculée afin d'obtenir une valeur représentative de la rugosité.



Figure III. 31 Mesure de la rugosité de surface avec un rugosimètre.

b) Temps d'usinage

Le temps d'usinage a été enregistré directement à partir de l'interface de la machine ROBOFIL 290P. Il représente la durée nécessaire pour compléter la découpe de la pièce entière, depuis le début jusqu'à la fin de l'opération.

CL1:	0:49:12	CL1:	0:36:23	CL1:	0:32:04
CL2:	0:46:52	CL2:	0:34:48	CL2:	0:20:42

Figure III. 32 Enregistrement du temps d'usinage sur l'interface ROBOFIL : CL1 pour le début de la simulation et CL2 pour le début de la coupe de la cavité carrée.

c) Taux d'enlèvement de matière (MRR)

Le MRR (Material Removal Rate) a été calculé à partir du volume de la pièce usinée et du temps d'usinage selon la formule suivante :

où :

$$\text{MRR} = \frac{V}{t} \quad (\text{III. 2})$$

- V est le volume de la pièce usinée, supposé constant pour toutes les expériences.

$$V = 10 \times 10 \times 24 \text{ mm}$$

$$V = 2400 \text{ mm}^3.$$

- t est le temps d'usinage (en minutes)

- Le MRR est exprimé en millimètres cubes par minute (mm^3/min), ce qui permet de comparer l'efficacité d'enlèvement de matière entre différents essais.

d) Précision dimensionnelle (ΔL)

La précision dimensionnelle a été évaluée sur les cavités carrées usinées par électroérosion à fil, en mesurant deux longueurs opposées de chaque pièce. Le parcours du fil débute et se termine au milieu d'un même côté du carré, à travers un trou d'entrée de 0,5 mm de diamètre, créant ainsi une zone de recoupe localisée.

Il a été observé que le côté comportant ce point d'entrée/sortie présente une légère surcoupe, avec une valeur souvent supérieure à 10 mm, tandis que le côté opposé est généralement plus proche de la cote théorique. Cette variation est attribuée à la concentration des décharges électriques dans la zone de recoupe.

Pour chaque pièce :

- L_1 représente la longueur mesurée sur le côté avec le point d'entrée/sortie,
- L_2 la longueur mesurée sur le côté opposé.

La déviation dimensionnelle moyenne (ΔL) a été calculée comme suit :

$$\Delta L = \frac{|L_1 - 10| + |L_2 - 10|}{2} \quad (\text{III. 3})$$

Les valeurs mesurées pour chaque essai sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III. 7 Résultats de la précision dimensionnelle.

N°essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L_1	10.06	10.07	10.06	10.04	10.05	10.09	10.15	10.08	10.11
L_2	10.00	9.96	9.99	9.95	9.98	9.95	9.95	9.94	9.94
$\Delta L(\text{mm})$	0.030	0.055	0.035	0.045	0.035	0.070	0.100	0.070	0.085

Le tableau suivant présente l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors des neuf essais réalisés selon le plan Taguchi L9. Ces résultats incluent les paramètres d'usinage appliqués (Ton, Toff, S), les temps d'usinage mesurés, les rugosités de surface Ra et Rz, les

taux d'enlèvement de matière (MRR), ainsi que les écarts dimensionnels moyens (ΔL) mesurés après découpe.

Tableau III. 8 Résultats expérimentaux obtenus lors de l'usinage par électroérosion à fil

N° essai	A (μs)	B (μs)	S (mm/min)	Temps usinage (min)	Ra (μm)	Rz (μm)	MRR (mm ³ /min)	ΔL (mm)
1	0.4	3.8	4	22.95	2.132	12.766	104.60	0.030
2	0.4	4.8	10	46.87	1.416	8.452	51.20	0.055
3	0.4	5.8	30	34.80	3.505	20.071	68.96	0.035
4	1.0	3.8	30	19.32	3.074	18.526	124.20	0.045
5	1.0	4.8	10	20.70	2.110	13.476	115.94	0.035
6	1.0	5.8	4	18.18	3.556	19.038	132.00	0.070
7	1.2	3.8	30	19.17	3.530	20.077	125.20	0.100
8	1.2	4.8	4	21.78	3.468	19.741	110.20	0.070
9	1.2	5.8	10	26.02	3.342	18.924	92.20	0.085

III.7 Usinage d'un profil complexe de type NACA pour l'industrie aéronautique

Afin d'évaluer les capacités du procédé d'électroérosion à fil (WEDM) dans un contexte industriel exigeant, une géométrie inspirée du profil aérodynamique NACA 2412 a été sélectionnée comme pièce d'essai représentative. Ce type de profil est couramment utilisé dans le domaine aéronautique pour ses performances aérodynamiques optimales, notamment sa capacité à générer une portance élevée tout en réduisant la traînée.

Le matériau utilisé pour cette opération est identique à celui des essais précédents, garantissant ainsi la cohérence des conditions expérimentales et permettant une comparaison rigoureuse avec les résultats obtenus précédemment.

Pour garantir des conditions optimales d'usinage, les paramètres ayant donné les meilleurs résultats lors des essais expérimentaux ont été repris. Ainsi, les réglages suivants ont été appliqués :

- Ton = 1 μs
- Toff = 4,8 μs
- Vitesse d'avance du fil = 10 mm/min

Ces paramètres, correspondant à l'essai n°5 du plan d'expérience, ont permis d'obtenir un bon compromis entre taux d'enlèvement de matière ($MRR = 115,94 \text{ mm}^3/\text{min}$) et qualité de surface satisfaisante ($Ra = 2,110 \text{ }\mu\text{m}$, $Rz = 13,476 \text{ }\mu\text{m}$), tout en maintenant un temps d'usinage raisonnable (20,70 min) et une déviation dimensionnelle faible, reflétant une bonne précision de coupe ($\Delta L = 0,035 \text{ mm}$).

Cette étude de cas met en évidence la capacité du procédé WEDM à usiner des géométries complexes avec une précision élevée et une qualité de finition compatible avec les exigences du secteur aéronautique. Elle démontre également l'importance d'un réglage fin des paramètres d'usinage pour optimiser simultanément la productivité et la qualité de surface.

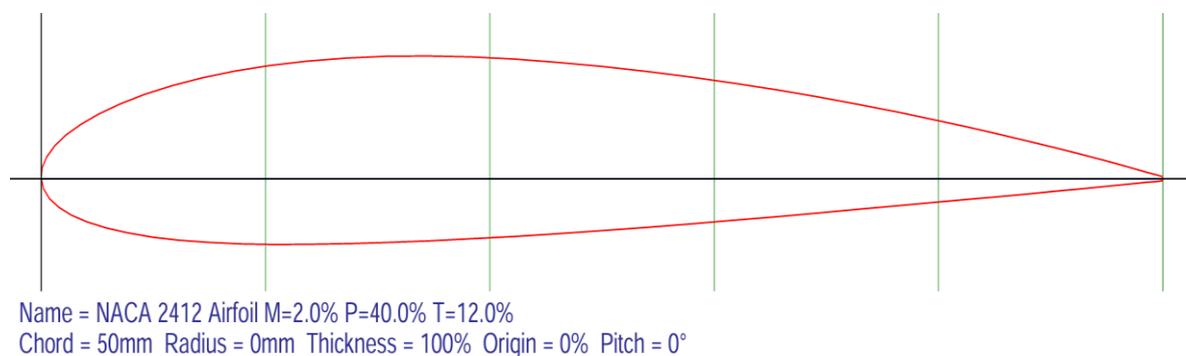


Figure III. 33 Générateur de profil aérodynamique NACA à 4 chiffres (Profil NACA 2412).

III.7.1 Objectif

L'objectif de ce travail est de fabriquer un profil aérodynamique NACA 2412 en utilisant la technologie WEDM, en évaluant sa capacité à produire des géométries complexes avec une haute précision dimensionnelle et une excellente qualité de surface, tout en respectant les tolérances serrées requises pour les applications aérodynamiques.

III.7.2 Conception de la pièce

Le profil NACA a été généré à l'aide d'un fichier de coordonnées (airfoiltools.com) et modélisé sous SolidWorks.

1. Génération du profil NACA 2412

- Étape 1 : Accéder à airfoiltools.com
- Étape 2 : Sélectionner "NACA 4-digit airfoil generator"
- Étape 3 : Entrer 2412 comme référence
- Étape 4 : Télécharger le fichier de coordonnées contenant les points (x,y) du profil.

2. Conversion du fichier de coordonnées en modèle CAO

Utilisation d'un logiciel de CAO (SolidWorks).

- Importer le fichier dans le logiciel

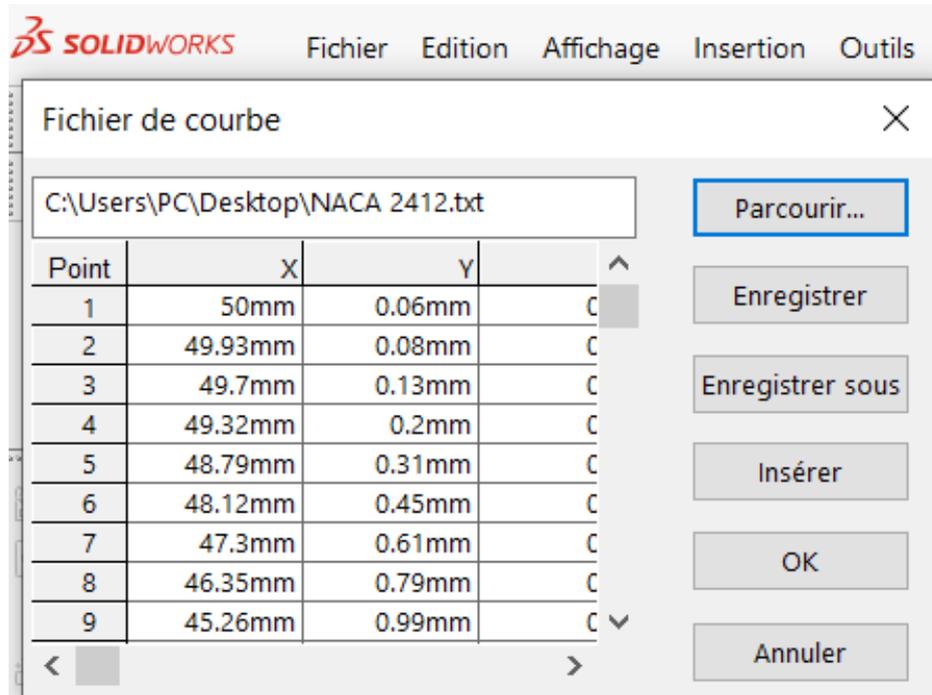


Figure III. 34 Importation des coordonnées du profil NACA 2412 dans SolidWorks

- Créer une courbe spline passant par tous les points

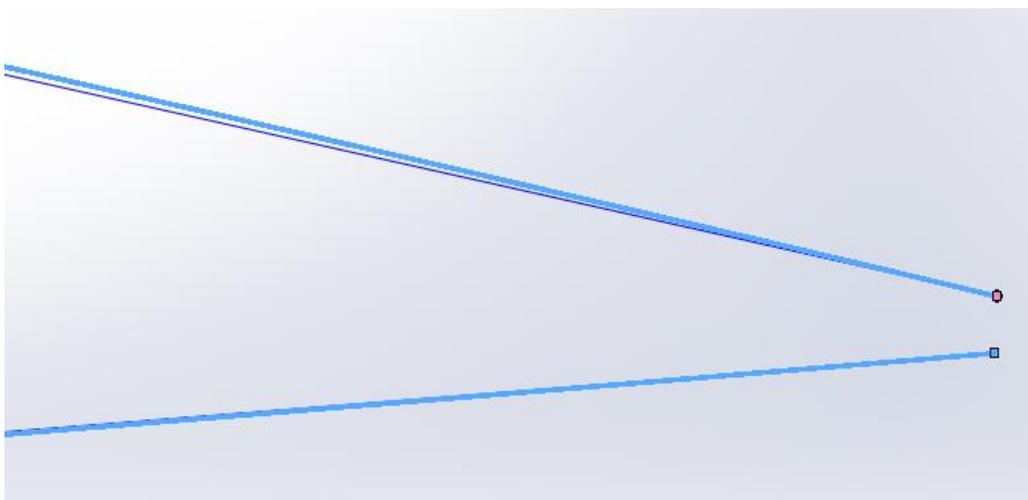


Figure III. 35 Création de la courbe spline du profil NACA 2412 à partir des points de coordonnées

- Fermer le profil et générer une surface/contour fermé

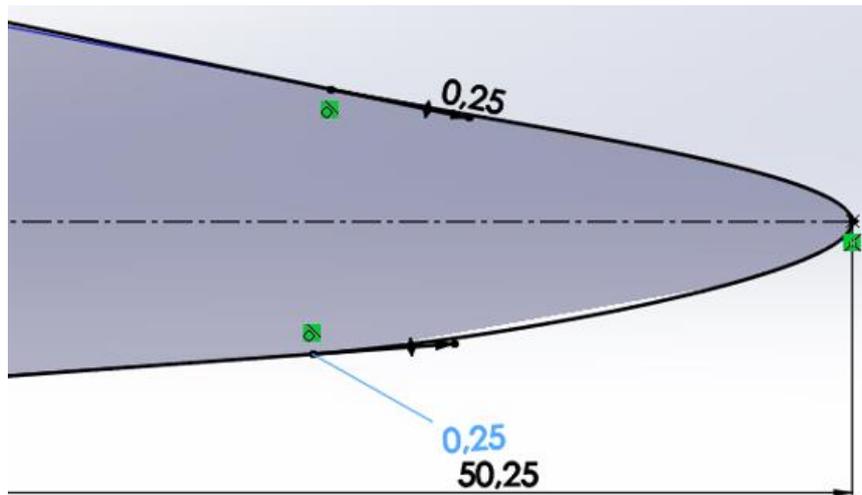


Figure III. 36 Fermeture du contour du profil NACA 2412 pour générer une surface usinable.

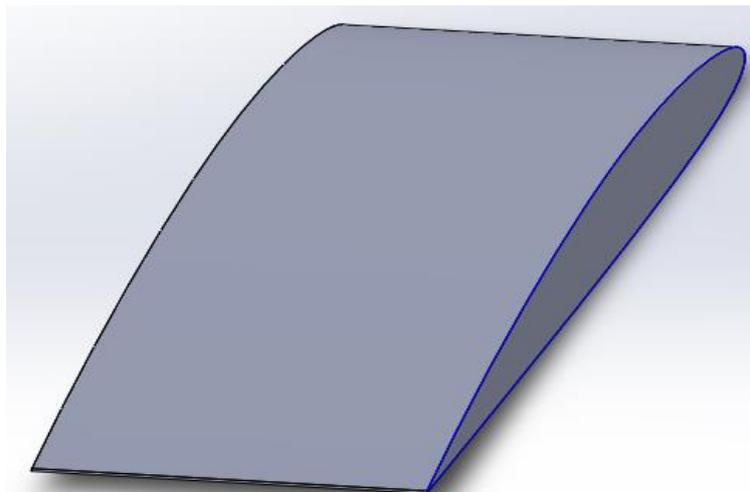


Figure III. 37 Modélisation finale du profil aérodynamique NACA 2412 sur SolidWorks.

3. Génération du G-code avec CAMWorks

La simulation et la génération du G-code ont été effectuées à l'aide de CAMWorks, comme illustré dans les figures suivantes.



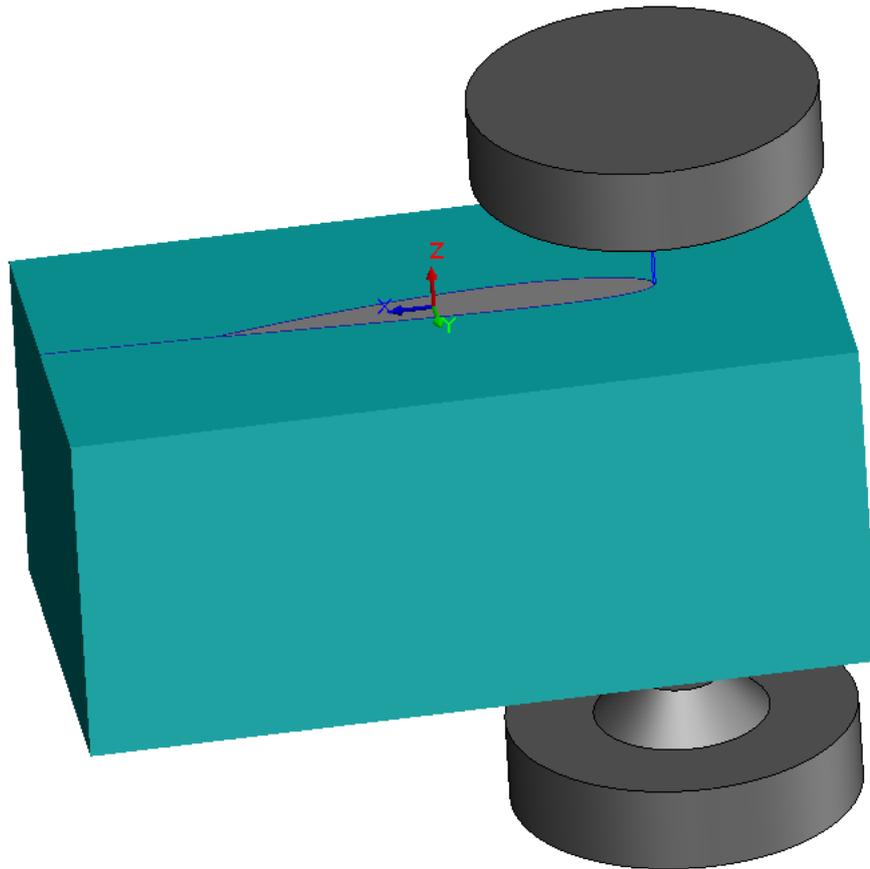


Figure III. 38 Simulation du parcours d'outil pour le profil NACA 2412 dans CAMWorks

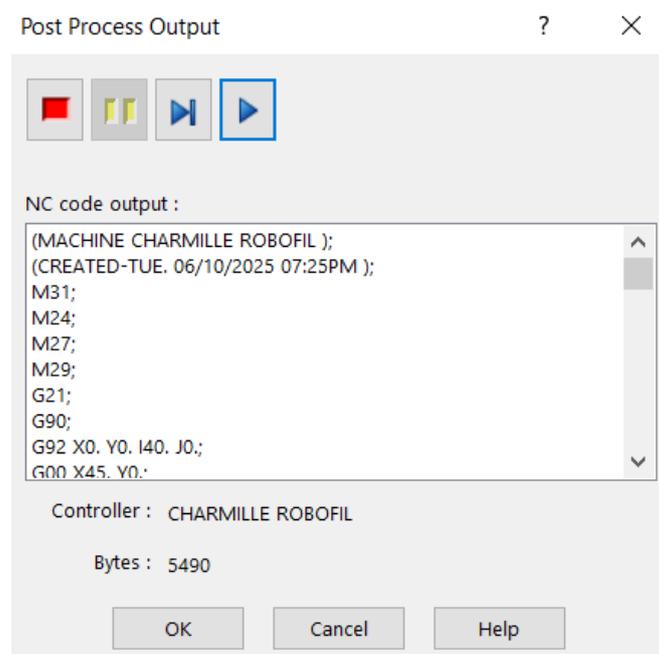


Figure III. 39 Génération du code G final pour l'usinage du profil NACA 2412

III.7.3 Mise en marche de la machine ROBOFIL 290P et exécution de l'usinage

Après la génération du code G via CAMWorks, l'étape suivante consiste à transférer ce code vers la machine ROBOFIL 290P afin de lancer l'usinage. Voici les étapes suivies :

1. Transfert du code G

- Le fichier G-code ISO est transféré à la machine à l'aide d'une clé USB,

2. Préparation de la machine

- Vérification du niveau du liquide diélectrique (eau déionisée).
- Montage de la pièce à usiner sur la table de travail.

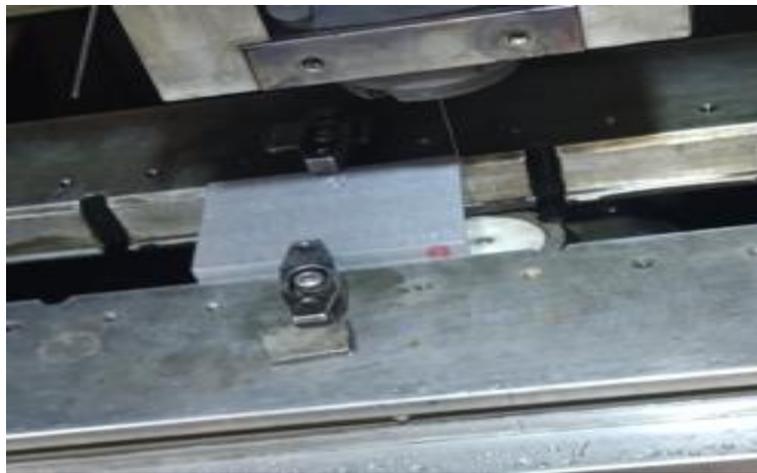


Figure III. 40 Montage du brut contenant le profil NACA 2412 sur la machine ROBOFIL

- Alignement de la pièce avec l'origine programmée (zero pièce).
- Mise en tension du fil électrode et vérification de son alignement.

3. Chargement du programme

- Ouverture de l'interface CNC sur la ROBOFIL 290P.
- Chargement du programme G-code précédemment transféré.
- Vérification de la compatibilité des paramètres : vitesse, intensité, pression de rinçage.

4. Simulation à blanc

Avant d'engager la découpe réelle :

- Exécution d'un test de parcours sans étincelage.
- Observation de la trajectoire de coupe et vérification de l'absence d'interférence.

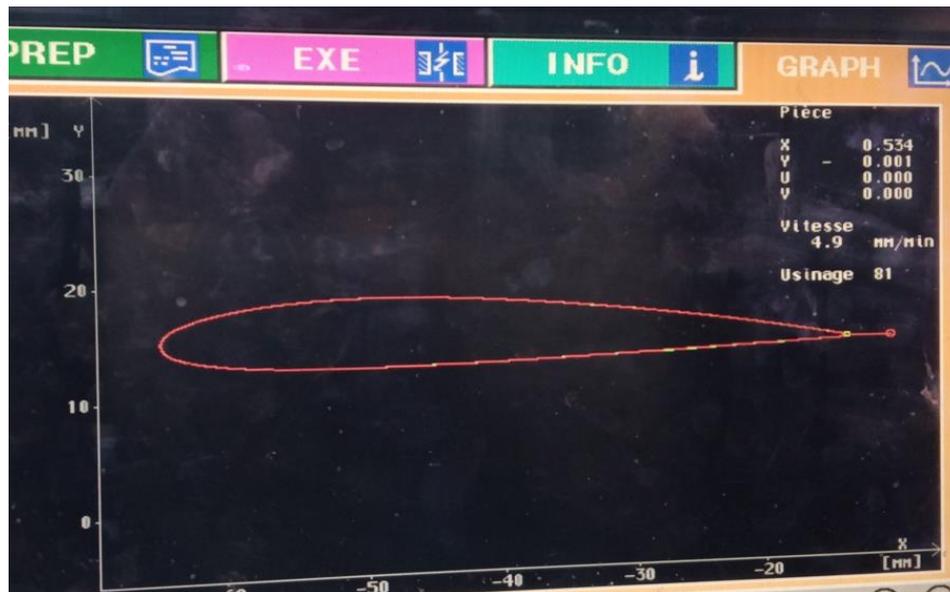


Figure III. 41 Simulation à blanc du parcours de découpe du profil NACA 2412

5. Lancement de l'usinage

- Activation du système diélectrique.
- Lancement de l'usinage avec les paramètres expérimentaux.
- Surveillance de l'opération en temps réel (étincelles, température, trajectoire du fil, etc.).

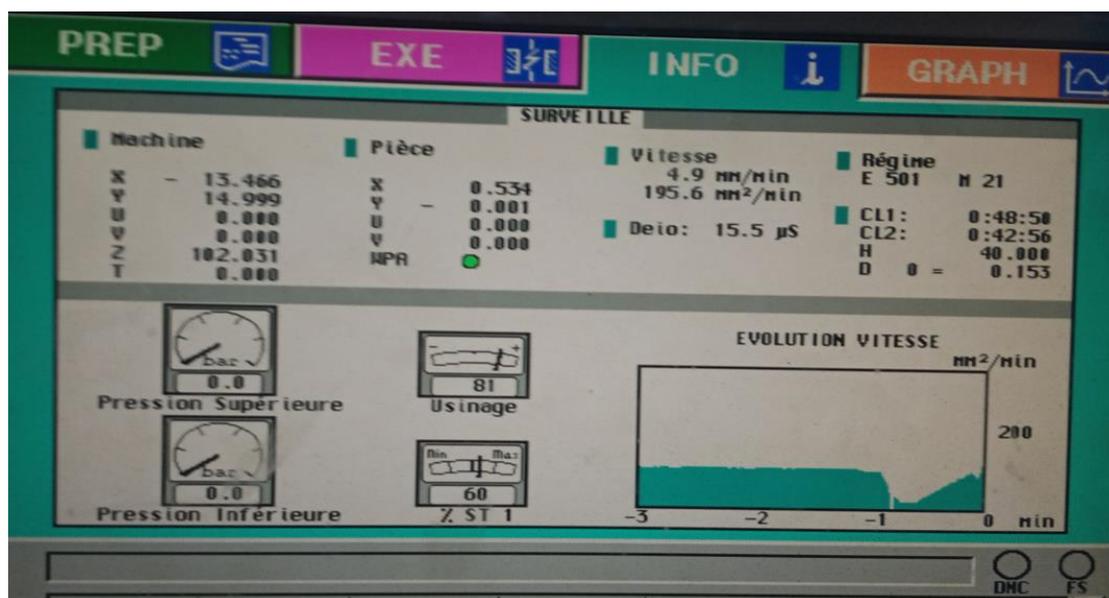


Figure III. 42 Surveillance en temps réel de l'usinage du profil NACA 2412

6. Fin d'usinage et nettoyage

- Arrêt automatique ou manuel à la fin du programme.
- Nettoyage de la pièce.



Figure III. 43 Fin d'usinage et nettoyage de la pièce usinée (profil NACA 2412).

- Inspection visuelle et dimensionnelle pour évaluer la précision et la qualité de surface.

III.7.4 Calcul des paramètres de réponse

Les paramètres de réponse ont été évalués selon les mêmes méthodes que celles utilisées pour les essais Taguchi (voir section III.8.6). Pour le profil NACA 2412.

La rugosité de surface a été mesurée et les résultats obtenus sont :

$$Ra_1 = 1.002 \mu\text{m} \quad ; \quad Rz_1 = 8.045 \mu\text{m}$$

$$Ra_2 = 1.015 \mu\text{m} \quad ; \quad Rz_2 = 8.120 \mu\text{m}$$



Figure III. 44 Mesure de la rugosité de surface du profil NACA 2412 à l'aide d'un rugosimètre.

Temps d'usinage et MRR :

Figure III. 45 Temps d'exécution des pièces NACA 2412 affichés sur l'écran de la machine : à gauche (Pièce 1), à droite (Pièce 2).

Sur ces captures d'écran de l'interface opérateur, les temps affichés correspondent à :

- **CL1** : début de simulation ou lancement de programme,
- **CL2** : début effectif de la coupe.

Deux essais d'usinage du profil NACA ont été réalisés, avec des temps mesurés de :

- $t_1 = 46.2$ minutes
- $t_2 = 42.94$ minutes

En utilisant le volume réel issu de la modélisation CAO $V = 7409.34 \text{ mm}^3$, les taux d'enlèvement de matière (MRR) ont été calculés comme suit :

$$MRR_1 = \frac{7409.34}{46.2} = 160.38 \text{ mm}^3/\text{min}$$

$$MRR_2 = \frac{7409.34}{42.94} = 172.55 \text{ mm}^3/\text{min}$$

La précision dimensionnelle des profils NACA usinés a été évaluée en mesurant la longueur réelle obtenue après découpe, puis en la comparant à la cote théorique de la corde, fixée à 50,25 mm.

Tableau III. 9 Résultats de la précision dimensionnelle pour les deux pièces NACA 2412 usinées.

Pièce	Longueur mesurée (mm)	Longueur théorique (mm)	ΔL (mm)
1	50.15	50.25	0.10
2	50.10	50.25	0.15

Ces écarts traduisent une légère sous-coupe probablement liée à des pertes par étincelage ou à un alignement initial du fil légèrement décalé.

III.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la mise en œuvre expérimentale du procédé WEDM dans le cadre de la réalisation de notre projet de fin d'études. Après une présentation de l'environnement industriel de l'entreprise ORFEE-BCR et des caractéristiques techniques de la machine ROBOFIL 290P, nous avons détaillé les différentes étapes de préparation et d'exécution des essais.

Un plan d'expériences basé sur la méthode Taguchi a été mis en place afin de structurer les essais selon des combinaisons de paramètres technologiques variés. Les opérations d'usinage ont été réalisées avec soin, et plusieurs paramètres de réponse ont été mesurés pour chaque essai, notamment la rugosité de surface (R_a , R_z), le temps d'usinage, le taux d'enlèvement de matière (MRR), ainsi que la précision dimensionnelle (ΔL).

Par ailleurs, une étude de cas a été menée sur l'usinage d'un profil complexe de type NACA 2412, représentatif des applications aéronautiques. Cette opération a permis de vérifier la capacité du procédé WEDM à reproduire fidèlement des géométries complexes avec une bonne qualité de surface et une précision satisfaisante, tout en maintenant une productivité acceptable.

Dans le chapitre suivant, nous analyserons les résultats expérimentaux obtenus à travers les essais réalisés. Nous interpréterons l'influence des paramètres technologiques sur les performances du procédé WEDM, en nous appuyant sur les résultats de l'ANOVA pour identifier les facteurs les plus significatifs. Cette analyse nous permettra de proposer des recommandations concrètes pour optimiser les conditions d'usinage.

CHAPITRE IV

Résultats et Discussions

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente et analyse les résultats expérimentaux obtenus à partir du plan d'expériences mis en œuvre dans le cadre de ce travail. L'objectif principal est d'évaluer l'influence des paramètres d'usinage sélectionnés sur les performances du procédé WEDM, en termes de taux d'enlèvement de matière, de rugosité de surface et de précision dimensionnelle. Les données recueillies sont interprétées à l'aide d'outils statistiques tels que ANOVA, permettant d'identifier les facteurs les plus significatifs. Une discussion critique est également menée afin de comparer les tendances observées avec les résultats théoriques ou issus de la littérature.

IV.2 Résultats des essais

Le tableau IV.1 regroupe les résultats obtenus lors des essais d'électroérosion à fil réalisés à l'aide de la machine ROBOFIL 290P. Cette étude vise à analyser l'effet de trois paramètres clés du processus, la durée d'impulsions (T_{on}), le temps entre deux impulsions (T_{off}) et la vitesse d'avance du fil (S), sur les performances d'usinage, à savoir : le taux d'enlèvement de matière (MRR), le temps d'usinage, la rugosité de surface (R_a ; R_z) et la précision dimensionnelle.

L'usure du fil (TWR) n'a pas été considérée de manière approfondie, en raison du système d'avance automatique du fil utilisé dans cette machine.

Tableau IV. 1 Résultats expérimentaux obtenus lors de l'usinage par électroérosion à fil.

N° essai	Paramètres d'entrée			Résultats mesurés				
	A (μ s)	B (μ s)	S (mm/min)	Temps usinage (min)	Ra (μ m)	Rz (μ m)	MRR (mm ³ /min)	Δ L (mm)
1	0.4	3.8	4	22.95	2.132	12.766	104.60	0.030
2	0.4	4.8	10	46.87	1.416	8.452	51.20	0.055
3	0.4	5.8	30	34.80	3.505	20.071	68.96	0.035
4	1.0	3.8	30	19.32	3.074	18.526	124.20	0.045
5	1.0	4.8	10	20.70	2.110	13.476	115.94	0.035
6	1.0	5.8	4	18.18	3.556	19.038	132.00	0.070
7	1.2	3.8	30	19.17	3.530	20.077	125.20	0.100
8	1.2	4.8	4	21.78	3.468	19.741	110.20	0.070
9	1.2	5.8	10	26.02	3.342	18.924	92.20	0.085

IV.3 Analyse statistique des résultats

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab, en appliquant la méthode ANOVA afin d'évaluer l'influence de trois paramètres technologiques : T_{on} , T_{off} , et S , sur les réponses mesurées. Les réponses analysées sont : MRR, Ra, Rz et la précision dimensionnelle.

IV.3.1 Analyse de la réponse : MRR (mm^3/min)

a) **Analyse de variance** : ANOVA appliquée au MRR a permis d'évaluer l'influence de trois paramètres principaux d'usinage par WEDM : T_{on} , T_{off} et la vitesse d'avance du fil.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 2 Résultats de l'ANOVA pour la réponse MRR

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur p
Ton (μs)	2	3809,0	1904,5	12,83	0,072
Toff (μs)	2	530,3	265,1	1,79	0,359
Vitesse fil	2	765,1	382,5	2,58	0,280
Erreur	2	296,9	148,5		
Total	8	5963,0			

Interprétation des résultats :

Le paramètre T_{on} (μs) présente la plus grande somme des carrés ajustée ($SCA = 3809,0$) et une valeur F élevée de 12,83, ce qui indique une influence marquée sur le MRR. Toutefois, la valeur p de 0,072 reste légèrement supérieure au seuil de signification usuel de 0,05 suggérant une tendance vers la significativité sans l'atteindre formellement.

Le paramètre T_{off} (μs) possède une valeur F faible (1,79) et une valeur p de 0,359, ce qui indique qu'il n'a pas d'effet significatif sur le MRR dans les conditions testées.

De même, la vitesse du fil affiche une valeur F de 2,58 avec une valeur p de 0,280, ce qui montre un effet limité et non significatif sur la réponse.

L'erreur résiduelle ($CM = 148,5$) sert de base de comparaison pour les tests F. Elle regroupe la variabilité inexplicée par les facteurs étudiés.

b) Récapitulatif du modèle et qualité d'ajustement

Pour compléter l'analyse, un modèle linéaire général a été ajusté afin de modéliser la réponse MRR en fonction des paramètres d'entrée. Les indicateurs statistiques du modèle sont présentés ci-dessous :

Tableau IV. 3 Indicateurs statistiques du modèle linéaire général pour la réponse MRR.

Indicateur	Valeur
S (écart-type des résidus)	12,1850
R ² (coefficient de détermination)	95,02 %
R ² ajusté	80,08 %
R ² prévisionnel	0,00 %

Ces valeurs indiquent que le modèle explique une grande partie de la variabilité des données (R² élevé), mais que sa capacité à prédire de nouvelles observations est faible (R² prévisionnel nul). Cette faiblesse peut être attribuée à la petite taille de l'échantillon ou à une variabilité expérimentale importante.

c) Analyse des coefficients estimés

Le tableau suivant présente les coefficients estimés du modèle, ainsi que leurs statistiques associées.

Tableau IV. 4 Estimation des coefficients du modèle linéaire général pour la réponse MRR.

Coefficients					
Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	102,72	4,06	25,29	0,002	
A (Ton) (μs)					
0,4	-27,80	5,74	-4,84	0,040	1,33
1,0	21,32	5,74	3,71	0,066	1,33
B (Toff) (μs)					
3,8	13,70	7,27	1,88	0,200	2,13
4,8	-8,69	7,27	-1,20	0,354	2,13
S (vitesse d'avance du fil) (mm)					
4	12,88	5,74	2,24	0,154	1,33
10	-8,81	7,27	-1,21	0,349	2,13

La Tableau IV. 4 présente les coefficients estimés pour chaque niveau des facteurs étudiés dans le modèle linéaire général. On observe que le paramètre T_{on} (μs), notamment au niveau 0,4 μs , a un effet fortement significatif sur le MRR ($p = 0,040$), avec un coefficient négatif important ($-27,80$), indiquant une diminution du MRR à ce niveau. Les autres paramètres (T_{off} et vitesse du fil) présentent des valeurs p supérieures à 0,15, suggérant que leurs effets ne sont pas significatifs dans les conditions expérimentales utilisées. Enfin, Tous les FIV sont inférieurs à 5, ce qui indique une absence de colinéarité préoccupante entre les facteurs. Les valeurs proches de 2, comme pour T_{off} et la vitesse du fil, restent dans les limites acceptables.

d) Équation de régression

L'équation de régression pour le MRR est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{MRR (mm}^3/\text{min)} = & 102,72 - 27,80 A (\text{Ton}) (\mu s)_{0,4} + 21,32 A (\text{Ton}) (\mu s)_{1,0} \\ & + 6,48 A (\text{Ton}) (\mu s)_{1,2} + 13,70 B (\text{Toff}) (\mu s)_{3,8} - 8,69 B (\text{Toff}) (\mu s)_{4,8} \\ & - 5,00 B (\text{Toff}) (\mu s)_{5,8} + 12,88 S (\text{vitesse d'avance du fil}) (\text{mm}_4 \\ & - 8,81 S (\text{vitesse d'avance du fil}) (\text{mm}_{10} \\ & - 4,06 S (\text{vitesse d'avance du fil}) (\text{mm}_{30} \end{aligned}$$

Figure IV. 1 L'équation de régression pour le MRR.

Interprétation :

T_{on} (μs) : Le coefficient négatif pour T_{on} à 0,4 μs ($-27,80$) indique une diminution significative du MRR à ce niveau, Les coefficients positifs pour T_{on} à 1,0 μs ($+21,32$) et 1,2 μs ($+6,48$) suggèrent une augmentation du MRR à ces niveaux, bien que l'effet soit moins marqué à 1,2 μs .

T_{off} (μs) : Le coefficient positif pour T_{off} à 3,8 μs ($+13,70$) indique une légère augmentation du MRR, tandis que les valeurs négatives pour 4,8 μs ($-8,69$) et 5,8 μs ($-5,00$) suggèrent une réduction du MRR.

Vitesse du fil : La vitesse à 4 mm/min augmente le MRR ($+12,88$), tandis que les vitesses à 10 mm/min ($-8,81$) et 30 mm/min ($-4,06$) le réduisent.

e) Analyse des résidus pour la réponse MRR

Afin de vérifier la validité du modèle et le respect des hypothèses de l'ANOVA (normalité, homogénéité, indépendance), des diagrammes des valeurs résiduelles ont été générés à partir du modèle.

Ils sont illustrés dans la figure suivante :

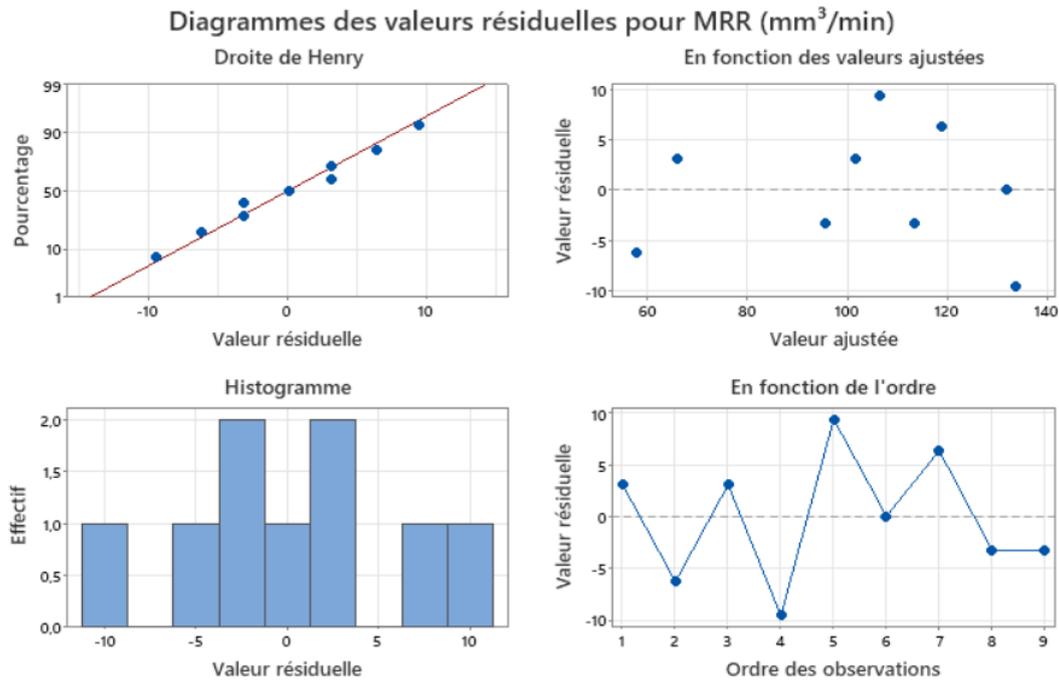


Figure IV. 2 Diagrammes des valeurs résiduelles pour MRR (mm³/min)

Interprétation :

- **Droite de Henry :**

Les points suivent globalement la ligne droite, ce qui indique que les résidus suivent approximativement une distribution normale. Cela valide l'hypothèse de normalité.

- **Résidus en fonction des valeurs ajustées :**

La dispersion des points ne présente pas de forme particulière (ni cône ni courbe), ce qui indique une variance homogène (homoscédasticité). C'est un bon signe pour la validité du modèle.

- **Histogramme des résidus :**

Les résidus sont répartis autour de zéro avec une forme grossièrement symétrique. Cela confirme encore la normalité et l'absence de biais majeur.

- **Résidus en fonction de l'ordre des observations :**

La variation des résidus semble aléatoire, sans tendance apparente. Cela suggère que les erreurs sont indépendantes entre elles, ce qui respecte une autre hypothèse de validité du modèle.

Conclusion : Le paramètre $T_{on} = 1,0 \mu s$ favorise l'augmentation du MRR, tandis que $T_{off} = 3,8 \mu s$ et vitesse du fil = 4 mm/min montrent également des effets positifs modérés. Ces niveaux peuvent être considérés comme les plus adaptés pour optimiser le taux d'enlèvement de matière dans les conditions de l'étude.

IV.3.2 Analyse de la réponse : Ra (μm)

a) Analyse de variance : L'analyse de la variance appliquée à la rugosité moyenne Ra permet d'évaluer l'influence des paramètres technologiques d'usinage par WEDM. Le tableau suivant résume les résultats :

Tableau IV. 5 Résultats de l'ANOVA pour la réponse Ra.

Analyse de la variance						
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	
A (T_{on}) (μs)	2	1,80115	0,90057	79,25	0,012	
B (T_{off}) (μs)	2	1,48402	0,74201	65,30	0,015	
S (vitesse d'avance du fil) (mm)	2	1,39652	0,69826	61,45	0,016	
Erreur	2	0,02273	0,01136			
Total	8	5,15758				

Interprétation des résultats :

- Tous les paramètres étudiés (T_{on} , T_{off} et vitesse du fil) présentent des valeurs p inférieures à 0,05, indiquant un effet statistiquement significatif sur la rugosité Ra.
- Le facteur T_{on} (μs) a la plus grande influence avec une valeur F de 79,25, suivi de T_{off} (μs) ($F = 65,30$) et de la vitesse du fil ($F = 61,45$).
- L'erreur résiduelle est faible ($CM = 0,01136$), ce qui renforce la fiabilité du modèle.

b) Récapitulatif du modèle et qualité d'ajustement

Après l'analyse de la variance, il est essentiel d'évaluer la qualité d'ajustement du modèle linéaire général aux données expérimentales.

Le tableau suivant présente les principaux indicateurs statistiques du modèle : l'écart-type des résidus (S), le coefficient de détermination (R^2), ainsi que ses versions ajustée et prédictive. Ces valeurs permettent d'apprécier la fiabilité globale du modèle.

Tableau IV. 6 Indicateurs statistiques du modèle linéaire général pour Ra.

Indicateur	Valeur
Écart-type résiduel (S)	0,106598
R ²	99,56 %
R ² ajusté	98,24 %
R ² prévisionnel	83,92 %

Ces résultats montrent que le modèle linéaire général explique presque toute la variabilité observée pour Ra, avec une excellente capacité prédictive (R² prévisionnel élevé), ce qui valide l'efficacité du modèle.

c) Analyse des coefficients estimés

Le tableau ci-dessus présente les coefficients estimés du modèle linéaire général pour la rugosité moyenne (Ra). FIV (Facteur d'inflation de la variance).

Tableau IV. 7 Estimation des coefficients du modèle linéaire général pour la réponse Ra.

Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	2,9037	0,0355	81,72	0,000	
A (Ton) (μs)					
0,4	-0,5527	0,0503	-11,00	0,008	1,33
1,0	0,0097	0,0503	0,19	0,865	1,33
B (Toff) (μs)					
3,8	-0,4076	0,0636	-6,41	0,023	2,13
4,8	-0,1564	0,0636	-2,46	0,133	2,13
S (vitesse d'avance du fil) (mm)					
4	0,1483	0,0503	2,95	0,098	1,33
10	-0,6981	0,0636	-10,98	0,008	2,13

Interprétation des résultats :

Ton (μs) : Le niveau 0,4 μs a un effet négatif significatif (coeff = -0,5527, p = 0,008), ce qui signifie qu'il réduit fortement la rugosité Ra. Cela en fait un niveau optimal pour améliorer la qualité de surface. Le niveau 1,0 μs a un effet négligeable (coeff = +0,0097, p = 0,865), donc il n'influence pas significativement Ra dans ce modèle.

Toff (μs) : Le niveau 3,8 μs diminue significativement la rugosité (coeff = $-0,4076$, $p = 0,023$), ce qui en fait un choix favorable. Le niveau 4,8 μs a un effet modéré mais non significatif ($p = 0,133$), ce qui le rend moins pertinent statistiquement.

Vitesse d'avance du fil : Le niveau 10 mm/min diminue fortement Ra (coeff = $-0,6981$, $p = 0,008$), indiquant un effet significatif favorable. À l'opposé, le niveau 4 mm/min augmente légèrement Ra (coeff = $+0,1483$), mais cet effet n'est pas statistiquement significatif ($p = 0,098$).

c) Équation de régression

L'équation de régression ajustée permet d'estimer la rugosité moyenne (Ra) en fonction des paramètres d'usinage étudiés. Elle est construite à partir des coefficients calculés par le modèle linéaire général, en tenant compte des niveaux codés de chaque facteur. Cette équation est un outil essentiel pour prévoir la réponse en fonction des conditions de coupe appliquées. L'équation de régression ajustée pour Ra est la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Ra } (\mu\text{m}) = & 2,9037 - 0,5527 \text{ A (Ton) } (\mu\text{s})_{0,4} + 0,0097 \text{ A (Ton) } (\mu\text{s})_{1,0} \\ & + 0,5430 \text{ A (Ton) } (\mu\text{s})_{1,2} - 0,4076 \text{ B (Toff) } (\mu\text{s})_{3,8} - 0,1564 \text{ B (Toff) } (\mu\text{s})_{4,8} \\ & + 0,5640 \text{ B (Toff) } (\mu\text{s})_{5,8} + 0,1483 \text{ S (vitesse d'avance du fil) (mm}_4 \\ & - 0,6981 \text{ S (vitesse d'avance du fil) (mm}_{10} \\ & + 0,5497 \text{ S (vitesse d'avance du fil) (mm}_{30} \end{aligned}$$

Figure IV. 3 L'équation de régression ajustée pour Ra.

Interprétation de l'équation :

- La réduction de T_{on} à 0,4 μs diminue fortement la rugosité (coeff = $-0,5527$, $p = 0,008$), ce qui en fait un paramètre optimal.
- Le niveau $T_{off} = 3,8 \mu\text{s}$ contribue également à une diminution significative de Ra (coeff = $-0,4076$, $p = 0,023$).
- Pour la vitesse d'avance du fil, 10 mm/min permet la réduction la plus importante de Ra (coeff = $-0,6981$, $p = 0,008$), indiquant une performance favorable à cette vitesse.

d) Analyse des résidus pour la réponse Ra

Pour vérifier les hypothèses de validité du modèle (normalité, indépendance et homogénéité des erreurs), les résidus ont été analysés via les graphiques suivants :

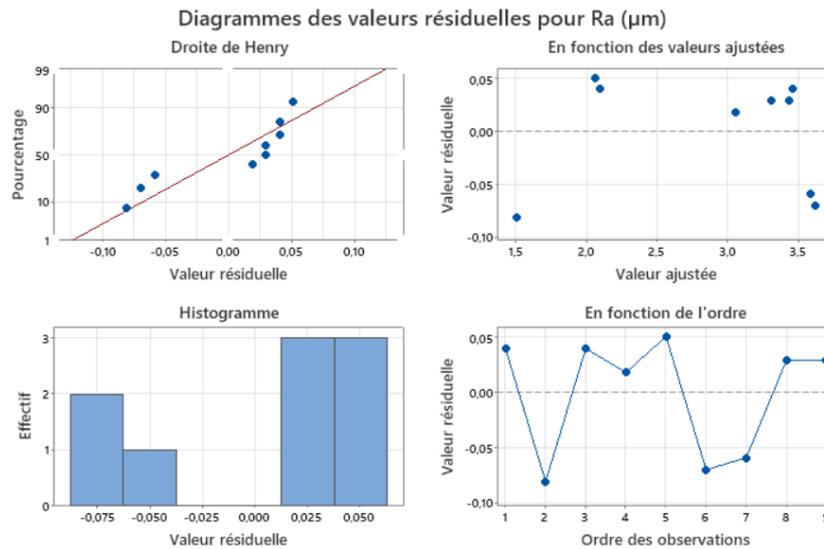


Figure IV. 4 Diagrammes des valeurs résiduelles pour Ra (μm).

Interprétation :

- **Droite de Henry:** Les points suivent globalement la ligne droite, ce qui indique que les résidus sont approximativement distribués selon une loi normale. Cela confirme l'hypothèse de normalité.
- **Résidus en fonction des valeurs ajustées:** Les résidus sont dispersés de manière relativement homogène autour de zéro, sans motif clair. Cela suggère que la variance est constante, validant l'hypothèse d'homoscédasticité.
- **Histogramme des résidus:** Les résidus sont centrés autour de zéro avec une forme légèrement asymétrique, mais acceptable, ce qui reste compatible avec une distribution normale.
- **Résidus en fonction de l'ordre des observations:** La distribution des points ne montre pas de tendance particulière ni de structure cyclique, ce qui suggère une indépendance des erreurs.

Conclusion : Les paramètres $T_{on} = 0,4 \mu\text{s}$, $T_{off} = 3,8 \mu\text{s}$ et Vitesse = 10 mm/min sont les plus efficaces pour réduire la rugosité moyenne Ra dans les conditions expérimentales testées.

IV.3.3 Analyse de la réponse : Rz (μm)

a) Analyse de variance : L'analyse de la variance appliquée à la rugosité Rz permet d'évaluer l'influence des paramètres technologiques d'usinage par WEDM sur cette réponse. Le tableau suivant présente les résultats obtenus :

Tableau IV. 8 Résultats de l'ANOVA pour la réponse Rz (μm).

Analyse de la variance					
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
A (Ton) (μs)	2	51,001	25,501	12,55	0,074
B (Toff) (μs)	2	30,888	15,444	7,60	0,116
S (vitesse d'avance du fil) (mm)	2	39,389	19,694	9,69	0,094
Erreur	2	4,064	2,032		
Total	8	139,596			

Interprétation des résultats :

- Les trois paramètres (Ton, Toff, et Vitesse du fil) ont une influence notable sur Rz, avec des valeurs F élevées.
- Toutefois, leurs valeurs p sont toutes supérieures à 0,05, ce qui signifie qu'ils ne sont pas significatifs au seuil usuel, bien qu'ils montrent une tendance vers la significativité.
- L'erreur résiduelle est faible (CM = 2,032), ce qui indique une bonne précision du modèle.

b) Récapitulatif du modèle et qualité d'ajustement

Afin d'évaluer la qualité statistique du modèle linéaire général appliqué à la rugosité Rz, plusieurs indicateurs ont été calculés.

La figure IV.5 présente les principaux paramètres statistiques :

Récapitulatif du modèle			
S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
1,42550	97,09%	88,35%	0,00%

Figure IV. 5 Indicateurs statistiques du modèle pour Rz (μm).

Les valeurs obtenues montrent que le modèle explique une grande partie de la variabilité de la réponse ($R^2 = 97,09\%$). Cependant, la capacité prédictive du modèle (R^2 prévisionnel = 0 %) est très faible, probablement en raison de la taille limitée de l'échantillon.

c) Analyse des coefficients estimés

Le tableau suivant présente les coefficients estimés du modèle linéaire général ajusté pour la réponse Rz (μm).

Tableau IV. 9 Estimation des coefficients du modèle pour la réponse Rz (μm).

Coefficients

Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	16,786	0,475	35,33	0,001	
A (Ton) (μs)					
0,4	-3,023	0,672	-4,50	0,046	1,33
1,0	0,228	0,672	0,34	0,767	1,33
B (Toff) (μs)					
3,8	-1,934	0,850	-2,27	0,151	2,13
4,8	-0,625	0,850	-0,74	0,539	2,13
S (vitesse d'avance du fil) (mm)					
4	0,396	0,672	0,59	0,615	1,33
10	-3,605	0,850	-4,24	0,051	2,13

Analyse des effets :

- Ton à 0,4 μs : a un effet significatif de réduction de Rz ($p = 0,046$), ce qui en fait un choix optimal.
- Toff à 3,8 μs : réduit Rz de manière notable mais pas statistiquement significative ($p = 0,151$).
- Vitesse du fil à 10 mm/min : réduction importante de Rz (coeff = -3,605), avec une valeur p proche de la significativité ($p = 0,051$).
- Tous les FIV sont < 5 , ce qui confirme l'absence de multicolinéarité.

d) Équation de régression

L'équation de régression ajustée pour la réponse Rz est :

Equation de régression

$$\begin{aligned} \text{Rz } (\mu\text{m}) = & 16,786 - 3,023 \text{ A (Ton) } (\mu\text{s})_{0,4} + 0,228 \text{ A (Ton) } (\mu\text{s})_{1,0} + 2,795 \text{ A (Ton) } (\mu\text{s})_{1,2} \\ & - 1,934 \text{ B (Toff) } (\mu\text{s})_{3,8} - 0,625 \text{ B (Toff) } (\mu\text{s})_{4,8} + 2,559 \text{ B (Toff) } (\mu\text{s})_{5,8} \\ & + 0,396 \text{ S (vitesse d'avance du fil) (mm)}_4 \\ & - 3,605 \text{ S (vitesse d'avance du fil) (mm)}_{10} \\ & + 3,209 \text{ S (vitesse d'avance du fil) (mm)}_{30} \end{aligned}$$

Figure IV. 6 Équation de régression ajustée pour Rz.

Interprétation :

D'après le modèle linéaire général ajusté, les combinaisons $T_{on} = 0,4 \mu\text{s}$, $T_{off} = 3,8 \mu\text{s}$ et Vitesse du fil = 10 mm/min ont montré les effets les plus significatifs pour la réduction de R_z , comparativement aux niveaux de référence.

e) Analyse des résidus pour la réponse R_z

Afin de valider les hypothèses du modèle statistique appliqué à la réponse R_z (μm), une analyse des résidus a été effectuée. Cette étape permet de vérifier la normalité, l'homogénéité de la variance et l'indépendance des erreurs.

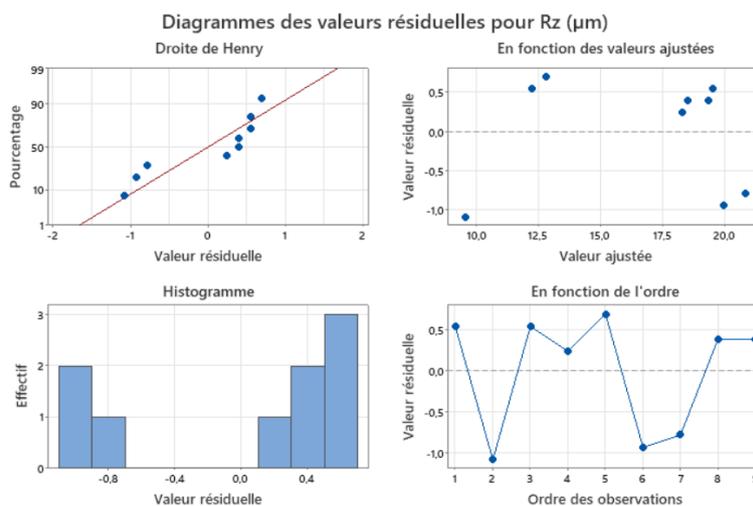


Figure IV. 7 Diagrammes des valeurs résiduelles pour R_z (μm).

Interprétation :

- **Droite de Henry** : Les points suivent approximativement la ligne, ce qui confirme la normalité des résidus.
- **Valeurs ajustées vs résidus** : pas de motif visible, variance constante (homoscédasticité).
- **Histogramme** : L'histogramme n'est pas parfaitement symétrique, mais il ne présente pas de valeurs extrêmes. Compte tenu du faible nombre d'essais, cette forme reste acceptable.
- **Résidus vs ordre** : pas de structure récurrente, erreurs indépendantes.

Conclusion : Le niveau $T_{on} = 0,4 \mu\text{s}$ et la vitesse d'avance = 10 mm/min sont les paramètres les plus efficaces pour réduire la rugosité maximale R_z dans les conditions testées.

IV.3.4 Analyse de la réponse : ΔL (mm)

a) Analyse de variance

L'analyse de la variance appliquée à la réponse ΔL (déformation linéaire) permet d'évaluer l'impact des paramètres d'usinage par électroérosion à fil (T_{on} , T_{off} , Vitesse d'avance du fil) sur cette réponse dimensionnelle.

Tableau IV. 10 Résultats de l'ANOVA pour la réponse ΔL (mm).

Analyse de la variance					
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
A (T_{on}) (μs)	2	0,003350	0,001675	2,62	0,276
B (T_{off}) (μs)	2	0,000153	0,000077	0,12	0,893
S (vitesse d'avance du fil) (mm)	2	0,000020	0,000010	0,02	0,985
Erreur	2	0,001280	0,000640		
Total	8	0,004800			

Interprétation :

Le facteur T_{on} montre une influence modérée ($F = 2,62$), mais n'est pas significatif statistiquement ($p = 0,276$). Les facteurs T_{off} et vitesse du fil ont des effets négligeables sur ΔL ($p \gg 0,05$). L'erreur résiduelle reste faible ($CM = 0,00064$), ce qui indique une certaine cohérence du modèle malgré la non-significativité.

b) Récapitulatif du modèle et qualité d'ajustement :

Le tableau suivant fournit un résumé des principaux indicateurs statistiques du modèle ajusté pour la réponse ΔL (mm).

Tableau IV. 11 Indicateurs statistiques du modèle pour ΔL (mm).

Récapitulatif du modèle			
S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
0,0252982	73,33%	0,00%	0,00%

Analyse :

Le modèle explique une part importante de la variation totale ($R^2 = 73,33\%$), mais le R^2 ajusté et prévisionnel sont nuls, indiquant une faible capacité du modèle à généraliser.

Cela peut être dû à la taille réduite de l'échantillon (seulement 9 expériences), ce qui limite la fiabilité statistique.

c) Analyse des coefficients estimés

Le tableau ci-dessous présente les coefficients estimés du modèle pour la réponse ΔL (mm). Ces résultats permettent d'analyser l'effet de chaque facteur technologique (Ton, Toff, et vitesse d'avance du fil) sur ΔL (mm).

Tableau IV. 12 Coefficients estimés pour ΔL (mm).

Coefficients

Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	0,05833	0,00843	6,92	0,020	
A (Ton) (μs)					
0,4	-0,0183	0,0119	-1,54	0,264	1,33
1,0	-0,0083	0,0119	-0,70	0,557	1,33
B (Toff) (μs)					
3,8	0,0010	0,0151	0,07	0,953	2,13
4,8	-0,0060	0,0151	-0,40	0,729	2,13
S (vitesse d'avance du fil) (mm)					
4	-0,0017	0,0119	-0,14	0,902	1,33
10	0,0023	0,0151	0,15	0,891	2,13

Analyse des effets :

- Aucun des paramètres ne présente une significativité statistique ($p > 0,05$).
- Le niveau Ton = 0,4 μs semble réduire ΔL , mais sans effet significatif.
- Tous les FIV < 5 , donc pas de problème de multicolinéarité.

d) Équation de régression

L'équation de régression ajustée permet de modéliser la réponse ΔL (mm) en fonction des paramètres technologiques étudiés. Elle fournit une expression mathématique utile pour prédire le comportement du processus en fonction des niveaux des facteurs.

Equation de régression

$$\Delta L \text{ (mm)} = 0,05833 - 0,0183 A \text{ (Ton)} (\mu\text{s})_{0,4} - 0,0083 A \text{ (Ton)} (\mu\text{s})_{1,0} + 0,0267 A \text{ (Ton)} (\mu\text{s})_{1,2} + 0,0010 B \text{ (Toff)} (\mu\text{s})_{3,8} - 0,0060 B \text{ (Toff)} (\mu\text{s})_{4,8} + 0,0050 B \text{ (Toff)} (\mu\text{s})_{5,8} - 0,0017 S \text{ (vitesse d'avance du fil)} (\text{mm})_4 + 0,0023 S \text{ (vitesse d'avance du fil)} (\text{mm})_{10} - 0,0007 S \text{ (vitesse d'avance du fil)} (\text{mm})_{30}$$

Figure IV. 8 Équation de régression ajustée pour ΔL (mm).

Interprétation :

- Les coefficients suggèrent que la combinaison Ton faible (0,4 μs) et Toff moyen (4,8 μs) pourrait réduire légèrement ΔL , mais l'effet est très faible et statistiquement incertain.

e) Analyse des résidus

Afin de vérifier la validité du modèle pour la réponse ΔL (mm), une analyse des résidus a été effectuée. Cette analyse permet d'évaluer les hypothèses de normalité, d'homogénéité de la variance et d'indépendance des erreurs, à travers plusieurs graphiques diagnostiques.

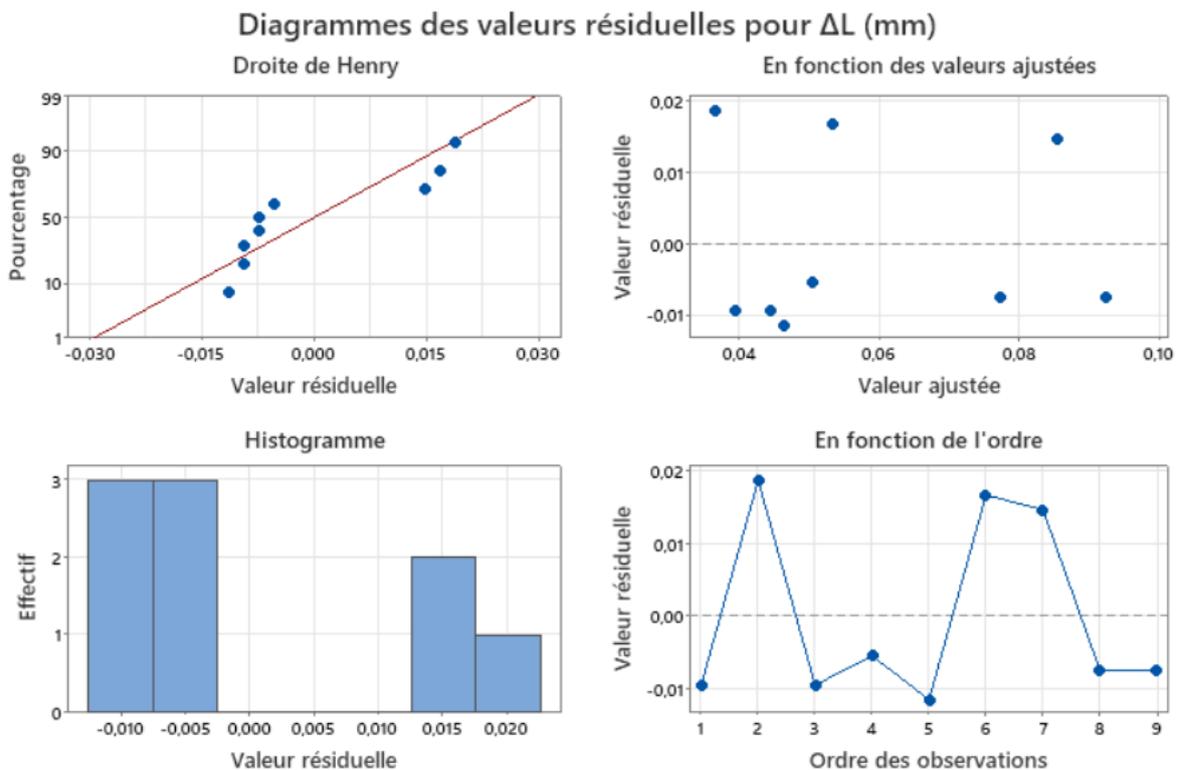


Figure IV. 9 Diagrammes des résidus pour ΔL (mm).

Interprétation :

- **Droite de Henry :** Les points suivent la ligne, ce qui valide l'hypothèse de normalité des résidus.
- **Résidus vs valeurs ajustées :** Pas de structure particulière → variance constante (homoscédasticité).
- **Histogramme :** L'histogramme n'est pas parfaitement symétrique, mais il ne présente pas de valeurs extrêmes. Compte tenu du faible nombre d'essais, cette forme reste acceptable.
- **Résidus vs ordre des observations :** Les erreurs sont réparties de manière aléatoire → indépendance des résidus respectée.

Conclusion : Bien que les résultats ne soient pas significatifs statistiquement, le facteur Ton à faible valeur (0,4 μ s) semble réduire légèrement ΔL . L'analyse des résidus montre que les hypothèses du modèle sont respectées, mais la qualité prédictive reste faible, soulignant la nécessité d'augmenter le nombre d'expériences pour renforcer la robustesse du modèle.

IV.3.5 Analyse de la réponse : Temps usinage (min)**a) Analyse de variance**

L'analyse de la variance appliquée à la réponse Temps usinage (min) permet d'évaluer l'effet des paramètres d'usinage (T_{on} , T_{off} , vitesse d'avance du fil) sur le temps nécessaire à la coupe par électroérosion à fil.

Tableau IV. 13 Résultats de l'ANOVA pour la réponse Temps usinage (min).

Analyse de la variance						
Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	
A (Ton) (μ s)	2	405,47	202,74	4,72	0,175	
B (Toff) (μ s)	2	64,89	32,45	0,76	0,570	
S (vitesse d'avance du fil) (mm)	2	94,52	47,26	1,10	0,476	
Erreur	2	85,94	42,97			
Total	8	718,65				

L'analyse de variance montre que aucun des facteurs étudiés (Ton, Toff, Vitesse du fil) n'a un effet statistiquement significatif sur la rugosité Rz au seuil de 5 %, car toutes les p-values sont supérieures à 0,05.

b) Récapitulatif du modèle et qualité d'ajustement

Le tableau ci-après fournit les principaux indicateurs statistiques du modèle ajusté pour Temps usinage (min).

Tableau IV. 14 Indicateurs statistiques du modèle pour Temps usinage (min).

Récapitulatif du modèle			
S	R carré	R carré (ajust)	R carré (prév)
6,55521	88,04%	52,17%	0,00%

Le modèle explique une part importante de la variabilité des données ($R^2 = 88,04\%$), indiquant une bonne qualité d'ajustement. Cependant, les faibles valeurs de R^2 ajusté (52,17 %) et de R^2 prévisionnel (0,00 %) montrent une capacité limitée à généraliser les résultats, probablement à cause de la taille restreinte de l'échantillon expérimental.

c) Analyse des coefficients estimés

Le tableau suivant présente les coefficients estimés du modèle pour la réponse Temps usinage (min). Ces résultats permettent d'interpréter l'effet individuel de chaque facteur et leur significativité statistique.

Tableau IV. 15 Coefficients estimés pour Temps usinage (min).

Coefficients					
Terme	Coeff	Coef ErT	Valeur de T	Valeur de p	FIV
Constante	25,53	2,19	11,68	0,007	
A (Ton) (μ s)					
0,4	9,34	3,09	3,02	0,094	1,33
1,0	-6,13	3,09	-1,98	0,186	1,33
B (Toff) (μ s)					
3,8	-4,71	3,91	-1,21	0,351	2,13
4,8	3,91	3,91	1,00	0,422	2,13
S (vitesse d'avance du fil) (mm)					
4	-4,56	3,09	-1,48	0,278	1,33
10	2,79	3,91	0,71	0,550	2,13

Analyse des effets :

- Aucun des coefficients n'est significatif au seuil de 5 % ($p > 0,05$).
- Le niveau $T_{on} = 0,4 \mu s$ augmente significativement le temps d'usinage (+9,34 min), tandis que $T_{on} = 1,0 \mu s$ le réduit.
- Les autres effets sont faibles et peu significatifs.
- Les FIV restent inférieurs à 5, ce qui exclut la présence de multicollinéarité.

d) Équation de régression

L'équation de régression ajustée modélise la réponse Temps usinage (min) en fonction des paramètres d'usinage. Elle constitue une base pour estimer les temps de coupe dans différentes conditions expérimentales.

Equation de régression

Temps usinage (min) = $25,53 + 9,34 A (Ton) (\mu s)_{0,4} - 6,13 A (Ton) (\mu s)_{1,0} - 3,21 A (Ton) (\mu s)_{1,2} - 4,71 B (Toff) (\mu s)_{3,8} + 3,91 B (Toff) (\mu s)_{4,8} + 0,80 B (Toff) (\mu s)_{5,8} - 4,56 S (\text{vitesse d'avance du fil}) (mm_4) + 2,79 S (\text{vitesse d'avance du fil}) (mm_10) + 1,77 S (\text{vitesse d'avance du fil}) (mm_30)$

Figure IV. 10 Équation de régression ajustée pour Temps usinage (min).

Interprétation

L'équation montre que le temps d'usinage est fortement influencé par les niveaux du paramètre T_{on} , en particulier à faible valeur. Néanmoins, les effets des autres facteurs sont faibles et peu fiables sur le plan statistique.

e) Analyse des résidus

Afin de vérifier la validité des hypothèses du modèle établi pour Temps usinage (min), une analyse des résidus a été effectuée à l'aide de plusieurs graphiques diagnostiques.

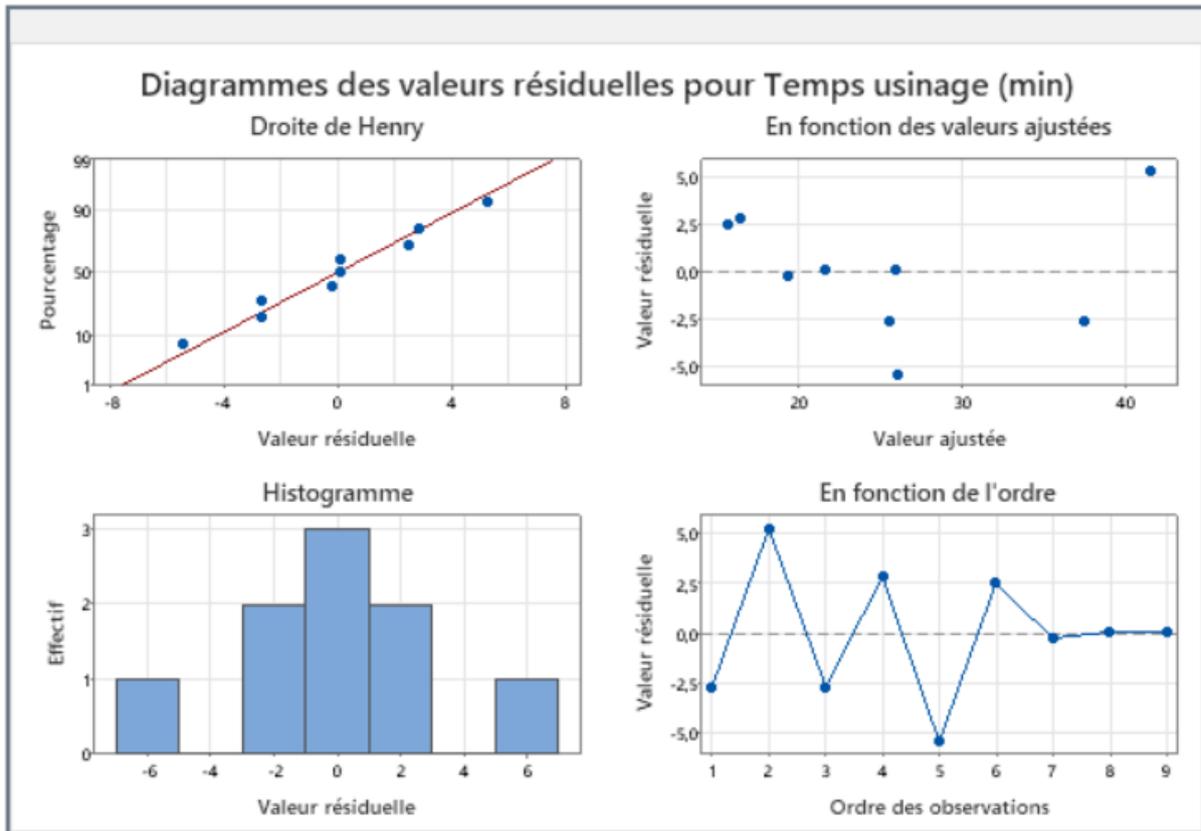


Figure IV. 11 Diagrammes des valeurs résiduelles pour Temps usinage (min).

Interprétation :

- **Droite de Henry** : Les points sont globalement alignés, ce qui suggère une distribution normale des résidus.
- **Résidus vs valeurs ajustées** : Aucune tendance particulière n'est observée, ce qui indique une variance constante.
- **Histogramme** : Les résidus sont centrés autour de zéro, ce qui valide l'hypothèse de normalité.
- **Résidus vs ordre des observations** : La répartition est aléatoire, ce qui montre l'indépendance des erreurs.

Conclusion :

Le modèle présente un bon ajustement aux données expérimentales, bien que les coefficients ne soient pas significatifs. L'analyse des résidus confirme que les hypothèses du modèle sont respectées. Toutefois, des expériences supplémentaires seraient nécessaires pour améliorer la robustesse et la fiabilité prédictive du modèle.

IV.3.6 Résumé des Résultats Principaux

Cette étude a examiné l'influence de trois paramètres clés du procédé d'électroérosion par fil (WEDM) : Durée d'impulsion (T_{on}); Temps entre impulsions (T_{off}) Et Vitesse d'avance du fil (S). sur les performances du procédé, notamment : Le taux d'enlèvement de matière (MRR); La rugosité de surface (R_a et R_z); La précision dimensionnelle (ΔL) et Le temps d'usinage.

Principales conclusions :

1. Impact dominant de T_{on} :

- Les valeurs élevées (1.0 ; 1.2 μs) augmentent significativement le MRR.
- Les valeurs basses (0.4 μs) améliorent la qualité de surface (réduction de R_a et R_z).
- Confirmation statistique via l'ANOVA ($p < 0.05$ pour MRR et rugosité).

2. Effet marginal de T_{off} :

- Aucune influence statistiquement significative sur le MRR ou ΔL ($p > 0.05$).
- Une légère amélioration de la rugosité observée à 3.8 μs , mais non concluante.

3. Optimisation par la vitesse du fil :

- Une vitesse de 10 mm/min minimise R_a et R_z sans compromettre le MRR.
- Corrélations confirmées par les coefficients ($p = 0.008$ pour R_a).

4. Précision dimensionnelle (ΔL)

- Aucun paramètre n'a montré d'impact significatif dans cette étude ($p > 0.1$).
- Suggère l'intervention d'autres facteurs (ex : tension du fil, propriétés du matériau).

Implications :

L'analyse statistique démontre que T_{on} est le levier principal pour contrôler le compromis entre productivité (MRR) et qualité de surface. La vitesse du fil à 10 mm/min émerge comme un paramètre secondaire clé pour les applications nécessitant une finition fine. "Ces résultats orientent vers un réglage optimal pour les applications industrielles alliant rendement et finition".

Limites : L'étude n'a pas exploré les interactions entre paramètres (ex : $T_{on} \times$ vitesse), ce qui pourrait faire l'objet de travaux futurs.

IV.3.7 Optimisation des réponses par la méthode de désirabilité

Dans cette section, une optimisation simultanée des cinq réponses étudiées a été réalisée à l'aide de la méthode de désirabilité [28]. Cette méthode permet de transformer chaque objectif de réponse (minimisation ou maximisation) en une fonction de désirabilité individuelle, ensuite combinée en une désirabilité globale.

IV.3.7.1 Objectifs de l'optimisation

Pour identifier les conditions optimales de fonctionnement du procédé d'électroérosion à fil, une optimisation multi-réponses a été réalisée à l'aide de la méthode de désirabilité. Les réponses étudiées sont : le temps d'usinage, la déformation linéaire (ΔL), la rugosité de surface (R_a et R_z), et le taux d'enlèvement de matière (MRR).

Le tableau suivant résume les objectifs assignés à chaque réponse, ainsi que les limites, la pondération et l'importance attribuées dans l'analyse.

Tableau IV. 16 Paramètres d'optimisation et plages cibles des réponses.

Paramètres						
Réponse	Objectif	Inférieur	Cible	Supérieur	Pondération	Importance
Temps usinage (min)	Minimum		18,180	46,870	1	1
ΔL (mm)	Minimum		0,030	0,100	1	1
R_z (μm)	Minimum		8,452	20,077	1	1
R_a (μm)	Minimum		1,416	3,556	1	1
MRR (mm^3/min)	Maximum	51,2	132,000		1	1

Tous les objectifs ont été pondérés de manière égale (poids = 1) et considérés comme ayant la même importance (importance = 1). L'objectif général était de minimiser R_a , R_z , ΔL et le temps d'usinage, tout en maximisant le MRR. Cette configuration permet d'assurer un bon compromis entre qualité de surface, précision dimensionnelle et productivité.

- ✓ Cible = La valeur cible souhaitée pour une réponse donnée.

IV.3.7.2 Résultats de l'optimisation

L'optimisation des paramètres d'usinage a été réalisée en tenant compte de plusieurs critères simultanés : minimisation du temps d'usinage, de la rugosité de surface (R_a , R_z) et de la déviation dimensionnelle (ΔL), tout en maximisant le taux d'enlèvement de matière (MRR).

La méthode de la désirabilité globale a permis d'identifier une configuration optimale satisfaisant l'ensemble de ces objectifs.

Tableau IV. 17 Solution optimale d'usinage obtenue par la méthode de désirabilité.

Solution							
Solution	A (Ton) (μs)	B (Toff) (μs)	S (vitesse d'avance du fil) (mm)	Temps usinage (min) Valeur ajustée	ΔL (mm) Valeur ajustée	Rz (μm) Valeur ajustée	Ra (μm) Valeur ajustée
1	1	3,8	10	17,4756	0,0533333	11,475	1,80767
Solution	MRR (mm^3/min) Valeur ajustée	Désirabilité composite					
1	128,929	0,827369					

La configuration optimale correspond à :

- ✓ $T_{on} = 1 \mu\text{s}$; $T_{off} = 3.8 \mu\text{s}$ Et Vitesse d'avance du fil = 10 mm/min.

Cette combinaison permet d'obtenir un bon compromis entre productivité (MRR = 128,93 mm^3/min) et qualité de surface (Ra = 1,81 μm , Rz = 11,48 μm), tout en minimisant le temps d'usinage (17,48 min) et la déformation dimensionnelle ($\Delta L = 0,053$ mm). La désirabilité composite de 0,827 indique une solution très satisfaisante.

IV.3.7.3 Prédiction des réponses et évaluation de la robustesse de la solution optimale

Afin d'évaluer la robustesse de la solution optimale obtenue, une prédiction multiple des réponses a été effectuée.

Cette analyse fournit les valeurs ajustées des différentes réponses (ΔL , Ra, Rz, MRR et temps d'usinage) ainsi que les marges d'erreur estimées et les intervalles de confiance à 95 %, permettant ainsi de juger la précision statistique des résultats obtenus par la méthode de désirabilité.

Tableau IV. 18 Résultats de la prévision des réponses multiples et intervalles de confiance associés.

Prévisions de réponses multiples				
Variable	Configuration			
A (Ton) (μs)	1			
B (Toff) (μs)	3,8			
S (vitesse d'avance du fil) (mm)	10			
Réponse	Valeur ajustée	ErT ajust	IC à 95 %	IP à 95 %
Temps usinage (min)	17,48	7,88	(-16,42; 51,37)	(-26,62; 61,57)
ΔL (mm)	0,0533	0,0304	(-0,0775; 0,1842)	(-0,1168; 0,2235)
Rz (μm)	11,48	1,71	(4,10; 18,85)	(1,89; 21,06)
Ra (μm)	1,808	0,128	(1,256; 2,359)	(1,091; 2,525)
MRR (mm^3/min)	128,9	14,6	(65,9; 191,9)	(47,0; 210,9)

Interprétation des résultats de prévision multiple :

Les résultats montrent ce qui suit :

- **Temps d'usinage (17,48 min)** : bien que la valeur ajustée soit faible (ce qui est souhaitable), l'intervalle de confiance inférieur est négatif, ce qui indique une incertitude importante dans la prédiction de cette variable. Cela est probablement dû à une variabilité élevée ou au faible nombre d'expériences réalisées.
- **ΔL (0,053 mm)** : la valeur ajustée est proche de la cible souhaitée, mais l'intervalle de confiance reste large avec une borne inférieure négative. Cela souligne une variabilité possible dans la précision dimensionnelle, bien que la valeur centrale soit acceptable.
- **Rz (11,48 μm) et Ra (1,808 μm)** : les intervalles de confiance sont bien resserrés autour des valeurs ajustées, ce qui confirme la stabilité et la fiabilité des prédictions en ce qui concerne la qualité de surface. Ces résultats indiquent que la configuration optimale offre un bon compromis pour la finition.
- **MRR (128,9 mm^3/min)** : la valeur est proche du maximum défini (132), ce qui démontre une productivité élevée. Toutefois, l'intervalle de confiance est assez large, ce qui reflète une certaine incertitude, probablement liée aux conditions expérimentales.

L'analyse d'optimisation suivante vise à identifier le compromis optimal entre les critères contradictoires du procédé WEDM. La méthode de désirabilité composite a été appliquée, attribuant à chaque réponse (MRR, Ra, Rz, ΔL , temps d'usinage) une fonction de désirabilité individuelle (d) normalisée entre 0 (inacceptable) et 1 (optimal). Les paramètres de contrôle sont : Durée d'impulsion (Ton) ; Temps entre impulsions (Toff) et la Vitesse d'avance du fil (S). Le diagramme ci-dessous synthétise les résultats de cette optimisation multi-objectifs.

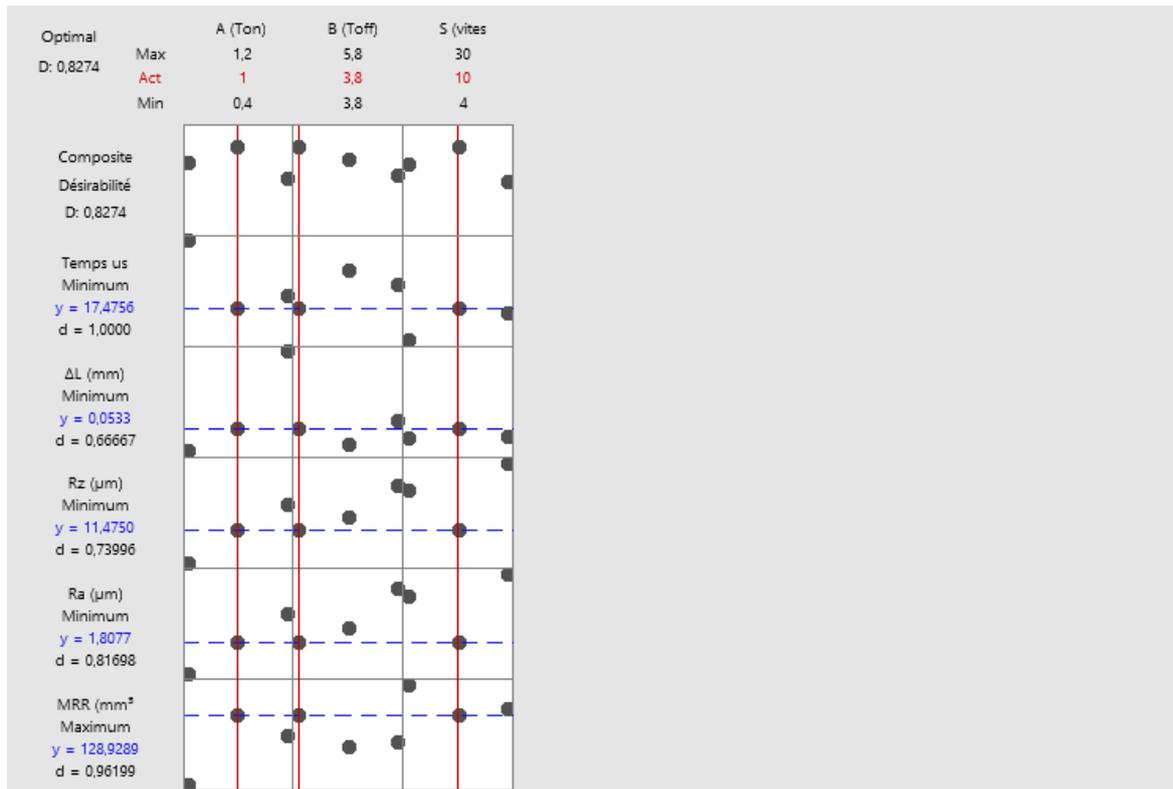


Figure IV. 12 Diagramme d'optimisation multi-réponses.

La solution optimale identifiée présente une désirabilité globale élevée ($D=0.827$), équilibrant :

- Un temps d'usinage minimal ($d=1.0$, $y=17.48$ min)
- Un MRR quasi-maximal ($d=0.96$, $y=128.93$ mm^3/min)
- Une rugosité Ra conforme aux exigences de finition fine ($d=0.81$, $y=1.81$ μm).

Les limites observées concernent principalement :

1. La précision dimensionnelle (ΔL , $d=0.66$) suggérant l'influence d'autres facteurs non contrôlés.
2. L'intervalle large pour le temps d'usinage (IC95%: [-16.4;51.4] min) reflétant la sensibilité du procédé.

Implications pratiques :

Cette configuration est recommandée pour les applications nécessitant un compromis entre productivité ($MRR > 125 \text{ mm}^3/\text{min}$) et qualité de surface ($Ra < 2 \text{ }\mu\text{m}$), notamment pour les pièces de moules ou composants aéronautiques.

IV.3.8 Validation expérimentale de la solution optimale

Dans le but de vérifier la validité de la solution optimale obtenue par la méthode de désirabilité, une validation expérimentale était initialement prévue en appliquant les paramètres optimaux $T_{on} = 1 \text{ }\mu\text{s}$; $T_{off} = 3.8 \text{ }\mu\text{s}$ Et Vitesse d'avance du fil = 10 mm/min . sur la même pièce.

Cependant, en raison du temps imparti par la société BCR, pour la disponibilité de la machine d'électroérosion à fil, cette expérimentation n'a pas pu être réalisée. Ce qui peut constituer une perspective pour des travaux futurs, afin de confirmer les performances prédites par le modèle statistique.

IV.4 Application industrielle potentielle des résultats

Les résultats obtenus lors de l'usinage du profil NACA 2412 par électroérosion à fil (WEDM) démontrent l'aptitude du procédé à répondre aux exigences de l'industrie aéronautique, notamment en termes de précision dimensionnelle, de qualité de surface et de capacité à usiner des géométries complexes. Cette approche expérimentale a mis en évidence que :

- Des profils aérodynamiques peuvent être fabriqués avec des écarts dimensionnels inférieurs à $0,15 \text{ mm}$.
- La qualité de surface obtenue ($Ra \approx 1 \text{ }\mu\text{m}$) est compatible avec les applications fonctionnelles sans retouche mécanique post-usinage.

Par conséquent, le WEDM s'avère être une technologie adaptée à la fabrication de pièces critiques telles que les pales de turbines et de compresseurs, notamment dans :

- Les moteurs aéronautiques,
- Les turbines à gaz et à vapeur,
- Les systèmes de propulsion et microturbines.

Ces résultats ouvrent la voie à une intégration du WEDM dans la chaîne de production de composants où la précision et la complexité géométrique sont déterminantes.

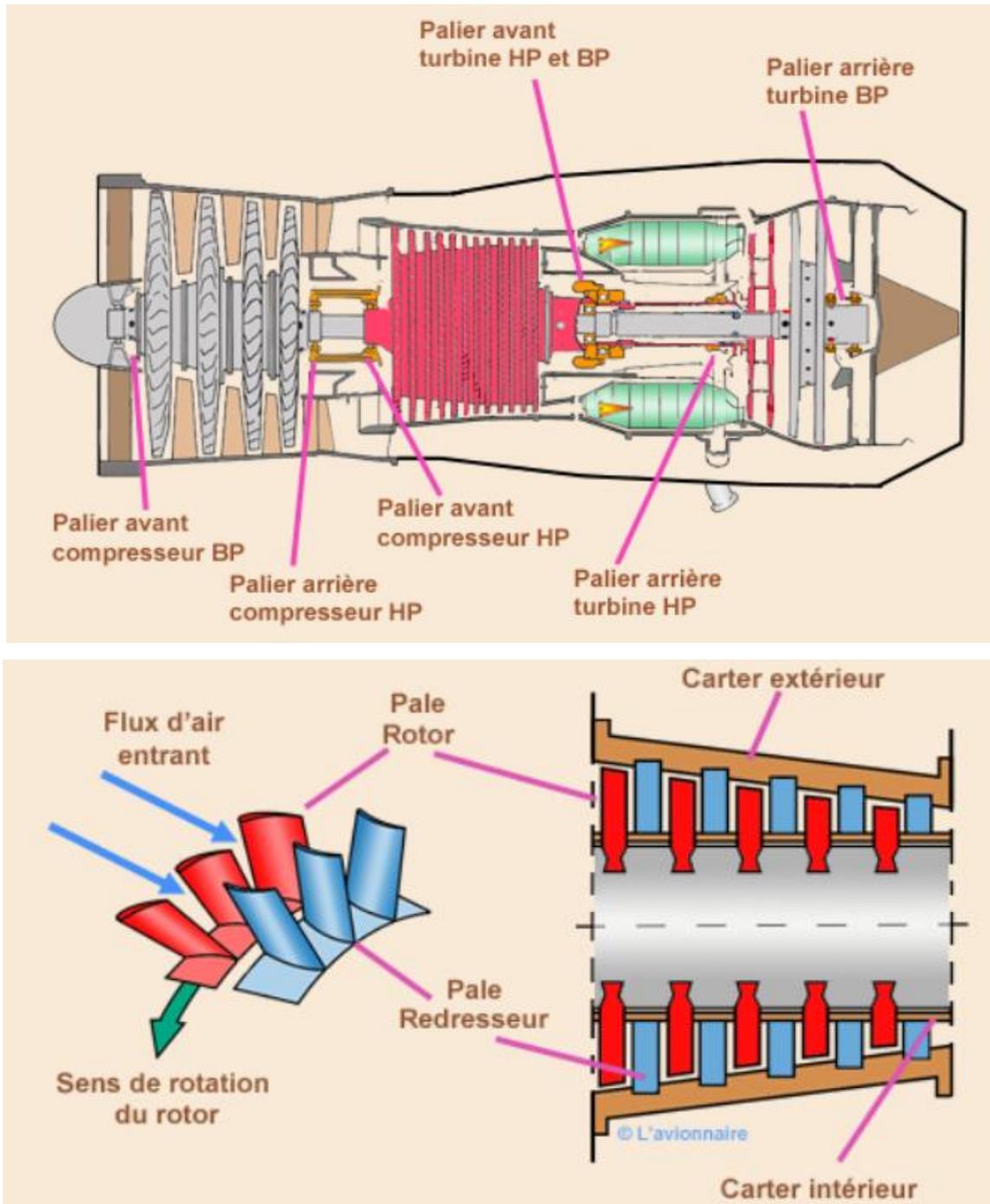


Figure IV. 13 Application industrielle de profil NACA 2412.

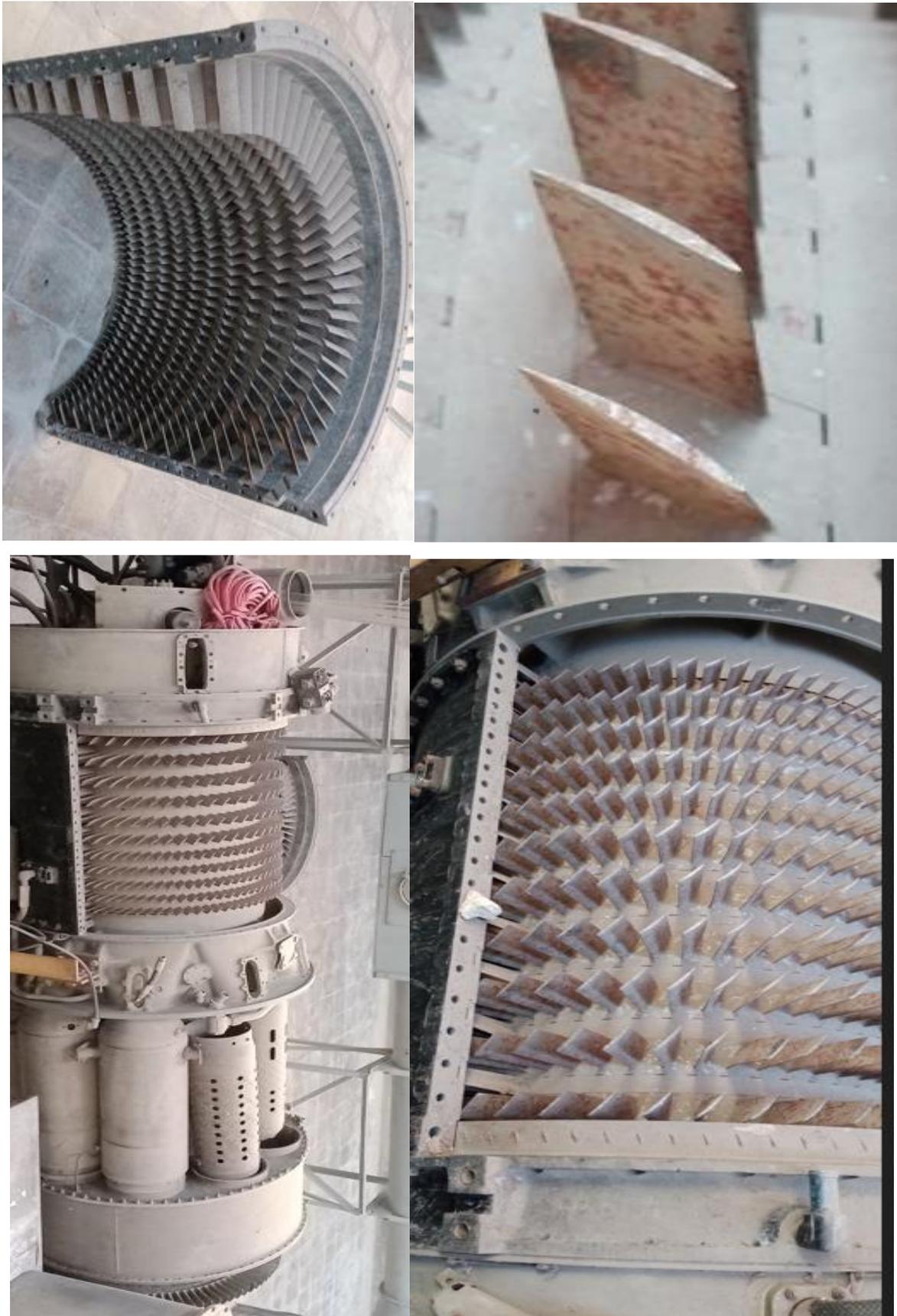


Figure IV. 14 Illustration d'un modèle expérimental comportant un rotor à aubages, observé au sein du laboratoire énergétique de l'ENP).

Ce modèle illustre une application potentielle des profils aérodynamiques de type NACA, dont la forme des aubages optimise l'écoulement fluide et l'efficacité énergétique. Une telle géométrie peut être reproduite avec précision grâce au procédé WEDM, comme démontré par les résultats expérimentaux présentés.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une analyse approfondie du procédé d'électroérosion à fil à travers une planification expérimentale rigoureuse et une optimisation multi-objectifs basée sur la méthode de désirabilité. L'étude a porté sur cinq réponses critiques : le temps d'usinage, la rugosité de surface (R_a , R_z), la déformation linéaire (ΔL) et le taux d'enlèvement de matière (MRR).

Les résultats obtenus ont permis d'identifier une configuration optimale des paramètres d'usinage ($T_{on} = 1 \mu s$; $T_{off} = 3.8 \mu s$ Et Vitesse d'avance du fil = 10 mm/min) offrant un équilibre satisfaisant entre qualité, précision et productivité, avec une désirabilité globale élevée ($D = 0,827$). L'analyse des intervalles de confiance a révélé une bonne robustesse des prédictions, en particulier pour la qualité de surface.

Cependant, la validation expérimentale de cette solution n'a pas pu être réalisée en raison de l'indisponibilité de la machine. Cette étape reste essentielle pour confirmer les performances réelles du modèle et constitue une perspective concrète pour la suite du travail.

Ce chapitre a ainsi posé les bases méthodologiques et analytiques nécessaires à la compréhension fine du procédé WEDM et à son optimisation dans un cadre industriel exigeant.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail de fin d'études a permis d'explorer en profondeur le procédé WEDM, une technologie d'usinage non conventionnelle offrant des performances remarquables dans la fabrication de pièces mécaniques complexes et de haute précision. À travers une étude bibliographique rigoureuse, une méthodologie expérimentale structurée et l'analyse statistique des résultats obtenus, nous avons pu identifier les paramètres les plus influents du procédé, notamment la durée d'impulsion (Ton), le temps de pause (Toff) et la vitesse d'avance du fil.

L'approche adoptée, basée sur un plan d'expériences de type Taguchi et une analyse de variance (ANOVA), a permis d'optimiser les conditions d'usinage en termes de taux d'enlèvement de matière (MRR), de rugosité de surface (Ra) et de précision dimensionnelle. Les résultats obtenus ont montré qu'un ajustement précis de ces paramètres peut significativement améliorer la performance globale du procédé tout en réduisant les effets indésirables tels que l'usure excessive de l'outil ou la formation de microfissures.

Par ailleurs, cette étude a mis en évidence l'intérêt croissant du WEDM dans le contexte industriel actuel, en particulier pour les applications nécessitant un haut niveau de précision, de reproductibilité et d'adaptabilité aux matériaux difficiles à usiner. L'expérience pratique menée au sein de l'entreprise ORFEE-BCR a renforcé cette perspective en démontrant la faisabilité et la pertinence de l'application du WEDM dans un cadre industriel réel.

En perspective, des travaux futurs pourraient être envisagés pour approfondir l'étude de certains paramètres secondaires, explorer d'autres stratégies d'optimisation multicritères, ou encore intégrer des approches d'intelligence artificielle pour le contrôle adaptatif du procédé.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] 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 doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 2005. [En ligne]. Disponible sur : https://infoscience.epfl.ch/record/50232/files/EPFL_TH3281.pdf
- [2] R. DAHMANI, L'électroérosion (EDM) – Optimisation d'un procédé d'usinage par microélectroérosion, Thèse de doctorat, 2015. [En ligne]. Disponible sur : https://hal.science/tel-01306778v1/file/These%20RD_VF23.04.15.pdf
- [3] AgieCharmilles, Catalogue CUT E 350_600 – Chapitre 0 : Introduction.
- [4] AgieCharmilles, Catalogue CUT E 350_600 – Chapitre 7 : Technique du procédé.
- [5] H.-P. Schulze, M. Läuter et G. Wollenberg, « Investigation of the pre-ignition stage in EDM », Institute for Fundamental Electrical Engineering and Electromagnetic Compatibility, 2001.
- [6] A. Descoedres, Characterization of Electrical Discharge Machining Plasmas, Thèse de doctorat, EPFL, 2006.
- [7] A. Descoedres, C. Hollenstein, R. Demellayer et G. Wälder, « Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma », Journal of Materials Processing Technology, juin 2004.
- [8] B. M. Schumacher, « After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed », Journal of Materials Processing Technology, 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.060>
- [9] K. Albinski, K. Musiol, A. Miernikiewicz, S. Labuz et M. Malota, « The temperature of a plasma used in electrical discharge machining », 1996. [En ligne]. Disponible sur <https://doi.org/10.1088/0963-0252/5/4/015>
- [10] W. Natsu, M. Shimoyamada et M. Kunieda, « Study on Expansion Process of EDM Arc Plasma », JSME International Journal Series C, 2006. <https://doi.org/10.1299/jsmec.49.600>
- [11] G. Vasudevamurthy et T. W. Knight, « Effect of system parameters on size distribution of 304 stainless steel particles produced by electrical discharge mechanism ».
- [12] J.-C. Diot, W. Zaugg, G. Naville et J.-P. Briffod, « Rotative tool-electrodes of simple shapes for 3D electroerosive machining », 2001.

- [13] M. Mezoudj, Prédiction des Paramètres du Processus d'Usinage par Electroérosion, Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [14] H. K. Kansal, S. Singh et P. Kumar, « Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology », *Journal of Materials Processing Technology*, pp.467-479,2008.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605005030>
- [15] K. H. Ho et S. T. Newman, « State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM) », *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, pp. 1287–1300, 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00162-7)
- [16] S. Oelheld Technologies, L'électroérosion par enfonçage, 2006. [En ligne]. Disponible sur <https://idoc.pub/documents/l-electroerosion-ce-qu-il-faut-savoir-pnxkjgdgd14v>
- [17] S. S. Mahapatra et A. Patnaik, « Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi method », *Journal of Materials Processing Technology*, <https://www.researchgate.net/publication/225160645>
- [19] H. Hocheng, *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, publié par Elsevier en 2016.
- [20] S. Kumar et R. Singh, « Investigations on the influence of machining parameters on material removal rate during WEDM of metal matrix composites », *Journal of Composite Materials*, pp. 93–100, 2010.
- [22] B. Lauwers, J. P. Kruth, W. Liu et al., « Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials », *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 347–352, 2004.
- [23] K. P. Rajurkar et al., « Wire EDM: Advances in Modelling, Process Control, and Applications », *Journal of Materials Processing Technology*, 2013.
- [24] S. Singh et al., « Review on Recent Advances in Wire EDM », *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- [25] H. Hocheng, *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, Elsevier, 2016.
- [26] ORFEE BCR, Présentation de l'entreprise et politique qualité, Document interne, Visite et entretiens réalisés en avril 2025.

- [27] J. Goupy et L. Creighton, Introduction aux plans d'expériences (3^e éd.), Dunod, 2006.
- [28] G. Derringer et R. Suich, « Simultaneous optimization of several response variables », *Journal of Quality Technology*, pp. 214–219, 1980.