



HAL
open science

Optimisation d'un procédé d'usinage par microélectroérosion

Rabah Dahmani

► **To cite this version:**

Rabah Dahmani. Optimisation d'un procédé d'usinage par microélectroérosion. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON1 2015. Français. NNT : . tel-01306778v1

HAL Id: tel-01306778

<https://hal.science/tel-01306778v1>

Submitted on 26 Apr 2016 (v1), last revised 12 Jun 2018 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre 58 - 2015

Année 2015

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON
Délivrée par
L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON1 (UCBL)

ECOLE DOCTORALE : ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE ET AUTOMATIQUE

DIPLOME DE DOCTORAT
(Arrêté du 7 août 2006)

Discipline : Micro & Nanotechnologies

Soutenue le 6 mai 2015 par

M. Rabah DAHMANI

Optimisation d'un procédé d'usinage par microélectroérosion

JURY :

M. Joël Rech, PU, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, Président
M. Olivier Lesaint, DR CNRS, Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble, Rapporteur
M. Emmanuel Brousseau, Senior Lecturer, Université de Cardiff, Rapporteur
M. Jacques Richard, Professeur HES, Haute Ecole du Paysage d'Ingénierie et d'Architecture de Genève, Examineur
M. Georg Wälder, Professeur HES, Haute Ecole du Paysage d'Ingénierie et d'Architecture de Genève, Examineur
M. Vincent Semet, MC UCB HDR, Institut des Nanotechnologies de Lyon, Directeur de thèse
M. Michel Cabrera, CR CNRS, Institut des Nanotechnologies de Lyon, Encadrant
Mme Yasmina Layouni, Enseignante Chercheuse CPE, Institut des Nanotechnologies de Lyon, Encadrant.

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1

Président de l'Université	M. François-Noël GILLY
Vice-président du Conseil d'Administration	M. le Professeur Hamda BEN HADID
Vice-président du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire	M. le Professeur Philippe LALLE
Vice-président du Conseil Scientifique	M. le Professeur Germain GILLET
Directeur Général des Services	M. Alain HELLEU

COMPOSANTES SANTE

Faculté de Médecine Lyon Est – Claude Bernard	Directeur : M. le Professeur J. ETIENNE
Faculté de Médecine et de Maïeutique Lyon Sud – Charles Mérieux	Directeur : Mme la Professeure C. BURILLON
Faculté d'Odontologie	Directeur : M. le Professeur D. BOURGEOIS
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques	Directeur : Mme la Professeure C. VINCIGUERRA
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation	Directeur : M. le Professeur Y. MATILLON
Département de formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directeur : Mme. la Professeure A-M. SCHOTT

COMPOSANTES ET DEPARTEMENTS DE SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Faculté des Sciences et Technologies	Directeur : M. F. DE MARCHI
Département Biologie	Directeur : M. le Professeur F. FLEURY
Département Chimie Biochimie	Directeur : Mme Caroline FELIX
Département GEP	Directeur : M. Hassan HAMMOURI
Département Informatique	Directeur : M. le Professeur S. AKKOUCHE
Département Mathématiques	Directeur : M. le Professeur G. TOMANOV
Département Mécanique	Directeur : M. le Professeur H. BEN HADID
Département Physique	Directeur : M. Jean-Claude PLENET
UFR Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives	Directeur : M. Y. VANPOULLE
Observatoire des Sciences de l'Univers de Lyon	Directeur : M. B. GUIDERDONI
Polytech Lyon	Directeur : M. P. FOURNIER
Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique	Directeur : M. G. PIGNAULT
Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1	Directeur : M. le Professeur C. VITON
Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education	Directeur : M. le Professeur A. MOUGNIOTTE
Institut de Science Financière et d'Assurances	Directeur : M. N. LEBOISNE

**« Le silence c'est la mort,
Si tu parles tu meurs,
Si tu te tais, tu meurs
Alors dis et meurs ! »**

Tahar DJAOUI

**« Tasusmi d lmut,
Ma temmeslayed-d ad temted,
Ma tessusmed ad temted
Jhi meslayed temted ! »**

Tahar ĠAWUI

RESUME

L'objet de cette thèse est d'étudier un procédé de fraisage par microélectroérosion (μ EE), qui est un procédé sans contact permettant d'usiner tous les matériaux durs conducteurs d'électricité à l'aide d'un micro-outil cylindrique ultrafin. Le principe consiste à créer des micro-décharges électriques entre le micro-outil et une pièce conductrice immergés dans un diélectrique liquide. En faisant parcourir à l'outil un parcours 3D, il est possible de creuser une forme complexe dans la pièce avec des détails à fort rapport d'aspect.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord amélioré un procédé d'élaboration de micro-outils cylindriques ultrafins par gravure électrochimique de barreaux de tungstène. Des outils de diamètre $32,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$ sur une longueur de 3 mm ont été obtenus de manière automatique et reproductible. L'écart type a été divisé par 2 par rapport à l'état de l'art antérieur. Des outils de diamètre inférieur ont été obtenus avec une intervention de l'opérateur, et ce jusqu'à $3 \mu\text{m}$ de diamètre.

Puis ces micro-outils ont été mis en œuvre pour usiner des pièces avec le procédé de fraisage par microélectroérosion. Pour ce faire, une machine de 2^{ème} génération a été entièrement développée sur la base de travaux antérieurs. Il a été possible d'usiner de l'acier inoxydable dans de l'eau déionisée avec des micro-outils de $3 \mu\text{m}$ de diamètre sans détérioration de l'outil. Par ailleurs, Le procédé de μ EE a été caractérisé en termes de résolution d'usinage, taux d'enlèvement de matière et usure de l'outil. Un générateur de décharges original a permis d'usiner avec des micro-décharges de 1 à 10 nJ / étincelle avec une diminution très sensible de l'usure de l'outil par rapport à l'état de l'art. Un procédé original de caractérisation en ligne des décharges et de cartographie dans l'espace a aussi été développé.

Mots clefs : micro usinage, électroérosion, microélectroérosion, fraisage par microélectroérosion, gravure électrochimique, micro-outil, microélectrode, décharge électrique, acier inoxydable, tungstène.

ABSTRACT

This work aims at studying Micro Electrical Discharge Milling (μ EDM milling), which is a non-contact process allowing machining all hard and electrically conductive materials with a cylindrical ultrathin tool. The principle is based on the creation of electrical micro discharges between the tool and an electrically conductive part immersed in a liquid dielectric. By means of a 3D path, the tool machines a complex shape in the part with high aspect ratio details.

In this work, we have firstly improved a process for making cylindrical ultrathin micro-tools by electrochemical etching of tungsten rods. Tools with a diameter of $32.6 \pm 0.3 \mu\text{m}$ and a length of 3 mm have been obtained with an automated and reproducible process. Standard deviation has been divided by 2 by comparison with the previous state of the art. Tools with diameter as low as $3 \mu\text{m}$ have been fabricated with the help of the machine operator

Then these micro-tools have been used for machining parts with the μ EDM milling process. To do so, a second generation machine has been entirely developed on the basis of previous work. It has been possible to machine stainless steel in deionized water with $3 \mu\text{m}$ micro-tools without damaging the tools. In other respects, the μ EDM milling process has been characterized in terms of machining resolution, material removal rate and tool wear. An innovative generator of discharges allow machining with 1 to 10 nJ / spark with a reduced tool wear by comparison to the state of the art. An innovative process for the on line characterization of discharges with spatial distribution capability has been developed.

Key words: micromachining, electro discharge machining, micro electro discharge machining milling μ -EDM, electrochemical etching, micro-tool, micro-electrode, spark, stainless steel, tungsten.

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier les personnes qui m'ont aidé à l'accomplissement de ce travail durant ces trois années de thèses, notamment mon directeur et mes encadrants que sont M. Michel CABRERA, Mme Yasmîna LAYOUNI et M. Vincent SEMET.

Je voudrais les remercier pour leur aide infaillible et leurs conseils pertinents, ce qui a permis l'aboutissement de ces travaux malgré la difficulté du sujet auquel je suis confronté. Travailler sous leur direction m'a appris tant de choses, aussi professionnelles qu'humaines, j'ai pris un réel plaisir à travailler avec eux et à profiter de leurs expériences et leurs compétences sans failles ce qui a énormément contribué au succès de ce travail.

Un grand merci à l'ensemble du personnel (administratif et scientifique) du laboratoire INL pour leur accueil chaleureux, sans lequel ce travail n'aurait tout simplement pas lieu. Je tiens particulièrement à remercier tous mes collègues de travail sans exception.

Je tiens à remercier particulièrement les membres du jury, notamment les rapporteurs M. O. Lesaint et M. E. Brousseau qui ont pris le temps de lire et de juger ce manuscrit. Je remercie aussi les autres membres du jury : M.J. Rech, G. Wälder, J. Richard, aussi bien évidemment mes encadrants.

Cela peut paraître inhabituel, mais je tiens particulièrement à remercier mon pays, la France, qui m'a donné la chance d'accomplir mes rêves, celui de vivre au sein d'un pays libre dont les valeurs sont inestimables et qui définissent sa grandeur telle que sa gastronomie, son histoire, ses valeurs républicaines qui assurent la dignité et la liberté individuelle et veillent à ce que ses enfants vivent ensemble en totale harmonie ayant les mêmes devoirs et les mêmes droits. Je ne saurais jamais te remercier assez, toi la France, mais je voudrais tout de même t'exprimer ma gratitude et ma reconnaissance de m'avoir offert toutes ces belles choses. Merci infiniment.

Enfin je remercie infiniment toute ma famille à savoir papa et maman ; mes sœurs sans oublier bien sur mon frère l'artiste. Je voudrais rendre hommage à ma grand-mère qui compte énormément pour moi et je voudrais lui dire que désormais tu peux te reposer en paix car j'ai exaucé tes vœux et j'aurais tant aimé partager ma réussite avec toi. Enfin un grand merci pour ma femme ma moitié, qui a su trouver les mots et les moments pour m'accompagner durant cette période et avec qui j'ai surmonté tant d'obstacles qui ont forgé ma personnalité et ma patience et surtout ma détermination à accomplir l'impossible.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	4
ABSTRACT.....	5
REMERCIEMENTS	6
TABLE DES MATIERES	7
LISTE DES FIGURES.....	12
LISTE DES TABLEAUX	20
LISTE DES ABREVIATIONS	22
INTRODUCTION GENERALE.....	23
1. USINAGE PAR ELECTROEROSION.....	27
1.1. GENERALITES.....	27
1.2. GENERALITES SUR L'ELECTROEROSION	28
1.2.1. <i>Historique</i>	28
1.2.2. <i>Principe de base</i>	29
1.2.3. <i>Mécanisme d'enlèvement de la matière</i>	30
a) Phase de pré-claquage	30
b) Phase de claquage.....	31
c) Phase de décharge	31
d) Fin de décharge	32
e) Phase de post-décharge	33
1.3. ELECTROEROSION CONVENTIONNELLE.....	33
1.3.1. <i>Les différentes variantes d'usinage par EE</i>	33
a) Electroérosion à enfoncement (Die sinking EDM)	34
b) Electroérosion à fil (Wire EDM)	34
c) Perçage de trous (Drilling EDM)	34
d) Fraisage par électroérosion avec un mouvement de l'outil en 3D (Milling EDM)	34
1.3.2. <i>Les générateurs de décharges en électroérosion conventionnelle</i>	35
a) Le générateur à relaxation	36
b) Générateur à impulsions rotatif	36
c) Les générateurs à transistor (à impulsions).....	37
d) Les générateurs à transistor iso-énergétique	37
1.3.3. <i>Conclusion</i>	38
1.4. ELECTROEROSION A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE	38
1.4.1. <i>Généralités</i>	38
1.4.2. <i>Les différentes variantes d'usinage par EE</i>	39
a) Microélectroérosion par enfoncement	39
b) Microélectroérosion à fil	40
c) Perçage de trous par microélectroérosion à fil	41
d) Micro meulage à fil par microélectroérosion	41
e) Fraisage par microélectroérosion.....	42
1.4.3. <i>Machines de fraisage par microélectroérosion</i>	42
a) Vue d'ensemble.....	42
b) Machine Panasonic Matsuhita MG-ED72W	44
c) Machine Smaltec EM203.....	46
d) Machine Sarix SX-100	47
e) Mikrotool.....	51

1.5.	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	52
2.	DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL	54
2.1.	GENERATIONS ANTERIEURES DE MACHINE DE FRAISAGE PAR MICROELECTROEROSION	54
2.1.1.	<i>Développement préliminaire (A. Benilov)</i>	54
2.1.2.	<i>Machine de 1^{ère} génération (G. Girardin).....</i>	57
a)	Principe.....	57
b)	Réalisation expérimentale	58
c)	Réalisation des modules électroniques	59
d)	Exemples d'usinage	61
e)	Conclusion	62
2.2.	MACHINE DE 2 ^{ÈME} GENERATION	62
2.2.1.	<i>Analyse du procédé.....</i>	62
2.2.2.	<i>Solution retenue.....</i>	64
2.2.3.	<i>Réalisation expérimentale (machine de 2^{ème} génération).....</i>	66
2.2.4.	<i>Description détaillée du dispositif expérimental de 2^{ème} génération</i>	69
a)	Déplacements XYZ	69
b)	Gestion de l'entrefer	72
c)	Commande à trois microcontrôleurs.....	74
d)	Générateur de décharges	76
e)	Caractérisation des décharges et régulation du gap	77
f)	Fluidique.....	82
2.3.	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	83
3.	FABRICATION DE MICRO-OUTILS CYLINDRIQUES A HAUT FACTEUR DE FORME.....	85
3.1.	METHODES DE FABRICATION DE MICRO-OUTILS CYLINDRIQUES	85
3.1.1.	<i>Fabrication de micro-outils par électroérosion</i>	85
3.1.2.	<i>Fabrication d'outils par gravure électrochimique</i>	86
3.2.	GRAVURE ELECTROCHIMIQUE DU TUNGSTENE	87
3.2.1.	<i>Généralités.....</i>	87
3.2.2.	<i>Dissolution électrochimique du tungstène.....</i>	87
3.2.3.	<i>Disposition expérimental de gravure de 1^{ère} génération</i>	90
3.3.	DEVELOPPEMENT INSTRUMENTAL.....	92
3.3.1.	<i>Effets des ménisques.....</i>	92
3.3.2.	<i>Intégration du poste de gravure électrochimique des micro-outils dans la machine de 2^{ème} génération</i>	94
a)	Cellule électrochimique.....	94
b)	Electronique de gravure	95
3.4.	DEVELOPPEMENT DU PROTOCOLE DE FABRICATION DES MICRO-OUTILS	97
3.4.1.	<i>Généralités.....</i>	97
3.4.2.	<i>Expression du diamètre central de l'haltère en négligeant l'effet des ménisques</i>	100
3.4.3.	<i>Protocole de gravure avec une diminution linéaire du diamètre</i>	101
3.4.4.	<i>Reproductibilité du protocole de fabrication des micro-outils.....</i>	104
a)	Reproductibilité de la 1ère étape ($\Phi_{MOY} = 146,35 \mu\text{m}$).....	104
b)	Reproductibilité du protocole complet ($\Phi_{MOY} = 32,6 \mu\text{m}$).....	105
3.5.	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	107
4.	FRAISAGE PAR MICROELECTROEROSION.....	110
4.1.	DEFINITIONS DES PRINCIPAUX PARAMETRES D'USINAGE.....	110
4.2.	PROTOCOLES EXPERIMENTAUX	110

4.2.1.	<i>Préparation de la machine</i>	111
4.2.2.	<i>Préparation du micro-outil</i>	111
a)	Fabrication par gravure électrochimique	111
b)	Rinçage, arasage et séchage.....	111
c)	Mesure et caractérisation	112
4.2.3.	<i>Préparation du substrat</i>	112
a)	Planéité et état de surface du substrat	112
b)	Réglage de la caméra 1.....	112
c)	Réglage de l'horizontalité du substrat.....	113
4.2.4.	<i>Paramétrages des usinages</i>	113
a)	Réglage de l'entrefer initial	113
b)	Réglage du générateur	114
c)	Choix des paramètres de caractérisation des décharges	114
d)	Régulation de l'entrefer	114
e)	Conversion des données CAO.....	114
f)	Définition des passes d'usinage.....	115
g)	Paramètres cachés	116
4.2.5.	<i>Exécution des usinages</i>	116
4.2.6.	<i>Caractérisation des usinages</i>	117
a)	Caractérisation optique.....	117
b)	Caractérisation au profilomètre mécanique	117
c)	Caractérisation au MEB.....	117
d)	Caractérisation des décharges.....	117
4.3.	USINAGE DE CANAUX / EFFET DE LA CAPACITE DE TRAVAIL ET VITESSE DES AXES	118
4.3.1.	<i>Objectif</i>	118
4.3.2.	<i>Conditions expérimentales</i>	118
4.3.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	119
4.4.	USINAGES DE CANAUX PROFONDS / EFFET DE LA PROFONDEUR DE CONSIGNE H_c	121
4.4.1.	<i>Objectif</i>	121
4.4.2.	<i>Condition expérimentales</i>	121
4.4.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	122
a)	Comparaison des usinages à profondeur de consigne croissante	122
b)	Etude d'un usinage particulier (profondeur de consigne : 300 μm).....	125
c)	Etude des autres cas.....	127
4.4.4.	<i>Discussion</i>	129
4.4.5.	<i>Conclusion</i>	129
4.5.	USINAGE D'UN INSERT PROFOND / EFFET DE LA VITESSE ET VERTICALITE DES FLANCS	130
4.5.1.	<i>Objectif</i>	130
4.5.2.	<i>Conditions expérimentales</i>	130
4.5.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	131
a)	Dimensions des canaux et de la nervure – facteur de forme	131
b)	Verticalité des flancs.....	132
c)	Usure de l'outil	133
d)	Nombre de contact et décharges détectés	134
4.5.4.	<i>Conclusion</i>	134
4.6.	TAUX DE RECOUVREMENT LATERAL / EBAUCHE D'UN INSERT	136
4.6.1.	<i>Objectif</i>	136
4.6.2.	<i>Conditions expérimentales</i>	137
4.6.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	138
a)	Recouvrement $R = 20\%$ - profondeur de consigne $H_c = 50 \mu\text{m}$	138

b)	Recouvrement R = 50 % - profondeur de consigne $H_c = 114 \mu\text{m}$	140
c)	Recouvrement R = 75 % - profondeur de consigne $H_c = 50 \mu\text{m}$	141
4.6.4.	<i>Conclusion</i>	142
4.7.	REGULATION DE L'ENTREFER ELECTRODE-SUBSTRAT.....	144
4.7.1.	<i>Objectif</i>	144
4.7.2.	<i>Conditions expérimentales</i>	144
a)	Parcours d'usinage.....	144
b)	Principe de la régulation.....	144
c)	Démonstration du principe de la régulation.....	145
4.7.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	146
a)	Caractérisation optique des canaux usinés.....	146
b)	Taux d'enlèvement de matière et usure.....	148
c)	Caractérisation électrique des canaux usinés.....	148
4.7.4.	<i>Conclusion</i>	149
4.8.	ENERGIE DES DECHARGES / EFFET DE LA RESISTANCE DE BALLAST.....	151
4.8.1.	<i>Objectif</i>	151
4.8.2.	<i>Conditions expérimentales</i>	151
4.8.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	152
a)	Caractérisations optiques.....	152
b)	Caractérisations électriques à l'oscilloscope numérique.....	153
c)	Caractérisations électriques avec la carte de caractérisation.....	155
d)	Enlèvement de matière et usure de l'outil.....	155
e)	Estimation du gap vertical et du gap latéral.....	156
f)	Nombre de décharges / cartographie des décharges.....	157
4.8.4.	<i>Conclusion</i>	158
4.9.	USINAGE D'UNE CAVITE / EFFET DE LA RESISTANCE DE BALLAST.....	159
4.9.1.	<i>Objectif</i>	159
4.9.2.	<i>Conditions expérimentales</i>	159
4.9.3.	<i>Résultats expérimentaux</i>	160
a)	Caractérisation optique.....	160
b)	Caractérisation avec l'oscilloscope numérique.....	160
c)	Caractérisation avec la machine de μEE	164
d)	Superposition des caractérisations.....	164
4.9.4.	<i>Conclusion</i>	166
4.10.	USINAGE AVEC UN MICRO-OUTIL DE $3 \mu\text{m}$ DE DIAMETRE.....	168
4.10.1.	<i>Objectif</i>	168
4.10.2.	<i>Conditions expérimentales</i>	168
4.10.3.	<i>Conditions expérimentales</i> Erreur ! Signet non défini.	
a)	Usinage avec une profondeur de consigne de $5 \mu\text{m}$	168
b)	Usinage par une profondeur de consigne de $20 \mu\text{m}$	169
c)	Usinage par une profondeur de consigne de $50 \mu\text{m}$	170
4.10.4.	<i>Conclusion</i>	171
4.11.	CONCLUSION DU CHAPITRE.....	172
a)	Usinage de canaux simples sans régulation.....	172
b)	Usinage de canaux simples avec régulation.....	172
c)	Usinage de cavités.....	173
d)	Influence de la résistance de ballast.....	173
e)	Usinage avec des micro-outils de 3 et $9 \mu\text{m}$ de diamètre.....	173
CONCLUSION GENERALE.....		174

a) Bilan.....	174
f) Perspectives à court terme avec la machine de 2 ^{ème} génération	175
g) Perspectives à plus long terme.....	176
ANNEXE 1 - PROCEEDINGS OF THE 4M2013, SAN SEBASTIAN-SPAIN, 8-10TH OCTOBER 2013	179
ANNEXE 2 - PROCEEDINGS OF THE 4M2015, MILAN, ITALY, 31TH – 2ND APRIL 20.....	183
ANNEXE 3 - COMMANDE DE L’ACTIONNEUR PIEZOELECTRIQUE VIA LE μC3	187
ANNEXE 4 - EFFET DES MENISQUES SUR LE DIAMETRE CENTRAL DE L’HALTERE.....	191
ANNEXE 5 - PARCOURS D’OUTIL ET FABRICATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR (FAO).....	194
ANNEXE 6 - RUGOSITE DE SURFACE	196
ANNEXE 7 - COMPARAISON ENTRE UN USINAGE AVEC ET SANS REGULATION	197
ANNEXE 8 - AUTRES EXEMPLES D’USINAGE	199
ANNEXE 9 - PROBLEMES RENCONTRES LORS DES USINAGES	202
BIBLIOGRAPHIE	203

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Principe du fraisage par microélectroérosion.....	23
Figure 2 – Exemples de micro-outils. (a) Microfraise pour l'enlèvement de copeaux (diamètre 30 μm ; rapport de forme 1,5) d'après [12]; (b) micro-outil en tungstène pour la μEE (diamètre 4 μm ; rapport de forme 20) d'après [13].	24
Figure 3 – Principe de la machine INL à double poste d'après [16] : (a) gravure électrochimique d'un micro-outil à partir d'un barreau de tungstène de 250 μm de diamètre ; (b) fraisage par μEE à l'aide de l'outil.	24
Figure 4 – Définition de la résolution d'usinage dans le cas de l'usinage d'un canal.	27
Figure 5 – Usinage d'une nervure.....	27
Figure 6 – Deux significations du terme micro-usinage en lien avec la précision (a) et la résolution d'usinage (b).	28
Figure 7 – (a) Premiers tests de décharges érodantes et (b) cercles d'impacts d'érosion de la cathode découverts par Joseph Priestley d'après [11][12].	28
Figure 8 – Principe de l'usinage par électroérosion d'après [26].	29
Figure 9 – Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [27], [34].....	30
Figure 10 – Phase de claquage d'après [27].	31
Figure 11 – Phase de décharge d'après [27].	32
Figure 12 – Phase de fin de décharge d'après [27].	32
Figure 13 – Phase de post-décharge d'après [27].	33
Figure 14 – Différentes variantes d'usinage par μEE . (a) Electroérosion à enfoncement, (b) électroérosion à fil; (c) perçage par électroérosion et (d) fraisage par électroérosion.....	33
Figure 15 – Illustration de l'électroérosion à fil: usinage de pièces complexes en 3D [46][47].	34
Figure 16 – Fraisage par μEE avec un outil tubulaire en rotation d'après [52]. (a) Principe de base. (b) Double cavité en acier usinée avec des outils en cuivre de 0,8 mm et 0,3 mm de diamètre ; la largeur de la nervure est de 0,15 mm. (c) Cavité complexe à fort rapport d'aspect.	35
Figure 17 – Générateurs de décharges pour l'usinage par électroérosion. (a) Générateur à relaxation ; (b) Générateur d'impulsions rotatif ; (c) Générateur d'impulsions par transistor et (d) Générateur d'impulsions iso-énergétique [46][53][54][55][56].....	35
Figure 18 – Formes de décharges produites par un circuit RC. (a) Décharge unique [57][58] ; (b) série de décharges [13][59].	36
Figure 19 – Signaux typiques de décharges électriques produites par un générateur d'impulsions par transistor [13][46].....	37
Figure 20 – Comparaison entre un cratère en électroérosion conventionnelle et en microélectroérosion d'après Uhlmann (échelle 5 μm) [66]. Echelle 5 μm	38
Figure 21 – Microélectroérosion par enfoncement.....	40
Figure 22 – Microélectroérosion à fil avec un fil ultrafin de tungstène de 13 μm de diamètre d'après [82]. (a) Usinage horizontal ou vertical. (b) μEE inverse ou usinage hélicoïdal.	41
Figure 23 – Exemples d'usinage en μEE à fil avec un fil en tungstène ultrafin d'après [82]. (a) Fentes de 15,6 μm de largeur dans un acier SUS304 d'épaisseur 230 μm . (b) Electrodes interdigitées en acier SUS304 avec un écart de 15 μm . (c) Tour en tungstène de 2,8 mm de hauteur avec un pinacle de largeur 10 μm et de hauteur 134 μm	41

Figure 24 – Machine MG-ED72W d’après [96]. (a) Vue générale. (b) Poste de fabrication du micro-outil par WEDG.	45
Figure 25 – Les différentes étapes du procédé d’usinage avec la machine MG-ED72W d’après [97].	45
Figure 26 – Fabrication d’outil par WEDG. (a) Système de guidage du fil d’après [96]. (b) Outil de 96 μm de diamètre (MEB) d’après [97].	46
Figure 27 – Machine de fraisage par μEE EM203 d’après [99]. (a) Disposition des postes. (b). Broche tournante. (c) Poste WEDG.	46
Figure 28 – Amincissement d’une électrode-outil de 300 μm à 25 μm de diamètre par WEDG d’après [99].	47
Figure 29 – Machine de fraisage par μEE SX-100. (a) Vue d’ensemble d’après [101]. (b) Poste de fabrication des outils par WEDG d’après [100]. (c) Poste de fraisage par μEE d’après [100].	47
Figure 30 – Dimensions et procédés d’usinage avec les générateurs SX-MPS, SX-MFPS et SX-UFPS d’après [101].	48
Figure 31 – Exemples d’application de la technologie Sarix dans différents domaines de l’industrie d’après [101].	49
Figure 32 – Micro-turbine réalisée par fraisage par μEE d’après [102].	49
Figure 33 – Réalisation d’un moule d’injection par combinaison entre fraisages par enlèvement de copeaux et par μEE d’après [104]. (a) et (b) Réalisation de l’ébauche par fraisage par enlèvement de copeaux. (c) et (d) Usinage des microstructures par fraisage par μEE	50
Figure 34 – Machine usinage hybride DT-100 d’après [65].	51
Figure 35 – Usinages à haute résolution par fraisage et perçage par μEE avec la machine DMT-100 d’après [65]. Générateur RC : 1 $\text{k}\Omega$, capacité parasite (~ 20 pF). Tension d’usinage : 60 V. Durée des décharges 30 ns avec un courant crête de 200 mA. Diélectrique : huile minérale EDM 3 de Total. Acier inoxydable SUS 304.	51
Figure 36 – Vues MEB de microcanaux et micro tenons usinés dans l’eau déionisée d’après [105]. (a), (c), (e) : 50 $\mu\text{m/s}$. (b), (d), (f) : 50 $\mu\text{m/s}$	52
Figure 37 – (a) Gravure électrochimique d’un fil de Pt-Ir ; (b) Outil obtenu à partir d’un fil de 250 μm de diamètre d’après [17].	54
Figure 38 – Développement préliminaire effectué à l’INL d’après [17]. (a) Module d’usinage par μEE ; (b) Principe du générateur de décharges.	55
Figure 39 – Usinages effectués par Benilov et al. [17]. (a) Perçage d’un trou de part en part avec une électrode de 100 μm . (b) Cavité de 250 x 250 μm avec pilier central de largeur 1 μm . (c) Canal microfluidique relié à une cuve de 250 x 250 μm	56
Figure 40 – Impacts élémentaires réalisés par μEE d’après [16][17]. (a) Microscope optique. (b) MEB. (c) et (d) Microscope à force atomique. Tension d’usinage 30 V ; résistance de charge 100 Ω ; capacité 33 nF pour (a), 4,7 nF pour (b), (c) et (d).	56
Figure 41 – Principe de la machine à double poste d’après [13]. (a) Gravure électrochimique d’un micro-outil. (b) Fraisage par μEE à l’aide de l’outil.	57
Figure 42 – Schéma de principe de l’électronique de commande de la machine de μEE de 1 ^{ère} génération [13].	58
Figure 43 – Première génération de machine de micro-usinage par électroérosion [13].	59
Figure 44 – Générateur des décharges du type Lazarenko à relaxation d’après [13].	60
Figure 45 – Capture d’écran par oscilloscope des décharges en cours d’usinage. En bleu : d.d.p. aux bornes de C_c . Violet : d.d.p. entre le point POL et le point de référence GND2. Vert : courant qui traverse l’outil ($I_V=I_A$). $R_b = 0 \Omega$	61

Figure 46 – Essais réalisés avec la machine de 1 ^{ère} génération d'après [13]. (a) Micro-outil en tungstène ($\phi = 4 \mu\text{m}$; $F_f = 20$). (b) Série de trous usinés dans l'acier inoxydable. (c) Canal microfluidique ($W = 40 \mu\text{m}$; $H = 15 \mu\text{m}$).	61
Figure 47 – Les différentes constantes de temps de l'usinage par μEE	64
Figure 48 – Solution retenue pour la commande électronique de la machine de μEE de 2 ^{ème} génération.	65
Figure 49 – Vue de la machine de 2 ^{ème} génération avec les postes gravure et usinage sur la table anti vibration et les armoires électronique (à gauche) et fluidique (à droite).	66
Figure 50 – Principales fonctions de la machine de μEE : (a) Fabrication de micro-outils par gravure électrochimique; (b) Fraisage sur substrat en acier inoxydable par μEE	67
Figure 51 – Vue détaillée de la machine de μEE de 2 ^{ème} génération.	68
Figure 52 – Vue détaillée du poste de μEE	69
Figure 53 – Actionnement triple du micro-outil.	69
Figure 54 – (a) Diagramme général du système de commande et de pilotage des axes X, Y et Z; (b) pilotage de l'axe PI M-511.2S avec le circuit de commande SMC11.	70
Figure 55 – Principe de l'étude de répétabilité des déplacements de la platine PI M511.2S.	71
Figure 56 – Etude de répétabilité de déplacement d'un axe PI M511.	72
Figure 57 – Pousse fil. (a) Schéma de principe. (b) Réalisation.	72
Figure 58 – Régulation de l'entrefer avec l'actionneur piézoélectrique.	73
Figure 59 – Commande électronique de l'actionneur piézoélectrique.	74
Figure 60 – Schéma de principe du circuit de commande de l'actionneur piézoélectrique.	74
Figure 61 – Architecture à trois microcontrôleurs de la machine de μEE de 2 ^{ème} génération.	75
Figure 62 – Générateur de décharges utilisées dans la 2 ^{ème} génération de machine de μEE	76
Figure 63 – Décharges obtenues avec le générateur des décharges type Lazarenko. (a) Décharges avec $R_b = 100 \Omega$; (b) Décharges avec inversion de polarité ($R_b=0$).	77
Figure 64 – Schéma de principe du circuit de caractérisation des décharges.	78
Figure 65 – Fonctionnement du circuit de caractérisation des décharges. (a) Image de la chute de potentiel aux bornes de C_C en sortie du suiveur et positionnement des seuils de caractérisation. (b) Sortie des comparateurs en fonction des seuils de référence.	79
Figure 66 – Organigramme de commande du mouvement d'un axe.	81
Figure 67 – Circuit fluidique pour l'usinage par électroérosion.	82
Figure 68 – Evolution de la conductivité de l'eau déionisée.	82
Figure 69 – Différentes méthodes de fabrication de micro-outils cylindriques à haut facteur de forme par électroérosion [44][141][142].	86
Figure 70 – Micro-outils obtenus par électroérosion par les méthodes suivantes: (a) et (b) bloc stationnaire; (c) disque en rotation ; (d) érosion à fil [141][142].	86
Figure 71 – Diagramme E-PH pour le système W-H ₂ O à 25°C, $[W]=10^{-4}$ [153], [155], [152].	87
Figure 72 – Principe de gravure par électrochimie d'un barreau de tungstène [147], [151], [154], [159].	88
Figure 73 – Illustration de l'effet drop-off: (a) formation du ménisque; (b) à (e) flux d'ions de WO_4^{2-} formant une couche dense autour de la tige. Au voisinage du ménisque, la gravure de la tige est plus rapide; (e) rupture de la partie inférieure de la tige par l'effet drop-off [155].	89
Figure 74 – Instabilité de Plateau-Rayleigh d'après [162].	89

Figure 75 – Tensions de surface et phénomène du ménisque. (a) Schématisation du flux d'ions WO_4^{2-} d'après [161] ; (b) Evolution de l'épaisseur d'un film de polyéthylène glycol (0,3 wt %) d'épaisseur initiale de 150 μm le long d'un barreau en W de 300 μm de diamètre plongé dans une solution d'hexadécane; (c) mesure des pressions de capillarité et hydrostatique s'exerçant sur le fil de W ($\phi = 500\mu m$) [161].	90
Figure 76 – Courant appliqué entre tungstène et la contre-électrode de platine d'après [13].	91
Figure 77 – Dispositif électronique de gravure électrochimique des micro-outils en W.	91
Figure 78 – Séquence d'affûtage pour l'obtention d'un micro-outil d'après [13].	92
Figure 79 – Mise en évidence des ménisques: (a) Nature des fluides. (b) Photographie des ménisques bas (interface tungstène-huile-électrolyte) et haut (interface tungstène-électrolyte-air).	93
Figure 80 – Rôle et intérêt des deux ménisques. (a) Image d'un outil cylindrique fabriqué (partie du milieu, $\phi = 15 \mu m$); (b) Schéma représentant un probable sens d'écoulement du film d'ions WO_4^{2-} en présence de deux ménisques.	93
Figure 81 – Cellule de gravure électrochimique avec le dispositif fluidique permettant de renouveler la solution d'électrolyte.	94
Figure 82 – Poste de gravure électrochimique dans la machine de μEE de 2 ^{ème} génération.	95
Figure 83 – Principe de la carte de génération des impulsions de gravure après modification.	95
Figure 84 – Attaque du barreau de W à tension nulle.	96
Figure 85 – Principe du micromètre laser Mitutoyo LSM-500S.	97
Figure 86 – Etapes de fabrication d'un micro-outil dans la machine de 2 ^{ème} génération. (1) Plongée du barreau jusqu'à l'immersion de son extrémité dans l'huile ; (2) formation de l'haltère par gravure électrochimique ; (3) remontée de la partie inférieure de l'haltère dans la solution d'hydroxyde de sodium ; (4) coupure de l'extrémité par voie électrochimique (drop-off); (5) dégagement de l'outil.	98
Figure 87 – Caractéristiques géométriques d'un micro-outil.	99
Figure 88 – Exemple de fabrication d'un micro-outil par étapes. (a) Profils successifs de l'outil à chaque étape de gravure avec le profilomètre laser ; (b) vue à la caméra du micro-outil après coupure.	99
Figure 89 – Principe de calcul du volume gravé électrochimiquement. (a) Barreau avant gravure ; (b) haltère après gravure en négligeant l'effet du ménisque ; (c) haltère après gravure en prenant en compte les effets du ménisque.	101
Figure 90 – Image prise à la camera de l'outil après coupure.	102
Figure 91 – Evolution du volume total enlevé en fonction de la charge électrique totale appliquée (comparaison entre le volume mesuré et le volume théorique).	103
Figure 92 – Evolution du diamètre de l'outil en fonction du temps pendant la gravure électrochimique.	103
Figure 93 – Profil de trois outils fabriqués avec le protocole de gravure du Tableau 11.	104
Figure 94 – Ecart en (%) en valeur absolue entre les profils des trois outils fabriqués pour une longueur totale de 7 mm.	105
Figure 95 – Evolution du diamètre moyen des 5 outils fabriqués.	106
Figure 96 – Evolution du volume de matière gravée pour chaque outil fabriqué en fonction de la quantité de charge électrique appliquée.	106
Figure 97 – Exemples d'outils ultrafins.	107
Figure 98 – Défaut de surface d'un micro-outil de 15 μm de diamètre vu au MEB.	108
Figure 99 – Etapes successives pour l'usinage par μEE .	111
Figure 100 – Arasage de l'outil par électroérosion inverse.	112

Figure 101 – Réglage de la planéité du substrat en trois points.	113
Figure 102 – (a) Illustration d'un parcours d'outil; (b) recouvrement latéral du parcours d'outil.	115
Figure 103 – Principe d'usinage d'un canal simple. (a) Parcours d'outil ; (b) vue de face et (c) vue de coupe de l'ensemble outil-substrat au cours d'usinage.	119
Figure 104 – Outil d'usinage (1) et réseau de canaux usinés à différentes vitesses avec :	120
Figure 105 – Influence de la capacité C_C et de la vitesse de l'axe sur la profondeur H (a) et la largeur W (b) des canaux usinés.	120
Figure 106 – Usinages de canaux à différentes profondeurs de consigne H_c	121
Figure 107 – Image des canaux avec une profondeur de consigne H_C croissante (50, 100, 150, 200, 250 et 300 μm). (a) Vue de dessus des canaux usinés (caméra 1 de la machine de μEE) ; (b) images des motifs en PDMS vue de dessus (caméra 1) ; (c) images des motifs en PDMS vue de face (caméra 2 de la machine de μEE). On notera les reflets sur le substrat délimités par la ligne blanche.	122
Figure 108 – Largeur W et profondeur H des canaux en fonction de la profondeur de consigne H_c	122
Figure 109 – Gap latéral γ_L en fonction de H_C	123
Figure 110 – Usinage de canaux profonds : images de l'usure de l'outil.	123
Figure 111 – Influence de la profondeur de consigne H_C sur le TEM et le TUO.	123
Figure 112 – Usure relative de l'outil TURO en fonction de la profondeur de consigne H_C	124
Figure 113 – Influence de la profondeur de consigne sur : (a) le nombre total de décharges électriques et de contacts mécaniques détectés ; (b) le nombre de décharges par mm^3 de matière usinée.	124
Figure 114 – (a) Cartographie des contacts détectés lors de l'usinage d'un canal avec $L = 500 \mu\text{m}$ et $H_C = 300 \mu\text{m}$; (b) évolution du nombre de contacts par tranches de 50 μm en Z.	125
Figure 115 – Cartographie en couleur dans le plan YZ du nombre de décharges détectées par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ ($H_C = 300 \mu\text{m}$ et $L = 500 \mu\text{m}$). Echelle en X et Y : 5 μm / unité.	126
Figure 116 – Représentation surfacique en 3D du nombre de décharges détectées par tranche d'épaisseur 5 μm ($H_C = 300 \mu\text{m}$ et $L = 500 \mu\text{m}$).	126
Figure 117 – Superposition de la cartographie des contacts et de la représentation en couleur des décharges ($H_c = 300 \mu\text{m}$). Echelle en X et Y : 5 μm / unité.	127
Figure 118 – Représentation graphique des décharges et des contacts des canaux en fonction de la profondeur de consigne : Six usinages différents effectués avec $H_c = 50, 100, 150, 200, 250$ et $300 \mu\text{m}$. Echelle en X et Y : 5 μm / unité.	128
Figure 119 – (a) Canal rectangulaire de longueur L 500 μm et de largeur W 100 μm usiné avec une profondeur de consigne H_C de 300 μm . (b) Moulage PDMS. (c) Parcours d'outil.	130
Figure 120 – Usinages réalisés avec trois vitesses de déplacement différentes : (a) pièces usinées ; (b) moulages en PDMS. Vues de dessus.	131
Figure 121 – Profondeur du canal et longueur d'usure de l'outil en fonction de la vitesse.	132
Figure 122 – Gap latéral en haut et au fond d'un canal.	132
Figure 123 – Influence de la vitesse sur l'usure de l'outil.	133
Figure 124 – (a) Influence de la vitesse sur le TUO et sur le TEM. (b) Influence de la vitesse sur le TURO.	133
Figure 125 – Influence de la vitesse sur le nombre total des décharges et de contacts détectés par le circuit de caractérisation.	134

Figure 126 – Image de l'insert prise par un microscope numérique HIROX KH-8700 (R=20%).....	136
Figure 127 – Définition du taux de recouvrement latéral du parcours d'outil.	137
Figure 128 – Usinage d'un insert avec R=20% : parcours d'outil d'une couche en rouge superposé au résultat de l'usinage (photographie).	138
Figure 129 – (a) Résultat d'usinage avec un recouvrement R = 20 % (vue de dessus avec la caméra) ; (b) usure de l'outil (vue de face avec la caméra) ; (c) Profil de la cavité mesuré au profilomètre mécanique DEKTAK 150.	139
Figure 130 – Usinage d'un insert avec R=50% : parcours d'outil d'une couche en rouge superposé au résultat d'usinage (caméra 2).	140
Figure 131 – (a) Insert usiné avec R = 50% (caméra 2) ; (b) mesure optique du gap latéral (caméra 1) ; (c) Profil de la cavité mesuré au profilomètre mécanique DEKTAK 150.	140
Figure 132 – Usinage d'un insert avec R=75% : parcours d'outil d'une couche en rouge superposé au résultat d'usinage (photographie).	141
Figure 133 – (a) Insert usiné avec R = 75% ; (b) mesure optique de l'usure latérale de l'outil ; (c) Profil de la cavité mesuré au profilomètre mécanique DEKTAK 150.	142
Figure 134 – Estimation de la durée d'usinage (minutes) rapportée à une profondeur de consigne de 50 μm en fonction du taux de recouvrement.	142
Figure 135 – Influence du taux de recouvrement sur le TEM, le TUO (a) et le TURO (b).	143
Figure 136 – Principe de la régulation de l'entrefer.	145
Figure 137 – Signaux de commande de la régulation: (a) début de l'usinage; (b) déclenchement de la régulation au cours de l'usinage.	145
Figure 138 – Usinages de canaux rectangulaires avec régulation de l'entrefer. (a) Vue de dessus des canaux usinés; (b) Vue de face des motifs moulés en PDMS et de leur reflet.	146
Figure 139 – Mesure de l'angle d'inclinaison β des flancs des canaux usinés. (a) Définition de l'angle d'inclinaison β ; (b) mesure de β au MEB pour une profondeur de consigne H_c de 100 μm ($\beta = 77,5^\circ$) et H_c de 200 μm ($\beta = 82^\circ$) ; (c) Mesure optique de β sur la pièce moulée en PDMS pour $H_c = 200 \mu\text{m}$ ($\beta = 85,5^\circ$).	147
Figure 140 – (a) Mise au point sur le mur de la nervure centrale ; (b) Reconstitution en 3D du motif usiné ($H_c = 200 \mu\text{m}$). Microscope numérique MEIJI MT8100L NUM.	147
Figure 141 – Evolution de la largeur et de la profondeur des canaux usinés en fonction de la profondeur de consigne H_c (usinage avec régulation de l'entrefer).	148
Figure 142 – TEM, TUO (a) et TURO (b) en fonction de H_c (régulation de l'entrefer).	148
Figure 143 – Caractérisation des décharges électriques avec régulation du gap. (a) Décharges accumulées durant la durée totale des décharges ; (b) Nombre de décharges par couche usinée (profondeur de passe 1 μpas).	149
Figure 144 – Micro-outil $\varnothing 9 \mu\text{m}$: (a) vue optique ; (b) caractérisation au profilomètre laser.	151
Figure 145 – Usinage de canaux avec différentes résistances de ballast de 5 à 500 Ω	152
Figure 146 – Images au microscope électronique à balayage des canaux usinés.	152
Figure 147 – Images au microscope électronique à balayage des motifs moulés en PDMS.	153
Figure 148 – Influence de R_b sur la profondeur H et la largeur W des canaux usinés (par recouplement des caractérisations optique et MEB sur les pièces usinées et moulées).	153
Figure 149 – Décharges types mesurées à l'oscilloscope numérique Tektronix DPO2024 avec : (1) $R_b = 5 \Omega$; (2) $R_b = 20 \Omega$; (3) $R_b = 100 \Omega$; (4) $R_b = 200 \Omega$; et (5) $R_b = 500 \Omega$	154

Figure 150 – Energie de décharges types en fonction de la résistance de ballast.	154
Figure 151 – Nombre de décharges détectées en fonction de la résistance de ballast : mise en évidence des insuffisances du circuit de caractérisation.	155
Figure 152 – (a) Entrefer initial à l'air. (b) à (f) Usure de l'outil pour différentes valeurs R_b	155
Figure 153 – (1) Outil en début d'usinage à l'entrefer initial ; (2) Outil en fin d'usinage à l'entrefer initial ; (3) Remontée de l'outil d'une valeur de H_c afin d'évaluer l'usure.....	156
Figure 154 – (a) Evolution du nombre total de décharges suivant l'axe Z pour $R_b = 5 \Omega$. (b) Nombre de décharges détectées par tranches de $10 \mu\text{pas}$ pour $R_b = 5 \Omega$	157
Figure 155 – Illustration du parcours d'outil pour l'usinage de la cavité carré.....	159
Figure 156 – Etat de surface d'une cavité usinée. (a) $R_b = 0 \Omega$. (b) $R_b = 100 \Omega$	160
Figure 157 – Enregistrement des signaux des décharges pour des usinages avec et sans résistance de ballast (oscilloscope LECROY).	161
Figure 158 – Décharges de type A pour les valeurs de R_b 0 et 100 Ω	162
Figure 159 – Signaux de type B pour les valeurs de R_b 0 et 100 Ω	162
Figure 160 – Puissance instantanée véhiculée par les décharges de type A pour les valeurs de R_b 0 et 100 Ω	162
Figure 161 – Puissance véhiculée par les signaux de type B pour R_b 0 et 100 Ω	163
Figure 162 – Etude statistique des décharges détectées à l'oscilloscope numérique suivant leur énergie pour R_b 0 et 100 Ω (échantillon de 210 décharges).	164
Figure 163 – Reconstitution spatiale des décharges détectées de type A. (a) $R_b = 0 \Omega$. (b) $R_b = 100 \Omega$	165
Figure 164 – (a) et (b) : vues optique de la cavité (cf. Figure 156). (c) et (d) : cartographie de décharges de type A par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ en XY, respectivement avec $R_b = 0 \Omega$ et $R_b = 100 \Omega$; chaque valeur représente la somme des décharges de type A pour les 6 couches de la Figure 163.	166
Figure 165 – Images des canaux usinées à $H_C = 5 \mu\text{m}$ avec : (a) $C_C = 0,1 \text{ nF}$; (b) $C_C = 1 \text{ nF}$; (c) vue de l'outil $\Phi 3 \mu\text{m}$ à la caméra 1.	169
Figure 166 – Images des canaux usinées à $H_C = 20 \mu\text{m}$ avec : (a) $C_C = 0,1 \text{ nF}$; (b) $C_C = 1 \text{ nF}$; (c) longueurs d'usure du micro-outil.....	170
Figure 167 – (a) Images optiques des canaux usinées à $H_C = 50 \mu\text{m}$ avec : (b) longueur d'usure du micro-outil ; (c) Images MEB du canal usiné avec $C_C = 0,1 \text{ nF}$	170
Figure 168 – Paramètres de commande de l'actionneur piézoélectriques.	187
Figure 169 – (a) Réglage de l'entrefer initial via l'actionneur piézoélectrique en mode continu ; (b) commande en mode oscillatoire des vibrations du micro-outil.....	188
Figure 170 – Commande du DAC7614.	189
Figure 171 – Circuit d'amplification de la tension de sortie du DAC7614.	189
Figure 172 – Approximation parabolique du ménisque.	191
Figure 173 – (a) Profil de l'outil mesuré au profilomètre laser ; Courbes de régression du profil de l'outil au niveau du ménisque haut (b) et bas (c).	192
Figure 174 – Comparaison entre les profils décrits par la mesure au profilomètre laser, la courbe de régression et le modèle mathématique décrit par Lim et al. [180].	192
Figure 175 – Etapes de génération du parcours d'outil.	194
Figure 176 – Représentation de la rugosité de surface avec ses pics et ses creux[182].	196
Figure 177 – Images des cavités usinées sans (a) et avec (b) régulation de l'entrefer.	197

Figure 178 – Caractérisation des décharges et des contacts détectés pour les cavités sans et avec régulation de l'entrefer. En bleu : sans régulation. En rouge : avec régulation.	198
Figure 179 – Micro-canaux de 10,4µm.....	199
Figure 180 – Mur fin de 5 µm séparant deux trous profonds.	199
Figure 181 – Trous profonds.	200
Figure 182 – Mur fin de 13 µm.	200
Figure 183 – A gauche : images optiques de canaux usinés avec des tensions de 50 à 300 V. A droite : caractérisation au profilomètre mécanique.	200
Figure 184 – Spirale d'Archimède.....	201
Figure 185 – Destruction d'un micro-outil par un arc électrique.....	202
Figure 186 – Outil avant (a) et après (b) un usinage montrant le collage de débris.	202
Figure 187 – Usinage de cavité.	202

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Les différentes variantes de μ EE d’après [10], [66] et [67].	39
Tableau 2 – Machines commerciales de fraisage par μ EE d’après [13][90][91].	44
Tableau 3 – Possibilités en termes d’usinage par μ EE en fonction de la géométrie d’après [101].	48
Tableau 4 – Comparaison les dimensions et l’état de surface d’un outillage hybride et de la pièce injectée en polymère COC d’après [104].	50
Tableau 5 – Durée des impulsions de courant en fonction de la capacité de travail d’après [13], [109].	60
Tableau 6 – Table d’état des signaux d’activation et de réduction de courant des moteurs des platines.	71
Tableau 7 – Résistance du potentiomètre R1 et rapport de division en fonction de la tension d’usinage V_{EE} .	78
Tableau 8 – Comparaison entre le générateur d’impulsions de gravure avant et après modification.	96
Tableau 9 – Adaptation des paramètres temporels et électriques du générateur de gravure pour la linéarisation du diamètre au cours de l’affutage.	102
Tableau 10 – Evolution du diamètre de l’outil.	102
Tableau 11 – Protocole de fabrication.	104
Tableau 12 – Résultats expérimentaux.	104
Tableau 13 – Choix des paramètres du générateur de gravure électrochimique.	105
Tableau 14 – Résultats de mesures pour 5 micro-outils.	105
Tableau 15 – Paramètres d’usinage de base.	118
Tableau 16 – Paramètres d’usinage : canaux à différentes profondeurs de consigne.	121
Tableau 17 – Paramètres d’usinage – usinage d’un insert.	131
Tableau 18 – Gap latéral en haut des canaux, gap latéral en bas des canaux et inclinaison des flancs en fonction de la vitesse des axes.	133
Tableau 19 – Ordres de grandeur caractéristiques de l’usinage par EE rapportés au volume de matière enlevée.	134
Tableau 20 – Paramètres d’usinage : taux de recouvrement de l’outil en phase d’ébauche.	138
Tableau 21 – Dimensions de l’insert usiné avec $R= 20\%$; usure de l’outil et gap latéral.	139
Tableau 22 – Dimensions de l’insert usiné avec $R= 50\%$; usure de l’outil et gap latéral.	141
Tableau 23 – Dimensions de l’insert usiné avec $R= 75\%$; usure de l’outil et gap latéral.	142
Tableau 24 – Paramètres d’usinage: Régulation du gap.	144
Tableau 25 – Ordres de grandeur caractéristiques de l’usinage par EE rapportés au volume de matière enlevée.	149
Tableau 26 – Paramètres d’usinage – Effet la résistance de ballast R_b .	151
Tableau 27 – Influence de R_b sur l’enlèvement de matière et l’usure de l’outil.	156
Tableau 28 – Estimation du gap vertical et latéral.	157
Tableau 29 – Paramètres d’usinage – Usinage d’une cavité sans et avec R_b .	160
Tableau 30 – Paramètres d’usinage – Usinage de canaux avec un outil de $3 \mu\text{m}$.	168
Tableau 31 – Sélection de l’une des sorties du DAC.	188

<i>Tableau 32 – Choix des conditions de mesure de la rugosité Ra [183].</i>	196
<i>Tableau 33 – Paramètres d'usinage – Usinage de deux cavités sans et avec régulation de l'entrefer.</i>	197
<i>Tableau 34 – Ordres de grandeur caractéristiques de l'usinage par EE rapportés au volume de matière enlevée.</i>	198

LISTE DES ABREVIATIONS

CAO	Conception Assistée par Ordinateur
EE	Electroérosion conventionnelle
μEE	Microélectroérosion
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
IHM	Interface Homme Machine
MEB	Microscope Electronique à Balayage
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
μpas	Micropas
PDMS	Polydiméthylsiloxanne
WEDG	Wire Electrical Discharge Grinding

INTRODUCTION GENERALE

Ce travail a pour contexte une demande croissante en micro-dispositifs et micro-outils dans de nombreux secteurs tels que : automobile (buses d'injecteurs diesel [1]), aérospatiale (aubes de moteur d'avion avec des trous de refroidissement), chimie (microréacteurs chimiques en acier inoxydable [2]), microsystèmes (microturbines et paliers pour les MEMS de puissance [3], [4]), plasturgie (micro outillages [5]), médecine (dispositifs médicaux biocompatibles en titane [6], [7]), horlogerie, etc.

Dans notre laboratoire par exemple, il y a un fort intérêt pour réaliser des maitres-modèles en acier pour les tampons souples nécessaires à la plastronique 3D [8] ou encore pour thermoformer des dispositifs microfluidiques en polymère [9].

De plus en plus souvent, ces micro-dispositifs et micro-outils doivent être réalisées dans des matières (aciers inoxydables, aciers d'outillage, etc...) que l'on ne peut pas usiner par les techniques de microtechnologie issues de la filière silicium (usinage plasma, faisceau d'ions...) [10] [11]. En conséquence, différents procédés de micro usinage issus de la mécanique et de l'optique font l'objet d'une recherche active : microfraisage par enlèvement de copeaux, usinage laser, électroérosion, usinage électrochimique...

Parmi ces procédés, nous nous sommes intéressés à la miniaturisation de l'usinage par électroérosion (EE) et plus précisément au fraisage par microélectroérosion (fraisage par μ EE). Le principe de ce procédé (Figure 1), transposé du fraisage mécanique¹, repose sur l'utilisation d'une électrode-outil de forme cylindrique. Celle-ci suit un parcours 3D prédéfini par CAO afin d'usiner par étincelage une électrode-pièce. Les deux électrodes sont immergées dans un fluide diélectrique (eau déionisée dans ce mémoire) avec un écart de quelques micromètres, que nous appellerons entrefer. L'effet des décharges électriques est le creusement de la pièce (accompagné d'une usure de l'outil) avec expulsion dans l'entrefer de débris provenant des deux électrodes. Le renouvellement du fluide dans l'entrefer et le rapprochement de l'outil et de la pièce recréent les conditions autorisant de nouvelles décharges. Un choix judicieux de la forme de l'outil et du mouvement relatif d'une électrode par rapport à l'autre permet d'usiner progressivement la pièce. L'usinage d'une cavité est effectué par passages successifs.

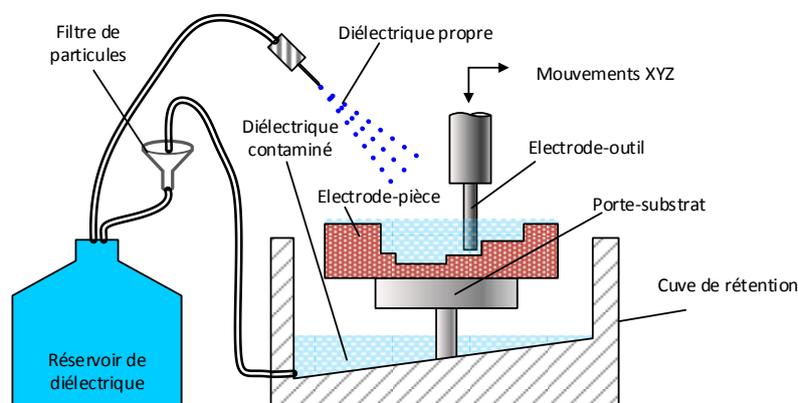


Figure 1 – Principe du fraisage par microélectroérosion.

¹ C'est-à-dire de l'usinage par enlèvement de copeaux avec un outil coupant.

Comme tous les autres procédés d'EE, le grand intérêt du fraisage par μ EE est qu'il permet d'usiner tous les matériaux conducteurs d'électricité comme les aciers, le titane, les carbures, ... ainsi que des semiconducteurs tels que le silicium.

C'est aussi un procédé d'usinage sans contact mécanique direct entre l'outil et la pièce, ce qui constitue un avantage important lorsque l'on utilise des micro-outils de petites dimensions. En effet, lors des usinages de matériaux tels que l'acier inoxydable, les micro-outils coupants sont détériorés à cause des contraintes générées par le process. Dans le cas de la μ EE, l'absence de contact permet de mettre en œuvre des outils très fins.

La Figure 2a montre l'un des plus petits micro-outils coupants (\varnothing 30 μ m) commercialisés à notre connaissance tandis la Figure 2b montre un micro-outil (\varnothing 4 μ m) élaboré à l'INL et prévu pour la μ EE. La fabrication de celui-ci repose sur une méthode de gravure électrochimique qui constitue l'un des points forts de la technologie. Comme nous le verrons dans ce mémoire, avec de tels micro-outils, il est possible d'usiner des formes complexes avec des détails fins (trous, nervures, canaux,...) à rapport d'aspect élevé.

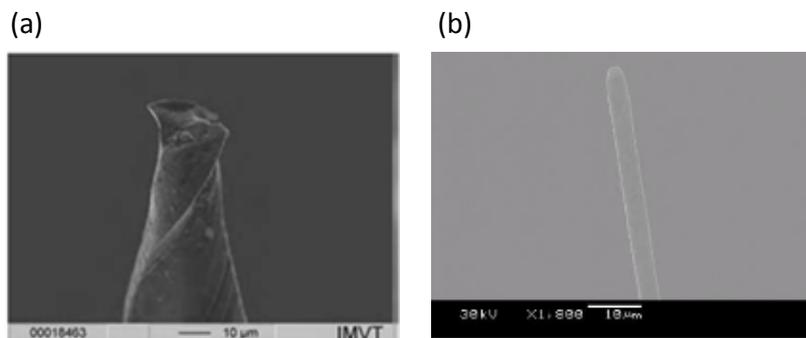


Figure 2 – Exemples de micro-outils. (a) Microfraise pour l'enlèvement de copeaux (diamètre 30 μ m ; rapport de forme 1,5) d'après [12]; (b) micro-outil en tungstène pour la μ EE (diamètre 4 μ m ; rapport de forme 20) d'après [13].

Ce travail a pour objectif d'optimiser un procédé d'usinage basé sur l'intégration (i) du procédé de fabrication de micro-outil par gravure électrochimique décrit ci-dessus [14] avec (ii) un procédé de fraisage par électroérosion ; le principe étant de pouvoir fabriquer et mettre en œuvre ces outils cylindriques ultrafins sans intervention de l'opérateur [15].

La Figure 3 montre le principe du dispositif avec un poste de fabrication des micro-outils par gravure électrochimique et un poste de fraisage par μ EE ; le passage d'un poste à l'autre étant automatique.

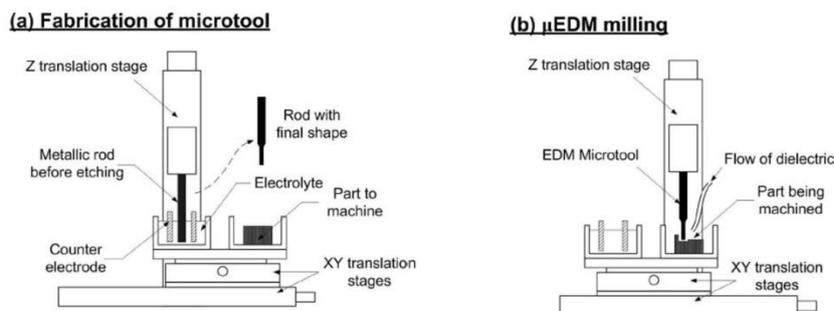


Figure 3 – Principe de la machine INL à double poste d'après [16] : (a) gravure électrochimique d'un micro-outil à partir d'un barreau de tungstène de 250 μ m de diamètre ; (b) fraisage par μ EE à l'aide de l'outil.

Ce travail fait suite à plusieurs études menées au laboratoire ; la stratégie de l'INL étant non pas d'acquérir une machine commerciale, qui aurait constitué une boîte noire, mais d'en développer une, de façon à pouvoir étudier tous les aspects du procédé. Le projet a été mené par étapes successives avec un travail préliminaire effectué durant la thèse d'A. Benilov [17]. Puis le laboratoire a développé une machine de 1^{ère} génération dans le cadre de la thèse de G. Girardin [13]. Pour ma part, j'ai procédé au développement d'une machine de 2^{ème} génération avec des possibilités inédites, qui seront vues dans ce mémoire : génération d'étincelles de faible énergie (1-10 nJ), cartographie des décharges pendant un usinage, etc.

Le mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le chapitre 1 est consacré à une étude bibliographique du procédé d'usinage par électroérosion (EE) puis du fraisage par microélectroérosion.

Dans le chapitre 2, nous commencerons par un bref rappel des travaux antérieurs puis nous décrirons la machine d'usinage de 2^{ème} génération développée durant cette thèse, plus précisément le poste de fraisage par μ EE¹. Nous commencerons par une description globale du fonctionnement de la machine avant de décrire les différents modules du poste de fraisage par μ EE. Une telle analyse est nécessaire avant d'appréhender les possibilités et les limites de l'instrument qui seront vues au chapitre 4.

Le chapitre 3 aura pour objet de décrire le procédé de fabrication des micro-outils par gravure électrochimique. Nous commencerons par un rappel des travaux antérieurs avant de faire le point sur les progrès accomplis. Il s'agira de montrer comment nous obtenons les micro-outils qui seront mis en œuvre dans le chapitre 4. En effet, un diamètre fin est nécessaire pour une bonne résolution d'usinage tandis qu'une hauteur importante permet de creuser des structures profondes et de compenser l'usure de l'outil.

Dans le chapitre 4, nous étudierons les possibilités offertes par la poste de fraisage par μ EE avec une série d'expériences menées durant la dernière phase du développement de la machine. L'objectif est d'avoir accès aux ordres de grandeur caractéristiques du procédé (taux d'enlèvement de matière, usure de l'outil, résolution d'usinage, état de surface,...) et d'aboutir à un jeu de paramètres d'usinage du matériau choisi pour la pièce, en l'occurrence un acier inoxydable. Des solutions originales pour réduire l'énergie par décharge et faciliter la caractérisation du procédé (cartographie des décharges et des contacts) seront testées.

Une conclusion permettra de faire un bilan des travaux effectués tout en discutant des perspectives.

¹ Pour plus de clarté, tout ce qui concerne la fabrication des micro-outils par gravure électrochimique sera reporté au chapitre 3.

CHAPITRE 1 :

USINAGE PAR ELECTROEROSION

1. USINAGE PAR ELECTROEROSION

Ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique de l'électroérosion. Après quelques définitions et une brève introduction historique, nous présenterons le phénomène physique à la base du processus d'usinage. Puis nous étudierons le procédé à l'échelle habituellement utilisée dans l'industrie, que nous appellerons « électroérosion conventionnelle » (EE) avant de nous intéresser au cœur du sujet : la miniaturisation en mode fraisage avec un outil cylindrique, désignée ci-dessous par le terme « fraisage par μ EE ».

1.1. Généralités

L'un des objectifs de cette thèse étant d'étudier la résolution et la précision d'un procédé d'usinage, il nous paraît nécessaire de préciser le vocabulaire utilisé.

La résolution d'usinage est le détail minimum que l'on peut obtenir mais il convient de noter que cette définition dépend de la forme à usiner.

En effet, dans le cas de l'usinage du canal de la Figure 4a (géométrie mortaise), la résolution est définie par la largeur de l'outil et les dimensions de la zone d'interaction entre outil et pièce. Celle-ci est caractérisée par les paramètres dimensionnels : gap latéral (γ_L) et gap vertical (γ_V) comme montré à la Figure 4b,

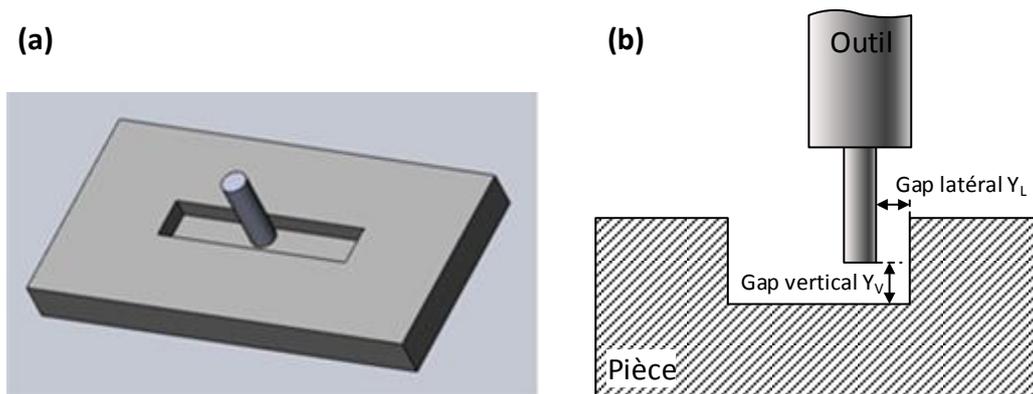


Figure 4 – Définition de la résolution d'usinage dans le cas de l'usinage d'un canal.

Dans le cas de l'usinage d'une nervure (géométrie tenon de la Figure 5), le diamètre de l'outil n'a pas d'influence directe sur la dimension du plus petit détail que l'on peut usiner. Celle-ci dépend essentiellement de la « précision » des axes de déplacement de l'outil et de l'épaisseur minimale de parois que l'on peut mettre à jour dans la pièce.

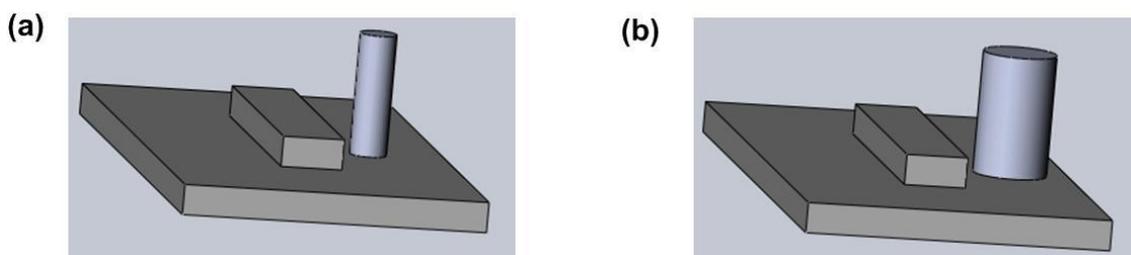


Figure 5 – Usinage d'une nervure.

Par ailleurs, la précision d'usinage correspond à la tolérance des dimensions usinées. Il est intéressant de noter que le terme micro-usinage correspond soit à la fabrication d'une pièce avec des tolérances serrées (Figure 6a), soit à l'usinage d'une pièce avec des structures très fines (Figure 6b) ; dans ce cas, la limite est fixée par la résolution d'usinage.

Dans ce mémoire, nous étudierons notamment la configuration la plus « difficile », c'est-à-dire dans le cas de l'usinage du canal.

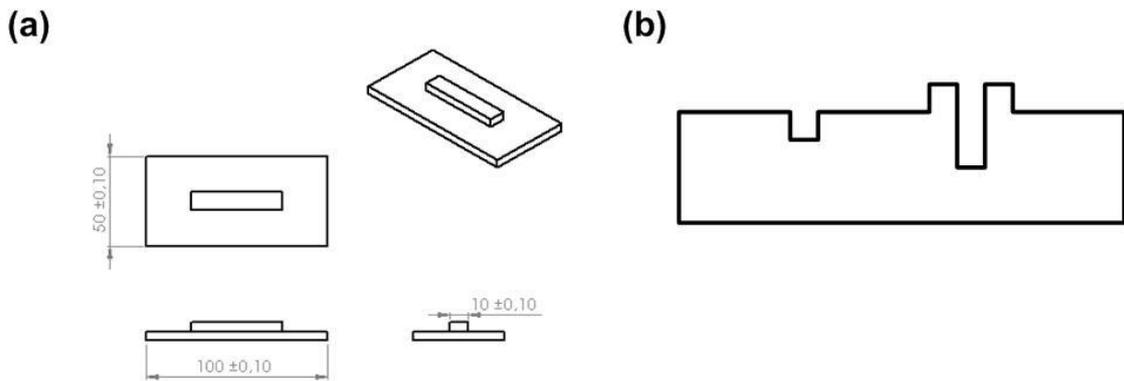


Figure 6 – Deux significations du terme micro-usinage en lien avec la précision (a) et la résolution d'usinage (b).

1.2. Généralités sur l'électroérosion

1.2.1. Historique

Le phénomène d'érosion par décharges électriques a été découvert en 1776 par l'anglais Joseph Priestley [18]. 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 [19],[20].

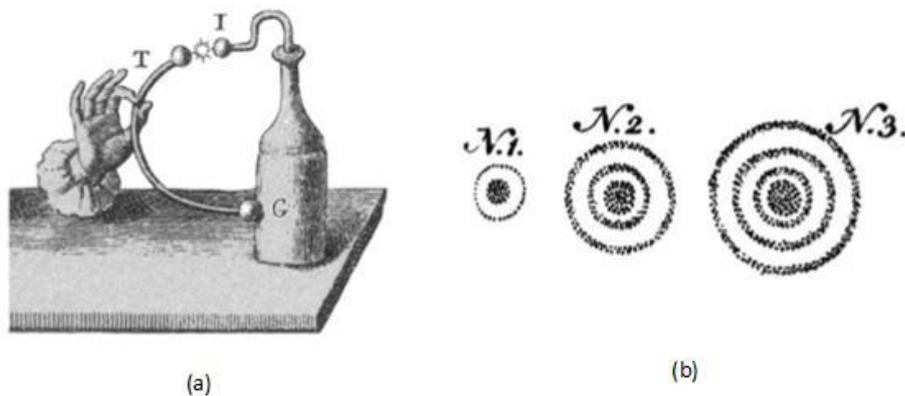


Figure 7 – (a) Premiers tests de décharges érodantes et (b) cercles d'impacts d'érosion de la cathode découverts par Joseph Priestley d'après [11][12].

Il faudra attendre 1943 pour que des scientifiques de l'université de Moscou, Boris et Natalia Lazarenko, développent le premier générateur d'électroérosion basé sur la charge d'une cellule RC et proposent d'exploiter les propriétés destructives des décharges pour procéder à des usinages. Ce générateur, appelé depuis lors générateur Lazarenko, est resté largement utilisé en électroérosion conventionnelle jusque dans les années 1950.

Dans les années 1960, le procédé EE a été progressivement adopté par l'industrie [21], [22]. Le tournant majeur a été pris à partir des années 1970 avec l'avènement de la commande numérique et le développement de générateurs de décharges à transistors (section 1.3.2) [23],[24]. Le lecteur intéressé par une perspective historique sur l'EE pourra se rapporter à [25].

De son côté, la μ EE, qui correspond à la miniaturisation du procédé d'EE, connaît un essor plus lent¹ essentiellement à cause du coût des machines et des limitations tant techniques que scientifiques. Son usage à très grande échelle est limité à quelques applications (perçage injecteurs pour l'automobile, perçage de trous de refroidissement pour les moteurs d'avions, micro filière pour l'industrie textile,...). Comme indiqué dans l'introduction, on note toutefois une demande en émergence dans de nombreux domaines.

1.2.2. Principe de base

L'EE (Figure 8) est un procédé d'usinage qui consiste à enlever de la matière par le biais de décharges électriques entre deux électrodes immergées dans un fluide diélectrique (liquide, gaz) ; l'une des électrodes constituant l'outil et l'autre la pièce à usiner. Celles-ci sont écartées l'une de l'autre d'une distance appelée entrefer² (gap en anglais). L'effet des décharges électriques est le creusement de la pièce³, via la création d'un micro-plasma, avec expulsion dans l'entrefer de débris provenant des deux électrodes. Le renouvellement du fluide dans l'entrefer et le rapprochement de l'outil et de la pièce permettent de recréer les conditions autorisant de nouvelles décharges. Un choix judicieux de la forme de l'outil et du mouvement relatif d'une électrode par rapport à l'autre permet d'usiner progressivement la pièce.

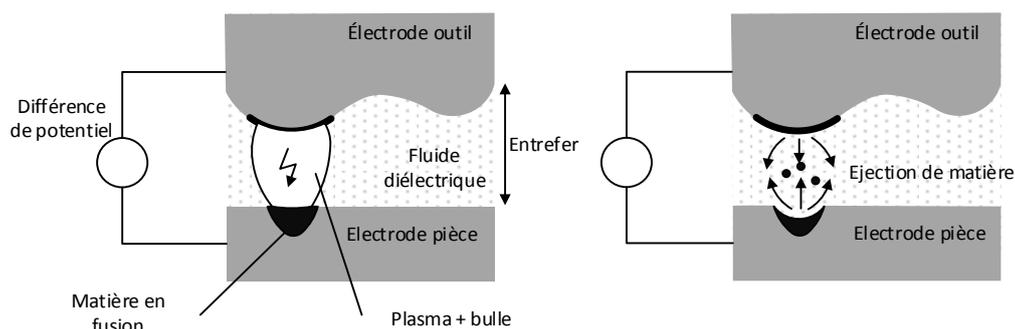


Figure 8 – Principe de l'usinage par électroérosion d'après [26].

¹ Mis à part le procédé WEDG proposé par Masuzawa et al. [75] qui sert à la fabrication des micro-outils : cf. section 3.1.1

² Dans ce mémoire, l'entrefer désignera l'espace entre l'outil et la pièce pendant l'usinage (Figure 8). Le terme gap (μm) sera réservé à l'écart entre outil et pièce après usinage (Figure 4b).

³ Avec simultanément usure de l'outil.

1.2.3. Mécanisme d'enlèvement de la matière

Joseph [27] décrit le processus d'usinage par EE en cinq étapes. Celles-ci seront illustrées par une représentation de la tension et du courant aux bornes de l'outil et de la pièce. Il est important de noter qu'en raison de la courte durée de vie du plasma, de sa petite taille et de sa disposition entre deux surfaces très rapprochées, il est difficile d'utiliser les méthodes de diagnostics classiques des plasmas (sonde de Langmuir par exemple). D'autres méthodes doivent être utilisées comme par exemple la spectroscopie d'émission optique, ce qui a été fait notamment par Descoedres et al. [20], [28], [29] ainsi que [30]–[32]. L'imagerie avec des caméras ultra-rapides de type iCCD est aussi un autre moyen de caractérisation des micro-plasmas utilisé en μ EE. Ainsi Schumacher et al. [33] sont parvenus à imager les différentes phases de la décharge.

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

a) Phase de pré-claquage

La phase de pré-claquage (Figure 9) correspond à l'application d'une différence de potentiel entre les deux électrodes avec une tension de l'ordre de 30 à 250 V [26] de façon à créer un champ électrique puissant (1 à 10MV/m avec un entrefer de 10 à 100 μ m) propice à l'ionisation locale du diélectrique.

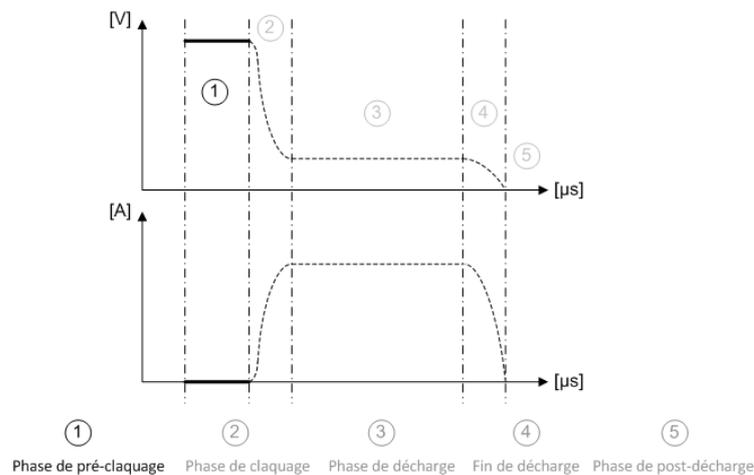


Figure 9 – Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [27], [34].

Pendant cette phase naissent et se propagent des canaux gazeux ionisés appelés amorces (streamers) qui croissent d'une manière extrêmement rapide et désordonnée d'une électrode à une autre [35]–[37].

Lorsque l'eau déionisée sert de diélectrique, les petites bulles d'hydrogène créées par électrolyse semblent jouer un rôle important [36]–[38]. En effet les amorces se propagent plus facilement dans un milieu gazeux.

Dans le cas d'un diélectrique de type huile, comme il n'y a pas de bulles d'hydrogène, le mécanisme de claquage pourrait être favorisé par des particules présentes dans l'entrefer [39].

Schumacher [33] indique que des ponts de particules (bulles, débris métalliques, etc.) entre les électrodes définissent la position des futurs arcs, ce qui expliquerait les différences constatées expérimentalement entre une décharge unique et une série de décharges.

b) Phase de claquage

La transition entre un canal faiblement ionisé et un canal fortement ionisé est un phénomène mal connu.

Ainsi, d'après [20], 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 10) sur une durée de 100 ns et le courant augmente fortement (Figure 10). Celui-ci peut atteindre plusieurs ampères. Le champ électrique devient si intense que les électrons des atomes sont émis au point de contact et font le chemin inverse jusqu'au point de départ. C'est à ce moment-là, entre 100 et 200 ns après le claquage, que le courant atteint son maximum. Les électrons sont accélérés dans le canal formé par l'amorce et conduisent à l'augmentation du canal ionisé. Ce « retour » d'amorce composé d'électrons semble être à la base d'un élargissement du canal de décharge, qui permet de faire passer un courant important. Il s'accompagne d'un craquement semblable à celui d'un éclair avec une onde de choc. Le diamètre du canal s'élargit rapidement. La température de l'arc électrique atteint 1,8 eV (20 000 K) et la densité d'électron 10^{17} cm^{-3} .

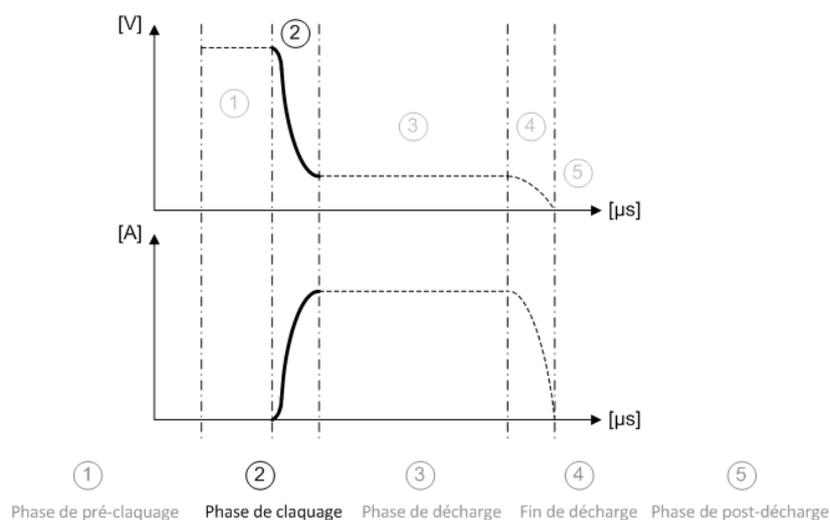


Figure 10 – Phase de claquage d'après [27].

c) Phase de décharge

D'après [20], [32] et [40], un plasma se développe très rapidement (50 ns) après le claquage et se stabilise. Le courant reste relativement constant (Figure 11). La lumière émise est particulièrement intense pendant les 500 ns puis elle faiblit. Son intensité dépend du courant.

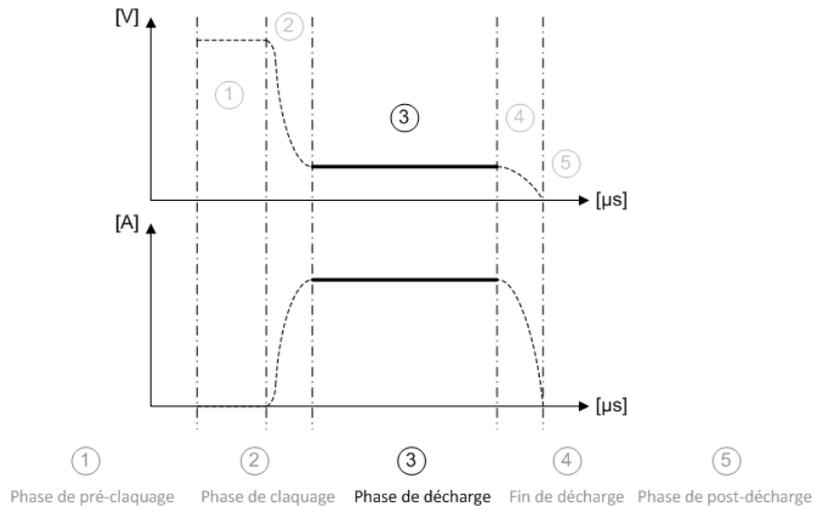


Figure 11 – Phase de décharge d’après [27].

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

d) Fin de décharge

A la fin de la décharge, le plasma n’est plus alimenté et le courant est coupé entre les deux électrodes : la jonction est rompue (Figure 12). Le plasma implose, conséquence de la pression du diélectrique et disparaît rapidement. De la lumière est souvent émise après la décharge par des particules métalliques incandescentes avec un rayonnement du type corps noir. Leur température mesurée par [20] est d’environ 2 200 K, ce qui démontre qu’elles sont à l’état liquide au début de la post-décharge.

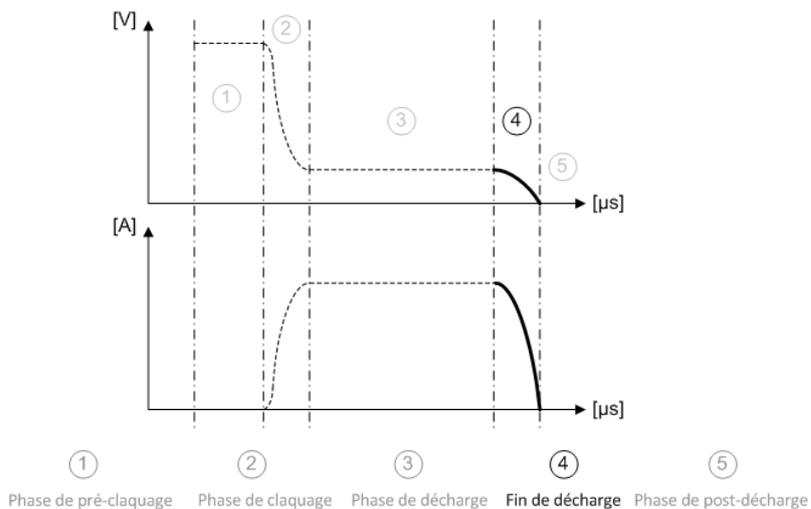


Figure 12 – Phase de fin de décharge d’après [27].

e) Phase de post-décharge

Le diélectrique joue un rôle très important durant cette phase (Figure 13). Il permet de diminuer la température des électrodes entre les impulsions et d'évacuer les débris fondus. Le milieu liquide confère une forme sphérique aux débris. Leur taille varie d'une expérience à l'autre et dépend des paramètres mais elle est typiquement d'une dizaine de μm [41]. La vitesse d'évacuation des débris dépend du flux de diélectrique. Cette évacuation doit être efficace car sinon la conductivité électrique du milieu sera trop faible et le claquage suivant sera perturbé. Le contrôle du processus deviendra alors difficile, ce qui conduira à un usinage de mauvaise qualité. Il est bien connu qu'ajouter une vibration par oscillation et/ou une rotation de l'électrode de travail permet une évacuation plus efficace des débris [42].

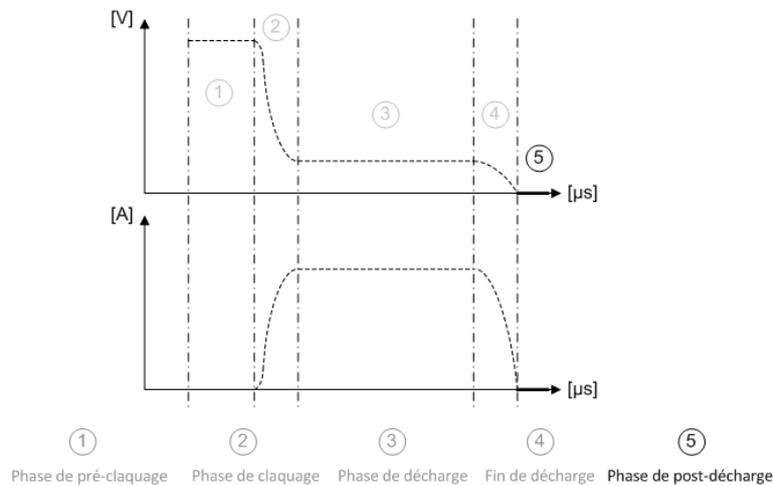


Figure 13 – Phase de post-décharge d'après [27].

1.3. Electroérosion conventionnelle

1.3.1. Les différentes variantes d'usinage par EE

En électroérosion conventionnelle, les procédés d'usinage sont classés en fonction de la forme de l'électrode-outil et de son mouvement par rapport à l'électrode-pièce [43] (Figure 14).

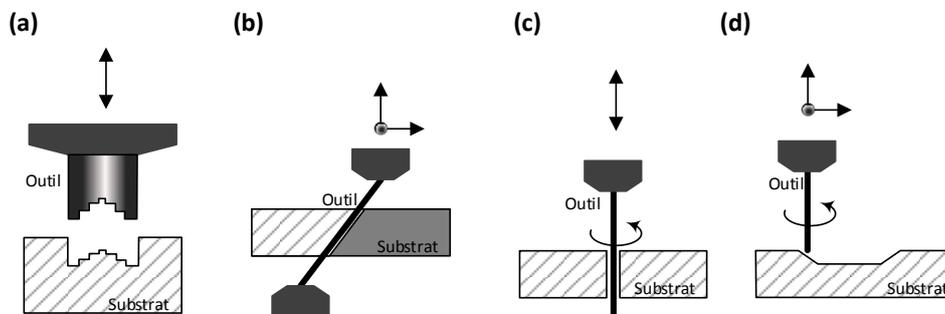


Figure 14 – Différentes variantes d'usinage par μEE . (a) Electroérosion à enfoncement, (b) électroérosion à fil; (c) perçage par électroérosion et (d) fraisage par électroérosion.

a) Electroérosion à enfoncement (Die sinking EDM)

L'outil de forme 3D est usiné au préalable dans une matière (cuivre, graphite,...) facile à usiner, par exemple par enlèvement de copeaux [27][44][45]. Puis il est enfoncé par EE dans la pièce avec un mouvement vertical progressif dit de plongée (Figure 14a). Ce procédé est pertinent lorsque la pièce est dans une matière difficile à usiner par enlèvement de copeaux ; l'électroérosion à enfoncement permettant de contourner cette difficulté.

b) Electroérosion à fil (Wire EDM)

L'électrode-outil est un fil (laiton, zinc revêtu de laiton, tungstène, molybdène,...) circulant entre des guides (Figure 15) [43]. Les guides peuvent décrire des mouvements à plusieurs degrés de liberté, ce qui permet d'usiner des surfaces réglées. Un trou de perçage est souvent nécessaire pour introduire le fil. L'avantage est le renouvellement constant de la partie de l'électrode-outil en interaction avec la pièce. La limite du procédé réside dans le contrôle mécanique du guidage du fil, qui peut casser. Dans l'industrie, celui-ci a en général un diamètre de 30 à 300 μm . Un diamètre 20 μm est plus rarement utilisé : on rentre dans le domaine de la μEE .

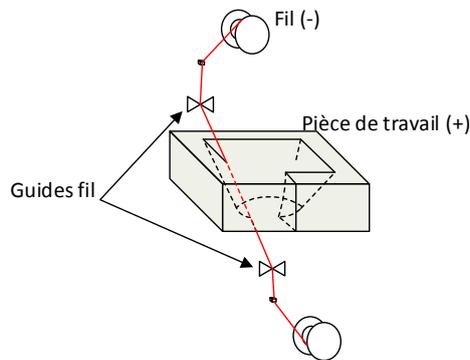


Figure 15 – Illustration de l'électroérosion à fil: usinage de pièces complexes en 3D [46][47].

c) Perçage de trous (Drilling EDM)

Dans ce cas, l'électrode-outil est de forme cylindrique, De plus, elle est creuse, ce qui permet d'envoyer du diélectrique liquide sous forte pression [48] ; les difficultés étant l'évacuation des débris emprisonnés [49] et l'usure de l'outil. Le mouvement de l'électrode est en plongée (Figure 14c). L'utilisation de vibrations ou d'ultrasons permet d'améliorer l'efficacité du procédé [50]. D'après [51], il est possible de percer des trous de 0,13 à 6,3 mm de diamètre avec un rapport d'aspect de 10 à 20.

d) Fraisage par électroérosion avec un mouvement de l'outil en 3D (Milling EDM)

Le principe du fraisage par électroérosion a été exposé dans l'introduction de ce mémoire (Figure 1 page 23) ainsi qu'à la Figure 14d. A notre connaissance, ce procédé n'est pas utilisé à l'échelle conventionnelle dans l'industrie. En effet, lorsque l'outil a un diamètre important, le fraisage par enlèvement de copeaux est préféré à l'EE, probablement pour une question de vitesse d'usinage.

Néanmoins, Richard et al. ont développé un procédé de fraisage par EE avec des électrodes-outils tubulaires, en bronze ou en cuivre, de diamètre 0,2 à 0,8 mm et de longueur 40 mm [52]. Les outils sont mis en rotation rapide, soit 10 000 tours/minute pour un outil de 0,2 mm (Figure 16a). A cette échelle, les électrodes sont flexibles. L'effet de la rotation est de les stabiliser pendant l'usinage par EE avec un auto alignement par rapport à l'axe de rotation. Des usinages avec des rapports d'aspect de 30 ont été rapportés (Figure 16b et c) [52].

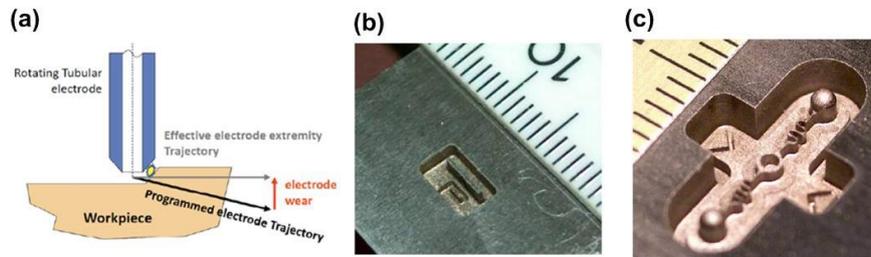


Figure 16 – Fraisage par μ EE avec un outil tubulaire en rotation d'après [52]. (a) Principe de base. (b) Double cavité en acier usinée avec des outils en cuivre de 0,8 mm et 0,3 mm de diamètre ; la largeur de la nervure est de 0,15 mm. (c) Cavité complexe à fort rapport d'aspect.

1.3.2. Les générateurs de décharges en électroérosion conventionnelle

Après avoir vu les différentes variantes du procédé, Il nous paraît utile ici de présenter les générateurs de décharges utilisés en EE. Une vue d'ensemble est représentée à la Figure 17. En effet certains dispositifs comme le générateur de Lazarenko seront encore utilisés en μ EE. D'autres dispositifs, comme les générateurs à transistors, ont permis de faire progresser de manière considérable l'électroérosion conventionnelle mais, comme nous le verrons plus loin, ils ne pourront pas être utilisés en μ EE (1.4). Néanmoins les concepts développés, notamment pour ce qui concerne le générateur iso-énergétique, méritent d'être connus.

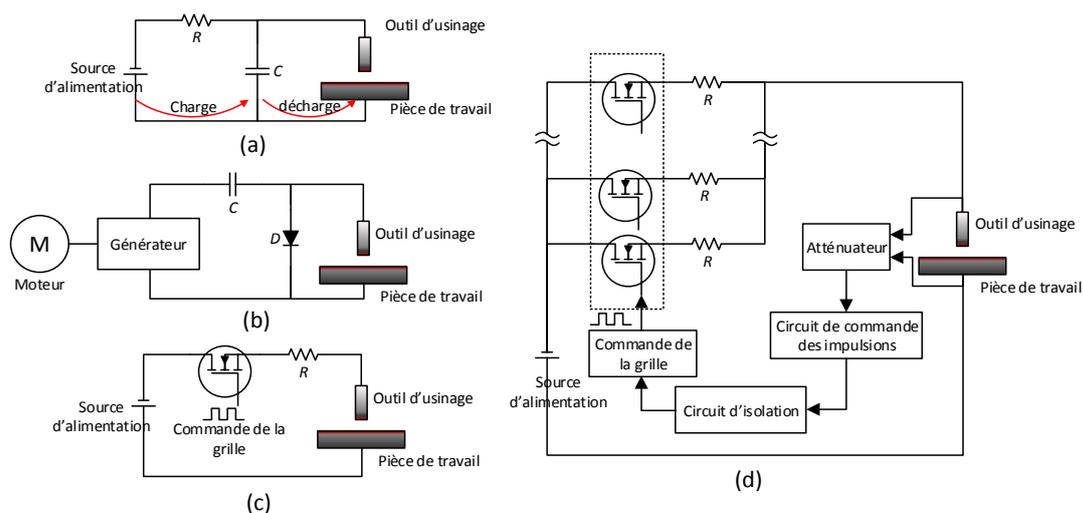


Figure 17 – Générateurs de décharges pour l'usinage par électroérosion. (a) Générateur à relaxation ; (b) Générateur d'impulsions rotatif ; (c) Générateur d'impulsions par transistor et (d) Générateur d'impulsions iso-énergétique [46][53][54][55][56].

a) Le générateur à relaxation

Le principe du générateur RC (générateur Lazarenko) (Figure 17a) repose sur la charge d'une capacité de travail C_C alimentée par une tension continue V_{EE} via une résistance de charge R_C . Lorsque l'outil est suffisamment près de la pièce (champ électrique suffisamment élevé) et que le diélectrique est suffisamment isolant, l'énergie emmagasinée dans la capacité est brusquement transférée à l'entrefer en donnant naissance à une étincelle. Le plus souvent, le transfert d'énergie est partiel¹. Cela se traduit par une chute de potentiel aux bornes de C_C et par une impulsion de courant comme montré à la Figure 18a. Quand toutes les conditions sont réunies, on assiste à des trains de décharges dont on notera le caractère irrégulier (Figure 18b). Chaque décharge crée un impact sur la pièce dont les dimensions dépendent de l'énergie de la décharge. La quantité de matière enlevée dépend du nombre total de décharges produites pendant le temps d'usinage et de leur énergie.

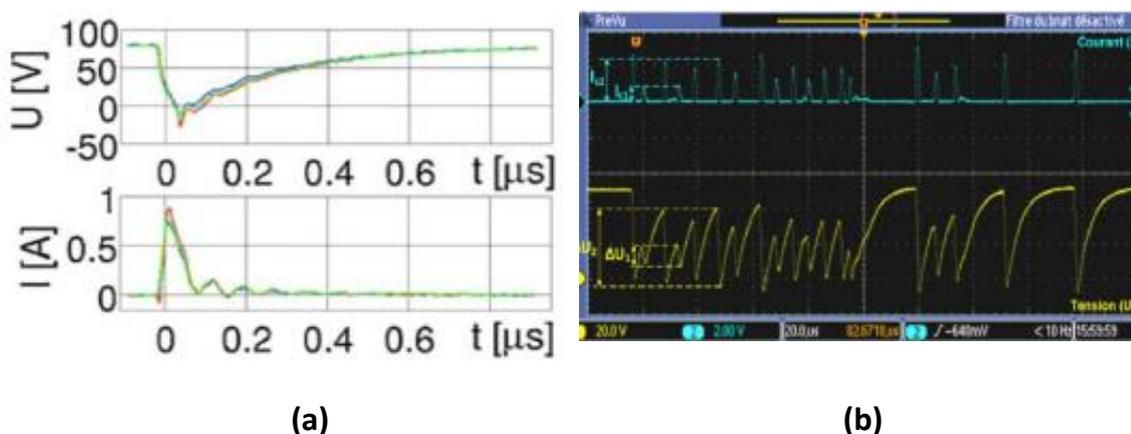


Figure 18 – Formes de décharges produites par un circuit RC. (a) Décharge unique [57][58] ; (b) série de décharges [13][59].

Il est possible de diminuer l'énergie par décharge, qui est de l'ordre de $1/2C_C V_{EE}^2$, en réduisant la valeur de la capacité de travail (éventuellement à se limitant à la capacité parasite de la machine) et en utilisant une faible tension d'usinage (au moins quelques V en fonction de la valeur de l'entrefer).

Par ailleurs la durée de l'impulsion est très rapide, de quelques dizaines de ns à quelques μs , et nous verrons à l'annexe 1 qu'elle dépend essentiellement de la capacité [8] [60].

Enfin la constante de temps $R_C C_C$ permet d'avoir une action (très grossière) sur la durée entre les décharges [13].

b) Générateur à impulsions rotatif

Dans ce dispositif (Figure 17.b), rarement utilisé depuis l'avènement de l'électronique moderne, l'alimentation est générée avec le même principe qu'un moteur à courant continu [55].

¹ A tension d'usinage élevée et/ou forte valeur de capacité de travail, il y a peu y avoir une inversion de polarité entre l'outil et la pièce, ce qui entraîne une usure très importante de l'outil.

c) Les générateurs à transistor (à impulsions)

La d.d.p. est directement appliquée entre le générateur et les électrodes par l'intermédiaire d'un transistor (Figure 17c) sans passer par l'intermédiaire d'une capacité de charge. Les commandes du temps d'activation T_{ON} , pendant lequel on autorise le processus de décharge, et du temps de repos T_{OFF} , pendant lequel le diélectrique est renouvelé à l'entrefer sont effectuées via la base du transistor. Il est possible ainsi de réguler l'énergie des décharges électriques en jouant sur la durée T_{ON} et de couper le courant en cas de contact outil-substrat [13], [46], [61].

d) Les générateurs à transistor iso-énergétique

Ce générateur (Figure 17d) est une amélioration du dispositif précédent qui a présenté un progrès considérable. Lors de l'application d'un créneau T_{ON} , le dispositif surveille l'occurrence de la décharge (augmentation brusque du courant ou chute de tension à l'entrefer) qui intervient avec un retard aléatoire t_a (Figure 19) puis il coupe le courant après un temps t_d fixé par l'opérateur. Ainsi pour chaque décharge, l'énergie échangée est (approximativement) égale à $U_d \times I_d \times t_d$ (Figure 19). Elle est régulée plus facilement qu'avec les générateurs précédents.

En effet, Le courant I_d et le temps t_d sont respectivement contrôlés par la source de courant constitué par le transistor et la base de temps. La tension U_d pendant la phase d'existence du plasma n'est pas accessible, mais on la considère, comme constante (Figure 11) en première approximation¹ Ainsi la machine applique au 1^{er} ordre toujours la même énergie par décharge d'où le nom de générateur iso-énergétique.

Par ailleurs, il est possible de réguler la valeur de l'entrefer à partir de la valeur du temps d'amorçage t_a [62].

Ce générateur a permis le succès de l'EE dans l'industrie.

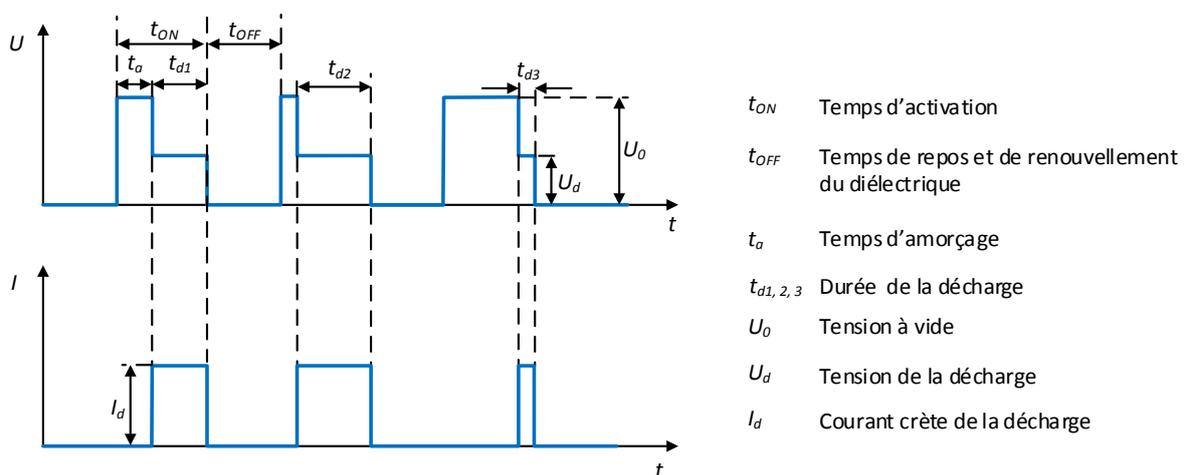


Figure 19 – Signaux typiques de décharges électriques produites par un générateur d'impulsions par transistor [13][46].

¹ Elle est, par exemple, de l'ordre de 20 V pour une tension appliquée de 200 V dans une machine d'EE par enfouçage [184].

1.3.3. Conclusion

Quoi qu'il en soit, nous avons déjà indiqué que, dans l'état de l'art actuel de l'électronique, l'énergie par décharge des générateurs à transistor est trop importante pour qu'ils puissent être mise en œuvre dans le domaine de la μ EE. Par ailleurs, le passage de l'échelle microscopique pose d'autres problèmes, dont certains seront étudiés plus loin dans ce manuscrit (fabrication des micro-outils, gestion des contacts outil-substrat avec des outils de quelques μm de diamètre seulement, énergie par décharge, vibrations mécaniques, dilatation thermique, etc.). Pour ce faire nous commencerons par passer en revue la bibliographie sur la μ EE.

1.4. Electroérosion à l'échelle microscopique

1.4.1. Généralités

La frontière exacte entre l'EE et le μ EE varie selon les auteurs et la variante considérée. On considère souvent que le domaine de μ EE est celui de la mise en œuvre de micro-outils à partir de 5-10 μm de diamètre [11], [44], [57]. Rares sont les auteurs qui ont essayé d'usiner avec des outils de diamètre inférieur [63], [64]. D'après d'autres auteurs, le domaine de la μ EE est celui de l'usinage avec des détails de 5 à 50 μm [65].

Par ailleurs, le domaine de la μ EE ne se résume pas à une simple diminution des dimensions caractéristiques de l'électrode-outil. Selon Uhlmann et al. [66], l'énergie par décharge en EE est typiquement de l'ordre de 100 μJ /étincelle en utilisant un générateur moderne à transistors. Elle peut être réduite au minimum à 5 μJ /étincelle avec des créneaux de courant de 1 A d'une durée T_{ON} de 0.2 μs . Il n'est pas possible de réduire encore cette énergie car il est nécessaire de polariser les composants électroniques actifs, ce qui limite la vitesse de commutation. Pour usiner en μ EE, la solution consiste à abandonner les générateurs à transistors et à revenir au générateur RC. Il est possible alors d'obtenir une énergie de l'ordre 1-10 μJ /étincelle, ce qui a conduit à cratères de l'ordre de 5 μm de diamètre. La Figure 20 permet de comparer des cratères caractéristiques en EE et μ EE.

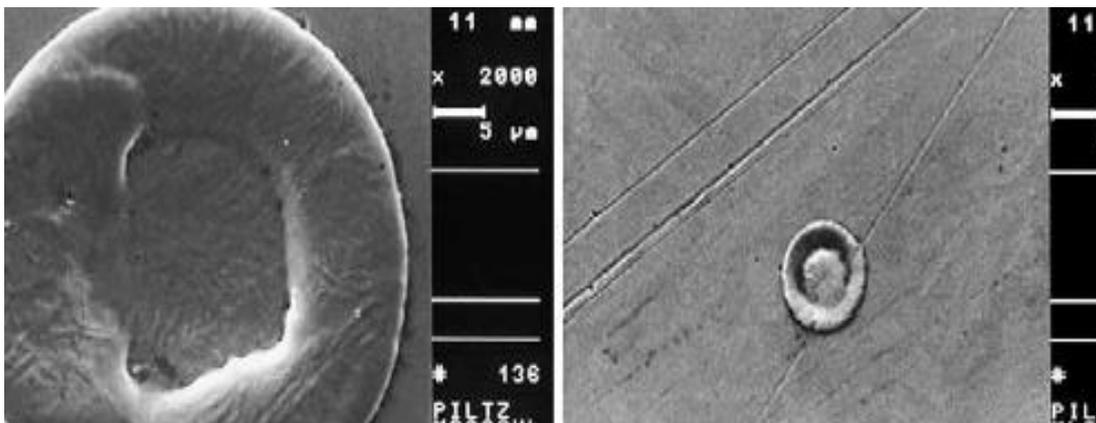


Figure 20 – Comparaison entre un cratère en électroérosion conventionnelle et en microélectroérosion d'après Uhlmann (échelle 5 μm) [66]. Echelle 5 μm .

Une autre caractéristique importante du procédé de μ EE est l'inversion de polarité.

En EE, l'outil est en général au pôle négatif tandis la pièce est au pôle positif. En effet les porteurs de charges positifs du plasma sont plus efficaces pour enlever de la matière que les porteurs de charges négatifs (les électrons). Ils convient donc de les repousser vers la pièce. Par contre, comme ils sont plus lents, il est nécessaire de prévoir une durée T_{ON} suffisante.

En μ EE, la polarité est inverse si l'on souhaite usiner la pièce et user l'outil au minimum. En effet la durée des impulsions de courant est très courte est l'on peut considérer que ce sont les charges négatives plus rapides que les charges positives qui doivent creuser la pièce. Il convient de polariser les électrodes de façon à repousser les charges négatives vers la pièce.

1.4.2. Les différentes variantes d'usinage par EE

Le Tableau 1 montre une vue d'ensemble des différents procédés de μ EE d'après [66] [67]. Les valeurs données (diamètre des micro-outils, facteur de forme, dimensions du détail minimum, état de surface des pièces) sont celles trouvées couramment dans les articles de revue. Nous avons tenté de corroborer ces données en revenant aux publications de base, ce qui n'a pas été facile. C'est la raison pour laquelle, lorsque nous passerons en revue les procédés, nous donnerons quelques exemples caractéristiques d'usinage.

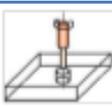
Procédés	Illustrations d'après [66]	Outil $\Phi(\mu\text{m})$	Géométrie (pièce)	Détail min. (μm)	Facteur de forme (FF)	État de surface (pièce) Ra	Sources
μEE par enfonçage (Die-Sinking μ EDM)		~	3D	20	15-20	0,05-0,3	[68], [69]
μEE à fil (μ WEDM)		20	2D1/2	15-30	10-100	0,07 – 0,35	[70], [71], [72]
Perçage de trous par μEE (μ EDM Drilling)		5 à 10	2D	5	25-50	0,05 - 0,3	[73], [74]
μ-meulage à fil par μEE (μ WEDG)		10	Cylindrique	3	30	0,15 – 0,80	[75]
Fraisage par μEE (μ EDM Milling)		5 à 10	3D	20	10	0,05 – 0,5	[76], [77], [78]

Tableau 1 – Les différentes variantes de μ EE d'après [10], [66] et [67].

a) Microélectroérosion par enfoncement

Le principe consiste à fabriquer un outil avec des micro-détails par des techniques conventionnelles de micromécanique (fraisage, etc.) ou de microtechnologie (LIGA, FIB,...) et à procéder à l'usinage de la pièce par un mouvement en plongée. Différentes variantes sont possibles en fonction du mode de fabrication de l'outillage.

La Figure 21a d'après [79] montre un micro-engrenage en carbure de tungstène–cobalt usiné en μ EE inverse par passages successifs dans un micro-outil obtenu par LIGA X. La

variation de diamètre externe est de 4 μm sur une hauteur de 1 mm. On ne peut que souligner le coût très élevé du LIGA X.

Richardson et al. [80] ont élaboré un outillage en cuivre par LIGA UV [81] avec des motifs jusqu'à 5 μm de largeur et les ont utilisé pour usiner de l'acier inoxydable (Figure 21a). L'intérêt de cette technique est qu'il s'agit d'un procédé de fabrication, beaucoup moins coûteux que le LIGA X, qui permet d'obtenir différents motifs en parallèle.

Uhlmann 2005 et al. [66] ont utilisé des techniques plus conventionnelles pour usiner les électrodes-outils. La Figure 21c montre une électrode de graphite usinée par enlèvement de copeaux.

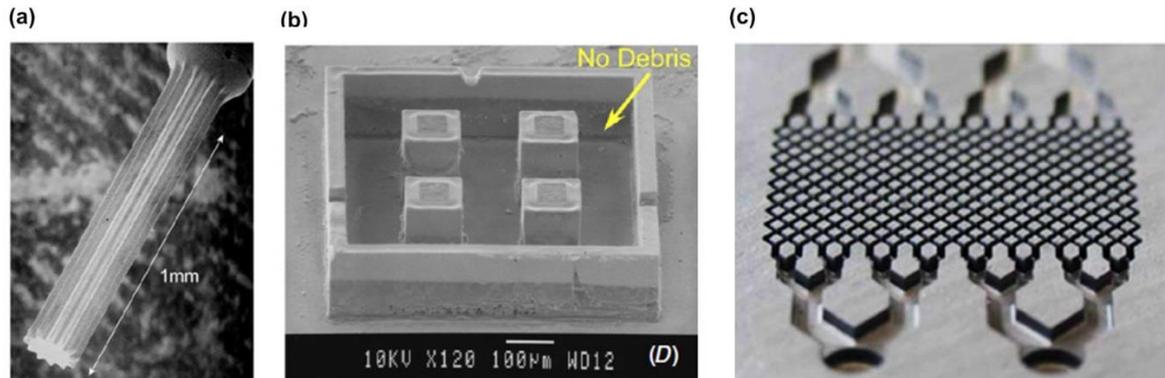


Figure 21 – Microélectroérosion par enfoncement.

(a) usinage d'un micro-engrenage en carbure de tungstène – cobalt par électroérosion inverse dans un outil réalisé en LIGA X d'après [79] ; (b) usinage d'un acier inoxydable avec un micro-outil en cuivre réalisé en LIGA UV d'après [80] ; (c) microélectrode pour l'usinage d'un moule pour le mélange de fines particules de graphite [66].

Les difficultés résident dans le renouvellement difficile du diélectrique entre deux surfaces à l'échelle considérée et l'usure importante des micro-outils, qui peut atteindre 30% d'après Uhlmann 2005 et al. [66]. A notre connaissance, malgré leur potentiel, ces procédés restent encore du domaine de la recherche.

b) Microélectroérosion à fil

Indépendamment des travaux de Yan et al. [72], Chen et al. [82], ont développé un procédé de μEE à fil avec un fil de tungstène ultrafin de 13 μm de diamètre. Le dispositif de guidage, très compact ($20 \times 30 \times 55 \text{ mm}^3$) et orientable dans différentes directions, permet de régler la tension du fil à l'aide d'un système d'aimants (Figure 22). La Figure 23 montre des exemples d'usinage : (i) fentes de largeur 15,6 μm dans un acier SUS304 d'épaisseur 230 μm , (ii) électrodes interdigitées en acier SUS304 avec un écart de 15 μm et (iii) tour en tungstène de 2,8 mm de hauteur avec un pinacle de largeur 10 μm et une hauteur de 134 μm .

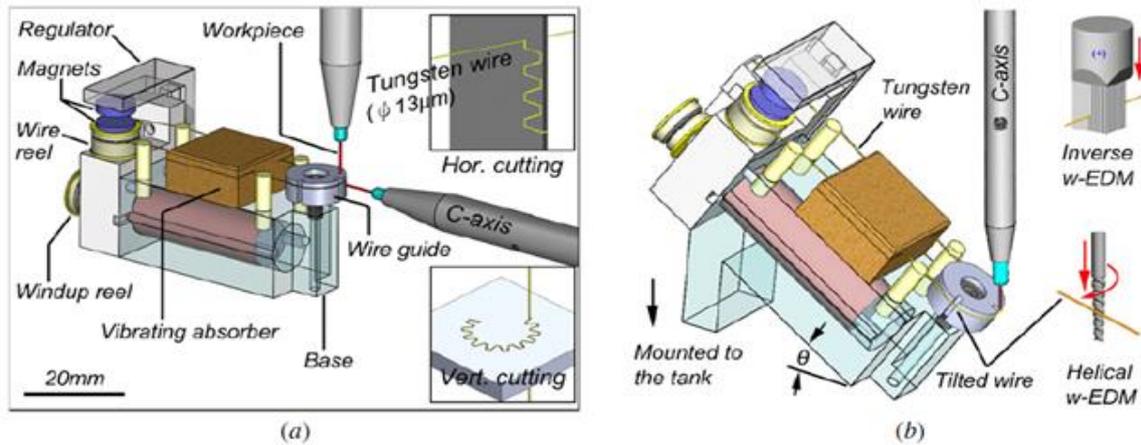


Figure 22 – Microélectroérosion à fil avec un fil ultrafin de tungstène de 13 μm de diamètre d'après [82]. (a) Usinage horizontal ou vertical. (b) μEE inverse ou usinage hélicoïdal.

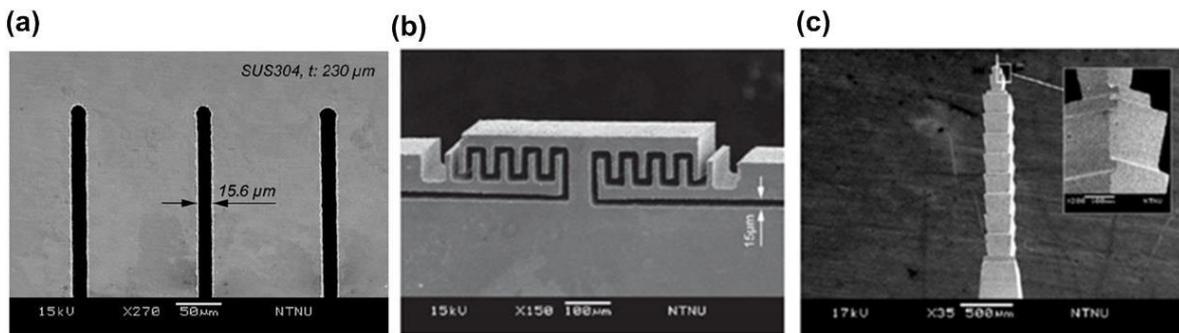


Figure 23 – Exemples d'usinage en μEE à fil avec un fil en tungstène ultrafin d'après [82]. (a) Fentes de 15,6 μm de largeur dans un acier SUS304 d'épaisseur 230 μm . (b) Electrodes interdigitées en acier SUS304 avec un écart de 15 μm . (c) Tour en tungstène de 2,8 mm de hauteur avec un pinacle de largeur 10 μm et de hauteur 134 μm .

c) Perçage de trous par microélectroérosion à fil

Ce procédé [50], [83] permet de forer des trous très profonds [84] ; la difficulté étant d'évacuer les débris emprisonnés. Il existe des machines spécialisées dans le domaine du perçage de micro-trous avec des applications à très grande échelle : buses d'injection pour l'automobile, trous de refroidissement d'aubes pour l'aéronautique [85], trous d'éjection des têtes d'impression à jet d'encre (procédé apparemment remplacé par le perçage laser), etc.

L'outil est de forme cylindrique. Souvent aussi il est creux, ce qui permet d'envoyer du diélectrique liquide sous forte pression. Le mouvement de l'électrode est quelquefois limité à un seul axe (Figure 14c). Souvent le mouvement est hélicoïdal ou cycloïdal pour réduire et/ou répartir l'usure de l'outil. L'utilisation de vibrations par actionneur ou d'ultrasons permet d'améliorer le procédé [86], [87].

d) Micro meulage à fil par microélectroérosion

Le meulage par microélectroérosion à fil, connu sous le nom de Wire Electrical Discharge Grinding (WEDG), a été inventé par le Pr. Masuzawa dans les années 1980 [75]. Ce

procédé est décrit à la section 1.4.2. b). Il s'agit d'une variante très importante car c'est l'une des méthodes les plus utilisées pour fabriquer des micro-outils [44], [88], [44], [89].

e) Fraisage par microélectroérosion

Le fraisage par microélectroérosion est un autre procédé de μ EE. Son principe a déjà exposé dans l'introduction de ce mémoire (Figure 1). D'après le Tableau 1, il permet d'obtenir des états de surface avec un Ra de l'ordre 0,1 μ m. Le détail minimum est de l'ordre de 20 μ m, ce qui reste élevé face à de techniques concurrentes comme le LIGA.

1.4.3. Machines de fraisage par microélectroérosion

a) Vue d'ensemble

Le Tableau 2 résume les informations disponibles sur les machines commerciales [13], [90], [91]. De manière générale, le parc de machine de μ EE est nettement inférieur à celui des machines conventionnelles mais aucune donnée quantitative n'est disponible à ce sujet.

Au Japon, il semble que la société Panasonic Matsushita, qui commercialisait les machines MG-ED72W et MG-ED82W, ait cessé son activité dans ce domaine. Néanmoins, l'ancien distributeur de Panasonic aux Etats-Unis, la société Smaltec, commercialise désormais sa propre machine EM203 ; la gamme de Smaltec a été étendue récemment avec une petite machine, la GM703 avec des codeurs optiques de résolution 10 nm et la machine MM903 de plus grande capacité. La machine OCT-200MA de la société Ocean Technologies paraît proche de la machine Panasonic Matsushita.

En Europe, beaucoup de machines de μ EE proviennent de la société suisse Sarix. Il s'agit des machines SX-100 et SX-200 auxquelles s'ajoute une machine hybride¹ permettant de combiner μ EE et usinage laser ou microfraisage par enlèvement de copeaux [92]. Par ailleurs, la société Posalux commercialise des machines de perçage à très grande cadence¹ avec des outils de 30 μ m de diamètre sur la base de la technologie Sarix [93].

Par ailleurs en Asie, la société MikroTool commercialise aussi une machine hybride, la DT-100 [94].

La plupart des machines ont un poste WEDG intégré d'amincissement des électrodes-outils dont le principe sera exposé dans la section 3.1.1.

L'étude bibliographique a montré qu'il y a peu d'article illustrant les possibilités de ces machines dans les conditions limites d'usinage qui nous intéressent (résolution, état de surface,...). Il est donc difficile d'avoir une idée précise de leurs performances réelles. Nous avons tout de même rassemblé ci-dessous quelques exemples d'usinage pris dans les publications.

¹ Non représentée au Tableau 4.

Machine	Electrode-Outil	Générateur	Axes	Commentaire
 <p>MG-ED72W MG-ED82W Panasonic Matsushita</p>	<p>Préparation des micro-outils par WEDG</p> <p>∅ 5 μm</p>	<p>Type RC U : 0 à +/-110 V C : capacité parasite, 10 pF, 110 pF, 220 pF, 3300 pF R1 : 1 kΩ R2 : 100 Ω (Figure 25) Impulsions de courant 10 ns</p>	<p>Courses XYZ 200x50x10 mm. Résolution 0,1 μm ;</p>	
 <p>EM203 Smaltec www.smaltec.com</p>	<p>Préparation des micro-outils par WEDG 6000 tour/mn</p>		<p>Courses XYZ 200x200x100 mm Résolution des codeurs 0,1 μm</p>	<p>Aérospatial, communication, médical, automobile, optique...</p>
 <p>GM703 Smaltec www.smaltec.com</p>	<p>Préparation des micro-outils par WEDG 6000 tour/mn</p>		<p>Courses XYZ 50x50x70 mm Résolution des codeurs 10 nm</p>	
 <p>MM903 Smaltec www.smaltec.com</p>	<p>Préparation des micro-outils par WEDG 5000 à 50 000 tour/mn</p>		<p>Courses XYZ 200x200x150 mm Résolution des codeurs 0,1 μm</p>	
 <p>OCT-200MA Ocean technologies www.octec.com.tw</p>	<p>3000 tour/mn Préparation par WEDG jusqu'à ∅ 20 μm</p>		<p>Courses XYZ 250x150x150 mm Précision déplacement +/-2μm</p>	<p>Pérçage de trous ∅30 μm</p>

 <p>SX-100 Sarix www.sarix.com</p>	<p>Electrodes outils \varnothing 45 μm à 3 mm.</p> <p>En-dessous de \varnothing 45 μm, les électrodes outils sont préparées par WEDG dans la machine</p>	<p>Plusieurs générateurs type RC</p>	<p>Courses XYZ 250x150x150 mm</p> <p>4^{ème} axe en option</p> <p>Précision déplacement \pm2μm</p>	
 <p>SX-200 Sarix www.sarix.com</p>	<p>Electrodes outils \varnothing 45 μm à 3 mm.</p> <p>En-dessous de \varnothing 45 μm, les électrodes outils sont préparées par WEDG dans la machine</p> <p>\varnothing min 5 μm avec le générateur SX-MFPS</p>	<p>Plusieurs générateurs type RC</p> <p>Eau déionisée</p> <p>Huile synthétique</p>	<p>Courses XYZ 350x200x200 mm</p> <p>4^{ème} axe en option</p> <p>Précision déplacement \pm2μm</p>	<p>Micro-moules Micro-pièces Fraisage par μEE en 3D Perçage de trous jusqu'à \varnothing 10-20 μm. Ra 0.1 μm Ra 0.05 μm avec le générateur SX-MFPS</p>
 <p>Machine hybride DT-100 Mikrotools http://mikrotools.com/</p>	<p>0-6000 tour/mn</p> <p>WEDG mais sans doute pas uniquement</p>	<p>Générateur type RC 80-150V avec R fixé à 1 kΩ.</p> <p>Six valeurs de capacité</p>	<p>Courses XYZ 200x100x100 mm</p> <p>Résolution des codeurs 0,1 μm</p>	

Tableau 2 – Machines commerciales de fraisage par μ EE d'après [13][90][91].

b) Machine Panasonic Matsuhita MG-ED72W

La Figure 24a montre les différents éléments de la machine MG-ED72W brevetée par Masaki et al. [95]. Celle-ci est composée d'une table motorisée XY avec un axe vertical Z portant une broche. La machine comporte un poste de fabrication des micro-outils et un poste d'usinage par μ EE, avec une cuve par poste pour contenir le diélectrique. Le micro-outil est obtenu par WEDG (Figure 24b) suivant le principe développé par Masuzawa et al. [75] à partir d'un barreau de tungstène de 150 μ m de diamètre. Le diamètre minimum de l'outil est de 5 μ m.

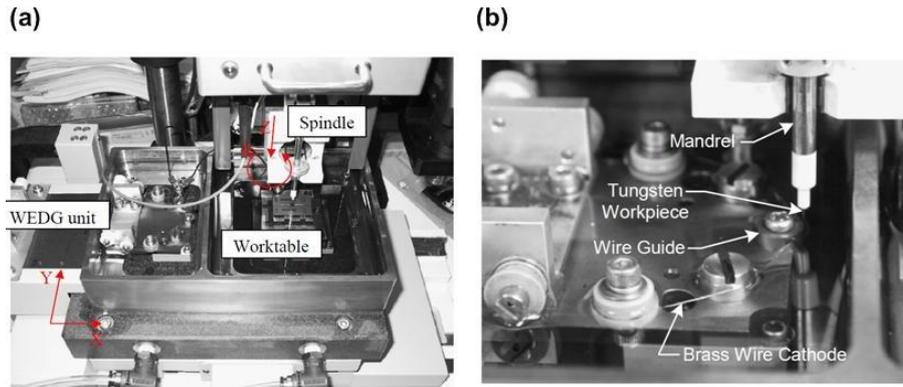


Figure 24 – Machine MG-ED72W d'après [96]. (a) Vue générale. (b) Poste de fabrication du micro-outil par WEDG.

La Figure 25 montre une vue d'ensemble des différentes étapes du procédé.

L'outil est fabriqué dans une première étape par la méthode WEDG. Celle-ci consiste à créer des décharges, à l'aide d'un circuit RC, entre le barreau de tungstène (anode) et un fil de cuivre de 100 μm de diamètre (cathode). La position du barreau, mis en rotation à 3000 tour/minute, est contrôlée par l'axe Z. Pour éviter d'utiliser une partie du fil déjà usée par les décharges, celui-ci est déroulé à partir d'une bobine réservoir, puis il passe dans un guide dont la position est contrôlée par les axes XY, avant d'être enroulé dans une bobine d'accueil (Figure 26a) ; la vitesse du fil est de 340 $\mu\text{m/s}$. La décharge a lieu à l'apex du guide avec un entrefer de l'ordre de 2 μm . Le barreau de la Figure 26b avec un diamètre de 96 μm est ainsi usiné en trois étapes en baissant progressivement la tension d'usinage (110 à 80V) et la capacité de travail (3300 pF à 110 pF).

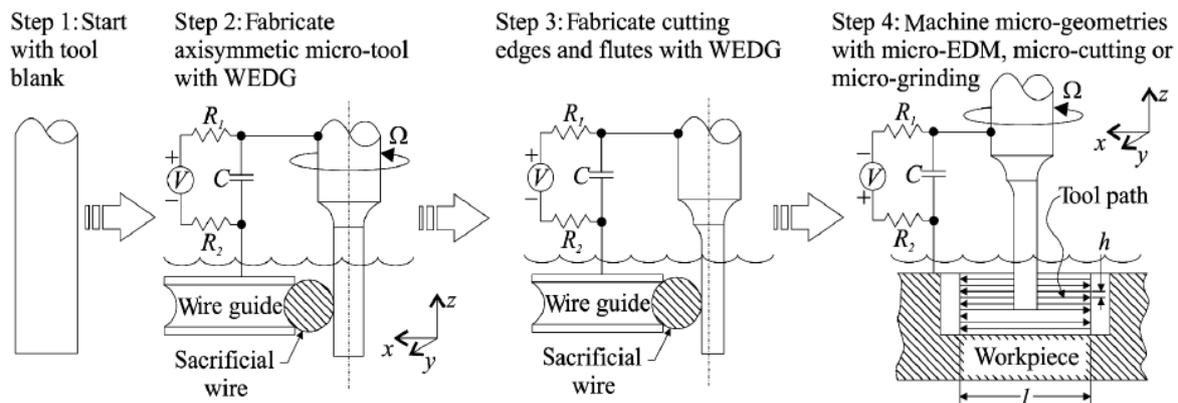


Figure 25 – Les différentes étapes du procédé d'usinage avec la machine MG-ED72W d'après [97].

L'outil est ensuite utilisé pour procéder à l'usinage d'une pièce par μEE . L'entrefer est de 1 à 4 μm avec une polarité inversée (Figure 25). La machine détecte l'occurrence des courts circuits et gère le retrait de l'outil. Les courts circuits sont fréquents si l'avancement en Z est trop rapide et si le choix des paramètres d'usinage n'est pas adapté (résistances R_1 et R_2 , capacité de travail, tension d'usinage, débit du diélectrique, matériau de l'outil et de la pièce).

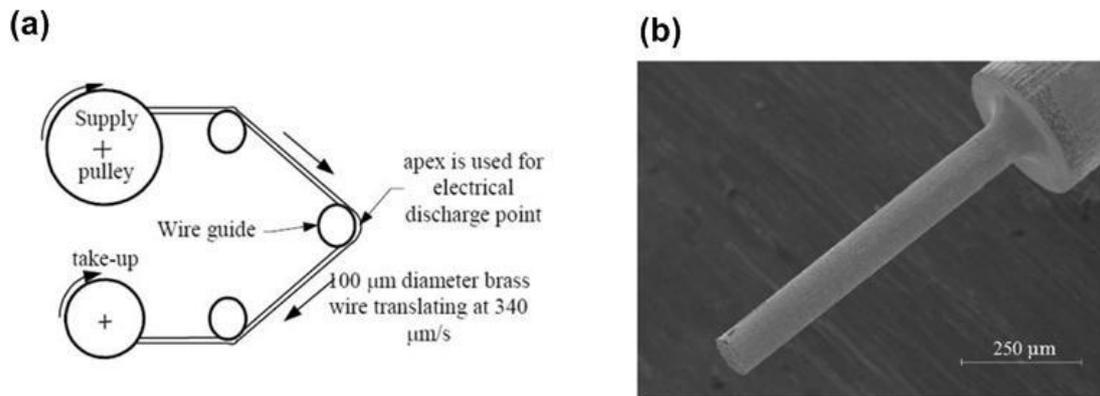


Figure 26 – Fabrication d'outil par WEDG. (a) Système de guidage du fil d'après [96]. (b) Outil de 96 μm de diamètre (MEB) d'après [97].

Morgan et al. [98] ont procédé à l'amincissement de barreaux de 150 à 50 μm de diamètre avec des rapports d'aspect de 10, 20 et 30. Leur conclusion est que la limite du procédé WEDG provient essentiellement de la fluctuation du diamètre du fil de cuivre. La rectitude de l'outil varie entre 3 et 12 μm en fonction du facteur de forme. La rugosité de l'outil R_a varie entre 67 nm et 781 nm en fonction de la capacité de travail et de la tension d'usinage.

c) Machine Smaltec EM203

D'après le fabricant, la machine EM203 (Figure 27) est issue de la technologie Panasonic. La société Smaltec met en avant les points suivants :

- perçage de trous jusqu'à un diamètre de 3 μm ;
- perçage de trous de diamètre 40 μm , 50 μm et 100 μm avec un rapport d'aspect respectivement de 20, 35 et 40 ;
- état de surface R_{max} de 40 nm.

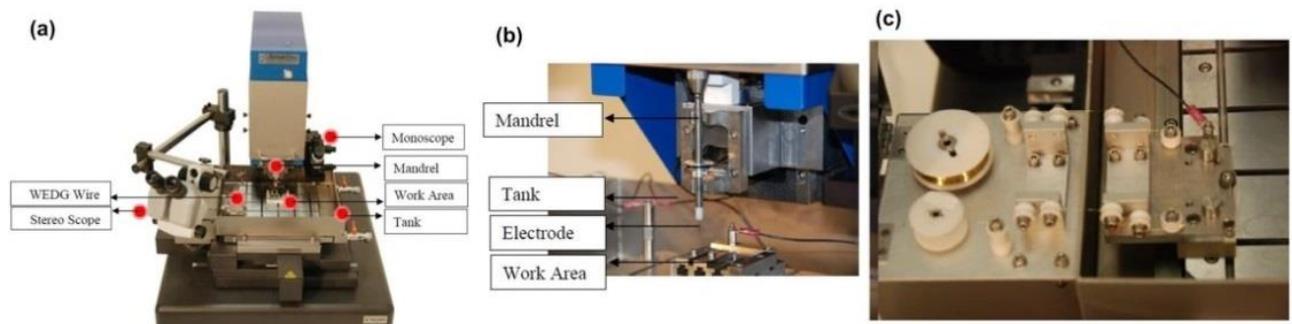


Figure 27 – Machine de fraisage par μEE EM203 d'après [99]. (a) Disposition des postes. (b). Broche tournante. (c) Poste WEDG.

La Figure 28 montre une électrode-outil en tungstène de 300 μm de diamètre amincie jusqu'à 25 μm en trois étapes avec le poste WEDG de la machine.



Figure 28 – Amincissement d'une électrode-outil de 300 μm à 25 μm de diamètre par WEDG d'après [99].

d) Machine Sarix SX-100

La Figure 29 montre une vue des différents éléments de la machine Sarix SX-100 d'après [53] et [100]. On retrouve une configuration avec un poste de fabrication des outils par WEDG et un poste de fraisage par μEE . Les fonctions suivantes sont aussi intégrées: rotation avec avance automatique de l'électrode outil, compensation d'usure de l'électrode outil et affûtage automatique de l'électrode outil par WEDG.

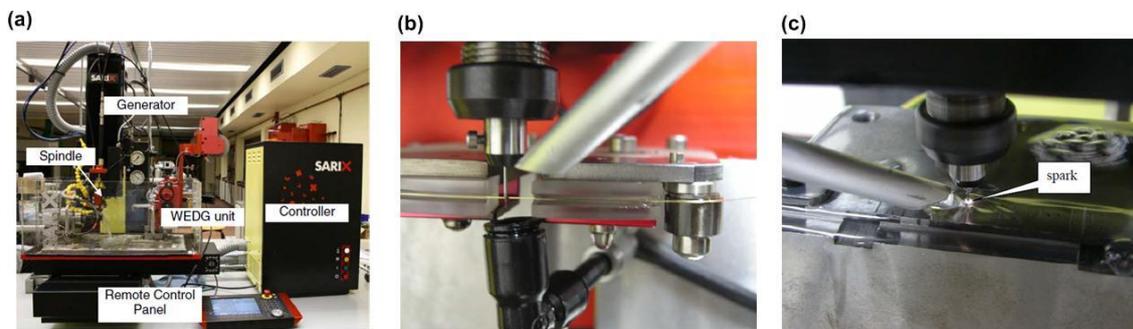


Figure 29 – Machine de fraisage par μEE SX-100. (a) Vue d'ensemble d'après [101]. (b) Poste de fabrication des outils par WEDG d'après [100]. (c) Poste de fraisage par μEE d'après [100].

Le générateur de décharge est du type RC. D'après [101], il y a trois variantes de générateur : le SX-MPS (Micro Pulse Shape Generator), le SX-MFPS (Micro Fine Pulse Shape Generator) et le générateur de dernière génération SX-UFPS (Ultra Fine Pulse Shape Generator) qui doivent être utilisés en fonction du diamètre de l'électrode-outil (Figure 30)¹. Peu d'information est disponible sur ces générateurs, ce qui rend problématique l'interprétation d'expériences décrites dans les articles scientifiques de l'avis même des auteurs [102], [103].

Néanmoins, d'après [100], le générateur SX-MPS est capable de produire des impulsions de courant de 50 ns à 2 μs avec un courant crête qui peut atteindre 50 A ; la tension d'usinage varie entre 50 V et 250 V. Le générateur SX-MFPS est utilisé en WEDG pour produire des outils de diamètre 5 μm .

¹ Auquel s'ajoute le générateur SX-HPS (High Pulse Shape Generator) pour les ébauches rapides (taux d'enlèvement de matière élevé) et le perçage de trous de grand diamètre.

D'après [102] et [103], les impulsions de courant les plus courtes ont une durée de 30 à 50 ns avec un courant crête de 0,25 A ; l'énergie par décharge mesurée à l'oscilloscope est de l'ordre de 125 nJ.

La documentation de la Sarix fait état d'impulsions de courant de 10 ns avec le générateur SX-UFPS (ultrafine pulse shape). On ne connaît pas l'énergie par décharge.

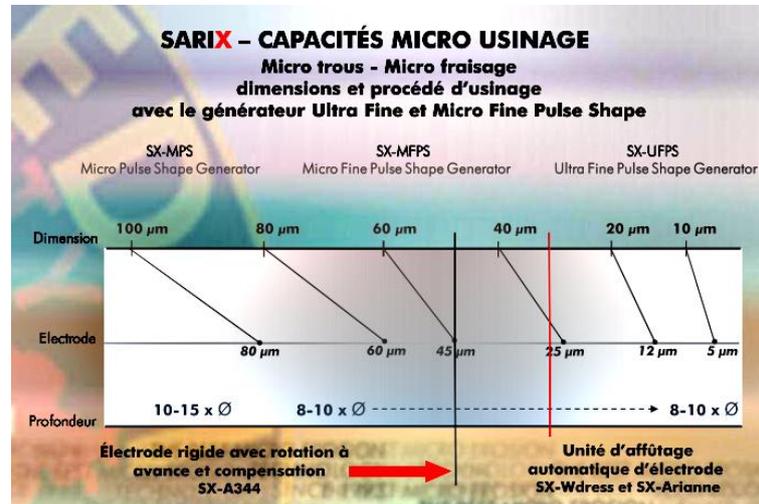


Figure 30 – Dimensions et procédés d'usinage avec les générateurs SX-MPS, SX-MFPS et SX-UFPS d'après [101].

Le Tableau 3 résume les possibilités en termes d'usinage communiquées par le fabricant, et ce en fonction de la géométrie [101] :

Structure	Performances réalisés
Micro-trous	<ul style="list-style-type: none"> • Φ_{Outil} : 80 à 130 μm • Facteur de forme / Φ_{Outil} : 150 • Faible tolérance : $\pm 0,01$
Micro-cavités	<ul style="list-style-type: none"> • Rayon minimum entre parois : 10 μm • Rayon e fond de structure : 3 μm • Précision des parois en finition : $\pm 1,5 \mu\text{m}$ • Qualité de surface en ébauche (Ra) : 1,5 μm • Qualité de surface en finition (Ra) : 80 nm
Surfaces planes	<ul style="list-style-type: none"> • Qualité de surface (Ra) inférieure à 2 μm
Piliers et parois structurelles	<ul style="list-style-type: none"> • Structure la plus petite réalisable : 10 μm • Angles vifs
Paroi haute	<ul style="list-style-type: none"> • Largeur minimum des canaux : 12 μm • Précision des parois (finition) : $\pm 1,5 \mu\text{m}$ • Qualité de surface (ébauche) : 1,5 μm • Qualité de surface (finition) : 80 nm • Angles vifs

Tableau 3 – Possibilités en termes d'usinage par μEE en fonction de la géométrie d'après [101].

La Figure 31 montre différents exemples d'application.

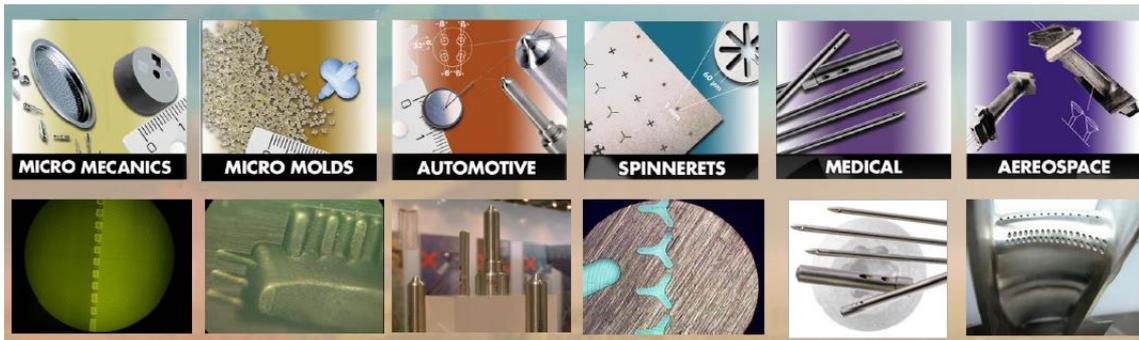


Figure 31 – Exemples d'application de la technologie Sarix dans différents domaines de l'industrie d'après [101].

Beaucoup de publications concernent l'usinage de micro trous. A notre connaissance, il existe peu d'exemples d'application bien documentée concernant des pièces 3D.

Néanmoins Liu et al. [102] ont réalisé un micro-compresseur cylindrique en acier inoxydable de 1 mm de diamètre. Le trou central de 0,3 mm de diamètre a été percé directement avec un micro-outil en carbure de tungstène. Les pales ont été usinées en fraisage par μ EE par couches de 0,5 μ m avec un outil de 40 μ m de diamètre usiné par WEDG. La précision de la pièce est de la pièce est de 1 μ m. L'examen de la pièce a montré que les cratères d'érosion ont un diamètre de 20 μ m en mode perçage et 6,5 μ m en mode fraisage par μ EE.

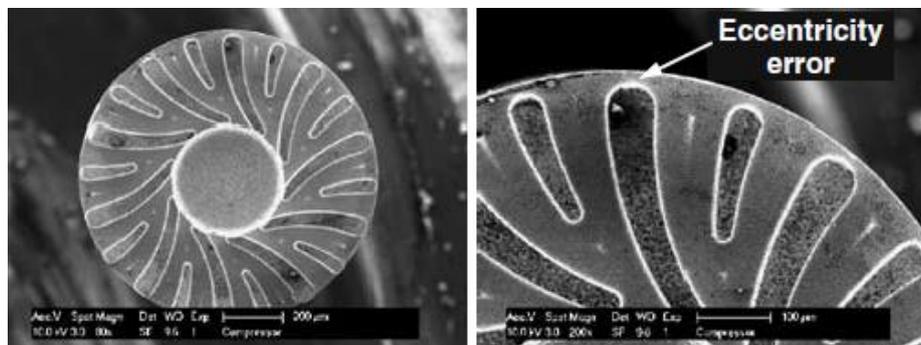


Figure 32 – Micro-turbine réalisée par fraisage par μ EE d'après [102].

Par ailleurs, Jurischka et al. [104] ont montré l'intérêt d'une combinaison entre fraisages par enlèvement de copeaux et par μ EE pour la réalisation d'un moule d'injection ; l'application concerne l'injection d'un dispositif microfluidique en polymère COC pour l'analyse sanguine. L'intérêt de cette démarche est qu'il serait trop long de tout usiner par fraisage par μ EE.

L'ébauche est usinée par enlèvement de copeaux avec un outil de 2 mm de diamètre puis un outil de 0,5 mm en laissant une surépaisseur de 100 μ m (Figure 33a et b). Les éjecteurs ainsi que les angles de dépouille (5°) sont usinés à cette étape qui dure 3 heures.

La réalisation des microstructures et l'amélioration des états de surface sont ensuite effectuées par fraisage par μ EE à l'aide d'une machine Sarix SX-100 d'abord avec un outil

de 340 μm de diamètre puis avec un outil de 45 μm (Figure 33.c et d). La surface à usiner est d'environ 50 mm^2 . La durée de cette étape est de 17 heures. Des structures (nervures) de 18 μm avec un rapport d'aspect de 5,5 et un état de surface Ra de 69 nm sont obtenues (Tableau 4). L'angle de dépouille est de 0,8°.

Jurischka et al [104] notent l'absence de bavure. Le Tableau 4 permet de comparer les dimensions et l'état de surface de l'outillage et de la pièce injectée. Il est rapporté que 8000 injections ont été réalisées avec un temps de cycle de 35 s, ce qui confirme que la technologie développée présente un grand intérêt pour la production de masse de dispositifs microfluidiques.

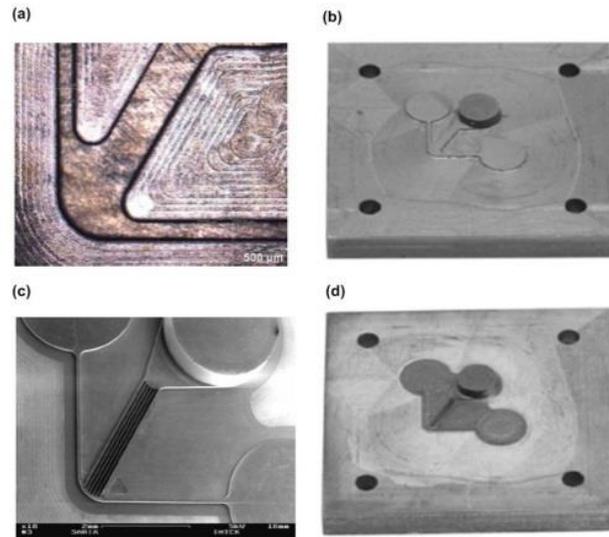


Figure 33 – Réalisation d'un moule d'injection par combinaison entre fraisages par enlèvement de copeaux et par μEE d'après [104]. (a) et (b) Réalisation de l'ébauche par fraisage par enlèvement de copeaux. (c) et (d) Usinage des microstructures par fraisage par μEE .

	Outillage	Pièce injectée
Macro structure usinée par enlèv. de copeaux		
Hauteur (μm)	0,781	0,788
Inclinaison ($^\circ$)	5	5
Etat de surface Ra (nm)	70	76
Micro structure usinée par fraisage par μEE		
Largeur minimum (μm)	18 ¹	17,7
Hauteur (μm)	99,2	97,7
Rapport d'aspect ($^\circ$)	5,5	5,5
Inclinaison	0,8	0,8
Etat de surface Ra (nm)	69	76

Tableau 4 – Comparaison les dimensions et l'état de surface d'un outillage hybride et de la pièce injectée en polymère COC d'après [104].

¹ Nervure.

e) Mikrotool

La DT-110 de la société Mikrotool est une machine dite « hybride » (Figure 34) c'est à dire qu'elle permet de mettre en œuvre différents procédés d'usinage par μ EE (enfonceur, fil, fraisage, meulage, meulage à fil) et par micro-outils coupants (microtournage, microfraisage, microperçage) ; l'intérêt étant de combiner les avantages des différentes technologies dans la même machine (ébauche rapide par enlèvement de copeaux et usinage à haute résolution par μ EE par exemple) [65].

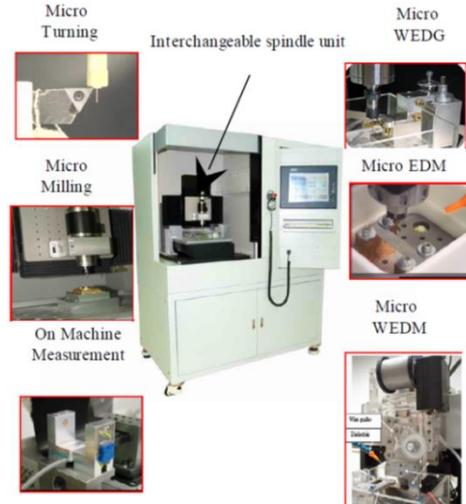


Figure 34 – Machine usinage hybride DT-100 d'après [65].

D'après [65], les outils sont fabriqués par MBEDG (Moving block electro-discharge grinding). Le générateur est du type RC. Les étincelles les plus fines dans une huile minérale sont de 30-60 nJ et sont obtenues avec la capacité parasite de la machine (~ 20 pF). L'application envisagée est l'usinage de motifs avec une résolution de 5 à 50 μ m. La Figure 35a (faisant référence à une tentative d'usinage avec une résolution de 1 μ m) montre que la résolution limite d'un tenon est de 5 μ m (facteur de forme ~ 1).

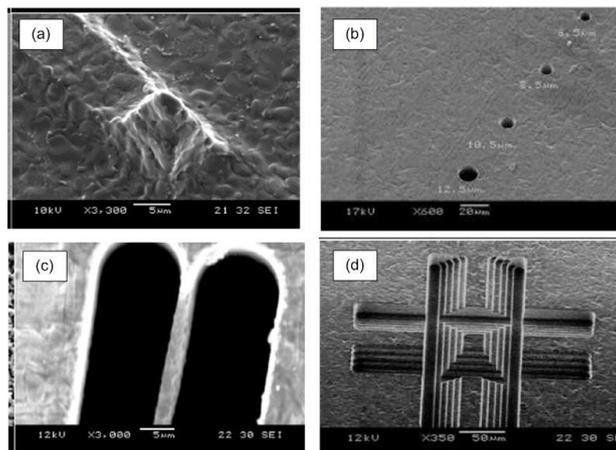


Figure 35 – Usinages à haute résolution par fraisage et perçage par μ EE avec la machine DMT-100 d'après [65]. Générateur RC : 1 k Ω , capacité parasite (~ 20 pF). Tension d'usinage : 60 V. Durée des décharges 30 ns avec un courant crête de 200 mA. Diélectrique : huile minérale EDM 3 de Total. Acier inoxydable SUS 304.

D'autres exemples d'usinage à haute résolution dans l'acier inoxydable sont les suivants (diélectrique : huile minérale EDM 3 de Total) :

- Trous de 6.5 à 12 μm de diamètre dans une plaque d'épaisseur 50 μm (Figure 35b).
- Canaux de de largeur 10 μm dans une plaque d'épaisseur 50 μm ; la largeur de paroi est de 2,5 μm (Figure 35c).
- Micro pyramide 3D de 25 x 25 x 35 μm avec des couches de 7 μm (Figure 35d).

La Figure 36 montre des exemples d'usinage dans l'eau déionisée à faible résistivité (0,5 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$). On notera qu'avec ce diélectrique, plusieurs publications font état d'un mode mixte « usinage par microélectroérosion / usinage électrochimique » [105] avec une amélioration de l'état de surface (Figure 36b, Figure 36d et Figure 36f). Celle-ci dépend notamment de la vitesse.

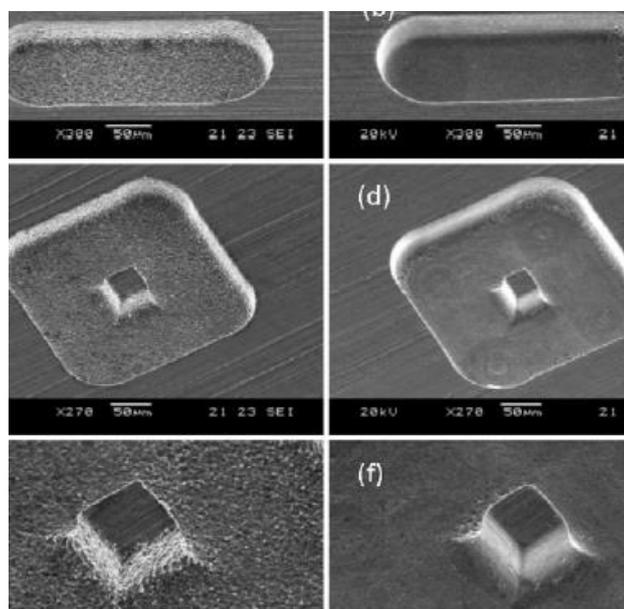


Figure 36 – Vues MEB de microcanaux et micro tenons usinés dans l'eau déionisée d'après [105]. (a), (c), (e) : 50 $\mu\text{m/s}$. (b), (d), (f) : 50 $\mu\text{m/s}$.

1.5. Conclusion du chapitre

Par rapport à la plupart des travaux publiés dans le domaine de la μEE , la stratégie de l'INL étant non pas d'acquiescer une machine commerciale mais d'en développer une, de façon à pouvoir étudier tous les aspects du procédé.

Nous nous appuyerons notamment sur une méthode originale de fabrication des micro-outils par gravure électrochimique et non pas sur la méthode WEDG adoptée par la plupart des machines commerciales.

Par ailleurs, l'accent sera mis sur la maîtrise des différentes parties de la machine et notamment de leurs interactions. Cela passe par le développement d'un dispositif expérimental qui est décrit au chapitre suivant.

CHAPITRE 2 :

DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Comme indiqué dans l'introduction, le projet de l'INL était basé dès l'origine sur l'intégration (i) d'un procédé de fabrication de micro-outil par gravure électrochimique [14] avec (ii) un procédé d'usinage par électroérosion [15]. La stratégie du laboratoire était non pas d'acquérir une machine commerciale (qui aurait constitué une boîte noire) mais d'en développer une de façon à pouvoir étudier tous les aspects du procédé.

Pour ce faire, l'INL a procédé par étapes, avec un travail préliminaire effectué durant la thèse d'A. Benilov, [16], [17], [64], puis un développement expérimental d'une machine de 1^{ère} génération mené dans le cadre de la thèse de G. Girardin [13], [14], [16],[106]–[109]

Pour faciliter la lecture de ce mémoire, nous avons rassemblé dans le chapitre 2, tous les développements concernant les machines d'usinage par μ EE. Ceux ayant trait à la gravure des outils sont reportés au chapitre 3. Le chapitre est organisé de la manière suivante. Les travaux de Benilov et de G. Girardin seront brièvement rappelés ci-dessous. Puis nous passerons à la description de la machine de 2^{ème} génération qui fait l'objet de cette thèse.

2.1. Générations antérieures de machine de fraisage par microélectroérosion

2.1.1. Développement préliminaire (A. Benilov)

Dans le travail exploratoire mené par A. Benilov et al., il n'y avait pas d'intégration du poste de fabrication électrochimique des micro-outils et du poste d'usinage par μ EE dans une machine unique. La fabrication des micro-outils était effectuée à part, par gravure électrochimique d'un fil de platine iridium (PtIr) de diamètre 250 μ m dans une solution saturée de NaCl (Figure 37a). Pour ce faire, une d.d.p. alternative était appliquée entre le fil et une contre-électrode en graphite avec un signal décroissant par paliers de 30 à 5 V contrôlés manuellement. Il s'agissait d'une technologie développée à l'origine pour élaborer les sondes de microscopes à effet tunnel¹. Les outils obtenus avaient une forme conique avec une extrémité de quelques μ m (Figure 37b), ce qui obligeait à limiter l'enfoncement des outils pendant les phases d'usinage par μ EE.

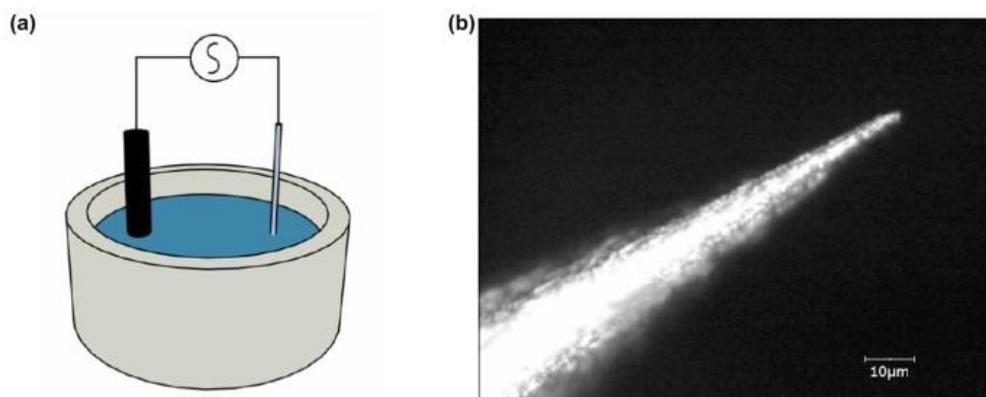


Figure 37 – (a) Gravure électrochimique d'un fil de Pt-Ir ; (b) Outil obtenu à partir d'un fil de 250 μ m de diamètre d'après [17].

¹ La démarche qui consistait à utiliser des sondes de microscopes à effet tunnel comme outil d'usinage par μ EE a été proposée indépendamment et ultérieurement par Egashira et al. [166].

Le poste d'usinage par μ EE était basé sur deux systèmes de déplacement imbriqués l'un dans l'autre mais dont les mouvements n'étaient pas coordonnés (Figure 38a) :

- trois actionneurs piézoélectriques Melles Griot DRV120 (course 30 μ m, résolution 10 nm avec capteur de position) regroupés sous la forme d'une table X'Y'Z' portant la pièce¹ ;
- deux axes de translation XY portant la table X'Y'Z' et un axe de déplacement Z portant l'outil (axes OWIS avec des moteurs pas à pas avec un pas de 2,5 μ m).

L'outil était emmanché dans un embout de seringue. La solution utilisée comme diélectrique d'usinage était soit de l'eau déionisée soit un mélange à 50% d'eau déionisée et de glycérol, que l'on faisait passer à travers l'embout.

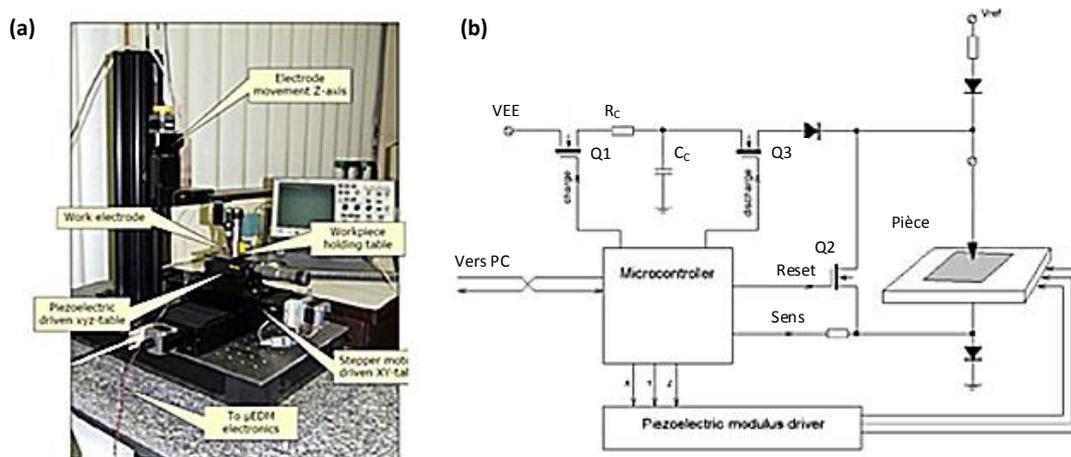


Figure 38 – Développement préliminaire effectué à l'INL d'après [17]. (a) Module d'usinage par μ EE ; (b) Principe du générateur de décharges.

La Figure 38b montre le principe du circuit générateur de décharges. Il s'agit d'un circuit RC (générateur Lazarenko) à relaxation commandé par trois transistors Q1 (charge), Q2 (reset) et Q3 (décharge) de type IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) pilotés par des drivers IR2108/IR2117 et fonctionnant en cycle.

La charge du condensateur à travers la résistance R_C est assurée par la fermeture de Q1 et l'ouverture de Q3. Puis Q3 est fermé et Q1 est ouvert, ce qui autorise la création d'une étincelle entre l'outil et la pièce si les conditions sont réunies à l'entrefer. En fin de cycle le condensateur est déchargé par la fermeture de Q2.

L'ensemble est géré par un microcontrôleur (μ C) ATmega162² 8 bits de fréquence 16 MHz. Un circuit électronique de caractérisation des décharges détermine s'il y a eu une décharge en retournant l'information au μ C. Il détecte aussi l'occurrence possible d'autres événements³ (contact mécanique outil/substrat, fuite de courant) et même l'absence d'événement (pas de décharge par exemple). En cas de contact mécanique outil-substrat qui pourrait endommager l'outil, le μ C commande le retrait vertical de l'électrode via un circuit

¹ Le plus souvent du silicium, ce qui permettait de régler la question de la planéité du substrat (cf. section 2.2.3).

² La famille de μ C ATmega a été depuis lors intégrée dans la plate-forme électronique ouverte Arduino.

³ Certains événements peuvent intervenir à tout moment (contact mécanique), d'autres lorsque la capacité de travail est chargée (décharge, fuite de courant), ce qui conduit à développer des solutions différentes pour les détecter.

de commande des axes. Les parcours d'outil sont gérés par un ordinateur superviseur en lien avec le μC .

Pour stabiliser le régime d'usinage, la gestion de l'entrefer est assurée de la manière suivante dans le cas de l'usinage d'un canal :

- l'axe Z' rapproche l'outil de la pièce jusqu'à détection de la première décharge ;
- à ce moment-là, la descente de l'outil est stoppée et les axes X 'Y' sont actionnés tant qu'une décharge est détectée ;
- lorsque plus aucune décharge n'est détectée, l'axe Z' rapproche l'outil de la pièce jusqu'à détection d'une nouvelle décharge de façon à recommencer le cycle.

A tout moment, si un court-circuit électrique est détecté, l'outil est aussitôt éloigné du substrat car l'on suppose qu'il s'agit d'un contact mécanique.

La Figure suivante montre des exemples d'usinage d'un wafer de silicium p+ ($0,005 \Omega \text{ cm}$) d'épaisseur $400 \mu\text{m}$.

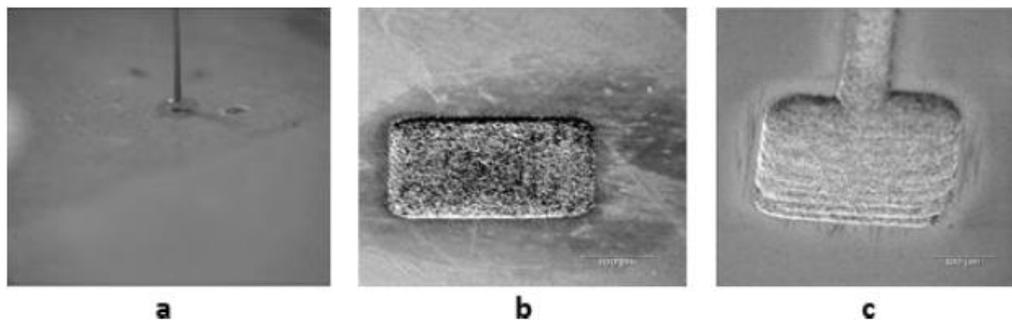


Figure 39 – Usinages effectués par Benilov et al. [17]. (a) Perçage d'un trou de part en part avec une électrode de $100 \mu\text{m}$. (b) Cavité de $250 \times 250 \mu\text{m}$ avec pilier central de largeur $1 \mu\text{m}$. (c) Canal microfluidique relié à une cuve de $250 \times 250 \mu\text{m}$.

Un autre résultat montré à la Figure 40 est la réalisation d'impacts élémentaires espacés de $25 \mu\text{m}$ dans du silicium dopé p+. Le diamètre des impacts est compris entre $1,5$ et $3 \mu\text{m}$ avec une profondeur d'environ 150 nm , ce qui donne un ordre de grandeur de la résolution d'usinage de la μEE . Les axes utilisés pour cet usinage étaient les actionneurs piézoélectriques DRV120.

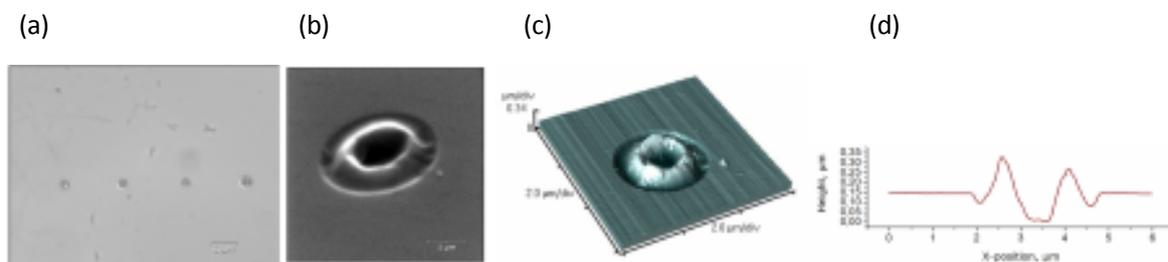


Figure 40 – Impacts élémentaires réalisés par μEE d'après [16][17]. (a) Microscope optique. (b) MEB. (c) et (d) Microscope à force atomique. Tension d'usinage 30 V ; résistance de charge 100Ω ; capacité 33 nF pour (a), $4,7 \text{ nF}$ pour (b), (c) et (d).

En conclusion, l'instrument développé durant la thèse d'A. Benilov a permis de « débroussailler » la problématique du procédé. Le poste de fabrication électrochimique des micro-outils était insuffisamment développé. Le poste d'usinage par μ EE a permis d'obtenir des usinages prometteurs. Son architecture avait pour ambition d'apporter une réponse systématique aux différents problèmes posés par le procédé. Néanmoins, la réalisation n'était pas assez aboutie sur le plan technique (transistor de décharge Q3 du générateur de la Figure 38b « mal » polarisé, circuit de caractérisation des décharges ne comptant pas toutes les décharges, etc.). Dans l'impossibilité de corriger ces insuffisances, la décision a donc été prise de développer une nouvelle machine.

2.1.2. Machine de 1^{ère} génération (G. Girardin)

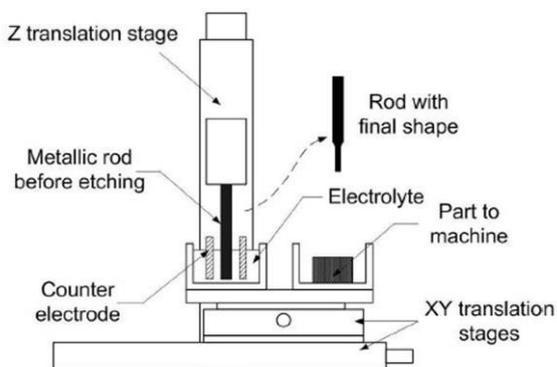
a) Principe

La machine développée par G. Girardin comporte pour la première fois deux postes avec passage automatique d'un poste à l'autre (Figure 41) :

- un poste de fabrication des micro-outils par gravure électrochimique (cf. chapitre 3) ;
- un poste d'usinage par μ EE, que nous allons détailler ci-dessous.

Ainsi l'opérateur n'a pas à manipuler des micro-outils qui peuvent être très fins et donc fragiles.

(a) Fabrication of microtool



(b) μ EDM milling

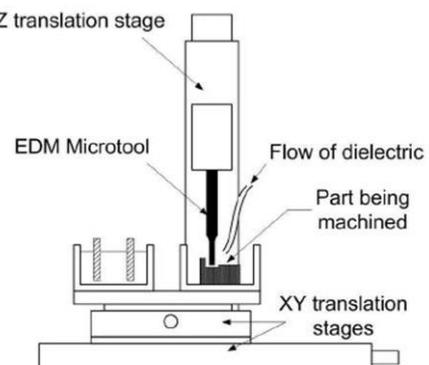


Figure 41 – Principe de la machine à double poste d'après [13]. (a) Gravure électrochimique d'un micro-outil. (b) Fraisage par μ EE à l'aide de l'outil.

L'électronique de commande du poste d'usinage par μ EE est montrée à la Figure 42. Par rapport à la Figure 38b, il y a non pas un μ C mais deux μ Cs.

Le microcontrôleur μ C1 gère le module de contrôle des déplacements en X, Y et Z et le module de caractérisation des décharges ; celui-ci surveille la survenance d'un court-circuit électrique (contact mécanique outil-substrat) ainsi que l'occurrence ou non des décharges, en comptant celles-ci. En cas de court-circuit électrique, le μ C1 donne l'ordre de stopper tout mouvement et de faire remonter l'axe Z ; puis au bout d'un délai défini par l'opérateur, il fait redescendre l'outil de sorte que la machine peut continuer l'usinage.

Le microcontrôleur $\mu C2$ gère le module de génération des décharges ainsi que le mouvement d'un actionneur piézoélectrique Z' qui permet d'ajuster la valeur de l'entrefer, et ce indépendamment des autres mouvements de la machine (gérés par le $\mu C1$).

Comme indiqué sur la Figure 42, des liaisons sont aussi prévues entre $\mu C1$ et $\mu C2$ pour :

- coordonner le contrôle des mouvements des axes principaux XYZ et de l'actionneur piézoélectrique Z' en se servant des données de caractérisation des décharges ;
- synchroniser la commande des mouvements avec le générateur des décharges¹.

On notera la présence d'un ordinateur portable permettant de modifier le firmware des deux μC . Par ailleurs, un PC superviseur :

- envoie les parcours d'outil au $\mu C1$;
- collecte auprès du $\mu C2$ les informations sur l'usinage réalisé : nombre de décharges et nombres de contacts².

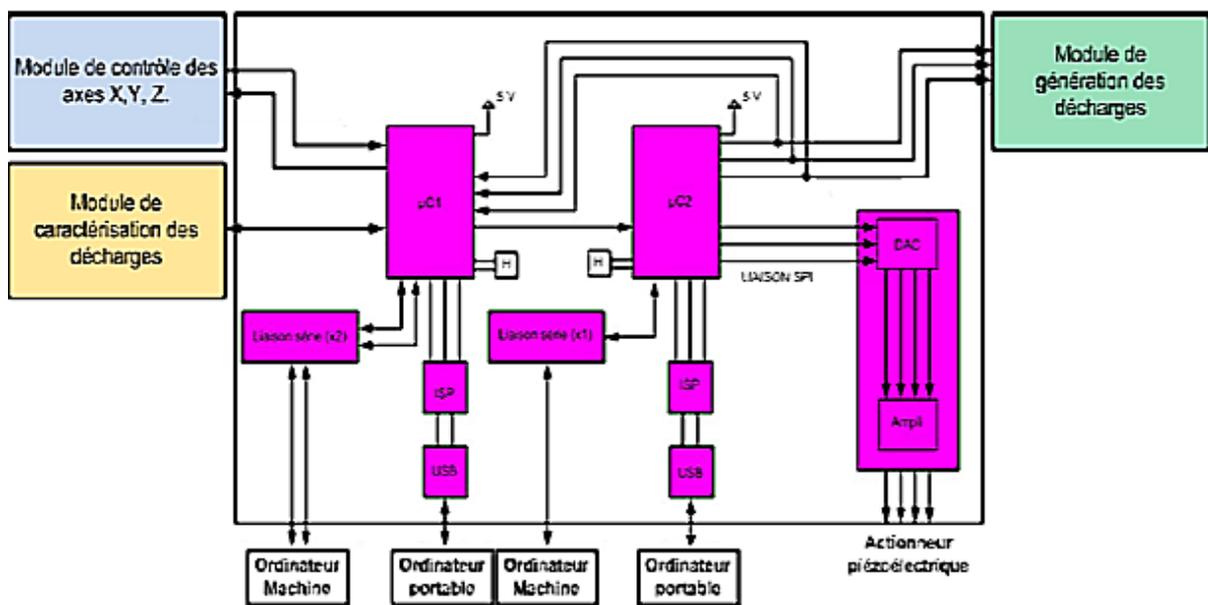


Figure 42 – Schéma de principe de l'électronique de commande de la machine de μEE de 1^{ère} génération [13].

b) Réalisation expérimentale

La Figure 43 montre une vue générale de la machine montée sur un banc optique. Le poste de micro-usinage par électroérosion et le poste de gravure des micro-outils sont disposés côte à côte. Deux caméras avec zoom à grande distance de travail sont prévues pour la caractérisation optique de l'outil (vision de coté) et les usinages de la pièce (vision par-dessus). Les axes de déplacement XYZ sont les axes OWIS avec moteur pas à pas

1 Par exemple pour veiller à ce que le générateur des décharges soit désactivé aux points d'arrêt des axes (changement de commande de mouvement ou de direction d'axe).

2 Sans information sur le position de sorte qu'aucune cartographie de décharges n'est possible (cf. section 4.9.3c).

mentionnés précédemment ; l'actionneur piézoélectrique P843.60 décrit plus loin permet de régler la valeur de l'entrefer.

Le porte-substrat permet de fixer une pièce à usiner, qui est le plus souvent une plaque d'acier inoxydable de $20 \times 20 \times 0,5 \text{ mm}^3$. Un réglage à l'aide de trois vis micrométriques permet de régler l'horizontalité du substrat¹.

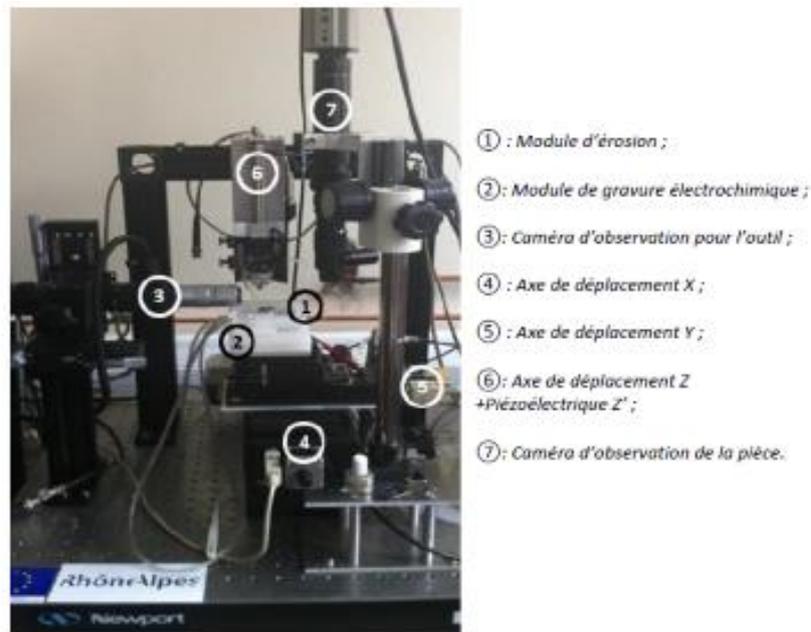


Figure 43 – Première génération de machine de micro-usinage par électroérosion [13].

c) Réalisation des modules électroniques

Le lecteur est invité à se reporter à la thèse de G. Girardin pour une description détaillée des modes de réalisation des modules électroniques. Dans la pratique ces cartes ont été développées pour assurer les fonctions suivantes :

- pilotage des moteurs pas à pas en mode pas entier $2,5 \mu\text{m}$ ou demi-pas $1,25 \mu\text{m}$ (ce dispositif sera totalement remplacé dans la machine de 2^{ème} génération) ;
- génération des décharges décrit ci-dessous car conceptuellement important ;
- caractérisation des décharges dont la description est reportée à la section 2.2.4.g car cette réalisation sera améliorée et intégrée dans la machine de 2^{ème} génération ;
- cartes permettant de mettre en œuvre les μC1 et μC2 dont les générations suivantes sont décrites en section 2.2.4.e.

Le générateur des décharges est un circuit RC piloté par deux MOSFETs dont le schéma de principe est la Figure 17a. La cellule de base est une capacité de travail C_C ($0,1 \text{ nF}$ à $1 \mu\text{F}$) chargée par un source de tension à la tension d'usinage V_{EE} (10 à 300 V) par l'intermédiaire d'une résistance de charge R_C (100Ω).

¹ Solution reprise dans la machine de 2^{ème} génération : cf. section 2.2.3.

Le MOSFET T1 de la Figure 44 permet d'autoriser la charge pendant une durée T_{ON} , réglable de 10 μ s à plusieurs centaines de μ s, tandis que le MOSFET T2 permet de maintenir la capacité déchargée pendant une durée T_{OFF} , réglable indépendamment de 10 μ s à plusieurs centaines de μ s.

Lorsque les conditions à l'entrefer sont réunies (distance outil-substrat, renouvellement du diélectrique), une décharge est créée entre outil et substrat en déchargeant la capacité de travail. Cet évènement est si rapide que l'on peut considérer que la cellule $R_C C_C$ est déconnectée du générateur au moins au début de la décharge. Lorsque celle-ci est terminée, il y a de nouveau un circuit ouvert entre outil et substrat, de sorte que la source de tension peut charger de nouveau la capacité de travail avec une constante de temps $R_C C_C$ tant que T1 est fermé.

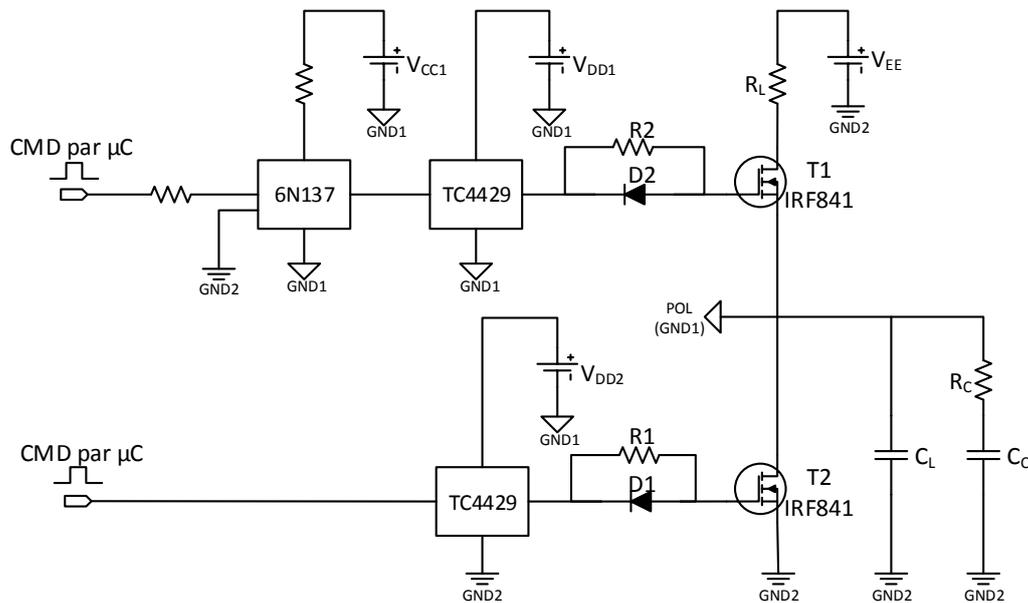


Figure 44 – Générateur des décharges du type Lazarenko à relaxation d'après [13].

Pour des décharges dans l'air, il a été possible d'établir expérimentalement que la durée de l'impulsion de courant qui passe dans le micro-outil ne dépend pas de la tension d'usinage mais de la capacité de travail (Tableau 5). Les détails de ce travail (auquel j'ai participé) sont dans l'Annexe 1.

C_c (nF)	Durée de l'impulsion de courant δ (ns)
0,1	80 ± 5
1	200 ± 10
10	550 ± 20
100	1550 ± 50

Tableau 5 – Durée des impulsions de courant en fonction de la capacité de travail d'après [13], [109].

Pour des décharges dans l'eau déionisée, la Figure 45 montre une capture d'écran des différents signaux mesurés au niveau du générateur pendant une phase d'usinage.

La d.d.p. aux bornes du condensateur de charge C_C est en bleu. Comme nous l'avons déjà indiqué, les décharges électriques sont uniquement possibles pendant les durées T_{ON} . En fonction des conditions d'usinage, on notera l'occurrence d'un contact, d'une ou plusieurs décharges et éventuellement l'absence de décharge.

La d.d.p. mesurée aux bornes du circuit $R_C C_C$ est en violet ; elle correspond aussi à la d.d.p. entre le point POL (masse flottante GND1) de la Figure 44, qui constitue un point critique du circuit (référence de polarisation du transistor haut) et le point de référence GND2

Le courant qui traverse l'outil, mesuré par une sonde de courant à effet Hall, est en vert.



Figure 45 – Capture d'écran par oscilloscope des décharges en cours d'usinage. En bleu : d.d.p. aux bornes de C_C . Violet : d.d.p. entre le point POL et le point de référence GND2. Vert : courant qui traverse l'outil ($1V=1A$). $R_b = 0 \Omega$

d) Exemples d'usinage

La Figure 46 montre quelques résultats obtenus avec la machine de 1^{ère} génération :

- un micro-outil en tungstène de $4 \mu\text{m}$ de diamètre et de facteur de forme 20 élaboré dans le poste de gravure électrochimique ;
- des perçages de trous non débouchant dans l'acier inoxydable ;
- un canal microfluidique dans l'acier inoxydable de largeur $40 \mu\text{m}$ et de hauteur $15 \mu\text{m}$.

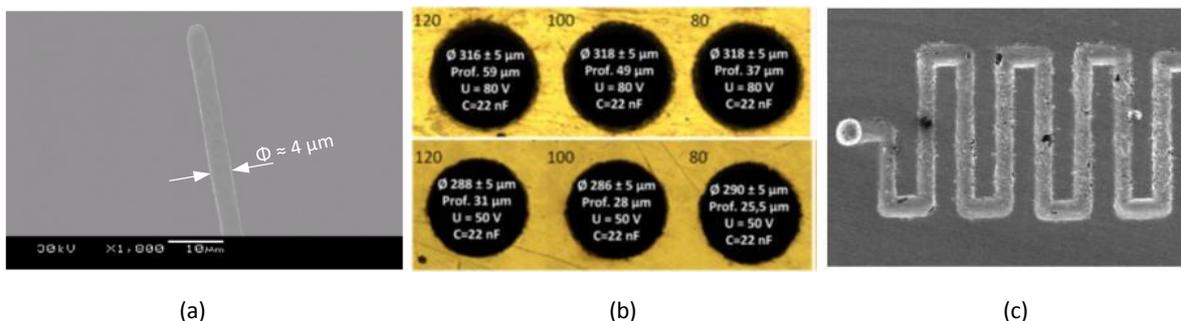


Figure 46 – Essais réalisés avec la machine de 1^{ère} génération d'après [13]. (a) Micro-outil en tungstène ($\phi = 4 \mu\text{m}$; $F_f = 20$). (b) Série de trous usinés dans l'acier inoxydable. (c) Canal microfluidique ($W = 40 \mu\text{m}$; $H = 15 \mu\text{m}$).

e) Conclusion

Avec la machine de 1^{ère} génération, il a été possible de graver électrochimiquement un micro-outil, de l'utiliser pour usiner par μ EE, d'évaluer son usure et de la régénérer par voie électrochimique [106]. Le brevet [15] est ainsi été validé.

Du point de vue instrumental, les progrès réalisés ont été très significatifs, notamment pour ce qui concerne la commande électronique. Chaque fonction a fait l'objet du développement d'une carte spécifique entièrement caractérisée.

Il nous a paru néanmoins nécessaire de développer une nouvelle génération de machine dans le cadre de cette thèse. En effet, comme nous le verrons ci-dessous, le niveau de parallélisme de la commande électronique était insuffisant. D'un point de vue matériel, l'intégration des cartes électroniques entre-elles n'était pas assurée avec une fiabilité suffisante. Le niveau de bruit électrique par rayonnement peut être très important.

Par ailleurs, la précision des axes de translation s'est révélée insuffisante. Bien que la valeur du demi-pas des axes soit de 1,25 μ m, la répétabilité bidirectionnelle de mouvement était de 10-15 μ m. Il était donc possible de creuser un canal avec une seule passe mais la dérive des axes était rédhibitoire lors de l'usinage de cavités profondes nécessitant de multiples allers retours.

Il était donc nécessaire de concevoir et de réaliser un dispositif expérimental plus performant. Pour ce faire, nous sommes passés par une phase d'analyse.

2.2. Machine de 2^{ème} génération

2.2.1. Analyse du procédé

Le fraisage par μ EE présente des spécificités par rapport à d'autres procédés d'usinage comme le microfraisage par enlèvement de copeaux [107], [110]–[112], le micro usinage électrochimique [113]–[123] et l'usinage laser [124]–[131], qu'il nous parait utile d'analyser avant de passer à l'étude de la nouvelle machine de μ EE.

Ces derniers fonctionnent en effet en boucle ouverte avec comme paramètres d'entrée l'énergie à fournir (vitesse de rotation de la fraise, puissance du laser,...) et la trajectoire de l'outil [27].

Dans le domaine de la μ EE, un asservissement en temps réel est nécessaire car il n'existe pas de modèle reliant directement l'enlèvement de matière aux paramètres électriques (tension d'usinage, capacité de travail) et mécanique du procédé (diamètre micro-outil, vitesses des axes,...). Notamment l'occurrence des décharges dans le processus d'usinage a un caractère aléatoire. De plus la machine doit pouvoir réagir à des événements qui peuvent intervenir de manière inopinée pendant l'usinage (par exemple un contact mécanique outil-substrat, un renouvellement insuffisant du diélectrique à l'entrefer). Pour ce faire, la commande électronique doit prendre en compte des événements et/ou mener des actions avec des constantes de temps totalement différentes. Ceux-ci peuvent

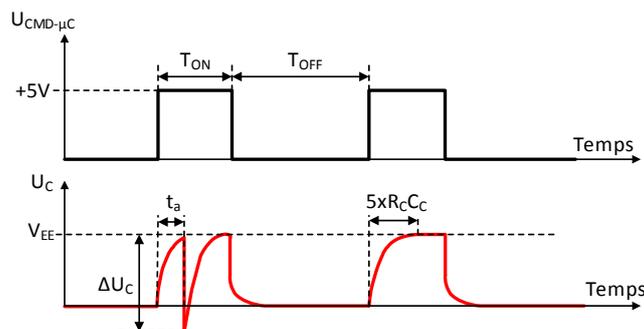
intervenir à tout moment et de manière simultanée. La réaction à ces événements doit obéir à une hiérarchie stricte¹.

Comme illustré sur la Figure 47, ces événements et/ou actions peuvent être classés du plus rapide au plus lent :

- Les décharges considérées individuellement dont l'impulsion de courant a une durée de 50 ns à 1 μ s dépendant essentiellement de la capacité de travail (Annexe 1).
- Les trains de décharges caractérisés par l'écart de temps entre les décharges fonction de :
 - du changement permanent de la valeur réelle de l'entrefer pendant l'usinage (creusement de la pièce et usure de l'outil) ;
 - de la temporisation T_{ON} et de la constante $R_C C_C$ du générateur de décharges ;
 - de la nature stochastique du processus de création des décharges, qui se traduit par un temps de retard variable entre la cause (application d'un champ électrique à l'entrefer) et l'effet (création d'une décharge électrique) dont on peut rendre compte à l'aide d'une distribution statistique de Weibull².
- Les caractérisations et/ou les actions à gérer par l'instrumentation électronique (constantes de temps 1 à 100 μ s) pour :
 - actionner ou couper le générateur autorisant les décharges ;
 - détecter et caractériser l'occurrence de décharges à l'entrefer, un court-circuit ou une fuite électrique ;
 - donner une consigne aux différents éléments mécaniques de la machine.
- Les actions mécaniques avec des constantes de temps de 1 ms à 1 s (déplacement des platines XY, dégagement de l'outil en cas de contact, gestion de l'entrefer avec l'actionneur piézoélectrique...).
- Le renouvellement du diélectrique avec une constante de temps fluïdique de 0,1 à 10 s.

¹ L'exemple le plus important étant la surveillance continue d'un court-circuit électrique pouvant indiquer un contact outil-substrat ; en cas de contact, il convient de couper le générateur et dégager l'outil en stoppant tous les autres mouvements.

² Ci-dessous on montre le temps de retard variable t_a correspondant à l'amorçage de la décharge en utilisant un générateur T_{ON} / T_{OFF} .



- La gestion globale du process (1 minute à 10 h) : taux d'enlèvement de matière ($\mu\text{m}^3/\text{min}$), taux d'usure de l'outil ($\mu\text{m}^3/\text{min}$), etc...

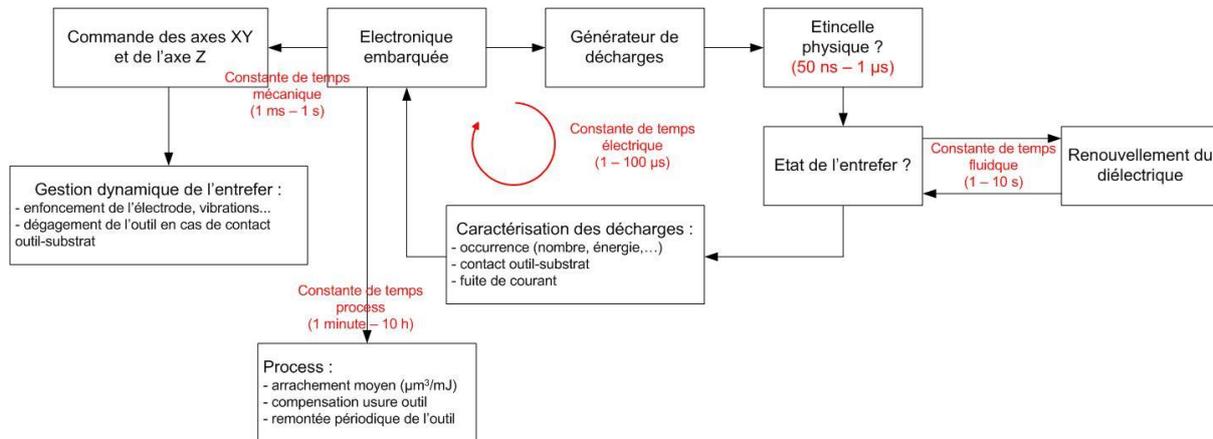


Figure 47 – Les différentes constantes de temps de l'usinage par μEE .

Dans la pratique, la solution retenue pour piloter la machine repose sur une électronique embarquée avec une architecture parallèle. La réalisation des sous-ensembles constituant la commande doit être très soignée ; la génération des décharges et leur caractérisation étant limitée par les possibilités actuelles de l'électronique.

2.2.2. Solution retenue

Par rapport à machine de 1^{ère} génération, l'objectif était d'améliorer très sensiblement la conception mécanique de la machine :

- Les postes de gravure électrochimiques et d'usinage par μEE ont été disposés sur une table anti vibration avec isolation pneumatique (fréquence de résonance 1,3 - 1,8 Hz) ; ce dispositif est nécessaire car la distance outil-substrat (entrefer initial) au début des usinages est couramment de 5 μm .
- Des platines de translation M511 de marque PI, très rigides, ont été mises en place pour les axes XYZ. Ces axes de course 100 mm disposent d'une vis de précision de 2 mm de période actionnée par moteur pas à pas. Le pas est de 5 μm mais nous avons mis en place une commande d'axe en mode micropas avec une résolution de 1/16 de pas soit 0,3125 μm (cf. section 2.2.4.a). D'après le fabricant, l'hystérésis d'une platine, prise isolément, est de 1 μm . La rectitude et la planéité sont de 1 μm / 100 mm tandis que le tangage et le lacet sont de +/- 25 μrad .
- D'autres améliorations seront discutées plus loin, notamment le système de guidage des micro-outils avec un pousse fil.

Par ailleurs, pour ce qui concerne la partie électronique, le niveau de parallélisme a été augmenté avec la mise en place d'une architecture avec trois μC ATmega 162 (Figure 48). L'idée générale est de pouvoir contrôler les mouvements des axes, gérer les oscillations de l'outil et commander le générateur des décharges d'une façon totalement indépendante. L'utilisation de trois μC permet d'éviter l'accumulation des retards dus aux temps de réponse de chacun des modules et de découpler leur fonctionnement en les rendant indépendants.

les uns des autres. Sur le plan technique, un effort important a été fourni pour améliorer l'intégration physique des différentes cartes électroniques (avec notamment le développement de cartes de fond de panier spécifiques).

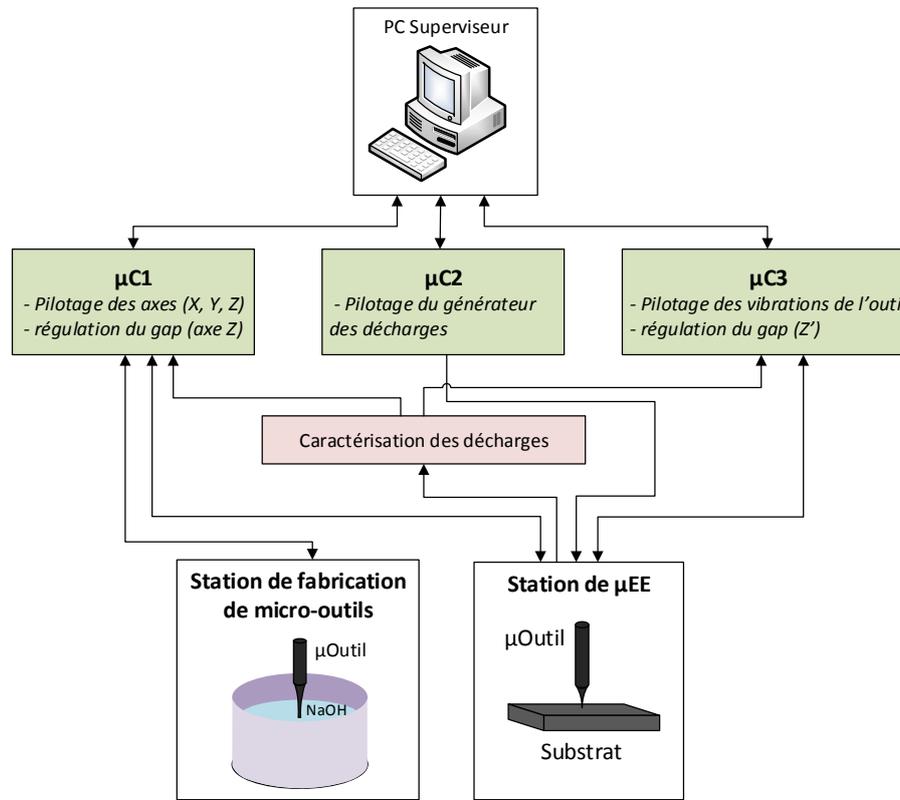


Figure 48 – Solution retenue pour la commande électronique de la machine de μEE de 2^{ème} génération.

Ces μC fonctionnent indépendamment les uns des autres mais ils restent en intercommunication dans le but de gérer d'une manière coordonnée les événements qui peuvent se produire. Ils communiquent aussi avec un PC superviseur à travers l'IHM LabVIEW, notamment pour le renvoi des drapeaux de fin d'exécution des commandes ou des codes d'erreur en cas d'envoi d'une commande défectueuse.

Le $\mu C1$ s'occupe de gérer les mouvements du substrat liés aux axes principaux XY et ceux de l'outil avec l'axe Z. Il dispose d'une liaison pour la lecture des données d'un premier module de caractérisation des décharges pour compter ces dernières et ordonner le retrait de l'outil en cas de contact mécanique avec pièce. Il communique aussi avec le $\mu C3$ afin de synchroniser la commande de l'actionneur piézoélectrique Z' avec les mouvements principaux (XY et Z).

Le $\mu C2$, quant à lui pilote le module de génération des décharges constitué du générateur T_{ON}/T_{OFF} . Il dispose d'une liaison d'intercommunication avec le $\mu C1$ pour coordonner l'activation des décharges avec les mouvements principaux XY, Z et le $\mu C3$ pour le mouvement secondaire Z' (actionneur piézoélectrique).

Le $\mu C3$ a pour tâche de commander le mouvement de l'outil via l'actionneur piézoélectrique Z'. Il dispose aussi d'une liaison de lecture des données avec un deuxième module de caractérisations des décharges pour réguler la valeur de l'entrefer.

2.2.3. Réalisation expérimentale (machine de 2^{ème} génération)

La Figure 49 montre une vue générale de la machine avec les postes de gravure électrochimique et d'usinage disposés sur la table anti vibration, une armoire électrique et une armoire fluidique. Nous nous contentons dans cette section d'une description succincte. Des explications plus détaillées, utiles pour une meilleure compréhension des résultats du chapitre 4, seront fournies dans la section 2.2.4.



Figure 49 – Vue de la machine de 2^{ème} génération avec les postes gravure et usinage sur la table anti vibration et les armoires électronique (à gauche) et fluidique (à droite).

La partie centrale de la machine de 2^{ème} génération est schématisée à la Figure 50. Pour limiter l'usure du micro-outil, l'usinage est effectué en mettant l'outil au potentiel bas et le substrat au potentiel haut (polarisation directe). Nous disposons aussi d'une fonction de lavage de l'outil et d'une fonction d'arasage de l'outil par électroérosion en polarisation inverse¹. On notera aussi l'intégration d'un pousse fil dont le principe sera détaillé plus loin.

¹ L'outil au potentiel haut est érodé contre une zone inutilisée de la pièce ou une électrode plate en graphite portées au potentiel bas. Cette polarité permet d'éroder l'extrémité du micro-outil afin de l'aplanir.

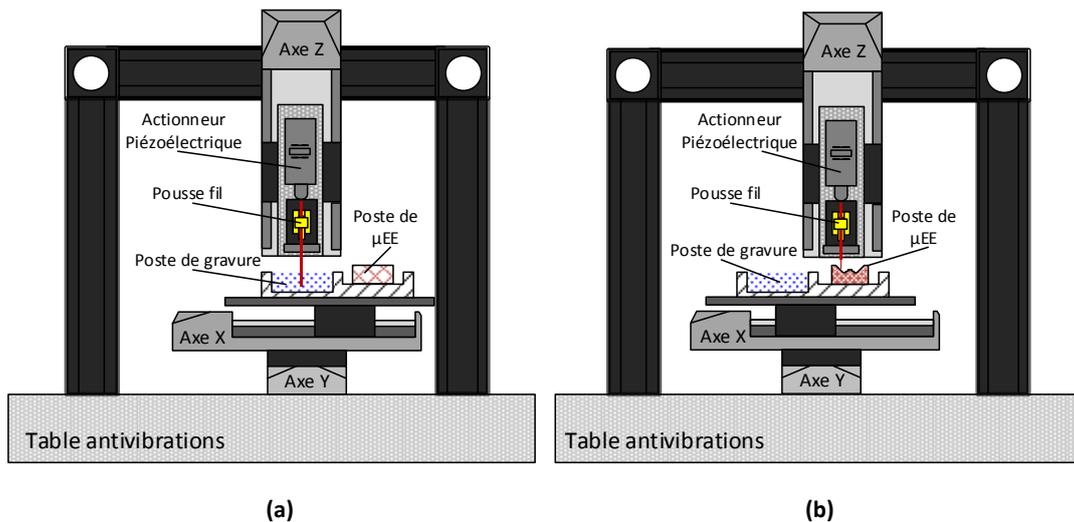


Figure 50 – Principales fonctions de la machine de μ EE: (a) Fabrication de micro-outils par gravure électrochimique; (b) Fraisage sur substrat en acier inoxydable par μ EE.

L'armoire fluide est composée de deux parties indépendantes pour gérer respectivement la solution de NaOH utilisée pour la gravure électrochimique et le diélectrique utilisé pour l'usinage par μ EE (exclusivement de l'eau déionisée dans ce mémoire).

L'armoire électrique contient un châssis d'instrumentation NI PXI avec :

- un PC embarqué (NI PXI-8101), qui sert de PC superviseur (Figure 48) et d'interface avec la station de CFAO ;
- une carte NI PXI-8432/4 avec des interfaces RS232 isolées qui permettent de communiquer avec les μ C1, μ C2 et μ C3 (Figure 48) ;
- une carte NI PXI-8252 avec interface IEEE 1394a permettant de gérer les images des deux caméras disposées sur la machine (caméra 1 permettant d'observer le micro-outil et caméra 2 permettant de caractériser les résultats d'usinage : Figure 51).
- une carte d'instrumentation NI PXI-6229, qui permet de gérer directement l'initialisation des axes ainsi que la gravure électrochimique des outils (Figure 83).

L'armoire électrique contient aussi les cartes électroniques spécifiques listées ci-dessous. Dans ce classement, les cartes issues directement de la machine de 1^{ère} génération sont notées (*) ; celles développées ou améliorées dans le cadre de ce travail sont notées (**).

La liste est la suivante :

- gravure électrochimique des outils (**) : cf. chapitre 3 ;
- commande des axes XYZ en mode micropas (**) : cf. section 2.2.4.a ;
- cartes μ C1 (**), μ C2 (**), μ C3 (**) : cf. 2.2.4.c ;
- générateur de décharges (*) : cf. section 2.2.4.d ;
- caractérisation des décharges (**) : cf. section 2.2.4.e;

Auxquelles il faut ajouter les cartes fond de panier permettant de gérer l'intercommunication entre ces différents éléments (**).

- Par ailleurs, nous avons intégré à l'armoire électrique, les éléments suivants :
- commande de l'actionneur piézoélectrique Z' P843.60 relié au $\mu C3$: cf. section 2.2.4.b ;
 - commande du système de guidage du micro-outil avec pousse fil : cf. section 2.2.4.b ;
 - module de pilotage du micromètre laser LMS-6200 permettant de mesurer le diamètre des micro-outils (cf. Figure 85) ;
 - pilotage des axes de motorisation des caméras et des différents systèmes d'éclairage.

La Figure 51 montre une vue plus détaillée des postes de gravure électrochimique et du poste d'usinage par μEE . On notera que le substrat est disposé sur une table croisée XY tandis que le micro-outil est intégré dans un système de guidage avec pousse fil, lui-même actionné par l'actionneur piézoélectrique Z' et l'axe de translation Z. L'ensemble est disposé sur un châssis en aluminium avec une section de 90 mm.

La capacité d'usinage est de 20 x 20 x 10 mm. La course de l'axe X est suffisante pour que l'on fasse passer le micro-outil du poste de gravure électrochimique au poste d'usinage sans éteindre le moteur. De la même façon, elle permet aussi de faire passer le substrat du poste d'usinage au poste d'observation avec la caméra 2 sans éteindre le moteur. De manière générale, le pilotage des axes est géré par le $\mu C1$ pendant les phases d'usinage tandis qu'il est géré par le PC embarqué NI PXI-8101 pendant les autres phases (mises en place du substrat et du micro-outil, observation avec les caméras, etc.).

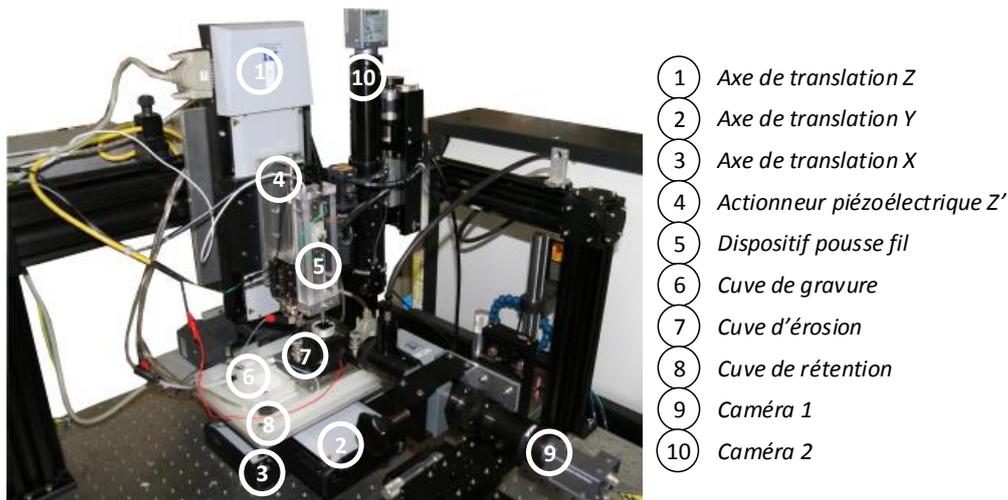


Figure 51 – Vue détaillée de la machine de μEE de 2^{ème} génération.

La Figure 52 montre une vue du poste de μEE (1). La cuve est alimentée d'un côté par une buse (2) qui envoie de l'eau déionisée sur le micro-outil. Celle-ci est vidée en permanence par une pompe (non représentée) qui permet de renvoyer le fluide après utilisation vers un réservoir. La cuve a aussi une fonction de rétention qui permet d'éviter tout débordement possible du diélectrique d'usinage.

Le substrat (3) est fixé sur un porte-substrat (4) dont l'horizontalité est réglée à l'aide de trois vis micrométriques (5).

Par ailleurs, le micro-outil (6) en tungstène de diamètre 250 μm est disposé dans un pousse fil (7) lui-même mis en mouvement par l'actionneur piézoélectrique Z' (page 72).

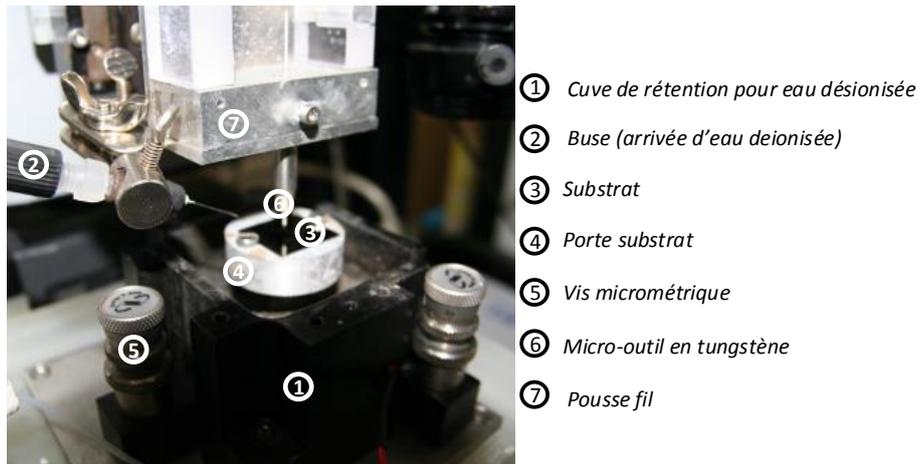


Figure 52 – Vue détaillée du poste de μ EE.

Au total la position du micro-outil est gérée par trois actionneurs (Figure 53) pour ajuster la longueur utile du micro-outil, régler la valeur instantanée de l'entrefer (avec éventuellement un mouvement de vibration) et permettre le dégagement de l'outil en cas de contact.

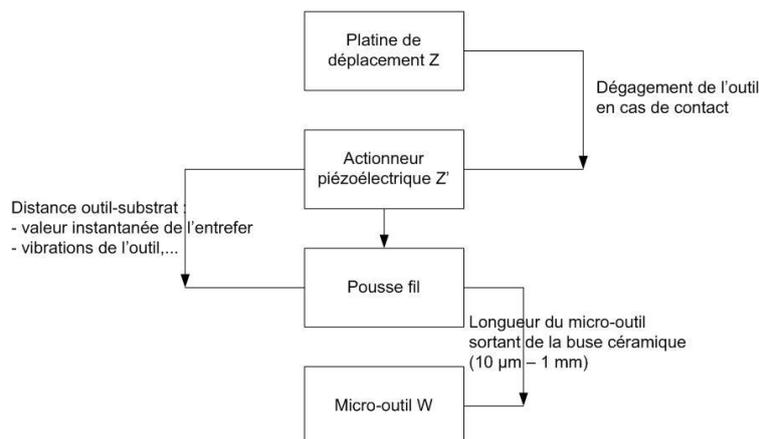


Figure 53 – Actionnement triple du micro-outil.

2.2.4. Description détaillée du dispositif expérimental de 2^{ème} génération

Dans cette partie, nous avons rassemblé les éléments qui nous paraissent importants pour aider à l'interprétation des résultats expérimentaux du chapitre 4. Il s'agit ici de comprendre les possibilités de l'instrument et d'en appréhender les limites.

a) Déplacements XYZ

Comme indiqué plus haut, des platines de translation M511 de marque PI ont été choisies pour les axes XYZ. Ce modèle est actionné par un moteur pas à pas bipolaire, (résistance de phase $3.3 \Omega / 0,8 \text{ A}$) avec une rotation de 0.9° par pas (400 pas par tour). La période de la vis est de 2 mm de sorte qu'un pas fait $5 \mu\text{m}$.

Nous avons mis en place une électronique de commande permettant d'atteindre une résolution de 1/16 de pas soit $0,3125 \mu\text{m}$, ce qui constitue un micropas (μpas). Elle est

basée sur le circuit SMC-11 de la société Nanotec. Comme montré à la Figure 54a, le μ C1 génère les signaux CLK et SENS qui permettent de commander la vitesse et le sens de déplacement des axes tandis que le PC embarqué NI PXI-8101 gère les signaux ENA et RED qui permettent d'activer le moteur et de réduire son courant. Les platines sont dotées d'un double capteur à effet Hall à chaque extrémité pour protéger les axes et d'un capteur à effet Hall au centre pour la référence. Les signaux des capteurs sont gérés par le μ C1.

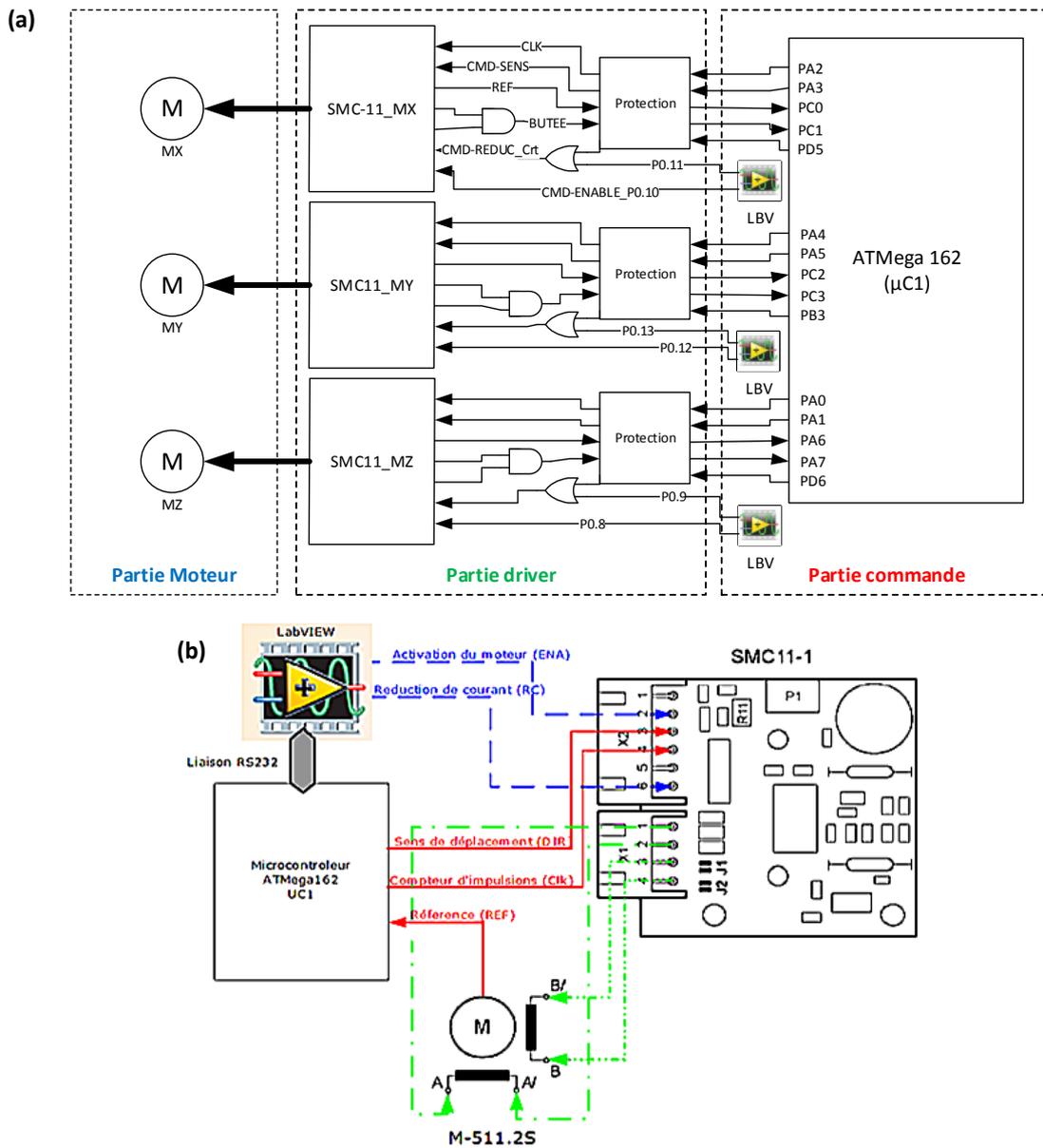


Figure 54 – (a) Diagramme général du système de commande et de pilotage des axes X, Y et Z; (b) pilotage de l'axe PI M-511.2S avec le circuit de commande SMC11.

La commande d'activation de courant RED (Figure 54b) est très importante car elle permet de réduire de 50% le courant consommé par moteur. On sait en effet que la dérive d'origine thermique des platines est l'une des principales causes d'erreur de positionnement. Par ailleurs, pour éviter toute perte de pas, il est déconseillé d'éteindre les moteurs. Le

Tableau 6 résume le compromis finalement retenu en donnant l'état des signaux d'activation et de réduction de courant lors des différentes phases du process.

Etat des axes	Autorisation du mouvement	Réduction de courant
– Démarrage de la machine	– Activé	– Activée
– Platines en mouvement	– Activé	– Désactivée
– Platines à l'arrêt	– Activé	– Activée
– Remise à 0 de la machine	– Activé	– Activée

Tableau 6 – Table d'état des signaux d'activation et de réduction de courant des moteurs des platines.

On notera que **les axes choisis n'ont pas de codeur de position intégré**. La solution retenue présente le mérite de la simplicité : la commande est en boucle ouverte¹.

Nous avons caractérisé un axe à l'aide d'un comparateur Mitutoyo 543-561D de précision 1,5 µm. Dix déplacements de 1 mm ont été effectués dans les deux sens comme montré ci-dessous. La platine est arrêtée tous les 1 mm, ce qui permet de mesurer l'écart par rapport à la position théorique à l'aide du comparateur.

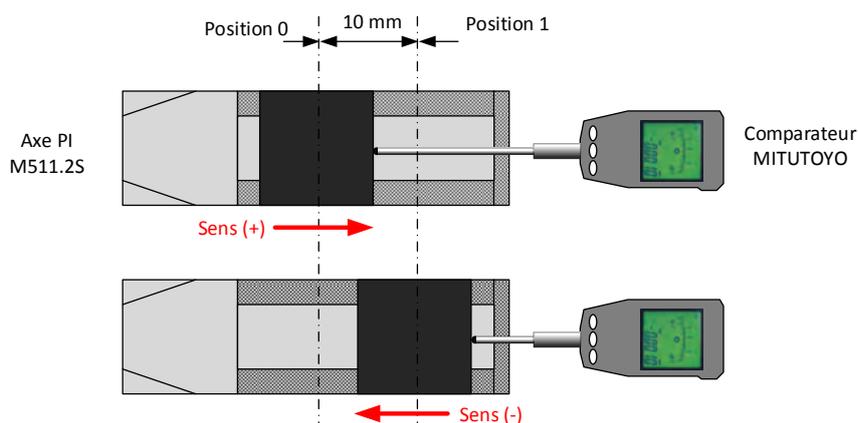


Figure 55 – Principe de l'étude de répétabilité des déplacements de la platine PI M511.2S.

Les résultats de mesure sont donnés dans la Figure 56. On note une augmentation progressive de l'écart jusqu'à atteindre un maximum de 4 µm avec une hystérésis en fonction du sens de déplacement. **Notre conclusion est que la précision des axes a été améliorée de manière significative par rapport à la machine de 1^{ère} génération. Pour des déplacements inférieurs à 1 mm, la répétabilité de positionnement est de l'ordre du micromètre par axe.** Il est difficile d'aller plus loin dans cette étude en l'absence de moyen de caractérisation plus performant (interféromètre laser).

¹ Récemment sont apparues des platines avec moteur pas à pas et règle optique linéaire placée sur l'axe ; elles permettent d'atteindre une précision de l'ordre de 0,1 µm (par axe) mais au prix d'un doublement du coût avec une mise en œuvre complexe.

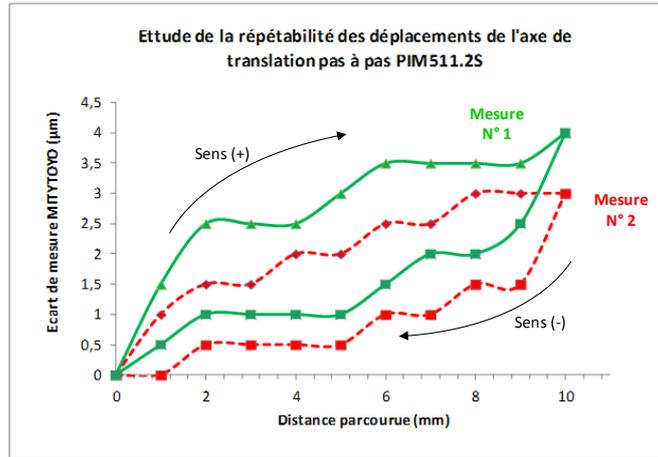


Figure 56 – Etude de répétabilité de déplacement d'un axe PI M511.

b) Gestion de l'entrefer

Nous avons rassemblé dans cette section les éléments concernant la commande de la position de l'outil par rapport au substrat (hormis la platine Z décrite ci-dessus). La longueur sortante de l'outil est gérée par un pousse fil tandis que l'ensemble est mis en mouvement par un actionneur piézoélectrique.

Pousse fil et compensation de l'usure de l'outil

La Figure ci-dessous montre le schéma de principe du pousse fil. Le barreau de tungstène (1) de diamètre 250 µm coulisse dans un guide céramique (2) de diamètre intérieur 300 µm. Afin de réduire les vibrations de l'outil, la longueur du barreau sortant du guide est réglée par l'actionneur (3), L'outil est isolé électriquiquement du reste de la machine de sorte qu'il est possible de changer sa polarisation électrique.

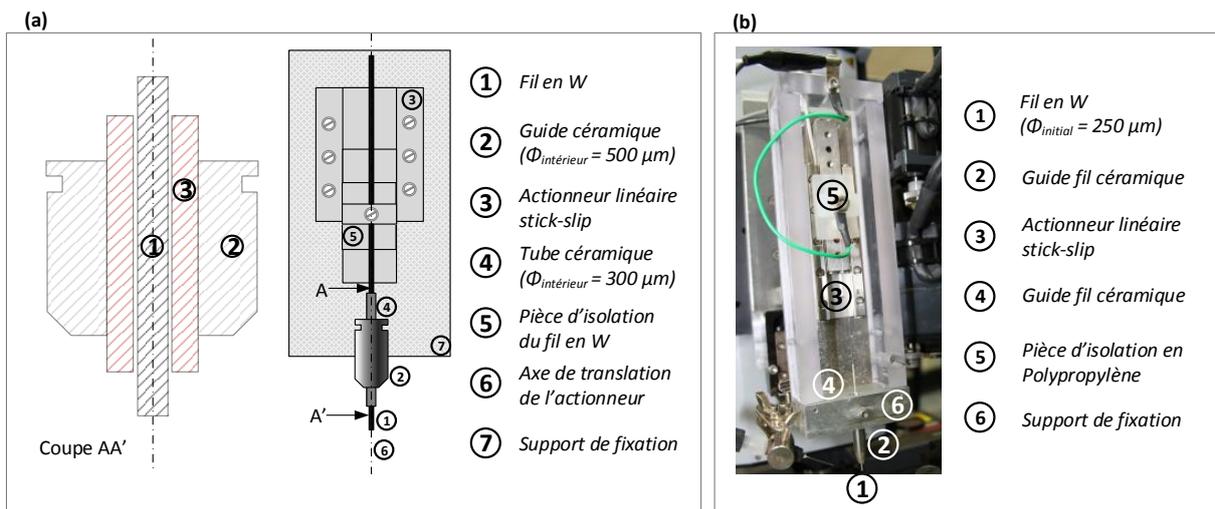


Figure 57 – Pousse fil. (a) Schéma de principe. (b) Réalisation.

L'actionneur (3) de course de 46 mm utilise un principe piezo-inertiel (stick-slip) avec un codeur optique linéaire intégré. Le mouvement est actionné avec des pas dont la longueur

est difficile à ajuster exactement par principe ; le codeur permettant toutefois de corriger les erreurs de déplacement en boucle fermée et d'atteindre une précision de 1 μm . Ce dispositif n'est donc pas destiné aux déplacements minutieux de l'outil nécessaires par exemple pour une régulation dynamique de l'entrefer. Il est prévu pour pousser le barreau de façon à compenser progressivement l'usure de l'outil pendant les usinages.

Actionneur piézoélectrique

L'actionneur piézoélectrique choisi est le P-843.60 de marque PI. L'actionneur a une dynamique de 90 μm . Il dispose d'un capteur de position LPVZT. La résolution de déplacement est de 1,8 nm en boucle fermée et de 0,9 nm en boucle ouverte.

Ce dispositif permettra de réguler la valeur de l'entrefer pendant les usinages (cf. section 0). Comme le montre la Figure 58, sa fonction est de mettre en mouvement le pousse fil dans son ensemble pour régler la distance outil-substrat. Il peut s'agir d'une position fixe, d'un mouvement d'oscillation ou d'un mouvement de translation. Soumettre en effet l'outil à des mouvements d'oscillation facilite l'évacuation des débris de matière usinée accumulés dans le gap [132][133][134].

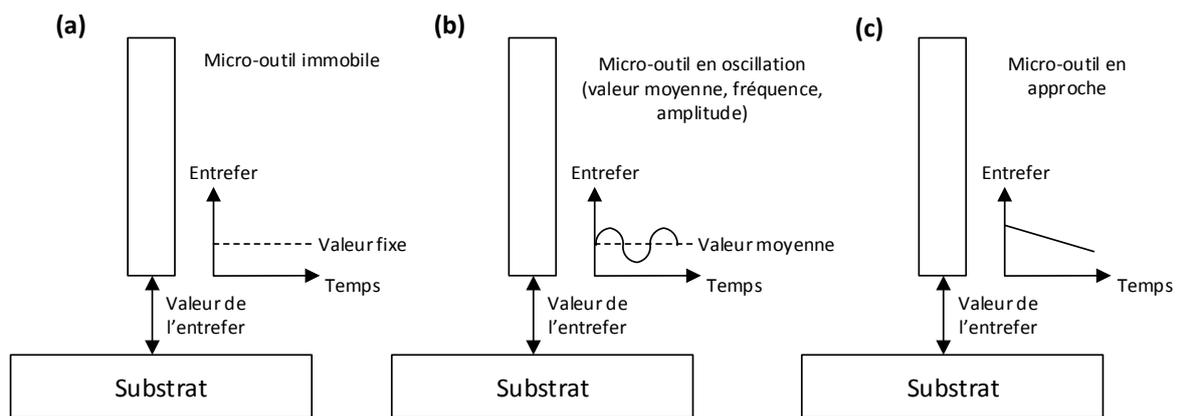


Figure 58 – Régulation de l'entrefer avec l'actionneur piézoélectrique.

L'actionneur est piloté par un contrôleur dont la tension d'entrée de -2 V à 12 V avec un gain de 9 $\mu\text{m}/\text{V}$. Cet ensemble peut déplacer une charge très élevée jusqu'à 3000 N. Nous avons vérifié que sa réponse est correcte en mettant en mouvement le pousse fil avec une fréquence de 100 Hz.

Il y a deux possibilités pour piloter le contrôleur :

- en analogique à l'aide d'un générateur de fréquence.
- ou en numérique à l'aide d'un convertisseur numérique analogique (CNA) piloté par le $\mu\text{C}3$, comme le montre la Figure 59.

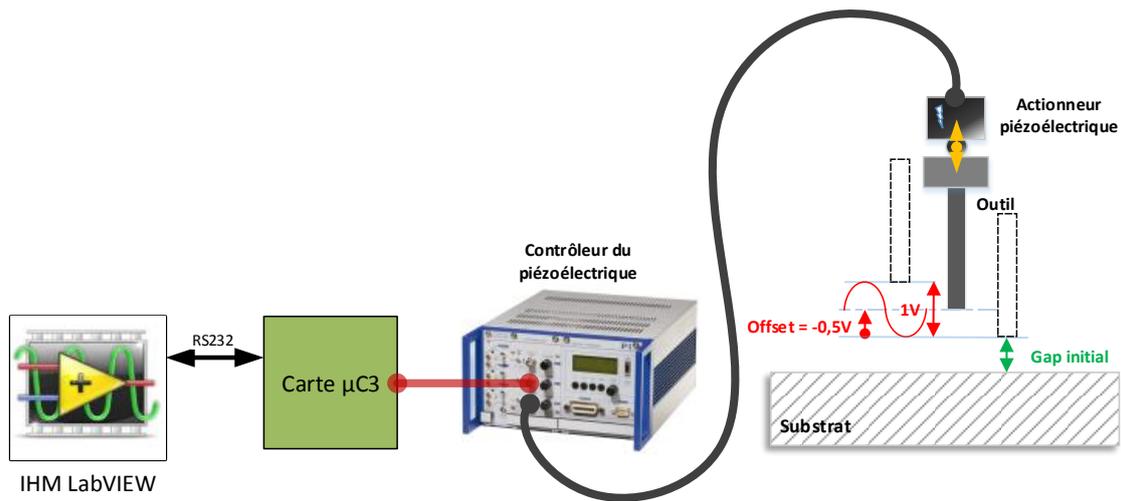


Figure 59 – Commande électronique de l'actionneur piézoélectrique.

Le pilotage est assuré par un CNA DAC7614 de résolution 12 bits. Le CNA est commandé par liaison série synchrone de type SPI via le microcontrôleur µC3. Le schéma de principe est présenté à la Figure 60 ; le fonctionnement est détaillé en Annexe 3.

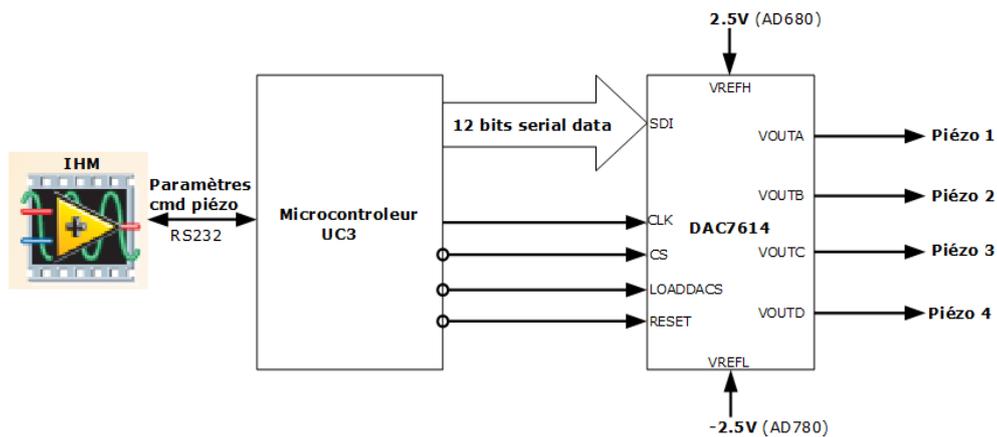


Figure 60 – Schéma de principe du circuit de commande de l'actionneur piézoélectrique.

c) Commande à trois microcontrôleurs

Une solution basée sur une architecture multiprocesseur (Figure 61) a été mise en place avec trois microcontrôleurs 8 bits ATmega 162 cadencés à 16 MHz avec une horloge externe à quartz.

Les microcontrôleurs fonctionnent de manière indépendante les uns par rapports aux autres mais il existe des liaisons d'intercommunication qui seront décrites ci-dessous.

Chaque microcontrôleur possède une liaison de communication de type série asynchrone en full duplex avec le PC superviseur. Cette liaison permet d'envoyer les différents paramètres et de recevoir l'état des différents compteurs et drapeaux de fin de trame. La liaison permet aussi de déboguer la machine.

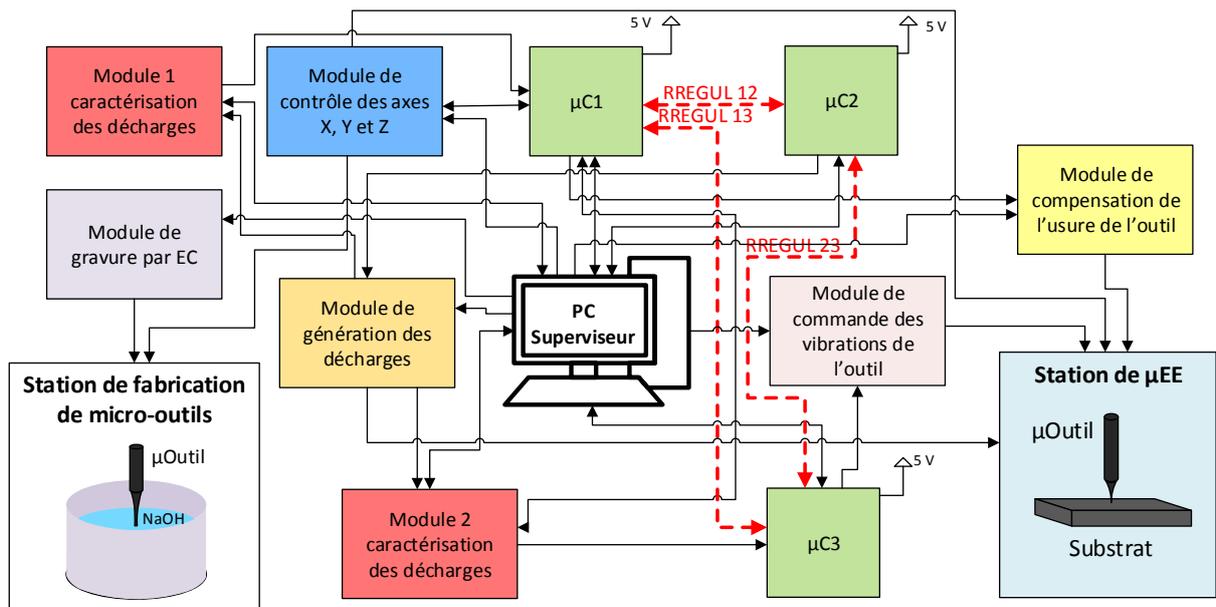


Figure 61 – Architecture à trois microcontrôleurs de la machine de μ EE de 2^{ème} génération.

Chaque microcontrôleur gère plusieurs tâches que nous passons en revue ci-dessous.

Le microcontrôleur μ C1 gère les fonctions suivantes :

- décodage des trames qui représentent le parcours d'outil (chaque trame est composée des paramètres décrits à l'Annexe 5) ;
- mouvement des axes X, Y et Z en mode synchrone ou asynchrone ;
- gestion des décharges et des contacts ;
- retour des compteurs du nombre de décharges et de contacts avec une première carte de caractérisation.

Le μ C1 peut aussi demander au μ C3 de changer la position de l'électrode en statique ou en dynamique, via le signal d'intercommunication REGUL13.

Il peut demander au μ C2 de couper la tension d'usinage lors de l'utilisation du générateur haché, via le signal de REGUL12. Lors d'un usinage, cette option, qui n'a pas été encore mise en œuvre, permet d'éviter des points d'accumulation des décharges lors d'un usinage lorsqu'un axe s'arrête (cf. annexe 9).

Le microcontrôleur μ C2 gère les tâches suivantes :

- décodage des trames envoyées qui représentent les paramètres temporels du générateur de décharges : durée des impulsions T_{ON} , temps de repos T_{OFF} et nombre de répétitions d'un cycle T_{ON}/T_{OFF} .

Le μ C2 communique avec μ C1 et μ C3 via des ports entrées sorties de façon à ce qu'ils ne comptent les décharges que pendant les durées T_{ON} .

Le microcontrôleur μ C3 gère les tâches suivantes :

- décodage des trames qui représentent les paramètres de commande de l'actionneur piézoélectrique (cf. Annexe 3) :
 - le type de commande statique ou oscillante ;

- le niveau de tension de commande ;
- la durée de la commande.

Le $\mu C3$ gère un deuxième circuit de caractérisation des décharges (indépendant du premier), qui permet de déclencher éventuellement l'intervention de l'actionneur piézoélectrique Z'. Les informations sur les contacts et décharges permettent d'assurer une régulation du gap demandée par le $\mu C1$ via le signal REGUL13.

d) Générateur de décharges

Le générateur des décharges utilisé est de type RC. Il est constitué d'une alimentation de laboratoire (EA-PS.3150-04B) délivrant une tension continue V_{EE} allant de 0 à 150 V avec un courant maximum de 4 A. En sortie du bloc d'alimentation est branchée une cellule RC composée d'une résistance¹ R_C , d'un condensateur² C_C (entre 100 pF et 1 μ F) et éventuellement d'une résistance de ballast³ R_b qui limite l'énergie envoyée au plasma (cf. section 4.8).

Un oscilloscope numérique Tektronix DPO2024 de bande passante 200 MHz permet de caractériser les décharges en parallèle des circuits internes de caractérisation, à l'aide de :

- une sonde de tension différentielle⁴ placée aux bornes du condensateur de charge C_C ;
- une sonde de courant à effet Hall⁵ qui mesure le courant à travers le micro-outil.

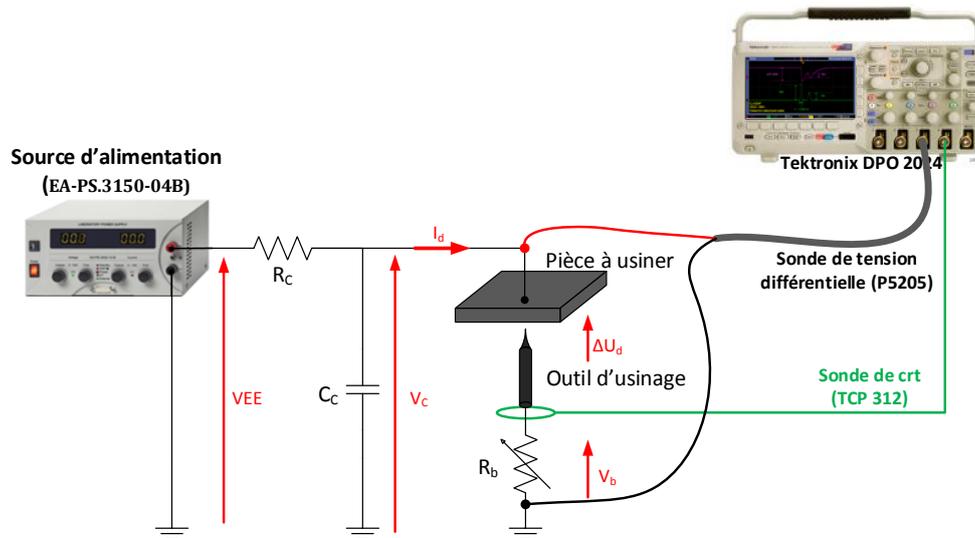


Figure 62 – Générateur de décharges utilisées dans la 2^{ème} génération de machine de μEE .

La Figure 63 montre deux exemples de décharges dans l'eau déionisée :

¹ Résistance CGS HSA50 (TE Connectivity) encapsulée avec une puissance de dissipation de 50 W avec radiateur et 20 W sans radiateur ; elle peut supporter un tension pouvant atteindre 2500 V.

² Condensateurs de puissance en couches minces en polypropylène fabriqués par KEMET.

³ Résistance de puissance de type HSA50.

⁴ Sonde de tension différentielle haute tension Tektronix P5205 avec une bande passante de 100 MHz.

⁵ Sonde de courant AC/DC à effet Hall Tektronix TCP312 avec une bande passante est de 100 MHz. Le courant minimum détectable est de 1 mA.

- Une décharge de faible énergie obtenue par combinaison de plusieurs paramètres : tension d'usinage modérée (50 V), faible capacité de travail (1 nF) et résistance de ballast de 100 Ω ; la chute de potentiel aux bornes de la capacité est de 10 V (la capacité n'est pas totalement déchargée) tandis que l'impulsion de courant a une valeur crête de 100 mA.

- Une décharge de forte énergie obtenue en l'absence de résistance de ballast avec une tension d'usinage de 150 V et une capacité de travail de 22 nF ; la chute de potentiel aux bornes de la capacité est de 210 V et aboutit à une inversion de polarité (le potentiel aux bornes de la capacité de travail passe de +150 V à -60 V) ; l'impulsion de courant a une valeur crête de 12,5 A. Il est intéressant de remarquer que l'inversion de polarité a déjà été observée, notamment par Gangadhar [135], qui indique qu'elle entraîne une accélération de l'usure de l'outil.

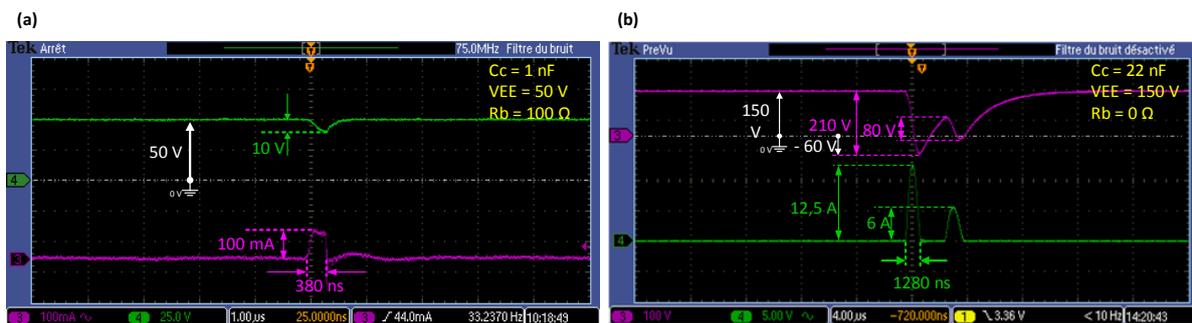


Figure 63 – Décharges obtenues avec le générateur des décharges type Lazarenko. (a) Décharges avec $R_b = 100 \Omega$; (b) Décharges avec inversion de polarité ($R_b=0$).

e) Caractérisation des décharges et régulation du gap

Principe de base

La Figure 64 montre le schéma de principe du circuit de caractérisation des décharges. Celui-ci est issu des travaux de G. Girardin [13] mais nous l'avons amélioré. Nous l'expliquons ci-dessous en détail car il est très important d'en comprendre les limitations.

Ce circuit est composé de :

- A l'entrée d'un pont diviseur de tension $R_1^1 // R_2^2$, paramétrable via R_1 .
- Un circuit suiveur rapide LM318 avec un temps de retard d'environ 1 μ s.
- Une batterie de 3 comparateurs de tension LM311 avec différents seuils³ de référence, fixés par l'opérateur via l'interface LabVIEW (les seuils sont spécifiques au type de signal que l'on veut détecter) :
 - $V_{REF(+)}$ pour détecter les décharges sans changement de polarité ;
 - $V_{REF(-)}$ pour détecter les décharges avec changement de polarité ;
 - V_{CONT} pour les contacts outil-substrat (cf. section 4.2.4.g).

¹ Potentiomètre 860 VISHAY : $R = 100 \text{ k}\Omega \pm 3\%$; linéarité = $\pm 0,25\%$; 8 W à 40 °C.

² Résistance MP820sans inductance : $R = 1 \text{ k}\Omega \pm 1\%$; tension maximale 300 V ; 20 W.

³ Les seuils sont réglés entre -5 et +5V, avec une graduation de 100 mV suivant le type de décharge à détecter.

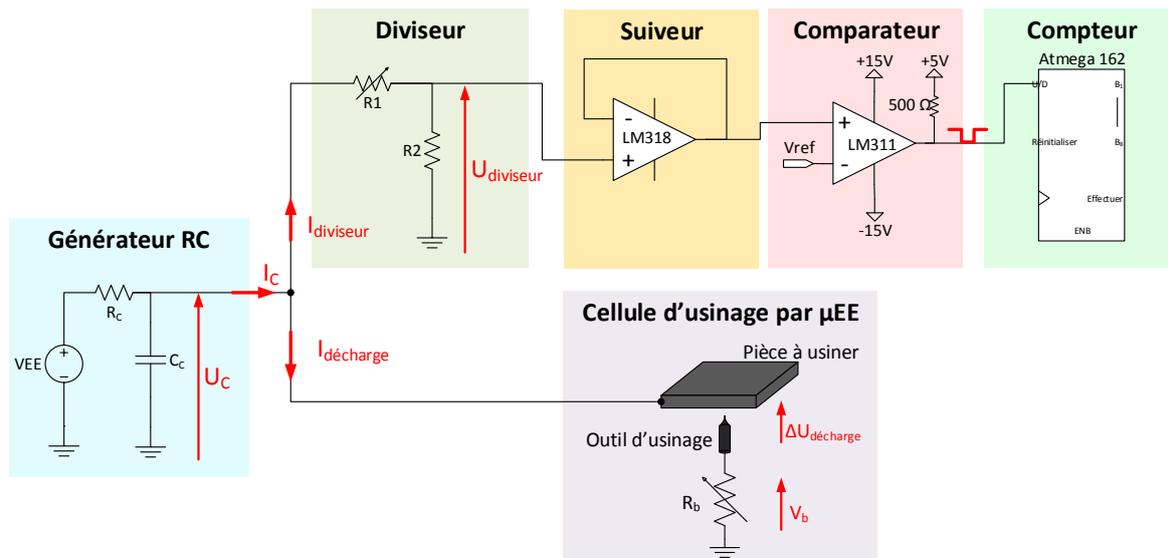


Figure 64 – Schéma de principe du circuit de caractérisation des décharges.

Le rapport du pont diviseur est choisi de sorte que l'image de la tension en entrée du suiveur ne dépasse pas les tensions d'alimentation. Pour le calculer, on néglige la résistance équivalente du plasma qui ne dépasse pas quelques Ω [13],[109],[136]. Le tableau suivant donne la valeur de R_1 en fonction de la tension d'usinage V_{EE} ainsi que le rapport de division.

VEE (V)	R1 (k Ω)	Rapport de division
30	16,6	18
50	28,4	29
80	46,1	47
100	57,8	59
150	87,2	88

Tableau 7 – Résistance du potentiomètre R_1 et rapport de division en fonction de la tension d'usinage V_{EE} .

La Figure 65a montre l'image d'une décharge en sortie du suiveur avec la disposition des seuils $V_{REF(+)}$, $V_{REF(-)}$ et V_{CONT} . Lorsqu'une décharge se produit, la tension aux bornes du condensateur chute instantanément et son image est comparée avec les seuils de référence. Si la tension est inférieure à un des seuils, le comparateur concerné bascule de son état de repos 5 V à 0 V. La sortie de chaque comparateur est reliée à une entrée d'interruption du microcontrôleur qui permet de compter les différentes décharges.

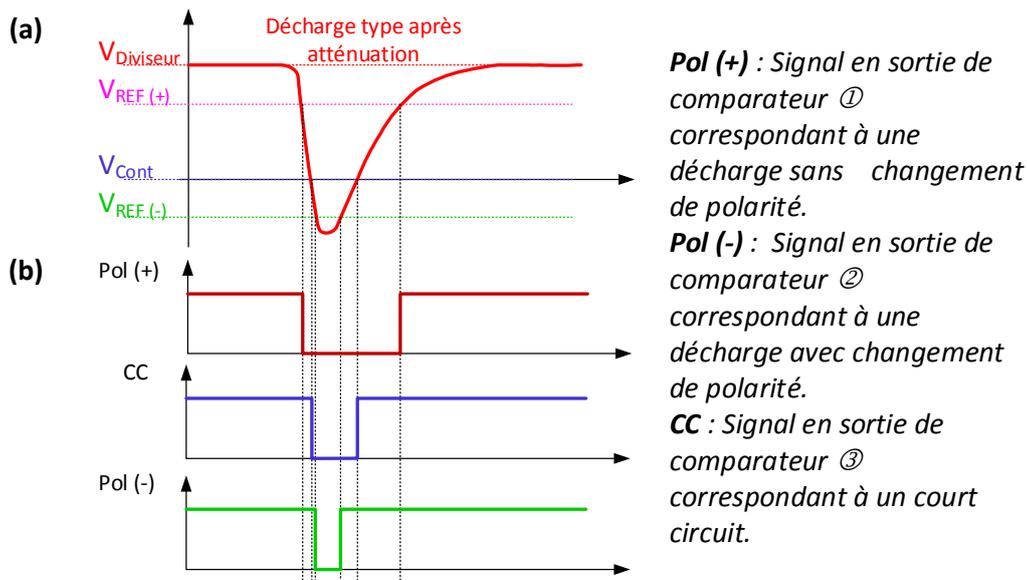


Figure 65 – Fonctionnement du circuit de caractérisation des décharges. (a) Image de la chute de potentiel aux bornes de C_c en sortie du suiveur et positionnement des seuils de caractérisation. (b) Sortie des comparateurs en fonction des seuils de référence.

Seuils de détection des décharges

Le basculement des comparateurs est utilisé indépendamment par les circuits de caractérisation des $\mu C3$ et $\mu C1$ pour caractériser l'occurrence des décharges et des contacts :

- Le $\mu C1$ permet d'avoir une cartographie des décharges lors du mouvement des translations X, Y, Z c'est-à-dire qu'il détecte l'occurrence des décharges et des contacts dans le temps et dans l'espace (cf. section 4.9.3.c) ;
- Le $\mu C3$ permet de compter ces événements lors d'un usinage, indépendamment du mouvement des platines XYZ ; l'information sert aussi à réguler la position de l'actionneur piézoélectrique Z' (qui est directement contrôlé par $\mu C3$).

Le comptage des décharges par les microcontrôleurs $\mu C1$ et $\mu C3$ est effectué à l'aide d'une routine d'interruption (INT0, INT1). A chaque fois qu'un changement de l'état logique 1 à l'état logique 0 est détecté au niveau des entrées d'interruptions (entrée PD2 pour le comptage des décharges sans inversion de polarité, PD3 pour les décharges avec inversion de polarité et PB2 pour les contacts), le sous-programme d'interruption entre en exécution de façon à :

- compter les événements détectés ;
- **dégager le micro-outil en cas de court-circuit dont la durée dépasse $20 \mu s^1$ (voir section suivante) ;**
- sortir de la routine ;
- revenir au programme principal pour continuer l'exécution des mouvements prévus dans le parcours d'outil.

¹ Ainsi tout contact outil-substrat d'une durée inférieure à $20 \mu s$ n'est pas pris en compte par la machine. Il n'est pas comptabilisé. Aucun mouvement n'est déclenché pour dégager l'outil.

Détection des contacts

De manière générale, la gestion des contacts outil-substrat est l'un des points clef du processus d'usinage par μ EE.

Pour des outils de diamètre supérieur à 50 μ m, un contact mécanique se traduit par un court-circuit électrique : le seuil V_{CONT} est donc fixé à 0 V par l'opérateur.

Par contre pour des outils de plus faible diamètre, en cas de collision, le contact outil-substrat n'est pas franc. La résistance de contact n'est pas nulle car essentiellement constituée par le contact entre des aspérités de l'outil sur les micro-reliefs du substrat. L'outil peut de plus être recouvert d'une couche à caractère isolant [137]–[139]. La solution consiste à choisir un seuil V_{CONT} légèrement supérieur à 0 V fixé arbitrairement à 0,5 V.

Par ailleurs, quel que soit la valeur du seuil V_{CONT} , lorsqu'un court-circuit est détecté au niveau du port PB2 de μ C1, tous les mouvements des axes sont arrêtés. Le micro-outil s'éloigne du substrat via l'axe Z d'une distance de 30 μ pas à une vitesse de 4 mm/s. Puis, le micro-outil est redescendu à sa position initiale avec une vitesse d'approche plus lente de 312 μ m/s. Ces valeurs ont été réglées expérimentalement lors de l'usinage de canaux dans l'acier inoxydable avec de l'eau déionisée. Il est prévu qu'il faudra modifier ces paramètres dans les autres cas (éventuellement ne pas redescendre à la position initiale en cas de perçage de trou par exemple).

Limitations à prendre en compte.

Enfin, Il est important de noter que la gestion des décharges et des contacts via le μ C1 présente une limite. En effet, ces événements sont comptés par des routines d'interruptions. Or il est nécessaire de désactiver ces routines pendant le déplacement des axes XY. En effet, celles-ci sont traitées en priorité et le μ C1 stoppe la commande de l'horloge des axes jusqu'au traitement de toutes les interruptions. Si trop de décharges ou de contacts interviennent rapidement. Cela entraîne la création de points d'accumulation de décharges et une variation de la vitesse de l'axe.

Pour résoudre cette difficulté, tout déplacement de N μ pas est décomposé en commande élémentaire de 1 μ pas (Figure 66). Autrement dit, l'ordre de déplacement de N μ pas n'est pas envoyé en un seul bloc mais μ pas par μ pas. Cela permet de désactiver les routines d'interruption avant chaque le déplacement élémentaire (1 μ pas) du moteur, puis de les réactiver à la fin du déplacement élémentaire. **Par conséquent toute décharge ou tout contact détecté pendant le déplacement passe inaperçu et ne sera donc pas pris en compte par le μ C1.**

Cette limitation s'applique au μ C3 pour le mouvement de l'actionneur piézoélectrique mais avec des conséquences moins importantes : le mouvement de l'actionneur est ralenti pendant la durée nécessaire au traitement des interruptions. C'est la raison pour laquelle, à la différence du μ C1, les interruptions du μ C3 ne sont pas désactivées.

Le $\mu C3$ peut donc compter quasiment¹ toutes les décharges et contacts pendant les déplacements des axes XY mais il n'est pas possible de relier ces informations entre elles.

Cela explique aussi que les nombre de décharges et contacts comptés par le $\mu C3$ sont supérieurs à ceux comptés par le $\mu C1$. **Dans la suite de ce mémoire, nous utiliserons essentiellement les données du $\mu C1$ pour procéder aux cartographies de décharges. D'après notre expérience, les ordres de grandeur des données fournies par les deux microcontrôleurs concordent et les nombres de décharges et contacts comptés par le $\mu C3$ sont au plus du double de ceux comptés par le $\mu C1$.**

Il est très important de noter l'ordre de grandeur de ces incertitudes. Autrement dit, toutes les données du chapitre 4 concernant le nombre de décharges et de décharges ont une incertitude de 100%. Bien évidemment il devrait être possible à l'avenir de dépasser cette limitation en modifiant l'électronique de la machine (cf. Conclusion Générale).

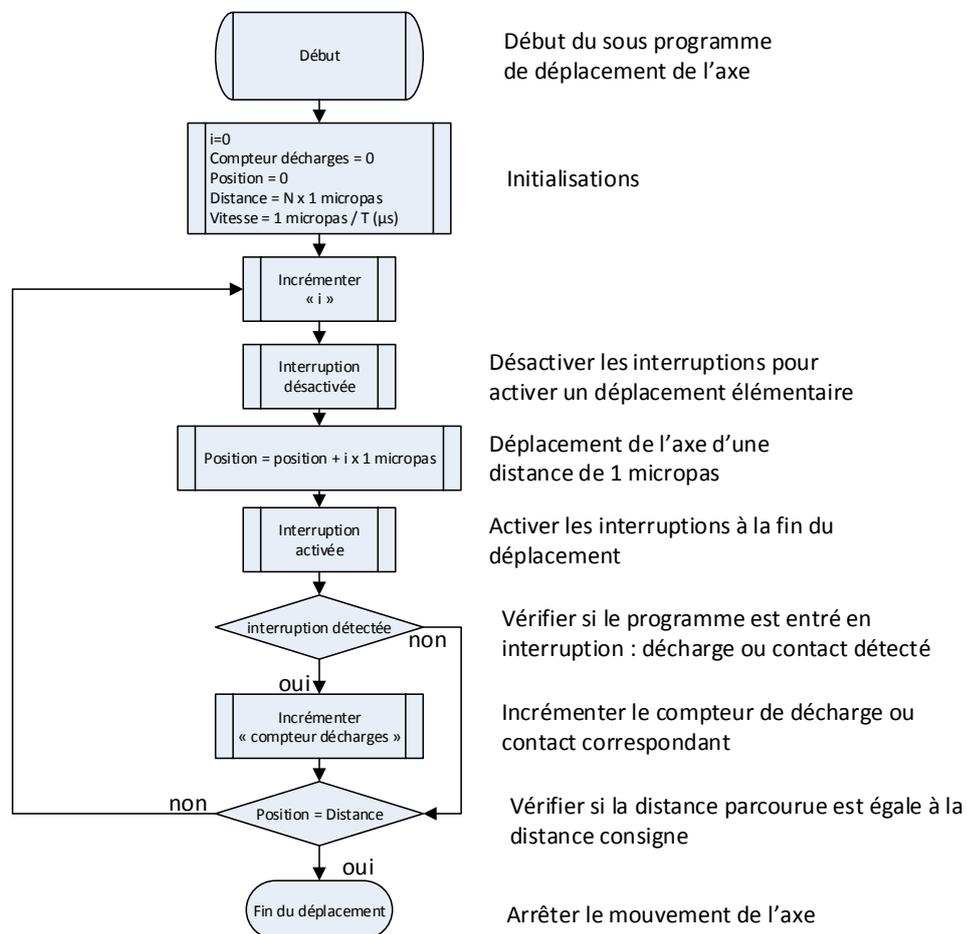


Figure 66 – Organigramme de commande du mouvement d'un axe.

¹ En effet, le $\mu C3$ a une fréquence de cadencement de 16 MHz et il est nécessaire d'exécuter une série d'instructions d'une durée finie pour compter les décharges et contacts ($\sim 0,5 \mu s$ par routine d'interruption). Il est donc normal que quelques décharges et contacts soient perdus. Il est toutefois rare d'avoir des décharges ou contacts en grand nombre et très rapprochés de sorte que ce cas de figure est d'ordre théorique. Il est à noter que la durée minimale entre 2 décharges est de l'ordre de $R_C C_C$ (p.e. 100Ω et $1 nF$).

Gestion de l'entrefer

Nous verrons en section 4.7, un exemple d'un algorithme de régulation de l'entrefer outil-substrat : lorsque l'on compte plus de 5 décharges pendant une durée de 20 μ s, le μ C3 donne l'ordre à l'actionneur piézoélectrique d'éloigner le micro-outil de 40 nm. Dans le cas inverse il le rapproche de la même distance. Cette opération est répétée durant l'usinage de manière continue. Il ne s'agit pas évidemment que d'un cas particulier de régulation de l'entrefer. Le dispositif permettra d'explorer beaucoup d'autres possibilités.

f) Fluidique

L'armoire fluidique contient deux dispositifs indépendants :

- la fluidique pour la gravure électrochimique des outils qui sera détaillée au chapitre 3 ;
- la fluidique pour le renouvellement du diélectrique (eau déionisée) pour l'usinage par μ EE.

Celle-ci est composée d'un réservoir d'une capacité de 10 L contenant de l'eau déionisée issue du purificateur du laboratoire (Figure 67). Le fluide est envoyé sur l'outil à l'aide d'une première pompe péristaltique. Une deuxième pompe récupère le fluide contaminée au fond de la cuve et l'envoie dans une poubelle.

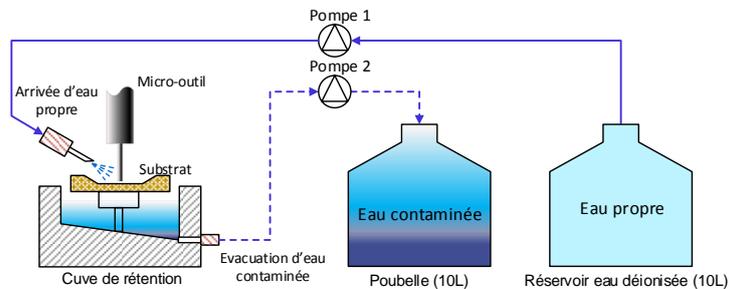


Figure 67 – Circuit fluidique pour l'usinage par électroérosion.

Nous avons fait un test pour étudier l'évolution de la conductivité au cours du temps. En sortie du purificateur du laboratoire, l'eau déionisée possède une résistivité de 18 M Ω .cm. La Figure 68 montre l'évolution de la résistivité de l'eau au cours du temps mesurée à l'aide d'une cellule de mesure LR 925/01 WTW pour eau déionisée. Cette mesure est faite dans l'environnement atmosphérique non contrôlé de la salle où est installée la machine de μ EE. Au bout d'environ 7 h, la résistivité de l'eau chute jusqu'à atteindre 1,2 M Ω . D'après Chung et al. [58], la cause principale de cette chute est due à l'absorption du CO₂ contenu dans l'air. La propreté du récipient intervient aussi.

La résistivité du diélectrique à son arrivée dans l'entrefer est donc de l'ordre du M Ω .cm.

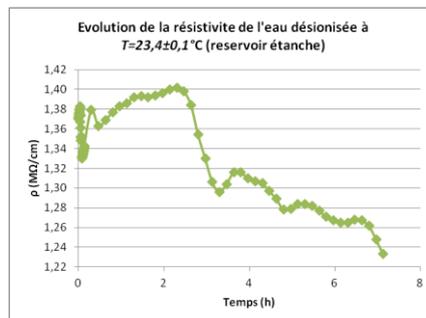


Figure 68 – Evolution de la conductivité de l'eau déionisée.

2.3. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons vu qu'une machine d'usinage de 2^{ème} génération a été entièrement mise en place. Le principal intérêt de la solution développée est qu'elle permet de caractériser en temps réel un usinage entier en caractérisant les décharges avec une batterie de comparateurs. Elle permet aussi, pour la première fois à notre connaissance, d'avoir une répartition des décharges et des contacts dans l'espace.

Il est important de noter qu'il y a une incertitude sur les nombres de décharges et de contacts comptés par le $\mu C1$ à cause du mode de réalisation choisi. Les informations données par le $\mu C1$ pour la cartographie des décharges devront donc être considérées comme d'ordre qualitatif avec une incertitude de 100%.

Toutefois, les solutions proposées dans la littérature pour le comptage de décharges sont beaucoup moins efficaces que la solution que nous avons développée [120], [140]. En effet elles reposent toutes sur l'utilisation de moyens d'acquisition externes (type National Instrument) dont l'horloge logicielle est au mieux de 5 ms. De ce fait beaucoup d'événements sont perdus de sorte que les données publiées correspondent à un sous-échantillonnage.

Par ailleurs, pendant les premiers essais d'usinage, les (mauvaises) surprises ont été nombreuses :

- disparition d'un motif au cours d'un usinage, qui pourtant s'annonçait très prometteur ;
- dérives des axes suite à des bogues dans le logiciel du $\mu C1$;
- plantage de l'électronique suite à de forts appels de courant ;
- etc.

Il a donc été nécessaire de procéder à une mise au point laborieuse des différents éléments de la machine. Quoi qu'il soit, nous avons réussi à résoudre (quasiment) tous ces problèmes, ce qui nous a permis de passer aux essais d'usinage qui seront vus en détail en chapitre 4.

Mais avant d'aborder ces questions, nous avons rassemblé tous les éléments concernant la fabrication des micro-outils au chapitre 3.

CHAPITRE 3 :

FABRICATION DE MICRO-OUTILS CYLINDRIQUES A HAUT FACTEUR DE FORME

3. FABRICATION DE MICRO-OUTILS CYLINDRIQUES A HAUT FACTEUR DE FORME

Nous traiterons ci-dessous des méthodes d'élaboration de micro-outils cylindriques à haut facteur de forme¹ indispensables pour le fraisage par μ EE. En effet, un diamètre fin est nécessaire pour une bonne résolution d'usinage tandis qu'une hauteur importante permet de creuser des structures profondes et de compenser l'usure de l'outil.

Comme indiqué dans l'introduction du mémoire, l'objectif principal de ce chapitre est de montrer comment nous obtenons les micro-outils qui seront mis utilisés dans le chapitre 4. Pour ce faire, nous commencerons par un bref état de l'art sur la fabrication des électrodes et nous rappellerons les travaux effectués dans la thèse de G. Girardin. Puis nous montrerons comment le poste de fabrication des outils a été intégré dans la machine de 2^{ème} génération en discutant des améliorations apportées. Dans la dernière partie, nous verrons une adaptation du protocole pour linéariser la vitesse de gravure en fonction du temps ainsi qu'une étude de reproductibilité.

3.1. Méthodes de fabrication de micro-outils cylindriques

L'élaboration de micro-outils par des méthodes classiques d'usinage (par exemple enlèvement de copeaux par exemple) est problématique lorsque le diamètre est en dessous de 100 μ m. En effet, les contraintes exercées sur l'outil deviennent tellement importantes que celui-ci peut se déformer fortement, voire se casser. Des méthodes sans contact² sont donc nécessaires, comme l'usinage par électroérosion ou l'usinage électrochimique. Celles-ci permettent de plus de fabriquer l'outil in situ dans la machine de μ EE de manière très économique.

3.1.1. Fabrication de micro-outils par électroérosion

La méthode principalement utilisée dans l'industrie pour élaborer les micro-outils nécessaires à la μ EE est l'électroérosion elle-même. Différentes variantes sont possibles en fonction de la forme de la deuxième électrode, du mouvement relatif d'une électrode par rapport à l'autre, et de la polarité d'usinage.

Lim et al. [141] ont ainsi répertorié les trois méthodes suivantes (Figure 69) :

- usinage de l'outil contre un bloc stationnaire à flanc droit ;
- usinage de l'outil avec un disque en rotation ;
- usinage de l'outil avec un fil.

Cette dernière variante est la plus utilisée et correspond au procédé WEDG décrit précédemment (sections 1.4.2.b et 1.4.2.d).

¹ Le facteur de forme est défini comme le rapport hauteur/diamètre de l'outil.

² Mentionnons pour mémoire l'usinage par faisceau d'ions qui est une technique ex situ très coûteuse [185].

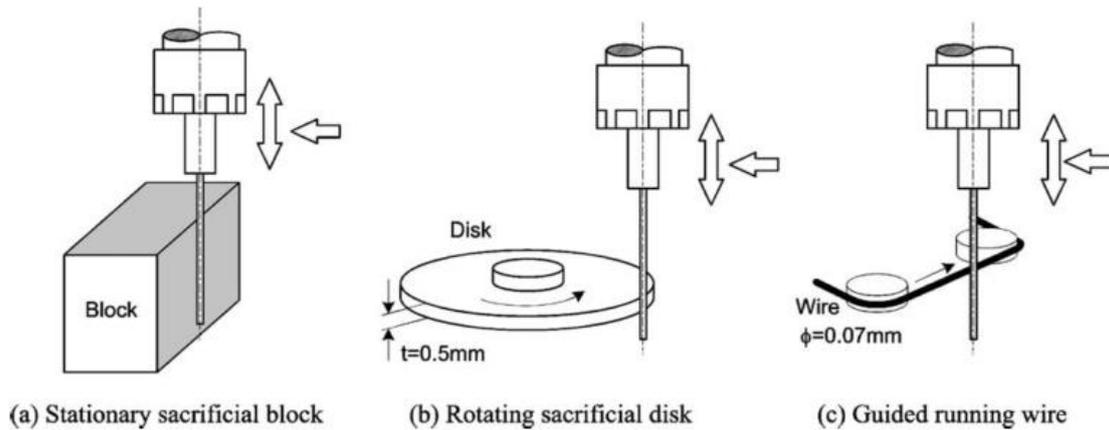


Figure 69 – Différentes méthodes de fabrication de micro-outils cylindriques à haut facteur de forme par électroérosion [44][141][142].

Dans tous les cas, il faut utiliser des décharges de faible énergie et le système de détection de contacts doit être très réactif pour éviter toute collision qui pourrait endommager l'outil [44]. Il est de plus nécessaire de contrôler la forme de l'outil, ses dimensions et sa rugosité de surface (Figure 70). Dans la pratique, ces méthodes deviennent inopérantes lorsque le diamètre est inférieur à 10 μm .

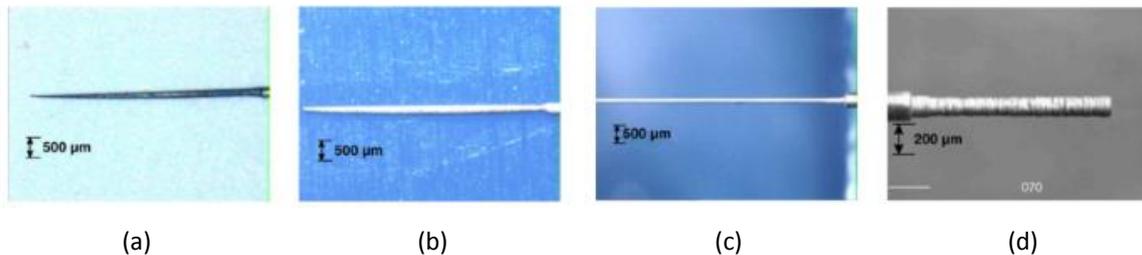


Figure 70 – Micro-outils obtenus par électroérosion par les méthodes suivantes: (a) et (b) bloc stationnaire; (c) disque en rotation ; (d) érosion à fil [141][142].

3.1.2. Fabrication d'outils par gravure électrochimique

Il est possible aussi de fabriquer des micro-outils par usinage électrochimique. Le principe de base consiste à appliquer une différence de potentiel entre l'outil et une contre électrode inerte électrochimiquement plongés dans une solution électrolytique. L'outil est dissous progressivement par voie électrochimique, ce qui permet de lui donner une forme [143]. Le grand intérêt de cette technique est qu'il s'agit d'un procédé sans contact avec des paramètres de contrôle (différence de potentiel et courant électrique) facilement réglables car d'origine électrique¹.

¹ D'autres paramètres interviennent comme la conductivité de l'électrolyte, la mobilité des ions, etc.

3.2. Gravure électrochimique du tungstène

3.2.1. Généralités

Dans ce mémoire, le matériau choisi pour les micro-outils est le tungstène. Celui-ci présente en effet l'avantage d'être facile à usiner par voie électrochimique. En EE, il se distingue par sa température de fusion (la plus élevée des métaux : 3400 °C), sa capacité thermique ($130 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) et sa conductivité thermique ($174 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Il est connu que cela se traduit par une grande résistance à l'usure durant l'usinage par électroérosion [144].

La gravure électrochimique du tungstène a été très largement utilisée pour produire des sondes de caractérisation [145], [146] (il s'agit d'ailleurs du point de départ du projet μEE à l'INL [64]). Pour obtenir des pointes avec un apex (sommet) de quelques atomes, on se sert d'un effet dit du « drop-off » qui intervient lorsque l'on plonge verticalement un barreau de tungstène dans un électrolyte liquide et qu'on le soumet à une gravure électrochimique : le barreau s'amincit en formant deux cônes qui finissent par se rompre. Le cône inférieur est perdu dans la solution. L'apex du cône supérieur présente des propriétés intéressantes comme sonde pour des dispositifs à émission de champ, pour des microscopes à force atomique ou à effet tunnel [145].

Pour obtenir un micro-outil cylindrique, il convient donc d'éviter l'effet drop-off. Pour ce faire, une solution proposée par la littérature est de tirer progressivement le barreau pendant la gravure électrochimique [147], [148], éventuellement en faisant tourner l'électrode [149] en sus. De son côté, l'INL a breveté [15] une forme originale de d.d.p. entre le tungstène et la contre-électrode qui permet d'amincir un barreau cylindrique en conservant une symétrie cylindrique sans tirer le barreau et en évitant l'effet drop-off [13], [16], [108], [106], [150].

3.2.2. Dissolution électrochimique du tungstène

Comme montré à la Figure 71, la dissolution du tungstène par voie électrochimique dépend fortement de la valeur du pH de la solution utilisée ainsi que de la valeur du potentiel de gravure appliqué. Pour ce qui concerne la nature et la concentration de l'électrolyte, différentes possibilités sont discutées dans la littérature [147][146][151]. Néanmoins, pour fabriquer des pointes pour les microscopes à effet tunnel, l'électrolyte choisi est généralement soit de l'hydroxyde de sodium (NaOH) soit de l'hydroxyde de potassium (KOH) [147], [152], [153], [154]. Notre choix s'est porté sur une solution très concentrée d'hydroxyde de sodium (4 Mol/l) qui donne des résultats satisfaisants.

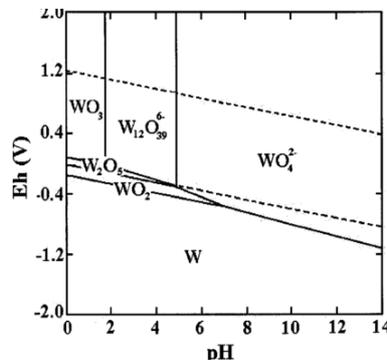
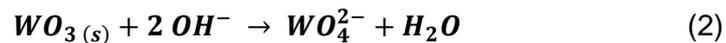
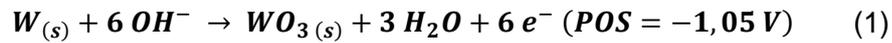


Figure 71 – Diagramme E-PH pour le système W-H₂O à 25°C, [W]=10⁻⁴ [153], [155], [152].

L'électrochimie du tungstène est étudiée depuis de longues années, notamment par Armstrong et al. [156] ainsi que Weiss et al. [157]. Les processus de dissolution du tungstène étant complexes, nous nous contenterons d'une version simplifiée.

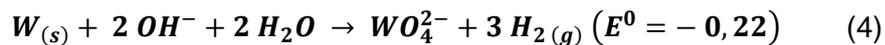
A l'anode, le tungstène métallique est oxydé à sa surface en tungstate (WO_3) qui se dissout dans la solution sous forme d'ion tungstate lourd (WO_4^{2-}) en constituant une couche de forte viscosité autour de l'électrode [147], [158] :



A la cathode il y a formation d'ions d'hydroxyles (OH^-) avec dégagement d'hydrogène gazeux [149]:



En fusionnant les équations (6), (7) et (8), la réaction globale devient:



Notons que les termes POS et PRS désignent respectivement le potentiel d'oxydation standard et le potentiel de réduction standard ; E^0 est le potentiel standard de la réaction globale d'électrolyse.

La Figure 72 montre le dispositif expérimental couramment utilisé avec un barreau de tungstène en anode et une contre électrode en platine en cathode plongés dans l'électrolyte. Les énergies de surface à l'interface « tungstène solide - liquide électrolyte - air » engendrent la formation d'un ménisque. Nous reviendrons ultérieurement sur ce point.

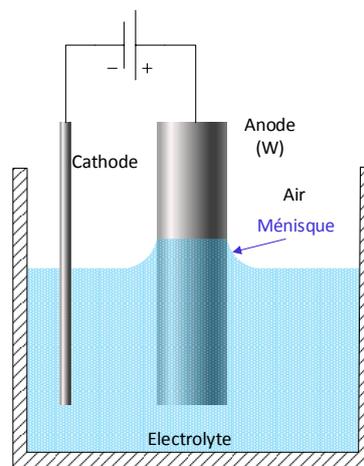


Figure 72 – Principe de gravure par électrochimie d'un barreau de tungstène [147], [151], [154], [159].

L'explication du mécanisme conduisant à l'effet drop-off est controversée dans la littérature, notamment les rôles exacts du ménisque et de la couche visqueuse d'ions tungstates (Figure 72).

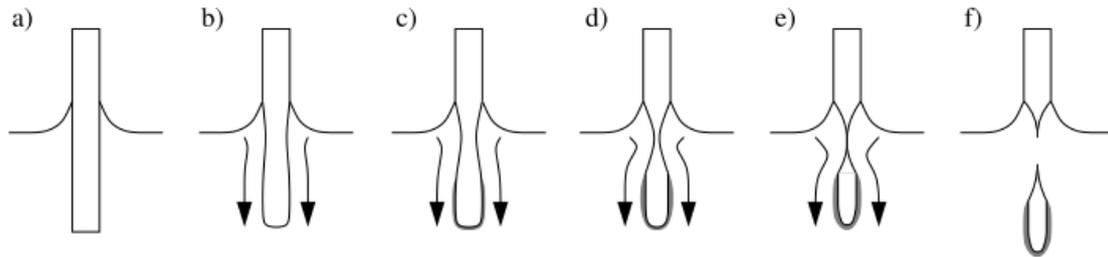


Figure 73 – Illustration de l'effet drop-off: (a) formation du ménisque; (b) à (e) flux d'ions de WO_4^{2-} formant une couche dense autour de la tige. Au voisinage du ménisque, la gravure de la tige est plus rapide; (e) rupture de la partie inférieure de la tige par l'effet drop-off [155].

D'après B. Ju et al. [160], les ions lourds WO_4^{2-} forment une couche visqueuse autour du barreau réduisant la vitesse de la réaction sur les endroits recouverts ; de plus la couche visqueuse s'écoule vers le bas par gravité

Récemment Kulakov et al. [161] ont proposé d'attribuer la non uniformité de gravure le long du barreau à une évolution du film visqueux de WO_4^{2-} sous l'effet d'une instabilité de Plateau-Rayleigh. Celle-ci (Figure 74) permet d'expliquer, que sous l'effet des forces capillaires, une colonne cylindrique de liquide de rayon r se brise en gouttelettes lorsque la longueur de la colonne l est supérieure à $2\pi r$ [161], [162].

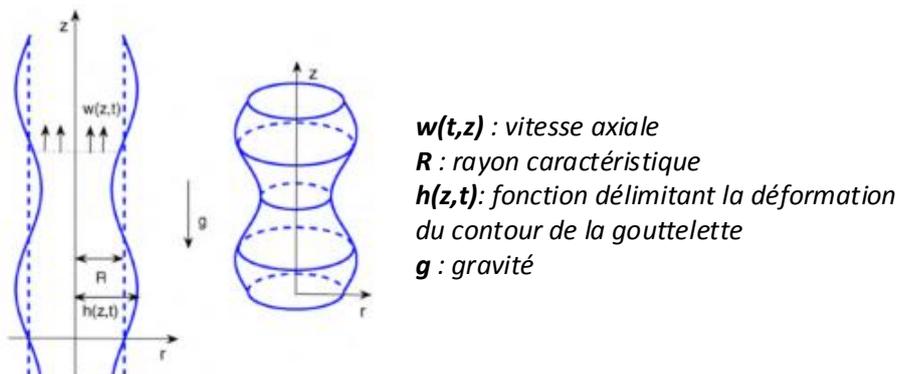


Figure 74 – Instabilité de Plateau-Rayleigh d'après [162].

Pour pouvoir visualiser ce phénomène, Kulakov et al. ont mis en place une expérience modèle en plongeant un barreau de tungstène dans un bain de polyéthylène glycol pour constituer une couche visqueuse puis en l'immergeant dans un bain d'hexadécane pour modéliser une solution de KOH de faible concentration (Figure 75). L'expérience confirme l'existence d'une instabilité à l'interface du film avec l'électrolyte : le film est séparé en deux parties créant ainsi deux flux. Le premier flux se dirige vers le haut avec un tourbillon au niveau du ménisque tandis que le deuxième flux s'écoule vers le bas le long du barreau

créant ainsi une couche qui peut empêcher ou ralentir la réaction de gravure électrochimique (Figure 75a-c).

Bien évidemment, cette expérience ne prétend pas être une représentation complètement exacte de ce qui se passe lors de la gravure d'un barreau de tungstène dans une solution d'hydroxyde de sodium. En particulier, le rétrécissement du fil et les bulles de gaz ne sont pas considérés ici ainsi que les effets électrochimiques.

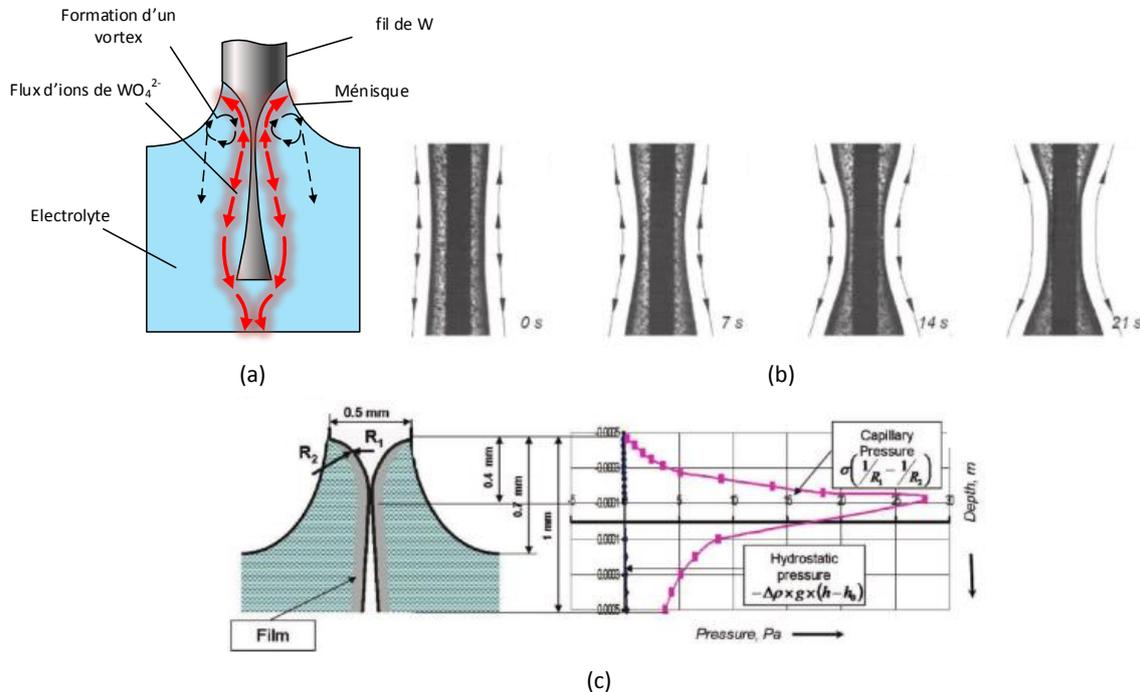


Figure 75 – Tensions de surface et phénomène du ménisque. (a) Schématisation du flux d'ions WO_4^{2-} d'après [161] ; (b) Evolution de l'épaisseur d'un film de polyéthylène glycol (0,3 wt %) d'épaisseur initiale de 150 μm le long d'un barreau en W de 300 μm de diamètre plongé dans une solution d'hexadécane; (c) mesure des pressions de capillarité et hydrostatique s'exerçant sur le fil de W ($\phi = 500\mu\text{m}$) [161].

3.2.3. Disposition expérimental de gravure de 1^{ère} génération

Pour éviter l'effet drop-off, le principe breveté par l'INL [14] et étudié en premier par G. Girardin [13] consiste à appliquer entre les électrodes des créneaux en courant de durée T_{ON} avec des temps de repos de durée T_{OFF} ; les créneaux T_{ON} étant eux-mêmes subdivisés en créneaux T^+ et T^- d'alternance opposée (Figure 76).

Le choix des paramètres a été justifié par G. Girardin dans son manuscrit de thèse :

- la gravure électrochimique du tungstène a lieu pendant l'impulsion positive T^+ (avec le barreau de tungstène en anode) ;
- la couche visqueuse de WO_4^{2-} autour du barreau est expulsée par l'action du gaz d'hydrogène générée électrochimiquement pendant l'impulsion négative T^- ;
- un processus alterné de gravure et d'expulsion de la couche visqueuse est répété plusieurs fois pendant la période T_{ON} , qui est égale à $T_{ON} = n \times (T^+ + T^-)$ où n est un entier ;

- un temps de repos T_{OFF} à courant nul est nécessaire ; celui-ci correspond au renouvellement macroscopique de la solution d'électrolyte autour du barreau sous l'action d'une pompe.

La durée totale de gravure t_g est donc égale à $N \times (T_{ON} + T_{OFF})$; N étant un entier correspondant au nombre de créneaux T_{ON}/T_{OFF} appliqués.

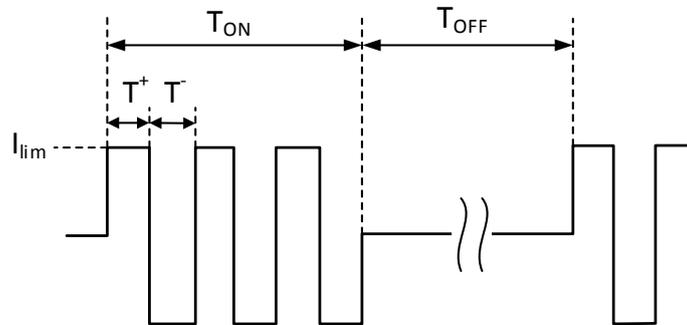


Figure 76 – Courant appliqué entre tungstène et la contre-électrode de platine d'après [13].

L'électronique de gravure est décrite à la Figure 77. Elle est basée sur l'utilisation d'un amplificateur de puissance OPA547 contrôlé en courant. La valeur de la tension et du courant appliqués à la cellule électrochimique est commandé par un convertisseur numérique analogique monté en bipolaire. Le train binaire est géré par une interface LabView avec des paramètres (tension, limite, durées T^+ , T^- , n , N) choisis par l'opérateur.

L'excursion du signal de sortie en tension V_g de l'OPA547 est comprise entre +/-15 V. Lorsqu'il est dans la bonne plage de fonctionnement, l'OPA547 fonctionne en source de courant, c'est-à-dire qu'il délivre une tension suffisante à la cellule pour que le courant qui la traverse corresponde au courant de consigne. Cela permet de polariser les électrodes à une d.d.p. permettant de déclencher la dissolution électrochimique ; le courant de gravure I_{LIM} pouvant être réglé de 16 mA à 450 mA.

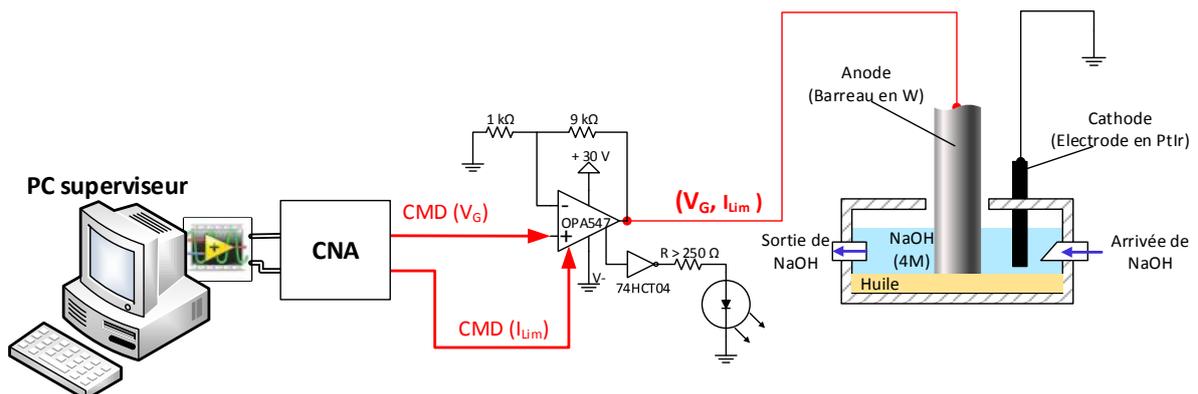


Figure 77 – Dispositif électronique de gravure électrochimique des micro-outils en W.

Dans la pratique, la cuve de gravure électrochimique contient deux liquides non miscibles :

- au fond, une huile commerciale perfluorée de type Galden HT200 lourde (densité de 1,79 g/cm³ à 25°C) non conductrice et inerte électrochimiquement ;

- au-dessus, la solution d'hydroxyde de sodium (NaOH 4M) plus légère (1,4 g/cm³). La solution d'hydroxyde de sodium est renouvelée à l'aide d'une pompe péristaltique via une entrée et une sortie disposées sur le couvercle.

Au début de la gravure (Figure 78), une extrémité du barreau de tungstène (diamètre initial Φ 250 μ m) est plongée dans l'huile perfluorée, de sorte que l'attaque électrochimique permet de graver la partie du barreau immergée dans la soude mais pas son extrémité. Durant cette phase, le barreau est gravé sous la forme d'un haltère. Dans une étape ultérieure, l'extrémité inférieure de l'haltère est remontée dans la soude puis coupée électrochimiquement par effet drop-off.

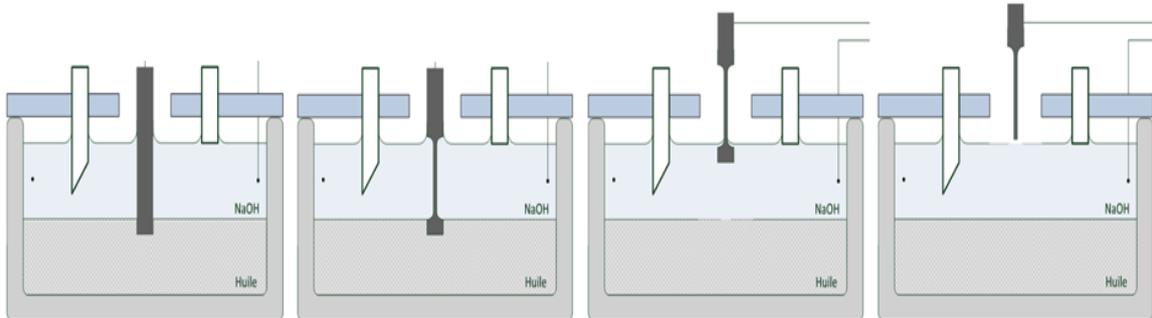


Figure 78 – Séquence d'affûtage pour l'obtention d'un micro-outil d'après [13].

Avec ce procédé, G. Girardin a réussi à graver de manière automatique un barreau de tungstène de 250 μ m jusqu'à un diamètre d'haltère d'environ 30 μ m en une seule étape (la coupure de la partie inférieure de l'haltère étant toujours effectuée avec un contrôle de l'opérateur). Un test de reproductibilité effectué sur 5 outils a montré qu'avec le protocole automatique, le diamètre moyen d'haltère avant l'étape de coupure est de 30,7 μ m avec un écart type de 2,1 μ m ; le facteur de forme moyen étant de 82,9 avec un écart type de 9.

Avec un réglage manuel des paramètres, il est possible en une seule étape d'obtenir des micro-outils avec un diamètre d'haltère jusqu'à 5 μ m. Pour obtenir des micro-outils de diamètre inférieur, l'intervention de l'opérateur est nécessaire, car une variation même mineure des paramètres de gravure peut conduire à une disparition du micro-outil par dissolution totale. Avec cette approche, des micro-outils avec un diamètre de l'ordre du μ m ont été obtenus.

3.3. Développement instrumental

Dans cette section, nous allons décrire comment nous avons intégré le poste de gravure électrochimique dans la machine de μ EE de 2^{ème} génération.

3.3.1. Effets des ménisques

Afin de corriger une coquille dans le manuscrit de G. Girardin, nous avons tout d'abord vérifié l'orientation des ménisques. Lorsque l'on plonge verticalement le barreau de tungstène dans un bécher rempli avec 10 ml d'huile Galten au fond et 10 ml de NaOH au-dessus, on voit apparaître les deux ménisques de la Figure 79 au niveau des interfaces huile-électrolyte et électrolyte-air.

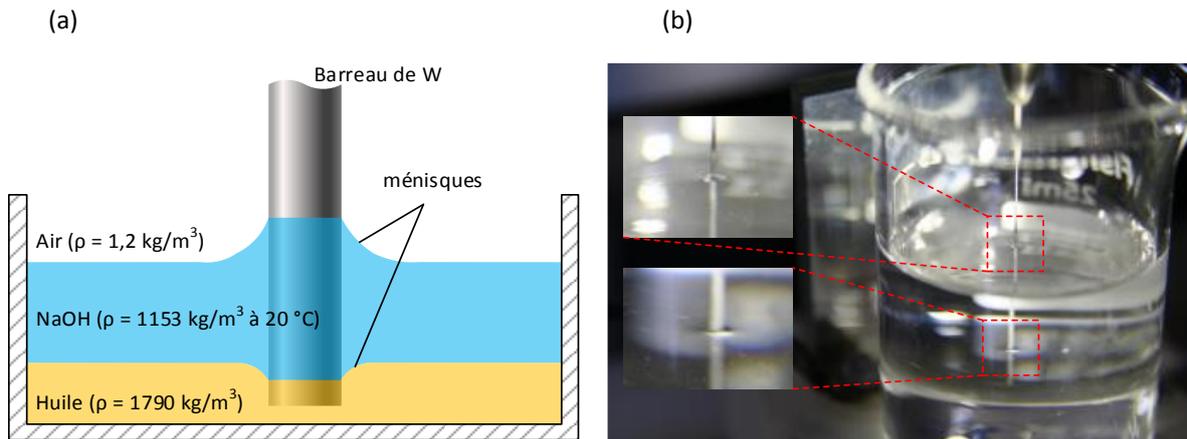


Figure 79 – Mise en évidence des ménisques: (a) Nature des fluides. (b) Photographie des ménisques bas (interface tungstène-huile-électrolyte) et haut (interface tungstène-électrolyte-air).

Cette configuration permet de graver l'outil avec un facteur de forme supérieur à 50 (cf. Figure 80a).

La Figure 80b est une interprétation possible de l'écoulement du film de WO_4^{2-} sous l'effet de la gravité en présence des ménisques. Elle fait apparaître deux endroits où la pression capillaire s'exerçant sur le fil donne naissance à des tourbillons de flux pendant la gravure.

Notre conclusion est que l'effet du ménisque supérieur est plus important que celui du ménisque inférieur. Nous avons estimé à l'annexe 3 l'ordre de grandeur du volume enlevé au niveau des ménisques. Par la suite, nous ne tiendrons pas compte de la quantité de matière enlevée au niveau des ménisques.

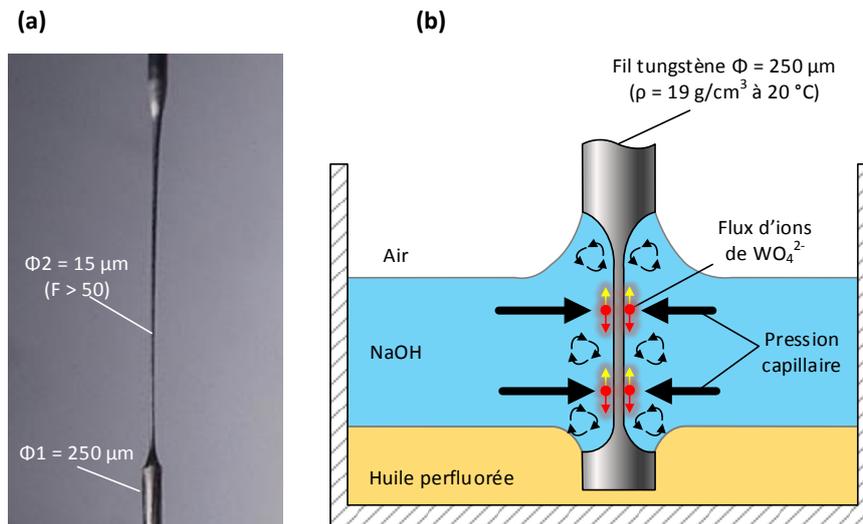


Figure 80 – Rôle et intérêt des deux ménisques. (a) Image d'un outil cylindrique fabriqué (partie du milieu, $\phi = 15 \mu\text{m}$) ; (b) Schéma représentant un probable sens d'écoulement du film d'ions WO_4^{2-} en présence de deux ménisques.

3.3.2. Intégration du poste de gravure électrochimique des micro-outils dans la machine de 2^{ème} génération

a) Cellule électrochimique

Pour Intégrer le poste de gravure électrochimique dans la machine de 2^{ème} génération, nous avons mis en place une cuve de gravure en polypropylène de 4 x 4 x 2 cm³. L'arrivée et la sortie de l'hydroxyde de sodium ont été modifiées par rapport à la version précédente avec des connexions fluidiques latérales placées à 1 cm du couvercle de la cuve (Figure 81).

Le barreau cylindrique est constitué de tungstène pur à 99,99 % (Goodfellow) avec un diamètre initial d'environ 250 µm. La contre électrode est un anneau de 1 cm en platine qui entoure le barreau. Cette forme permet de répartir le courant de gravure avec une symétrie cylindrique ; néanmoins la conductivité de la solution d'hydroxyde de sodium (400 mS.cm⁻¹ à 25°C) est telle que la disposition exacte des électrodes est de peu d'importance. Le barreau de tungstène est plongé sur une longueur de 6 mm dans la solution d'hydroxyde de sodium et de 1 mm dans l'huile Galten.

Nous avons mis en place une solution mère d'hydroxyde de sodium dans un réservoir de 5 L, ce qui permet de prélever la solution de gravure et de l'envoyer dans un réservoir de 1 L placé dans un bain thermostaté à 35 °C (Figure 81). En effet, après plusieurs opérations de gravure, la viscosité de l'électrolyte augmente notamment par incorporation des ions tungstates. Il est donc préférable, pour une meilleure reproductibilité du procédé, de renouveler fréquemment le volume de travail. Pendant la gravure, l'électrolyte est mis en circulation continue entre le réservoir de 1 L et la cuve de gravure. A la fin de celle-ci l'électrolyte est envoyé dans un réservoir poubelle. La cuve et les connexions fluidiques sont rincées à l'eau déionisée.

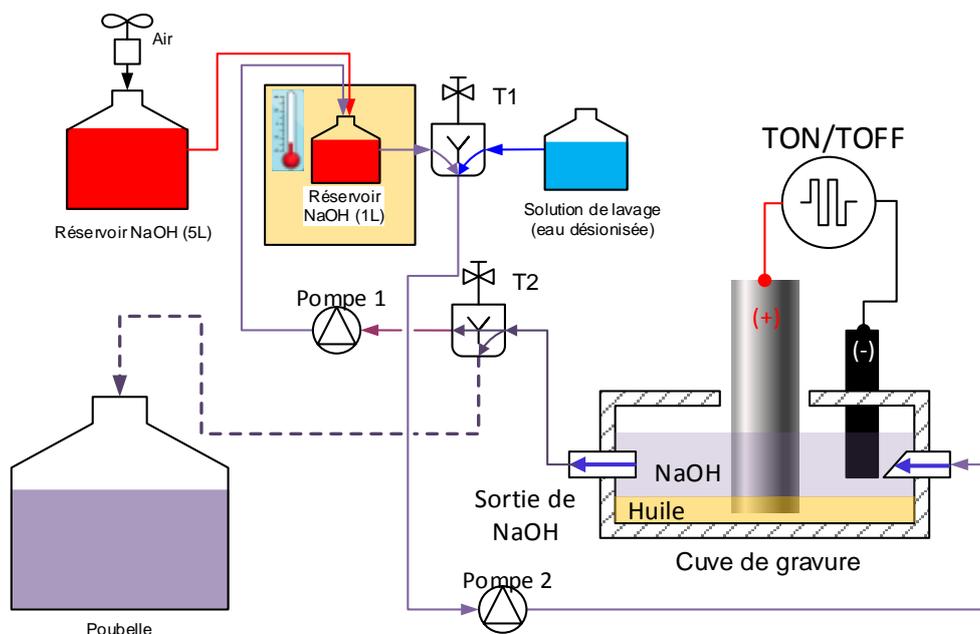


Figure 81 – Cellule de gravure électrochimique avec le dispositif fluide permettant de renouveler la solution d'électrolyte.

La Figure 81 montre une photographie du nouveau poste de gravure électrochimique dans la machine de 2^{ème} génération. Il est à noter qu'une fois que la gravure électrochimique du micro-outil est terminée, celui-ci est plongé dans une cuve adjacente contenant de l'eau déionisée pour enlever les résidus de NaOH restés à la surface du tungstène.

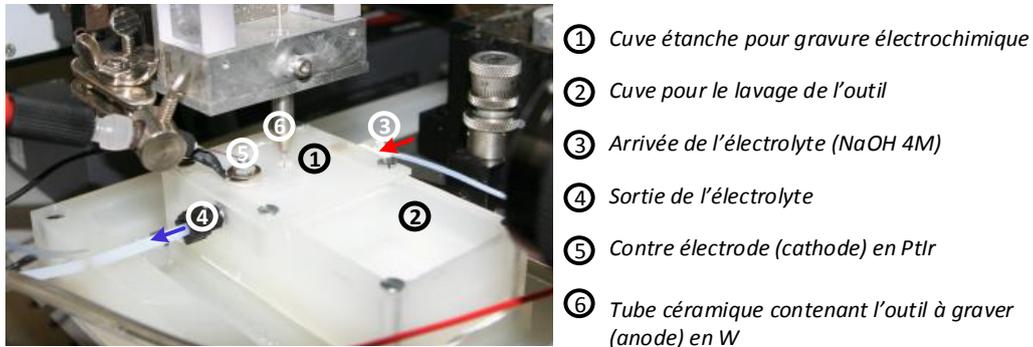


Figure 82 – Poste de gravure électrochimique dans la machine de μ EE de 2^{ème} génération.

b) Electronique de gravure

La quantité de matière enlevée pendant la phase d'usinage électrochimique dépend de la quantité d'électricité qui passe dans le dispositif. Celle-ci dépend de l'intensité du courant ainsi que du nombre et la durée des impulsions T^+ .

Dans la version de l'électronique réalisée par G. Girardin, la valeur minimum de la durée T^+ était de 30 ms avec des fluctuations pouvant atteindre 20 ms, ce qui était pénalisant pour l'obtention de micro-outils très fins ($<30 \mu\text{m}$). Cela était dû au fait que la durée était contrôlée par une horloge logiciel LabView.

En conséquence, par rapport au schéma de la Figure 77, le circuit de génération des signaux de gravure a été modifié de la sorte que le signal de sortie (tension) de l'amplificateur OPA547 est commandé directement par le convertisseur numérique analogique interne à la carte NI 6229, ce qui permet d'avoir une précision temporelle de 1 ms. Par contre le convertisseur numérique analogique externe a été conservé tel quel pour limiter la valeur du courant de sortie de l'OPA547 (car elle est indépendante des différentes temporisations).

Le principe du nouveau dispositif est montré à la Figure 83.

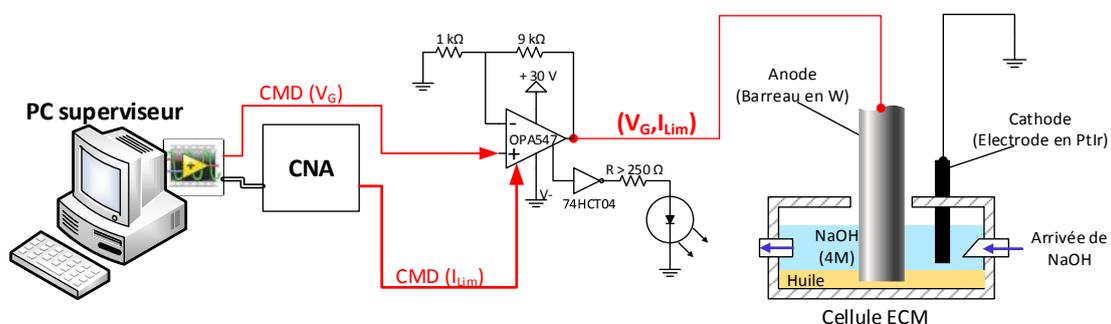


Figure 83 – Principe de la carte de génération des impulsions de gravure après modification.

Une autre modification a été apportée au niveau de la tension de gravure pendant le temps de repos T_{OFF} . En effet, la tension de sortie de l'OPA547 doit être fortement négative à pH très basique (cf. Figure 71) pour éviter une dissolution chimique du tungstène (c'est-à-dire à courant nul). Pour ce faire, pendant la durée T_{OFF} , le courant de sortie de l'OPA547 est ajusté à 0 A mais sa tension de sortie a été réglée à -5 V et non plus à 0 V.

Nous avons vérifié expérimentalement que ce potentiel négatif est nécessaire pour bloquer une réaction de dissolution pouvant intervenir pendant T_{OFF} . La Figure 84 montre par exemple la diminution du diamètre d'un barreau de W de 257 μm lors d'une attaque chimique de 5 minutes (c'est-à-dire à tension et courant nuls).

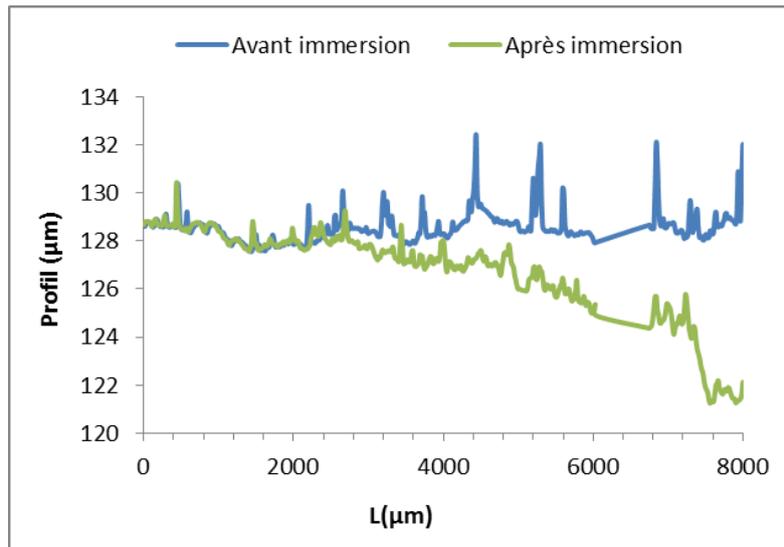


Figure 84 – Attaque du barreau de W à tension nulle.
($C_{NaOH} = 4M/l$, $V_G = 0V$, immersion pendant 5 minutes).

Le tableau suivant résume les différences principales entre les générateurs de 1^{ère} et 2^{ème} génération. Les points essentiels sont un meilleur contrôle de la durée des créneaux T^+ (avec un durée minimum de 1 au lieu de 30 ms) ainsi qu'un courant de sortie minimum de 10 mA pendant les phases T^+ , ce qui est important pour les outils de faible diamètre.

Générateur de gravure Machine μUEE génération N°1	Générateur de gravure Machine μUEE génération N°2
<input checked="" type="checkbox"/> $T^+ \geq 30 \text{ ms}$	<input checked="" type="checkbox"/> $T^+ \geq 1 \text{ ms}$
<input checked="" type="checkbox"/> $T^- \geq 30 \text{ ms}$	<input checked="" type="checkbox"/> $T^- \geq 1 \text{ ms}$
<input checked="" type="checkbox"/> $V_G (T_{OFF}) = 0 \text{ V}$	<input checked="" type="checkbox"/> $V_G (T_{OFF}) = -5 \text{ V}$
<input checked="" type="checkbox"/> $I_{Lim} (T_{OFF}) \geq 16 \text{ mA}$	<input checked="" type="checkbox"/> $I_{Lim} (T_{OFF}) \geq 10 \text{ mA}$
<input checked="" type="checkbox"/> $V_G (T^+/T^-) = 0 \text{ à } \pm 15 \text{ V}$	<input checked="" type="checkbox"/> $V_G (T^+/T^-) = 0 \text{ à } \pm 10 \text{ V}$
<input checked="" type="checkbox"/> $I_{Lim} (T^+/T^-) = 16 \text{ à } 470 \text{ mA}$	<input checked="" type="checkbox"/> $I_{Lim} (T^+/T^-) = 10 \text{ à } 470 \text{ mA}$

Tableau 8 – Comparaison entre le générateur d'impulsions de gravure avant et après modification.

3.4. Développement du protocole de fabrication des micro-outils

Dans cette section, nous discuterons du protocole de fabrication des micro-outils qui sera utilisé au chapitre 4. Nous commencerons par présenter les moyens de caractérisation utilisés.

3.4.1. Généralités

Les micro-outils seront caractérisés ex situ avec un microscope électronique à balayage (MEB) de marque FEG Tescan Mira 3 et un microscope optique Olympus BX51M.

Ils seront caractérisés in situ dans la machine de μ EE :

- avec la caméra 1 équipée d'un zoom Navitar x12 avec une résolution optique de $1,67 \mu\text{m}$ d'après le constructeur ; la caractérisation est effectuée en prenant des images décalées par déplacement en Z de l'outil de $350 \mu\text{m}$, puis en reconstituant une vue complète de l'outil par assemblage des images ;
- avec un micromètre laser Mitutoyo LSM-500S dont l'étendue de mesure est de $5 \mu\text{m}$ à 2mm ; d'après le fabricant, la résolution est de 10nm tandis que, pour une pige de calibration de 2mm , la répétabilité est de $\pm 0,03 \mu\text{m}$.

Le principe de fonctionnement du micromètre laser est le suivant (Figure 85) : un faisceau émis par une diode laser est dirigé sur les facettes d'un miroir polygonal à 8 faces qui tourne à grande vitesse de sorte que le faisceau réfléchi balaie une lentille de collimation de haut en bas. Le faisceau réfléchi est partiellement obstrué par la pièce en fonction du diamètre de celle-ci puis il est focalisé par une 2^{ème} lentille sur un récepteur photo-électrique. La tension de sortie du récepteur est proportionnelle à la quantité de lumière reçue, ce qui permet de déterminer la dimension de la zone d'interception du laser et donc le diamètre du micro-outil. La vitesse de rotation du miroir polygonal atteint 3200 balayages/s, ce qui permet d'effectuer une mesure en $0,32 \text{ms}$.

Le laboratoire n'ayant pas de pignes certifiées, la calibration du profilomètre est effectuée à l'aide d'un barreau tungstène avant la gravure. La valeur du diamètre sera arbitrairement fixée à $255 \pm 1 \mu\text{m}$.

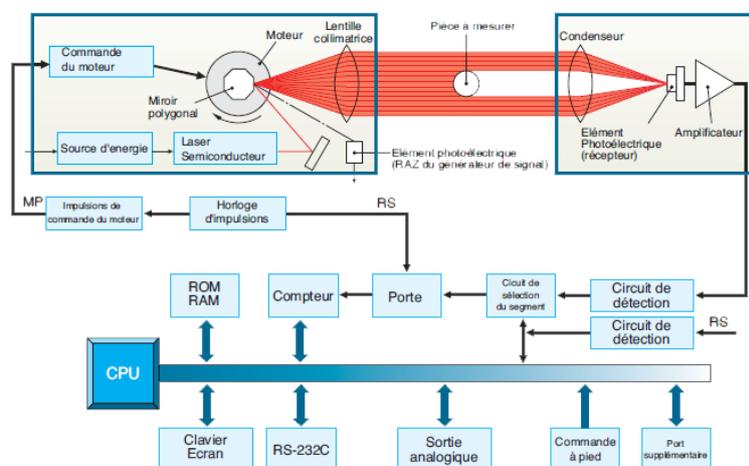


Figure 85 – Principe du micromètre laser Mitutoyo LSM-500S.

Les étapes de fabrication sont résumées à la Figure 86. Le barreau est plongé dans la cuve de gravure jusqu'à ce qu'un courant électrique soit détecté à la surface libre de la solution d'hydroxyde de sodium ; cette position sera prise comme référence verticale. Puis il est enfoncé de 7 mm de sorte que son extrémité est immergée dans l'huile.

L'haltère est ensuite gravé en appliquant les créneaux de courant comme décrit précédemment, et ce jusqu'à l'obtention du diamètre Φ souhaité ; le but de ce chapitre étant de développer un protocole permettant d'atteindre ce diamètre électrochimiquement. Cette opération est effectuée soit en une seule étape avec un courant I_{Lim} constant, soit en 3-4 étapes avec des courants I_{Lim} décroissants. Le diamètre Φ est mesuré avec le profilomètre laser en prenant la moyenne du diamètre entre les positions $z = 3$ et $z = 7$ mm.

L'étape suivante consiste à remonter l'haltère de façon à en positionner la partie inférieure dans l'électrolyte. Celle-ci est coupée automatiquement par effet drop-off. Le profil de l'outil est de nouveau mesuré au profilomètre.

Si nécessaire, l'outil est de nouveau plongé dans l'électrolyte pour poursuivre l'amincissement. Puis il est de nouveau contrôlé au profilomètre.

Le micro-outil ainsi obtenu est dégagé de la cuve de gravure, rincé et séché. Il alors est prêt à être utilisé.

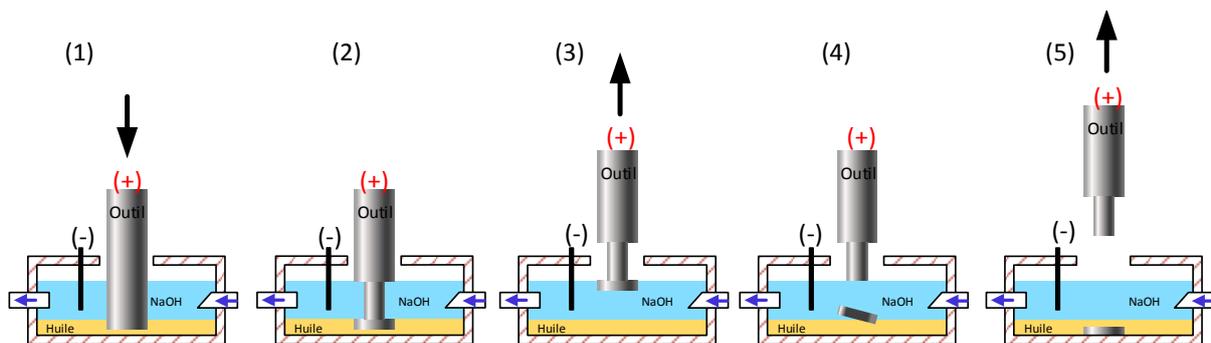


Figure 86 – Etapes de fabrication d'un micro-outil dans la machine de 2ème génération. (1) Plongée du barreau jusqu'à l'immersion de son extrémité dans l'huile ; (2) formation de l'haltère par gravure électrochimique ; (3) remontée de la partie inférieure de l'haltère dans la solution d'hydroxyde de sodium ; (4) coupure de l'extrémité par voie électrochimique (drop-off) ; (5) dégagement de l'outil.

Nous indiquons ci-dessous comment le diamètre moyen du micro-outil est calculé.

En effet, la Figure 87 montre le profil obtenu avec quatre parties caractéristiques :

- une tige cylindrique de diamètre $255 \pm 1 \mu\text{m}$ qui sert au maintien de l'outil dans la machine ;
- une zone de transition appelée fuseau inhérente à la méthode de fabrication ;
- l'outil cylindrique proprement dit, qui correspond à la partie utile en μEE ;
- l'extrémité de l'outil avec sa surface extérieure.

Soit $z = 0$, l'origine de l'axe z placée dans la tige près du fuseau :

- le fuseau est compris entre les plans $z = 0$ et $z = 3$ mm ;
- l'outil (partie utile) est compris entre les plans $z = 3$ et $z = 7$ mm¹ ;
- l'extrémité de l'outil est définie comme la zone au-delà de $z = 7$ mm.

¹ Ou bien 6 mm en fonction de l'expérience considérée.

Le diamètre moyen est obtenu en calculant la moyenne du diamètre sur la longueur utile. Le facteur de forme est le rapport entre la longueur utile et le diamètre moyen.

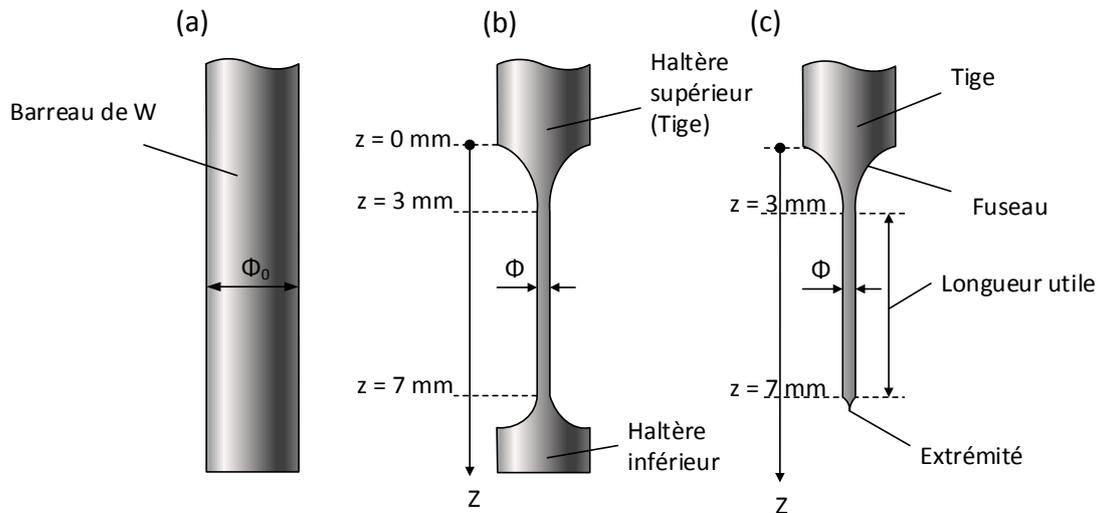


Figure 87 – Caractéristiques géométriques d'un micro-outil.

(a) Avant affutage ; (b) après affutage ; (c) après coupure de l'haltère inférieur par drop off.

La Figure 88 montre un exemple d'outil cylindrique de diamètre $22,6 \mu\text{m}$ avec un facteur de forme de plus de 180. Celui-ci a été obtenu à partir d'un barreau de diamètre initial moyen de $255,64 \mu\text{m}$ (mesuré sur une hauteur de $4,3 \text{ mm}$). L'outil a été fabriqué en plusieurs étapes de gravure ; la durée total t_g de gravure étant de 22,5 minutes. Le protocole de gravure n'était à ce moment pas encore optimisé.

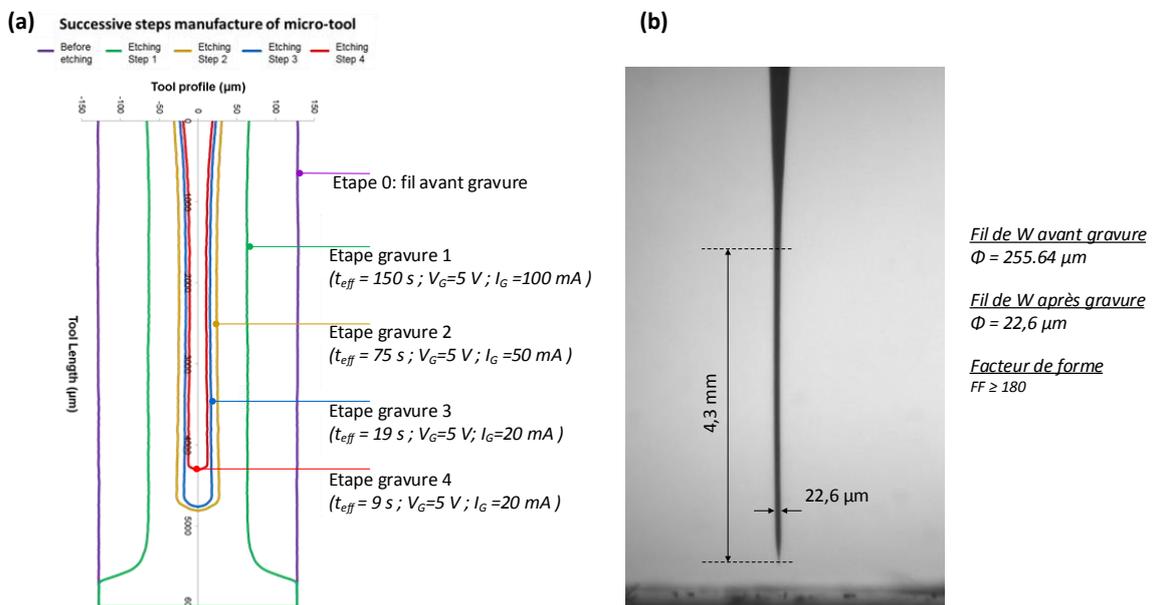


Figure 88 – Exemple de fabrication d'un micro-outil par étapes. (a) Profils successifs de l'outil à chaque étape de gravure avec le profilomètre laser ; (b) vue à la caméra du micro-outil après coupure.

3.4.2. Expression du diamètre central de l'haltère en négligeant l'effet des ménisques

L'objectif ici est de relier le diamètre moyen de l'haltère entre les plans $z = 3$ et $z = 7$ mm à la durée totale de gravure t_g en fonction des autres paramètres de gravure.

Pendant la gravure électrochimique, la quantité de matière globale enlevée au tungstène est donnée par la loi de Faraday sur l'électrolyse, soit :

$$m = \left(\frac{Q}{F}\right) \times \left(\frac{M}{z}\right) \quad (5)$$

Où :

- m est la masse de matière libérée à l'électrode en grammes ;
- Q est la quantité de charges électriques traversant le circuit (nombre d'électrons en moles) ;
- F est la constante de Faraday (96485 C/mol) ;
- M est la masse molaire du tungstène (183,85 g/cm³) ;
- $z = 6$ est le nombre d'électrons impliqués dans la réaction électrochimique.

En faisant cela, on suppose implicitement que tous les électrons ont été utilisés pour graver électrochimiquement le tungstène (pas d'autres réactions électrochimiques que celle-ci).

Si l'on suppose de plus que le courant électrique est constant, la quantité d'électricité Q est donnée par :

$$Q = I \cdot t_{eff} \quad (6)$$

Où :

- I est le courant traversant le circuit (A) fourni par l'OPA547 ;
- t_{eff} (s) est la durée effective de gravure, différente de la durée totale de gravure t_g (s) ; la différence étant due aux impulsions T^- et aux durées T_{OFF} .

Si l'on tient compte du fait que la réaction de dissolution électrochimique du tungstène n'a lieu que durant les impulsions T^+ . La durée effective de gravure t_{eff} peut être calculée à partir de la durée totale de gravure t_g et des autres paramètres temporels T^+ , T^- , T_{ON} et T_{OFF} comme suit :

$$t_{eff} = \left(\frac{T^+}{T^+ + T^-}\right) \times \left(\frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}\right) \times t_g \quad (7)$$

En négligeant l'effet des ménisques (Figure 89b), la quantité de tungstène enlevée ΔV correspond à une couronne cylindrique de longueur L comprise entre les cercles de diamètre Φ_0 et Φ comme suit :

$$\Delta V = \frac{\pi \cdot L}{4} (\Phi_0^2 - \Phi^2) = \frac{m}{\rho} \quad (8)$$

Où :

- Φ_0 est le diamètre initial du barreau de tungstène ;

- Φ est le diamètre final dans la partie centrale de l'haltère ;
- L est la hauteur finale de la partie centrale de l'haltère ;
- m est la masse totale de matière gravée ;
- ρ est la masse volumique du tungstène (19300 kg/m^3).

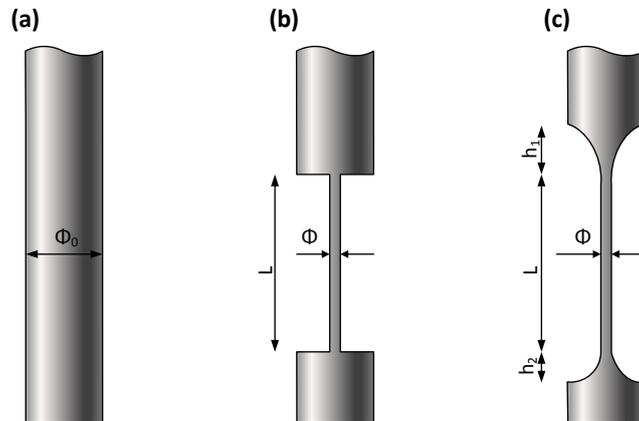


Figure 89 – Principe de calcul du volume gravé électrochimiquement. (a) Barreau avant gravure ; (b) haltère après gravure en négligeant l'effet du ménisque ; (c) haltère après gravure en prenant en compte les effets du ménisque.

En reportant les équations (5), (6) et (7) dans l'équation (8), nous obtenons le diamètre théorique (Φ) en fonction des paramètres de gravure :

$$\Phi = \sqrt{\Phi_0^2 - t_{eff} \cdot \left(\frac{4 \cdot M \cdot I}{\pi \cdot L \cdot \rho \cdot z \cdot F} \right)} \quad (9)$$

Pour simplifier les calculs, nous négligerons l'effet des ménisques dans la section suivante. La formule (9) permettra donc de calculer directement le diamètre final de l'haltère après gravure dans cette hypothèse.

3.4.3. Protocole de gravure avec une diminution linéaire du diamètre

D'après l'équation (9), à courant de gravure constant, le diamètre de l'outil diminue avec un facteur en $t^{1/2}$. Au début de la gravure, il est utile de commencer avec un courant important pour gagner du temps. Mais, si l'on applique les mêmes paramètres pendant toute la gravure, il est de plus en plus difficile de contrôler le diamètre de l'outil. En d'autres termes lorsque l'outil devient très fin, la moindre variation d'un des paramètres expérimentaux (fluctuation de courant ou t_{eff} trop long) entraîne une dissolution totale de l'outil.

L'objectif de cette section est de définir un protocole d'usinage électrochimique permettant d'avoir une diminution du diamètre Φ du micro-outil¹ plus lente et donc plus facile à contrôlée expérimentalement. Pour ce faire, nous avons développé un protocole de gravure en plusieurs étapes en laissant les paramètres T_+ , T_- , n et N inchangés et en faisant varier le

¹ Il s'agit du diamètre dans la phase haltère avant la coupure finale.

courant I de gravure par paliers. L'idée est d'aboutir à une variation du diamètre linéaire avec le temps¹.

Le protocole expérimental est détaillé au Tableau 9. Les étapes de 1 à 4 consistent à graver le barreau en adaptant le temps de gravure t_g et le courant de gravure I , les autres paramètres du générateur restant inchangés. La forme en haltère est conservée jusqu'à l'étape 4 comprise.

N° d'étape	T ⁺ (ms)	T ⁻ (ms)	T _{ON} (ms)	T _{OFF} (ms)	t _g (s)	V _g (V)	I (mA)
Etape 1	30	30	300	500	800	5	100
Etape 2	30	30	300	500	400	5	50
Etape 3	30	30	300	500	100	5	20
Etape 4	30	30	300	500	50	5	20

Tableau 9 – Adaptation des paramètres temporels et électriques du générateur de gravure pour la linéarisation du diamètre au cours de l'affutage.

Le résultat obtenu est détaillé au Tableau 10 avec :

- $\Phi_{\text{Mesuré}}$: diamètre moyen de la partie cylindrique de l'altère mesurée au profilomètre laser ;
- $\Phi_{\text{Calculé}}$: diamètre calculé en utilisant les paramètres du Tableau 9 dans l'équation (9).

N° d'étape	Φ Mesuré (μm)	Φ Calculé (μm)
Avant gravure	256,64	-
Etape 1	127,48	124,75
Etape 2	50	51,27
Etape 3	32,4	36,35
Etape 4	22,6	21,45

Tableau 10 – Evolution du diamètre de l'outil.

La coupure de la partie basse du micro-outil est effectuée à la fin de l'étape 4 en appliquant un courant de 100 mA pendant 60 s. La Figure 90 montre une image de l'outil après la coupure. Le diamètre est de 22,6 μm . La longueur utile est de 1200 μm et le facteur de forme F_f est de 53.

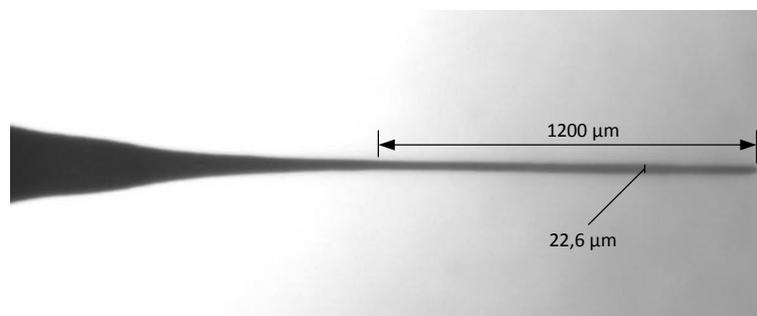


Figure 90 – Image prise à la camera de l'outil après coupure.

¹ T⁺, T⁻, n et N étant inchangés avec le protocole du Tableau 9, t_{eff} et t_g sont proportionnels d'après (7). Nous ferons donc ci-dessous référence au temps sans préciser s'il s'agit du temps de gravure expérimental ou du temps effectif.

La Figure 91 montre l'évolution du volume total, sur une longueur de 1,2¹ mm en fonction de la quantité d'électricité en sommant toutes les étapes du Tableau 9. Le volume enlevé a été mesuré au profilomètre tandis que la quantité d'électricité a été évaluée en mesurant le courant avec une sonde de courant et ce pendant les impulsions T⁺ (par échantillonnage). Le volume enlevé à la première étape est très important puis il diminue. Nous obtenons une vitesse de gravure de 2x10⁶ μm³ / C.

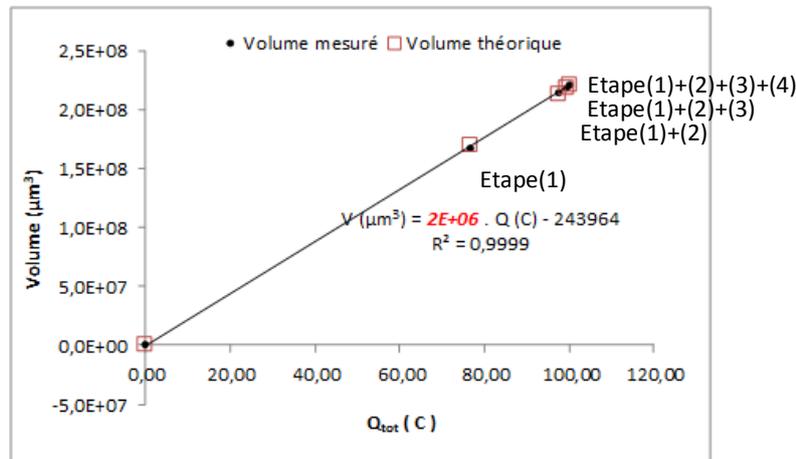


Figure 91 – Evolution du volume total enlevé en fonction de la charge électrique totale appliquée (comparaison entre le volume mesuré et le volume théorique).

La Figure 92 montre l'évolution du diamètre (mesuré au profilomètre) en fonction du temps de gravure total du process (t_g) et du temps effectif (t_{eff}) pendant les phases de gravure de 1 à 4 du Tableau 9. L'évolution est linéaire avec une pente de 0,93 μm / s en fonction de t_{eff} et 0,17 μm/s en fonction de t_g. Cette dernière valeur est utile expérimentalement pour l'opérateur en fin de gravure car elle est plus facile à gérer que la vitesse de gravure exprimée en μm³ / C.

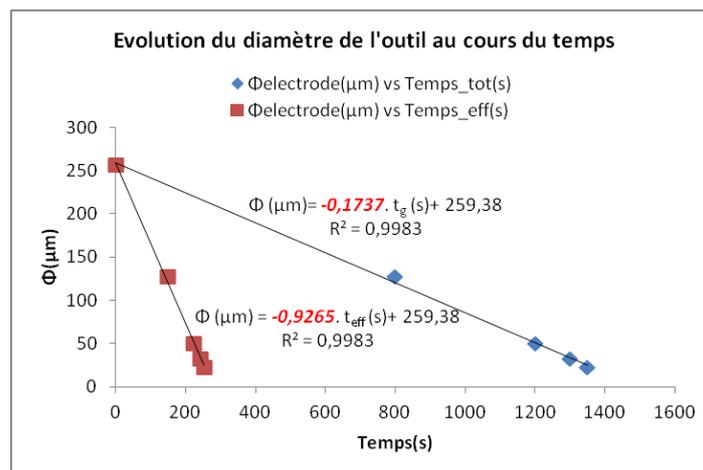


Figure 92 – Evolution du diamètre de l'outil en fonction du temps pendant la gravure électrochimique.

¹ Une longueur trop importante du micro-outil le fragilise et le rend sensible aux vibrations. C'est pourquoi nous l'avons raccourci en longueur.

3.4.4. Reproductibilité du protocole de fabrication des micro-outils

Cette section a pour objectif d'étudier la reproductibilité du procédé de gravure, ce qui est indispensable pour l'automatisation du processus de fabrication des micro-outils.

a) Reproductibilité de la 1^{ère} étape ($\Phi_{MOY} = 146,35 \mu\text{m}$)

Dans un premier temps, nous avons fabriqué trois micro-outils en une seule étape avec des paramètres identiques de gravure, et ce à partir du même barreau d'origine. Il s'agit ici d'évaluer la reproductibilité de la 1^{ère} étape de gravure, qui est celle où l'on enlève le plus de matière (cf. section précédente).

Les tableaux suivants montrent les paramètres du générateur de gravure utilisés ainsi que le diamètre des trois outils mesurés au profilomètre. Plus précisément, il s'agit de la moyenne du diamètre entre les positions $z = 2$ et $z = 6$ mm (pas de coupure de l'haltère).

N° d'étape	T ⁺ (ms)	T ⁻ (ms)	T _{ON} (ms)	T _{OFF} (ms)	t _g (s)	V _g (V)	I _g (mA)
Etape 1	30	30	300	500	750	5	100

Tableau 11 – Protocole de fabrication.

N° d'étape	Outil 1 (μm)	Outil 2 (μm)	Outil 3 (μm)
Avant gravure	256,7	255,9	256,3
Etape 1	146,4 \pm 0,55	144,9 \pm 1,64	147,7 \pm 0,72

Tableau 12 – Résultats expérimentaux.

La Figure 93 montre la superposition des trois profils d'outil mesurés au profilomètre laser. En faisant la moyenne sur les trois outils, le diamètre moyen est de $146,35 \mu\text{m}$ avec un écart type de $0,97 \mu\text{m}$, le facteur de forme est 27. On notera que le diamètre moyen de départ est de $255 \pm 1 \mu\text{m}$.

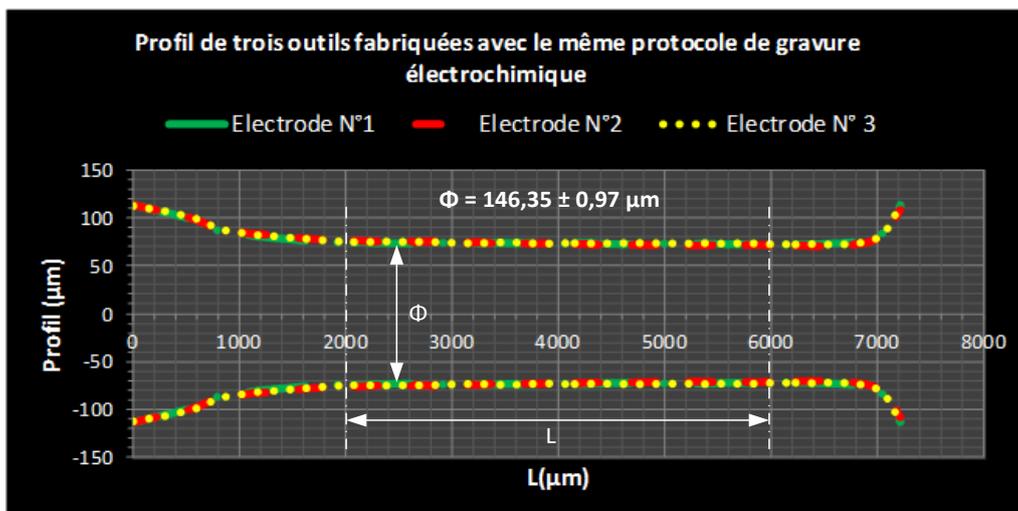


Figure 93 – Profil de trois outils fabriqués avec le protocole de gravure du Tableau 11.

Dans la figure précédente, il convient de tenir compte de l'effet d'échelle. Pour ce faire, la Figure 94 montre, pour chaque outil, l'écart en pourcentage entre les diamètres des outils 1, 2 et 3 calculé comme suit : $\Delta\Phi (\%) = \frac{(\Phi_{Outil\ "i"} - \Phi_{Outil\ "j"})}{\Phi_{Outil\ "j"}} \times 100 ; (i, j = 1, 2, 3 ; i \neq j)$,

La courbe en rouge représente la moyenne des trois différences relatives de diamètre en fonction de z. Sur la longueur L des micro-outils, l'écart moyen est 1,72 % avec un écart type de 0,72 %. La reproductibilité du protocole est donc bonne.

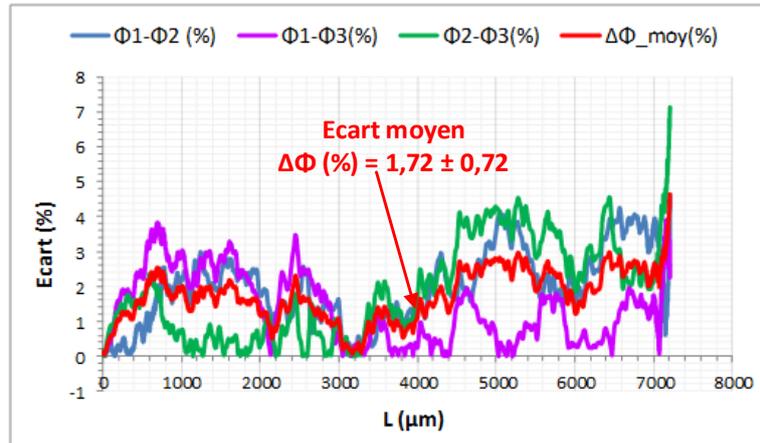


Figure 94 – Ecart en (%) en valeur absolue entre les profils des trois outils fabriqués pour une longueur totale de 7 mm.

b) Reproductibilité du protocole complet ($\Phi_{MOY} = 32,6 \mu\text{m}$)

Avec le protocole en trois étapes du Tableau 13, nous avons poussé la gravure afin d'obtenir un micro-outil avec un diamètre final plus petit. Cette fois-ci, l'haltère est coupé à la fin de l'étape 3. Cinq micro-outils ont ainsi été gravés électrochimiquement. Une mesure au profilomètre est faite pour chaque outil à chaque étape.

Pour chaque étape, le diamètre moyen d'outil sur une longueur de 3 mm est affiché au Tableau 14. Le diamètre final moyen sur les cinq outils est de $32,61 \pm 0,31 \mu\text{m}$, ce qui donne un facteur de forme F_f de 91.

N° d'étape	T+ (ms)	T- (ms)	T _{ON} (ms)	T _{OFF} (ms)	t _g (s)	V _g (V)	I _g (mA)
Etape 1	30	30	300	500	800	5	100
Etape 2	30	30	300	500	400	5	50
Etape 3	30	30	300	500	100	5	20

Tableau 13 – Choix des paramètres du générateur de gravure électrochimique.

N° d'étape	Outil 1 (µm)	Outil 2 (µm)	Outil 3 (µm)	Outil 4 (µm)	Outil 5 (µm)	Φ Moyen (µm)
Φ _{initial}	256,00	256,64	256,64	256,70	256,30	256,46 ± 0,3
Etape 1	125,06	126,48	125,54	126,95	125,00	125,81 ± 0,87
Etape 2	49,25	50,00	49,63	50,18	48,74	49,56 ± 0,58
Etape 3	32,86	32,40	32,50	33,00	32,27	32,61 ± 0,31

Tableau 14 – Résultats de mesures pour 5 micro-outils.

Le tracé de la courbe de l'évolution du diamètre moyen des cinq outils fabriqués avec le même protocole est illustré par la Figure 95. Ce résultat confirme que le protocole de fabrication avec une diminution linéaire du diamètre de l'outil est fiable, avec une vitesse de gravure de $0,92 \mu\text{m/s}$.

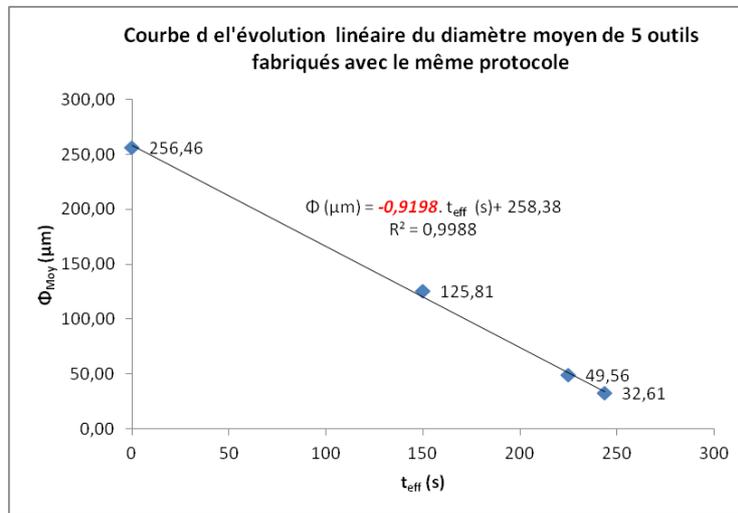


Figure 95 – Evolution du diamètre moyen des 5 outils fabriqués.

La Figure 96 montre l'évolution du volume de matière gravée de 5 outils. Leur volume moyen est calculé sur une longueur de 3mm.

Le volume moyen des 5 micro-outils gravé électrochimiquement avec le protocole décrit ci-dessus est de $1500 \times 10^{-4} \pm 5,16 \times 10^{-4} \text{ mm}^3$ ce qui confirme la robustesse et la bonne reproductibilité du procédé.

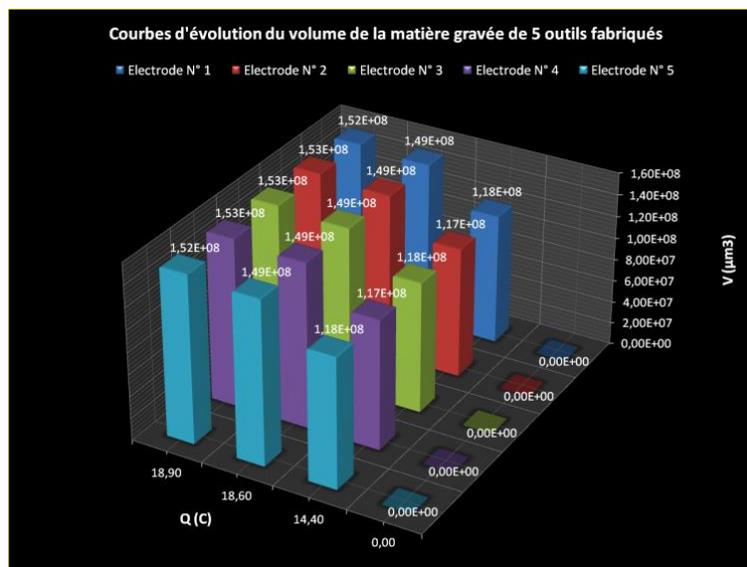


Figure 96 – Evolution du volume de matière gravée pour chaque outil fabriqué en fonction de la quantité de charge électrique appliquée.

3.5. Conclusion du chapitre

Le protocole du Tableau 13 permet d'obtenir de manière automatisée des micro-outils de diamètre moyen d'haltère $\Phi_{\text{Moy}} = 32,61 \pm 0,31 \mu\text{m}$, sur une longueur de 3 mm, ce qui donne un facteur de forme F_f de 91. L'écart type a été divisé par 2 par rapport à l'état de l'art antérieur (section 3.2.3).

Le protocole du Tableau 13 n'est pas optimisé. On pourrait notamment tenter de réduire la durée des différentes étapes sans altérer le facteur de forme. Nous n'avons pas eu le temps de mener à bien cette étude car il nous a été demandé de nous concentrer sur les usinages par EE du chapitre 4.

Quoi qu'il en soit, les Figure 97a et Figure 97b montrent des exemples de micro-outils de diamètre 10 et 8 μm . Il est donc tout à fait possible d'obtenir des micro-outils de diamètre nettement inférieur à 30 μm mais à cette échelle, l'intervention de l'opérateur est toujours nécessaire. Des exemples d'outils de diamètres 3 μm sont utilisés à la section 4.10

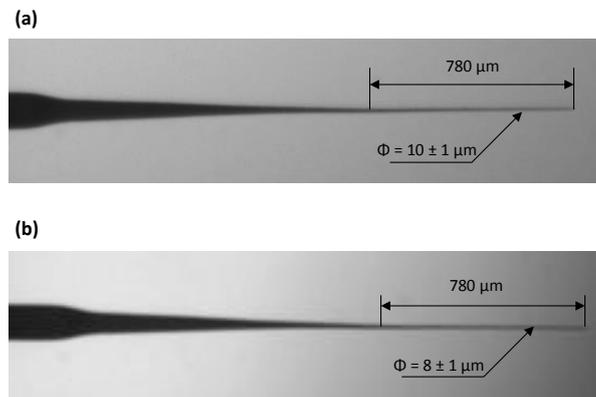


Figure 97 – Exemples d'outils ultrafins.

(a) Diamètre 10 μm avec facteur de forme 78 ; (b) diamètre 8 μm avec facteur de forme 97.

Pour tenter d'obtenir de manière automatique des outils de diamètre de l'ordre de 2 à 5 à 10 μm , il conviendrait d'étudier les questions suivantes :

- 1) défauts du barreau de tungstène (Figure 98) : grains de taille différente, fissures, etc. Ces défauts sont dus probablement à la phase d'étirement du barreau lors de la fabrication. Les solutions possibles sont un recuit thermique sous atmosphère inerte avant utilisation, accompagné éventuellement d'une étape de polissage électrochimique. Aux diamètres extrêmes, il faudra envisager l'utilisation de tungstène monocristallin (très coûteux).

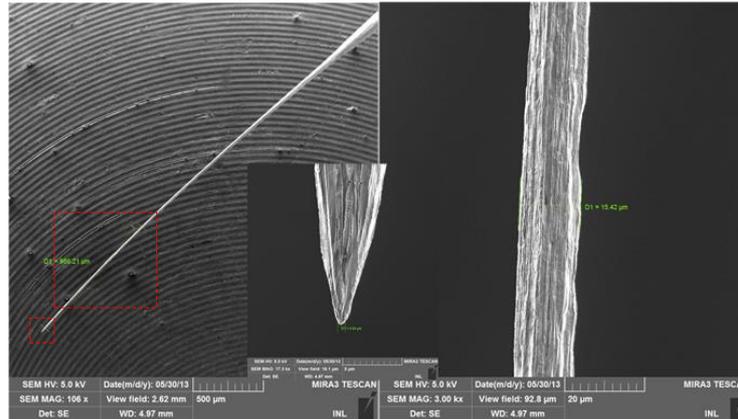


Figure 98 – Défaut de surface d'un micro-outil de 15 μm de diamètre vu au MEB.

- 2) défauts du générateur de gravure : il faudrait remplacer la source de tension contrôlée en courant, utilisée actuellement, par une source de courant paramétrable. Une solution à envisager serait de passer à un montage à trois électrodes avec un galvanostat de précision au lieu d'un montage à deux électrodes.

Il est important de mesurer la quantité réelle d'électricité qui passe dans le circuit au lieu de prendre des mesures échantillonnées du courant. Dans l'équation (9) par exemple, il serait ainsi possible de remplacer le courant de consigne par le courant réel.

Il conviendrait aussi de remplacer les paramètres temporels, qui dépendent actuellement d'une boucle logicielle, par une temporisation matérielle qui permettra de fixer des durées d'impulsion précises en μs .

- 3) il serait utile de modéliser l'usinage électrochimique (capacité de double couche, variation de conductivité de l'électrolyte en fonction de la quantité de tungstène dissous, circulation de fluide dans la cuve assurant le renouvellement...) ce qui permettrait de remonter au profil d'usinage.
- 4) un meilleur contrôle de l'environnement la machine (température et humidité) est souhaitable.

CHAPITRE 4 :

FRAISAGE PAR MICROELECTROEROSION

4. FRAISAGE PAR MICROELECTROEROSION

Dans ce chapitre, nous allons étudier les possibilités d'usinage par μ EE avec une série d'expériences menées durant la dernière phase du développement de la machine. Il s'agissait de procéder à des essais d'usinage tout en déboguant les programmes des μ C. C'est la raison pour laquelle, nous n'avons pas suivi un plan d'expérience d'une manière systématique. L'objectif était plutôt d'avoir accès aux ordres de grandeur caractéristiques (taux d'enlèvement de matière, usure de l'outil, résolution d'usinage, état de surface,...) pour un matériau et un diélectrique donnés, en l'occurrence un acier inoxydable et de l'eau déionisée.

Nous nous sommes intéressés à l'usinage de géométries en trois axes (cavité, canal, insert) en laissant de côté le perçage de trous verticaux qui correspond à un usinage à un seul axe (enfonceur), qui mériterait une étude spécifique.

4.1. Définitions des principaux paramètres d'usinage.

Toutes les unités faisant intervenir des déplacements effectués par les axes de translation XYZ sont exprimées en μ pas (0,3125 μ m) ou en μ m.

Les principaux paramètres d'usinage sont résumés ci-dessous :

- Entrefer initial ϕ (μ m ou μ pas) : distance entre le micro-outil et le substrat suivant l'axe Z juste avant le démarrage de l'usinage.
- Profondeur de consigne H_c (μ m ou μ pas) : consigne de descente totale du micro-outil suivant l'axe z.
- Profondeur de passe h (μ m ou μ pas) : valeur de l'incrément de descente de l'outil correspondant à une couche.
- Vitesses v_x et v_y (μ m/s) : vitesse de déplacement des axes X et Y en mode usinage.
- Gap vertical Y_v (μ m ou μ pas) et gap latéral Y_L (μ m ou μ pas) : élargissement des structures usinées respectivement dans le sens vertical et horizontal.
- Taux de recouvrement du parcours d'usinage $R\%$ (%) : distance entre deux passes en X ou Y exprimée par rapport au diamètre de l'outil.
- Diamètre moyen de l'outil Φ (μ m) : mesuré au profilomètre laser.
- Hauteur usée de l'outil ψ_v (μ m) : mesuré à la caméra 1.
- Taux d'enlèvement de matière TEM (μ m³/min) : volume de matière enlevé à la pièce par minute de temps d'usinage.
- Taux d'usure de l'outil TUO (μ m³/min) : volume de matière enlevé à l'outil par minute de temps d'usinage.
- Taux d'usure relatif de l'outil TURO (%) : rapport du TUO sur le TEM.

4.2. Protocoles expérimentaux

La Figure 99 montre une vue générale des six étapes nécessaire pour usiner une pièce et caractériser le résultat. Nous passerons ci-dessous en revue chaque étape en insistant sur les points importants.

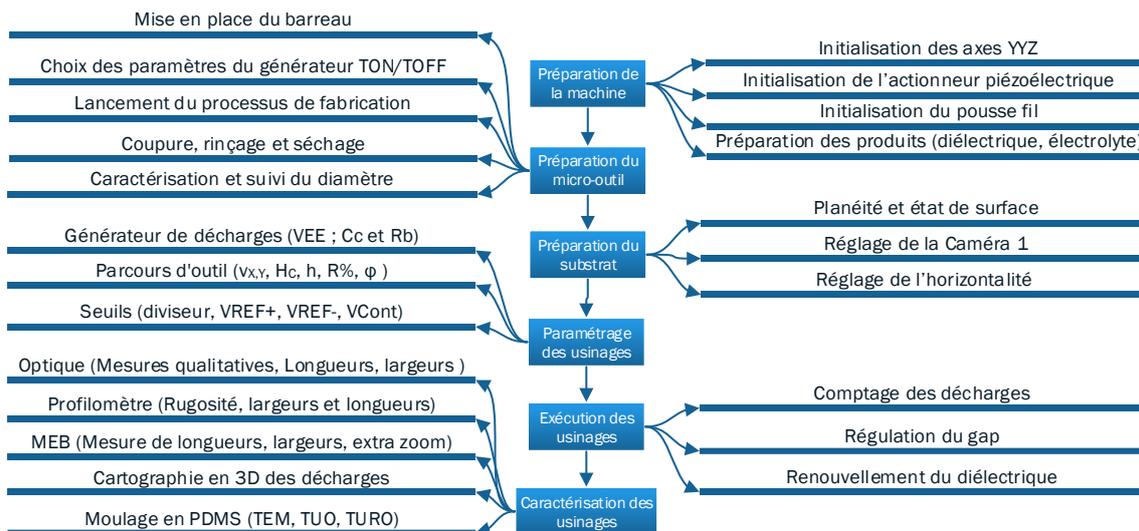


Figure 99 – Etapes successives pour l'usinage par μEE .

4.2.1. Préparation de la machine

Cette étape consiste à initialiser les moyens de déplacement de la machine : axes XYZ de translation, actionneur piézoélectrique et pousse-fil.

Il convient aussi d'introduire les produits suivants dans la machine ;

- solution d'hydroxyde de sodium 4M et huile perfluorée pour la fabrication des micro-outils
- eau déionisée pour l'usinage par μEE (conductivité initiale 18 M Ω .cm).

Par ailleurs un barreau de tungstène de 250 μm de diamètre est nettoyé, séché, puis introduit dans le pousse-fil.

4.2.2. Préparation du micro-outil

a) Fabrication par gravure électrochimique

L'étape suivante consiste à fabriquer le micro-outil en respectant les exigences du cahier des charges (diamètre moyen final et facteur de forme). Le protocole de fabrication a été détaillé à la section 3.4.

b) Rinçage, arasage et séchage

L'outil est ensuite rincé à l'eau déionisée puis séché avec de l'air comprimé. Si nécessaire, il est ensuite arasé par μEE en polarité inverse avec des mouvements en XYZ jusqu'à ce que toutes les aspérités à l'extrémité de l'outil soient enlevées, puis il est lavé et séché de nouveau.

La Figure 100 montre un exemple d'arasement d'un outil en tungstène de diamètre 500 μm ; les paramètres utilisées sont les suivants : $V_{EE} = 50$ V, $C_C = 4,7$ nF et $v_x = 312,5$ $\mu m/s$. Le diélectrique est de l'eau déionisée.

Nous n'avons pas mis en place de procédure de caractérisation de la surface arasée.

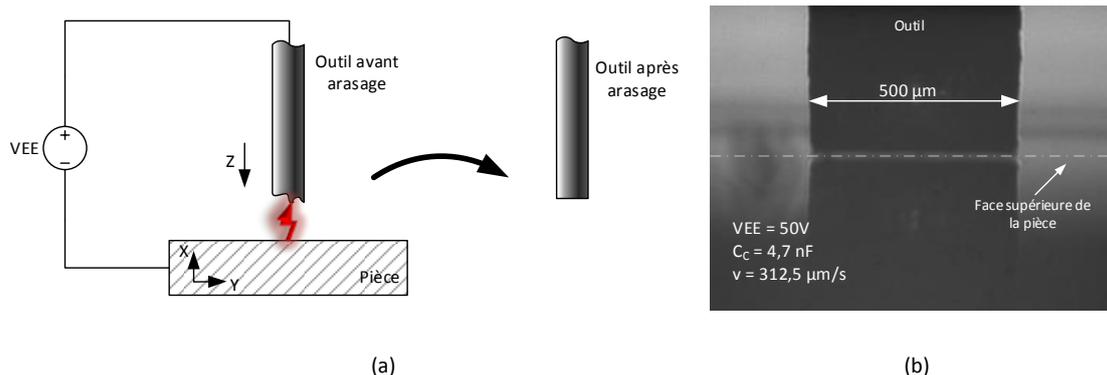


Figure 100 – Arasage de l'outil par électroérosion inverse.

(a) Principe. (b) Exemple avec un outil de diamètre 500 μm (caméra 1 de la machine de μEE).

c) Mesure et caractérisation

La fabrication s'achève par la mesure du profil de l'outil avec le profilomètre laser Mitutoyo décrit dans la section 3.4.1. La caméra 1 est utilisée pour prendre des images successives le long de l'axe de l'outil ; elle permet de vérifier qualitativement l'état de surface de l'outil et son extrémité.

L'usure de l'outil est aussi déterminée avec cette caméra après usinage.

4.2.3. Préparation du substrat

a) Planéité et état de surface du substrat

Dans la pratique, nous ne procédons pas à une ébauche du substrat par μEE pour établir une surface de référence car cela ferait perdre un temps considérable.

Pour les essais d'usinage de ce chapitre, nous avons sélectionné un seul type d'acier inoxydable¹ avec une planéité de départ acceptable² et un poli miroir d'origine. Le matériau a été découpé en substrats carrés de 2 x 2 cm et d'épaisseur 0,5 avec une machine à jet d'eau pour éviter les effets de bord.

Une étape supplémentaire de polissage mécanique a été nécessaire pour améliorer encore la planéité et l'état de surface des substrats. La rugosité finale mesurée sur 4 échantillons est de $R_a = 7,6 \pm 1,2 \text{ nm}$ et $R_q = 10,3 \pm 1,9 \text{ nm}$ (longueur de mesure 750 μm).

Après le polissage, les substrats sont rincés à l'eau déionisée puis séchés à l'air comprimé avant d'être placés dans le porte substrat de la machine de μEE (Figure 52).

b) Réglage de la caméra 1

Cette étape consiste à mettre au point la caméra 1 sur l'extrémité du micro-outil avec un grandissement suffisant du zoom Navitar. Ce dispositif sera utilisé ci-dessous pour le réglage de l'horizontalité du substrat.

¹ Acier inoxydable de type AISI 316 dont la composition chimique est Fe/Cr18/Ni10/M03 (Réf. 559-206 Radiospares.fr).

² Typiquement 2 à 5 μm sur 10 mm.

c) Réglage de l'horizontalité du substrat

Il s'agit d'une étape délicate. Un mauvais réglage de l'horizontalité du substrat engendrerait en effet les problèmes suivants :

- entrefer initial outil-substrat non constant, ce qui peut conduire à des conditions d'usinage non homogènes (élargissement d'un canal, par exemple, si la valeur de l'entrefer augmente le long du canal) ;
- risque de collision entre l'outil et le substrat avec endommagement et/ou destruction possibles du micro-outil.

Afin de procéder au réglage de l'horizontalité, le substrat est positionné à la position d'usinage en regard du micro-outil.

L'entrefer outil-substrat est facilement observé avec la caméra 1 car il n'y a pas d'eau déionisée ; la valeur de l'entrefer initial est en général ajustée à $5\ \mu\text{m}$.

Le principe du réglage de l'horizontalité consiste à procéder à une translation¹ du substrat en X (ultérieurement Y) et à observer la diminution ou l'augmentation de l'entrefer avec la caméra. Un réglage progressif de l'horizontalité du substrat à l'aide des trois vis micrométriques supportant le porte-substrat aboutit à l'observation d'un entrefer quasiment constant à la caméra. On considère que l'horizontalité du substrat est correctement réglée si la valeur observée de l'entrefer est de $5 \pm 1\ \mu\text{m}$ pour des translations XY de $500\ \mu\text{m}$.

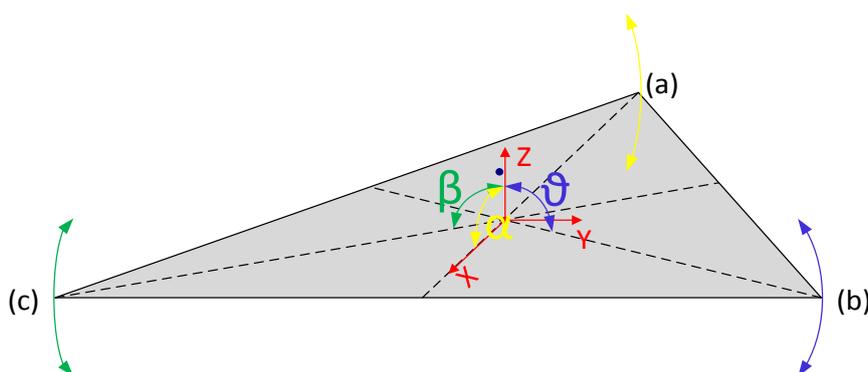


Figure 101 – Réglage de la planéité du substrat en trois points.

4.2.4. Paramétrages des usinages

Les protocoles d'usinage sont généralement définis en fonction du mode² et du type³ d'usinage. Ils dépendent du matériau à usiner et du diélectrique utilisés.

a) Réglage de l'entrefer initial

Avant de lancer l'usinage, on règle la valeur de l'entrefer initial avec une méthode électrique. Pour ce faire, une tension continue de 5 à 10 V est appliquée entre l'outil et le substrat en polarisation directe. L'outil est rapproché du substrat avec l'axe Z jusqu'à ce

¹ La valeur de translation en X et Y est typiquement de $500\ \mu\text{m}$ car elle correspond aux dimensions des motifs usinés dans ce chapitre.

² Modes d'usinage en μEE : ébauche, semi-finition et finition

³ Types d'usinages en μEE : fraisage en 3D (canal, cavité, nervure, bossage...), perçage de trous,

qu'un contact électrique soit détecté. Le mouvement de descente est alors arrêté et cette position est choisie comme référence $z = 0$. L'outil est ensuite remonté d'une distance choisie entre 2 à 10 μm appelée "entrefer initial" (typiquement 5 μm).

b) Réglage du générateur

Le schéma de principe du générateur est représenté à la Figure 62¹. Les valeurs de la tension d'usinage V_{EE} (entre 0 et 150 V) et de la capacité de charge C_C (parmi les valeurs suivantes : 0,1 ; 1 ; 4,7 ; 10 ; 22 et 100 nF) sont fixées par l'utilisateur ; la valeur de la résistance de charge R_C étant le plus souvent fixée à 100 Ω . Nous avons parfois inséré une résistance de ballast R_b (Cf. sections 4.8 et 4.9).

Dans la série d'expérience qui suit, la tension d'usinage V_{EE} est restée inchangée à 50 V. Il était intéressant en effet d'étudier les possibilités du procédé, notamment la résolution d'usinage à une valeur de tension d'usinage modérée mais pas trop basse pour éviter de se placer directement aux limites de l'électronique du dispositif.

c) Choix des paramètres de caractérisation des décharges

Comme indiqué précédemment (section 2.2.4e), il s'agit de choisir les valeurs des seuils de référence des comparateurs (Figure 65) via l'interface LabVIEW du PC superviseur :

- $V_{REF(+)}$ dans l'intervalle [0 V, +5 V] pour détecter les décharges sans changement de polarité ;
- $V_{REF(-)}$ dans l'intervalle [- 5 V, + 5 V] pour détecter les décharges avec changement de polarité ;
- V_{Cont} pour dans l'intervalle [0 V, +1 V] pour les contacts outil-substrat.

La valeur du pont diviseur est conditionnée par la tension d'usinage V_{EE} . Le choix des seuils de référence des décharges est conditionné par V_{EE} et C_C . Le seuil de détection des contacts dépend du diamètre de l'outil.

d) Régulation de l'entrefer

La régulation de l'entrefer a pour objectif d'assurer un régime de décharges électriques aussi régulier que possible. La machine de μEE présente de nombreuses possibilités dans ce domaine que nous n'avons pas eu le temps d'exploiter de manière systématique. Néanmoins, un essai de régulation sera vu à la section 4.7.

e) Conversion des données CAO

Le parcours d'outil est au format code G, langage standard pour les machines à commande numérique. Le plus souvent, pour une forme simple, il est calculé à la main. Pour une forme complexe, il est possible de concevoir la géométrie de la pièce avec le logiciel de CAO SolidWorks de Dassault Systèmes ou le logiciel PowerShape de Delcam. Les données numériques sont ensuite transférées sous forme normalisée (IGES, STEP,...) au logiciel PowerMill de Delcam qui génère un parcours d'outil par couche en code G (Figure 102).

¹ On rappelle que par manque de temps, nous n'avons pas mis en œuvre le générateur de décharges T_{ON}/T_{OFF} décrit dans la Figure 44.

Celui-ci est chargé dans le PC superviseur qui envoie au $\mu C1$ les instructions pour le déplacement des axes.

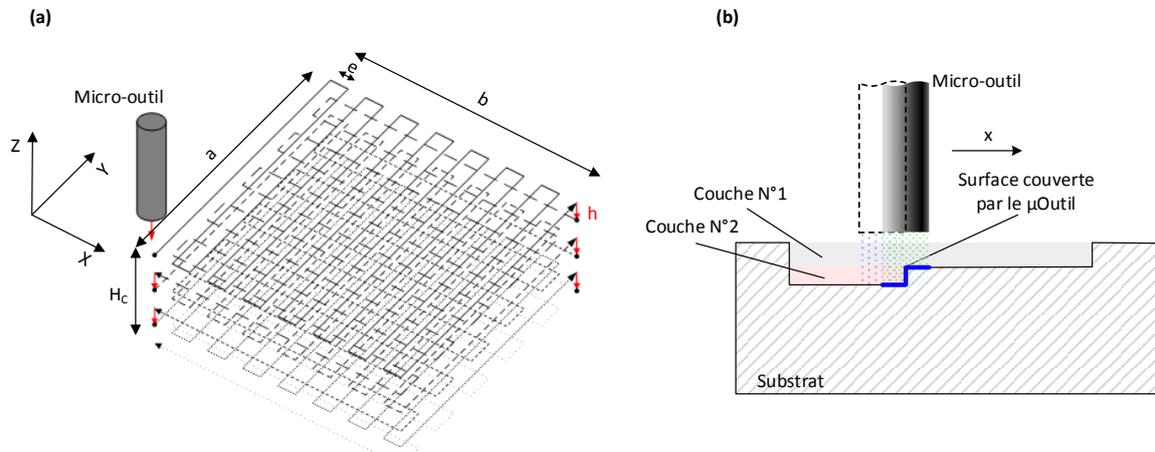


Figure 102 – (a) Illustration d'un parcours d'outil; (b) recouvrement latéral du parcours d'outil.

f) Définition des passes d'usinage

La Figure 102 montre un exemple de parcours d'outil dans le cas d'une cavité. Il est composé d'un réseau de lignes que doivent décrire les axes XY par couches en Z d'épaisseur h (Figure 102a). Afin de pouvoir usiner toute la surface d'une couche, l'outil¹ doit suivre un parcours en serpentins balayant celle-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de réaliser un parcours avec des passages serrés avec un écartement e défini lors de la génération du parcours d'usinage ; celui-ci est choisi en fonction du diamètre Φ du micro-outil (Figure 102b). Le rapport e/Φ correspond au taux de recouvrement du parcours d'usinage $R\%$.

L'opérateur doit aussi décider de la position de descente en Z de l'outil pour chaque couche (flèches en rouge sur la Figure 102a). Pour ce faire, la position finale de l'outil à la couche N correspond souvent à la position d'enfoncement en Z et au point de départ des passes XY de la couche N+1.

Il faut de plus compenser l'usure de l'outil en Z. N'ayant pas eu le temps d'exploiter toutes les possibilités du pousse fil dans ce domaine, nous avons parfois symétrisé les parcours d'usinage en XY lors des enfoncements de l'outil en Z (section 4.6 et 0) ; l'idée étant d'homogénéiser l'usinage de la couche et l'usure de l'outil².

L'opérateur doit aussi choisir les paramètres de vitesse de déplacement des axes en mode d'usinage, de positionnement ou d'approche. Ces paramètres dépendent des protocoles établis pour chaque mode d'usinage (ébauche, semi-finition ou finition).

¹ En réalité, c'est le substrat qui se déplace suivant les axes X et Y ; l'outil ne se déplace que suivant l'axe Z.

² Rappelons que contrairement à la plupart des travaux sur la μEE , dans ce mémoire l'outil n'est pas mis en rotation. L'intérêt d'une telle rotation réside dans les points suivants : meilleur renouvellement des débris à l'entrefer, homogénéisation des usinages et meilleure répartition de l'usure de l'outil. L'inconvénient est que le faux rond des rotations sur roulement à billes est au mieux de l'ordre de 1-2 μm , ce qui n'est plus négligeable par rapport au diamètre des micro-outils. Il existe des rotations sur paliers hydrostatiques ou aérostatiques avec des faux ronds inférieurs ; les inconvénients étant l'encombrement, le poids et le coût de ces dispositifs.

g) Paramètres cachés

Les paramètres cachés sont les différents paramètres auxquels l'opérateur ne peut pas avoir accès sans modifier le firmware des μ Cs. Ils sont donc programmés directement dans les processeurs de la machine.

On peut citer :

- Lorsqu'un contact mécanique entre le micro-outil et le substrat est détecté, le μ C1 éloigne le micro-outil via l'axe Z d'une distance de 30 micropas à la vitesse de 4 mm/s (rapide) pour ne pas l'endommager. Il est ensuite repositionné à sa position d'avant contact avec une vitesse d'approche plus lente de 312 μ m/s.
- Un contact mécanique n'est pris en compte que lorsque celui-ci dure plus de 20 μ s. Au-dessous de cette valeur, il reste indétectable par les μ C1 et μ C3 à cause du logiciel.
- La gestion en temps réel de l'entrefer outil-pièce est assurée par le μ C3 via l'actionneur piézoélectrique (avec des paramètres décrits à la section 2.2.4.b).
- Pour ne pas perturber le mouvement des axes XYZ, celui-ci est segmenté en N déplacements élémentaires de 1 micropas chacun. Le comptage des décharges n'est pas autorisé pendant que les axes se déplacent sur un segment ; le système de comptage est alors complètement aveugle et ne tient pas compte des signaux venant des circuits de caractérisation. Le comptage des décharges et des contacts n'est donc effectué qu'entre deux segments successifs (cf. section 2.2.4.e).

4.2.5. Exécution des usinages

L'usinage démarre dès que l'ordre est donné par l'opérateur. L'interface de commande LabVIEW envoie alors les commandes de déplacement trame par trame via la liaison série du PC superviseur à la carte μ C1. Le mouvement n'est autorisé qu'après vérification que la commande est correcte et ne contient aucune erreur lors de son décodage. Si la trame est jugée valide, le μ C1 génère l'horloge de commande des circuits drivers des axes micropas conformément à la vitesse et à la distance contenues dans la trame. A la fin du mouvement, le μ C1 renvoie les drapeaux de fin de mouvement, puis la trame suivante pourra être envoyée et ainsi de suite jusqu'à la fin du mouvement.

Pendant l'usinage, les circuits de caractérisation détectent les contacts et décharges ; les comptages sont assurés indépendamment par les cartes μ C1 et μ C3. Nous avons expliqué à la section 2.2.4.e pourquoi il peut y avoir une différence entre les comptages.

Dans le cas d'un contact mécanique, le μ C1 donne l'ordre de stopper les mouvements XY des axes. Il ordonne le retrait de l'outil en Z puis le retour à la position d'origine (Cf. section 2.2.4.g) de façon à relancer l'usinage.

L'un des points originaux de ce travail est la possibilité de réaliser une cartographie spatiotemporelle de l'occurrence des contacts et des décharges (avec un tri entre décharges positives et négatives). Pour ce faire, la carte μ C1 attribue chaque signal détecté (décharge ou contact) à une position de l'outil dans l'espace. Les données concernant le nombre et la position XYZ des contacts, des décharges positives et négatives sont envoyées par le μ C1 au PC superviseur durant l'usinage.

La carte μC3 exploite les compteurs de décharges afin de réguler le gap via l'actionneur piézoélectrique (Cf. section 4.7). Cette opération est effectuée sans interruption des mouvements des axes XY et Z. Les données concernant le nombre des contacts et des décharges positives et négatives sont envoyées par le μC3 au PC superviseur durant l'usinage.

4.2.6. Caractérisation des usinages

La dernière étape consiste à caractériser les usinages par les moyens décrits ci-dessous, soit directement sur la pièce, soit sur un moulage de celle-ci à l'aide de polydiméthylsiloxane (PDMS).

a) Caractérisation optique

La caractérisation optique des pièces usinées est effectuée à l'aide des caméras 1 et 2 (Cf. Figure 51) de façon à déterminer :

- la largeur et la longueur des motifs usinés à la surface du substrat ;
- le diamètre de l'extrémité de l'outil et la hauteur usée ;
- l'entrefer latéral à la surface du substrat ;
- la profondeur, la largeur et la longueur du fond des motifs ;
- la profondeur, la largeur et la longueur des motifs moulés en PDMS, ce qui permet d'évaluer l'entrefer latéral au fond des motifs usinés ;
- l'angle d'inclinaison des flancs usinés pris sur les moulages PDMS (Cf. Figure 139) ;
- les états de surface des parties usinées (étude qualitative).

b) Caractérisation au profilomètre mécanique

Lorsque les structures usinées sont de dimensions suffisantes, la caractérisation au profilomètre mécanique DEKTAK 150 permet de déterminer (Annexe 6) :

- les dimensions telles que la longueur, la largeur et la profondeur des structures usinées (directement sur la pièce ou sur les moulages en PDMS) ;
- la rugosité de surface.

c) Caractérisation au MEB

Le MEB fournit des images topographiques avec une résolution nanométrique, ce qui permet d'avoir accès aux dimensions des structures et de caractériser l'état de surface des usinages, Afin de pouvoir caractériser les moules en PDMS, nous avons dû les métalliser avec une couche d'or de 10 nm environ (Cf. Figure 147).

d) Caractérisation des décharges

La caractérisation des décharges est effectuée à l'aide des dispositifs de caractérisation décrits précédemment (cf section 2.2.4e). La reconstitution spatiotemporelle des contacts et des décharges est effectuée en post-traitement¹ lorsque l'usinage est terminé.

¹ Il sera possible à l'avenir de procéder à une cartographie en ligne, c'est-à-dire pendant l'usinage.

4.3. Usinage de canaux / effet de la capacité de travail et vitesse des axes

4.3.1. Objectif

L'objectif de cette section est d'étudier quelles sont les vitesses des axes et les valeurs de capacité de travail qui permettent d'usiner des canaux avec un « bon » état de surface. En parallèle, nous caractériserons l'enlèvement de matière et l'usure de l'électrode.

4.3.2. Conditions expérimentales

Nous avons usiné une série de canaux de longueur L 500 μm avec une profondeur de consigne H_c de 64 μpas (20 μm) en faisant varier la valeur de la capacité de travail C_C et la vitesse des axes (V_y). La profondeur de passe h est constante à 1 μpas (0,3125 μm). Le diamètre Φ de l'outil est de 20 μm . Les conditions expérimentales sont résumées au Tableau 15.

Générateur RC ¹	Circuit de caractérisation ²	Actionneur piézoélectrique ³	Procédé
<ul style="list-style-type: none">- $V_{EE} = 50 \text{ V}$- $C_C = 0,1 ; 1 ; 4,7 ; 10 ; 22 \text{ nF}$- $R_C = 100 \Omega$- $R_b = 0$	<ul style="list-style-type: none">- $V_{\text{Ref}+} = 1,4 \text{ V}$- $V_{\text{Ref}-} = 0,1 \text{ V}$- $V_{\text{Cont}} = 0,1 \text{ V}$- Diviseur = 30	<ul style="list-style-type: none">- Alimentation : GBF- Commande : sinus- Amplitude : 1 V- Décalage : - 500 mV- Fréquence : 100 Hz	<ul style="list-style-type: none">- Eau déionisée- Electrode $\Phi = 20 \mu\text{m}$- Entrefer initial $\varphi = 5 \mu\text{m}$- Profondeur de passe $h = 1 \mu\text{pas}$- Profondeur de consigne $H_c = 20 \mu\text{m}$- Vitesses $V_x V_y = 62-73-104-156-312-520 \mu\text{m/s}$- Usinage : canal $L = 500 \mu\text{m}$

Tableau 15 – Paramètres d'usinage de base.

La Figure 103 montre le parcours de l'outil. Celui-ci est positionné au point ① au-dessus de la pièce à la distance de l'entrefer initial φ . Puis le générateur est mis en route. L'outil effectue un seul aller②-retour③ le long de l'axe Y. Il s'enfonce en Z au point ④ d'une valeur égale à la profondeur de passe h . Cette opération est répétée jusqu'à ce que l'outil se soit enfoncé d'une distance égale à H_c .

A la fin de l'usinage, l'outil est remonté d'une hauteur égale à H_c et son usure est estimée à l'aide de la caméra.

¹ Section 2.2.4.d

² Section 2.2.4.e

³ Section 2.2.4.b

Il est ensuite décalé de 100 μm selon X. Puis l'entrefer initial φ est ajusté à 5 μm de sorte que l'on peut recommencer l'usinage en faisant varier les vitesses (62 à 520 $\mu\text{m/s}$) pour différentes valeurs de capacité (0,1 à 22 nF) dans les mêmes conditions.

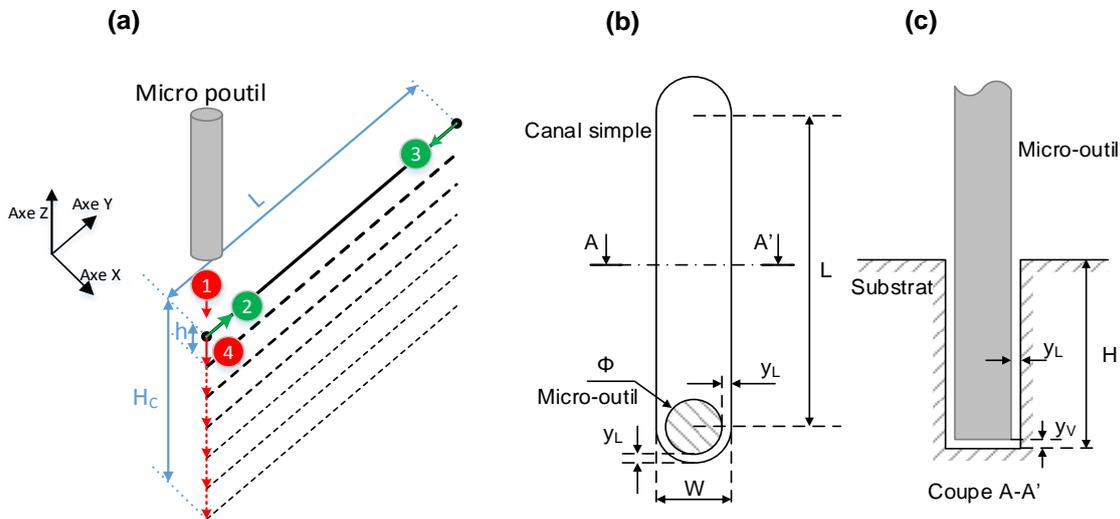


Figure 103 – Principe d'usinage d'un canal simple. (a) Parcours d'outil ; (b) vue de face et (c) vue de coupe de l'ensemble outil-substrat au cours d'usinage.

4.3.3. Résultats expérimentaux

On notera que nous n'avons pas effectué d'étude de reproductibilité. Il s'agit ici d'un usinage peu profond ($H_c = 20 \mu\text{m}$) et nous verrons plus loin que l'usinage des premières couches est plus difficile qu'en profondeur. C'est la raison pour laquelle, les résultats de ne sont donnés ci-dessous qu'à titre indicatif.

La Figure 104 montre l'outil de 20 μm de diamètre ($F_f = 50$) dans son état de départ à l'entrefer initial. Les résultats des usinages sont regroupés par valeur de capacité de travail en faisant varier la vitesse. Lorsque celle-ci diminue, l'état de surface des canaux s'améliore et leur largeur augmente. De manière surprenante, l'effet de la capacité n'est pas évident (mais nous n'avons pas effectué d'essai avec des capacités supérieures de 100 nF et 1-10 μF). En tout cas, elle ne semble pas affecter la netteté des bords des canaux. La profondeur H et la largeur W des canaux ont été mesurées la caméra 2 (Figure 105) ; H et W augmentent si la vitesse diminue et varient peu avec la valeur de C_c .

Quoi qu'il en soit avec les valeurs de capacité considérées, la gamme de vitesse 104-156-312 $\mu\text{m/s}$ constitue un bon compromis entre qualité d'usinage et temps de fabrication. Nous prendrons ces valeurs pour la suite.

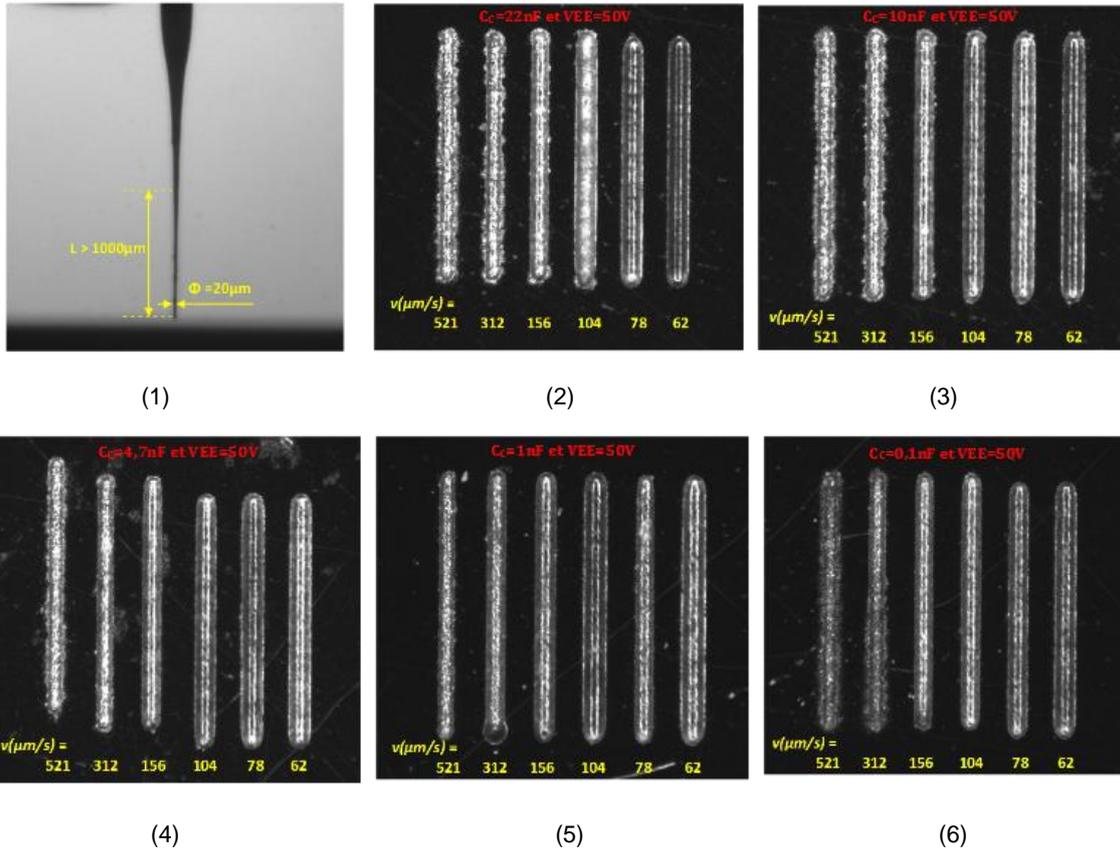


Figure 104 – Outil d'usinage (1) et réseau de canaux usinés à différentes vitesses avec : (2) $C_c = 22 \text{ nF}$; (3) $C_c = 10 \text{ nF}$; (4) $C_c = 4,7 \text{ nF}$; (5) $C_c = 1 \text{ nF}$; (6) $C_c = 0,1 \text{ nF}$.

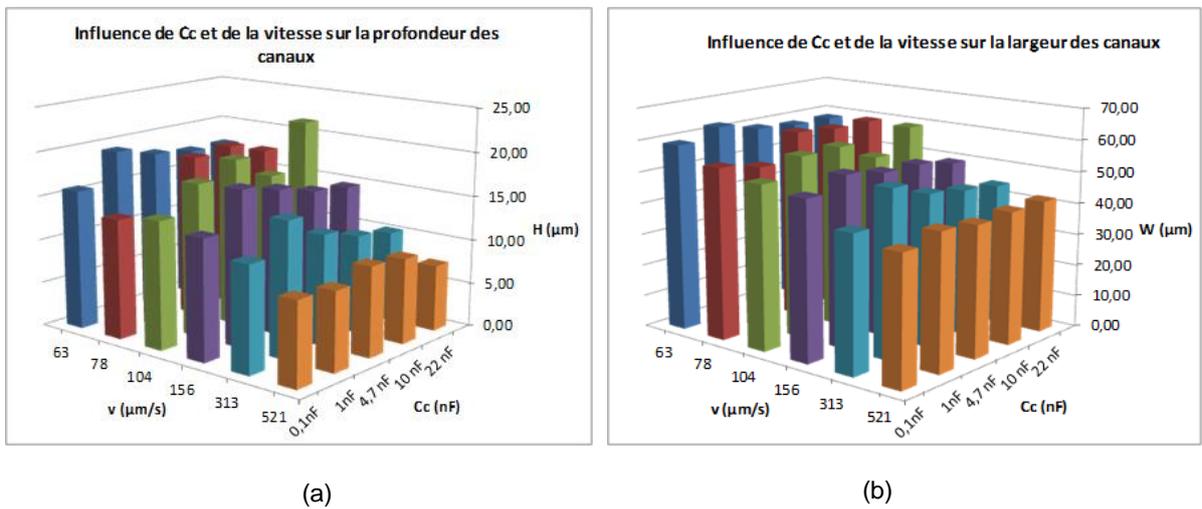


Figure 105 – Influence de la capacité C_c et de la vitesse de l'axe sur la profondeur H (a) et la largeur W (b) des canaux usinés.

4.4. Usinages de canaux profonds / effet de la profondeur de consigne H_c

4.4.1. Objectif

L'objectif de cette section est d'usiner des canaux profonds.

4.4.2. Condition expérimentales

Pour ce faire, comme montré à la Figure 106, nous avons usiné six canaux de longueur L 500 μm avec une profondeur H_c de consigne croissante de 50 à 300 μm . Le diamètre Φ de l'outil est de 25 μm . Avant l'usinage de chaque canal, l'outil est positionné ① à la même valeur l'entrefer initial. Puis il effectue ensuite un aller ② et un retour ③ suivant Y et il s'enfonce ④ de la valeur de l'épaisseur de couche h , soit 1 μpas . La descente est répétée jusqu'à atteindre la valeur de profondeur de consigne. La vitesse V_Y ainsi que la capacité de travail C_C sont constantes. Les paramètres sont résumés au Tableau 16.

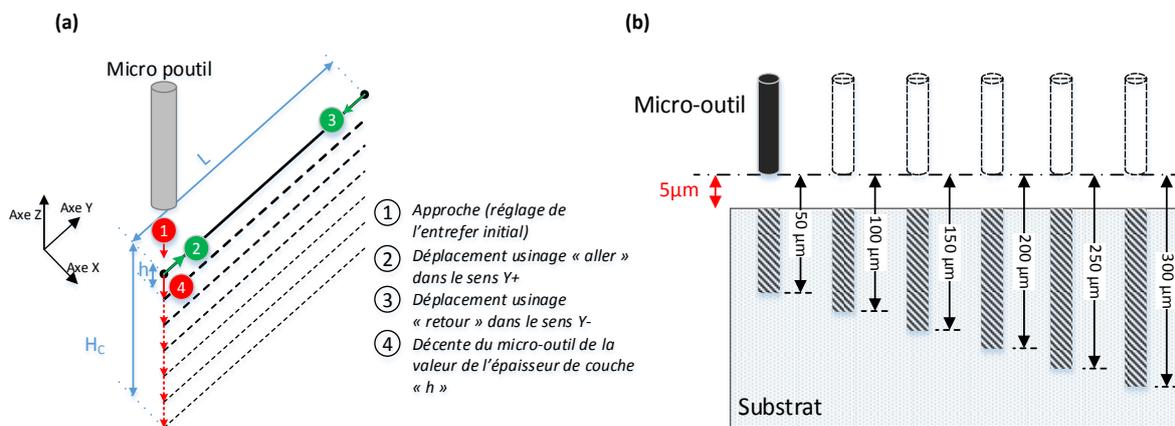


Figure 106 – Usinages de canaux à différentes profondeurs de consigne H_c .

Les différents paramètres d'usinage sont listés dans le Tableau 15 ci-dessous.

Générateur RC	Circuit de caractérisation	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none"> – $V_{EE} = 50 \text{ V}$ – $C_C = 4,7 \text{ nF}$ – $R_C = 100 \Omega$ – $R_b = 0$ 	<ul style="list-style-type: none"> – $V_{Ref+} = 1,4 \text{ V}$ – $V_{Ref-} = 0,1 \text{ V}$ – $V_{Cont} = 0,1 \text{ V}$ – Diviseur = 30 	<ul style="list-style-type: none"> – Alimentation : GBF – Commande : sinus – Amplitude : 1 V – Décalage : - 500 mV – Fréquence : 100 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> – Eau déionisée – Electrode $\Phi = 25 \mu\text{m}$ – Entrefer initial $\varphi = 5 \mu\text{m}$ – Profondeur de passe $h = 1 \mu\text{pas}$ – Profondeur de consigne $H_c = 50-100-150-200-250-300 \mu\text{m}$ – Vitesse $V_Y = 312 \mu\text{m/s}$ – Usinage : canaux – $L = 500 \mu\text{m}$

Tableau 16 – Paramètres d'usinage : canaux à différentes profondeurs de consigne.

4.4.3. Résultats expérimentaux

a) Comparaison des usinages à profondeur de consigne croissante

La Figure 107a montre une vue de dessus des canaux usinés dans le substrat à profondeur de consigne croissante (caméra 2).

Les canaux ont été moulés avec du PDMS. La Figure 107b et Figure 107c montrent respectivement une vue de dessus (caméra 2) et une vue de face (caméra 1) des moulages.

Les résultats expérimentaux montrent que la profondeur d'usinage augmente avec la profondeur de consigne. On observe aussi un élargissement progressif du gap latéral et une amélioration de l'état de surface des canaux. Sur les parties moulées, on note la présence de flancs légèrement inclinés avec un sommet ovale.

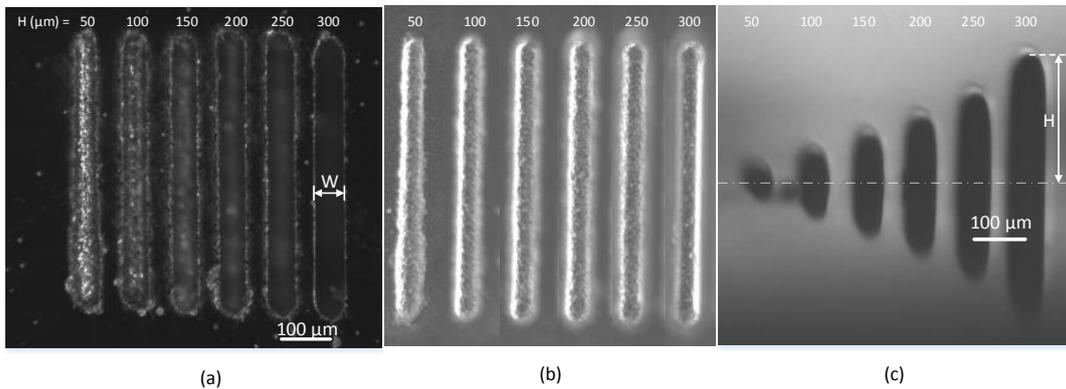


Figure 107 – Image des canaux avec une profondeur de consigne H_C croissante (50, 100, 150, 200, 250 et 300 μm). (a) Vue de dessus des canaux usinés (caméra 1 de la machine de μEE) ; (b) images des motifs en PDMS vue de dessus (caméra 1) ; (c) images des motifs en PDMS vue de face (caméra 2 de la machine de μEE). On notera les reflets sur le substrat délimités par la ligne blanche.

La largeur W et la profondeur H des canaux ont été mesurées à partir de ces images. La Figure 108 montre que W et H augmentent linéairement avec la profondeur de consigne H_C . Le canal le plus étroit a une largeur de 45 μm une profondeur de 57 μm . Le canal le plus profond atteint 210 μm de profondeur avec une largeur de 61 μm (facteur de forme $\sim 3,4$).

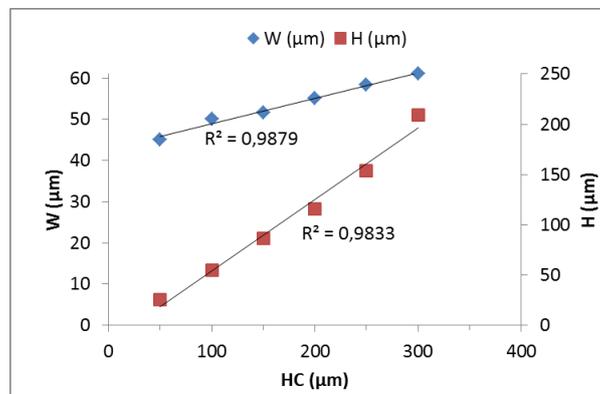


Figure 108 – Largeur W et profondeur H des canaux en fonction de la profondeur de consigne H_C .

Connaissant la largeur des canaux et le diamètre de l'outil, on déduit le gap latéral γ_L (au niveau du substrat) en fonction de H_C (Figure 109). Celui-ci s'accroît continûment avec la profondeur de consigne sans atteindre de valeur limite (dans les conditions expérimentales).

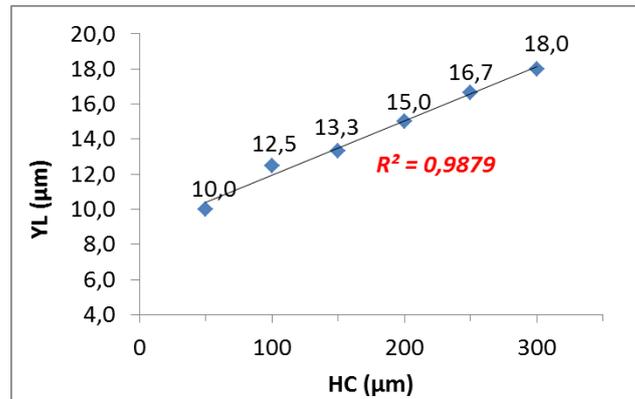


Figure 109 – Gap latéral γ_L en fonction de H_C .

A partir de la caractérisation de la forme des canaux (Figure 108) et de la mesure optique de l'usure de l'outil (Figure 110), on calcule le taux d'enlèvement de matière (TEM) ainsi que le taux d'usure de l'outil (TUO).

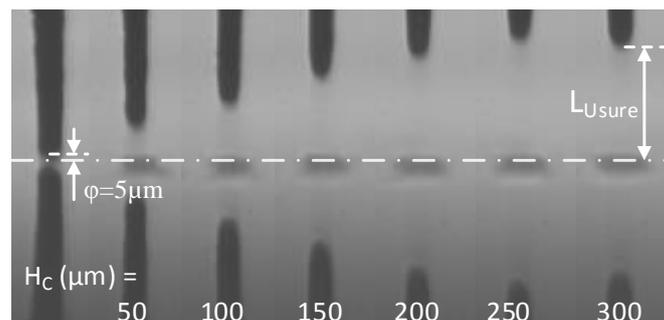


Figure 110 – Usinage de canaux profonds : images de l'usure de l'outil.

La Figure 111 montre que le TUO diminue avec la profondeur de consigne H_C . Le TEM augmente avec la profondeur de consigne H_C . Plus l'usinage est profond plus il est efficace.

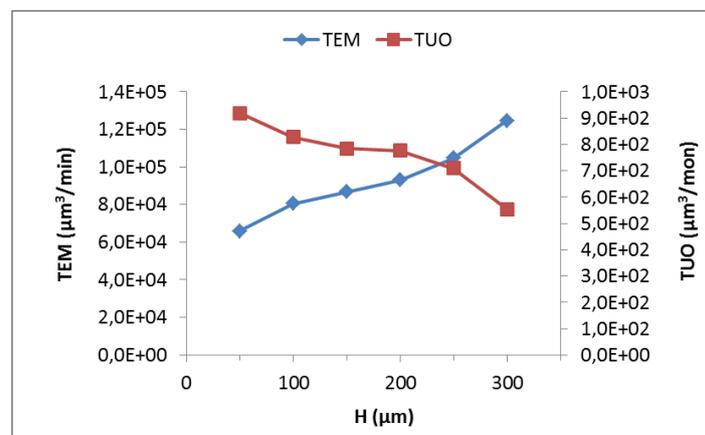


Figure 111 – Influence de la profondeur de consigne H_C sur le TEM et le TUO.

La Figure 112 montre que l'usure relative de l'outil TURO diminue avec la profondeur de consigne. L'usure relative de l'outil diminue d'un facteur 3 entre $H_c = 50 \mu\text{m}$ et entre $H_c = 300 \mu\text{m}$: elle atteint 0,44 % pour une profondeur de consigne de 300 μm .

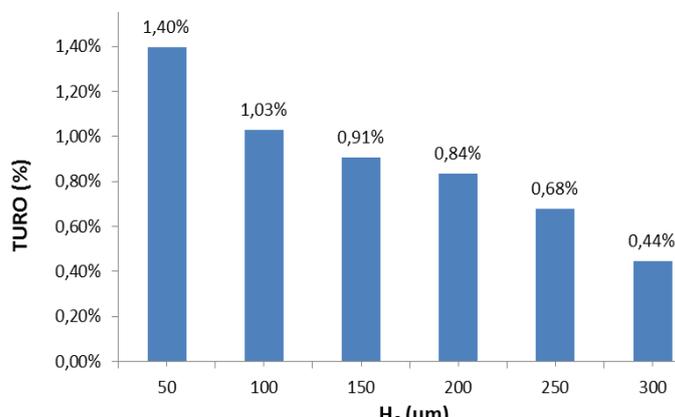


Figure 112 – Usure relative de l'outil TURO en fonction de la profondeur de consigne H_c .

Le nombre de décharges électriques détectées¹ par le circuit de caractérisation de μC1 augmente linéairement avec la profondeur de consigne tandis que le nombre de contacts détectés est plus stable 540 ± 56 (Figure 113a).

Le résultat concernant le nombre de décharges était attendu car celui-ci est proportionnel au volume de matière enlevé. Le coefficient de proportionnalité (calculé sur les valeurs correspondant aux 6 consignes H_c) ramené au volume de matière enlevée est de $2,01 \pm 0,14 \cdot 10^7$ décharges/ mm^3 : cf. Figure 113b.

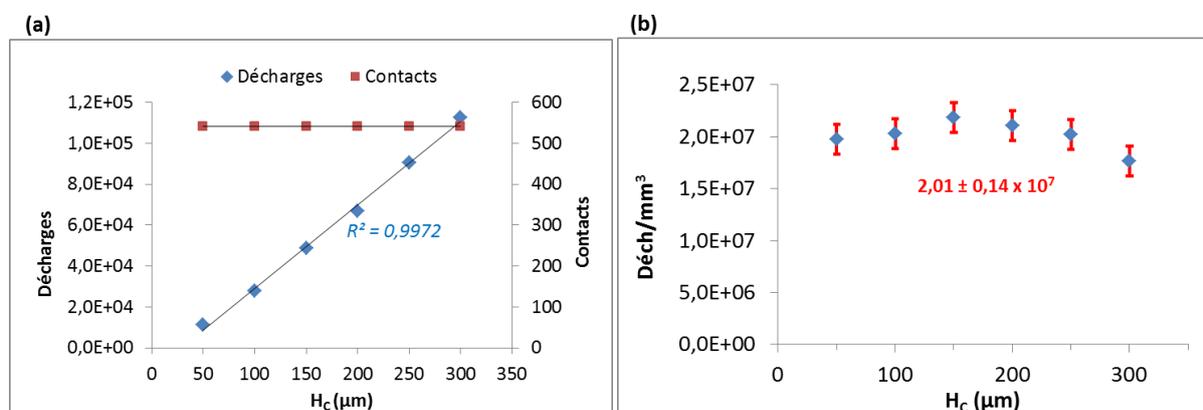


Figure 113 – Influence de la profondeur de consigne sur : (a) le nombre total de décharges électriques et de contacts mécaniques détectés ; (b) le nombre de décharges par mm^3 de matière usinée.

Le résultat concernant le nombre de contacts peut être analysé en considérant un usinage particulier comme nous allons le voir ci-dessous.

¹ C'est-à-dire dont la chute de tension ΔV est supérieure ou égale à 8V d'après les paramètres du Tableau 16.

b) Etude d'un usinage particulier (profondeur de consigne : 300 μm)

Il est possible en effet de tracer une cartographie dans l'espace ZY du nombre de décharges et de contacts électriques détectés par le circuit de caractérisation pendant un usinage particulier. Pour ce faire, nous avons choisi d'étudier l'usinage le plus profond.

Contacts détectés

Ainsi la Figure 114a montre la cartographie ZY des contacts détectés lors de l'usinage du canal avec $H_C = 300 \mu\text{m}$. L'orientation des axes Z et Y est indiquée à la Figure 106a et il faut noter l'axe Y correspond à la position réelle de l'outil tandis que l'axe Z correspond à la profondeur de consigne¹.

On constate ainsi qu'il y a un grand nombre de contacts aux extrémités du canal selon Y. Il s'agit de points singuliers (changement de sens de l'axe de translation avec éventuellement des vibrations induites). L'enfoncement de l'outil en Z est effectué à la position $Y = 0$: on observe bien que le nombre de contacts est plus important à gauche ($Y = 0 \mu\text{m}$) qu'à droite de la figure ($Y = 500 \mu\text{m}$).

On observe aussi que le nombre de contacts est plus important lors de l'usinage des premières couches. La Figure 114b montre que la majorité des contacts est concentrée dans les couches de profondeur inférieure à 50 μm (436 contacts sur un total de 596 contacts pour l'usinage en entier) ; il existe encore un nombre important de contacts pour les profondeurs de 50 à 100 μm (96 contacts) puis le nombre de contact diminue drastiquement lorsque l'outil s'enfonce dans le volume de la pièce (64 contacts).

Si l'on revient à la Figure 113, on peut donc avancer que le nombre de contacts varie peu avec la profondeur de consigne H_C parce qu'ils ont lieu essentiellement dans les 50-80 premiers μm d'usinage².

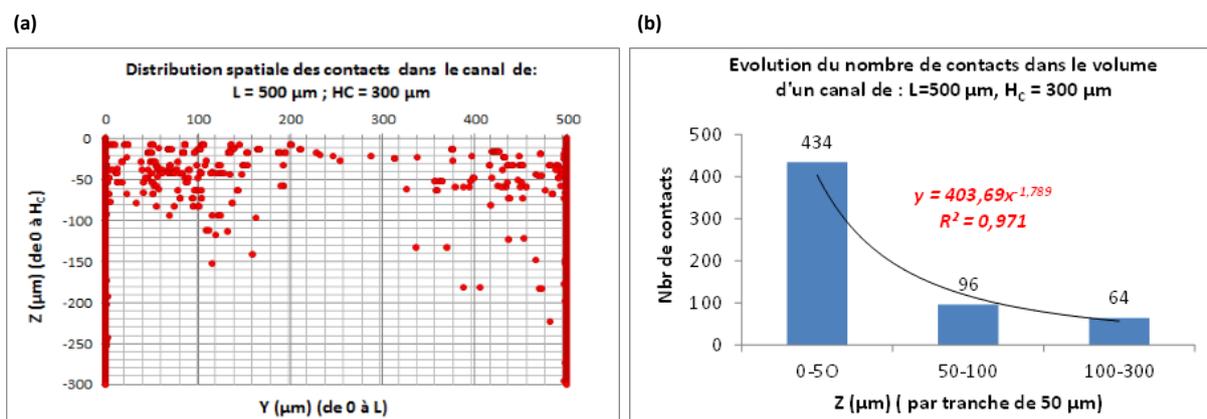


Figure 114 – (a) Cartographie des contacts détectés lors de l'usinage d'un canal avec $L = 500 \mu\text{m}$ et $H_C = 300 \mu\text{m}$; (b) évolution du nombre de contacts par tranches de 50 μm en Z.

¹ Pour remonter à la position réelle de l'outil en Z, il faudrait tenir compte de l'usure de l'outil et de l'entrefer initial.

² On retrouve ainsi une contestation empirique : dans la pratique nous avons souvent constaté que les usinages sont plus « difficiles » pour les premières couches.

Décharges détectées

Etant donné le grand nombre d'évènements, nous avons utilisé deux représentations.

La Figure 115 montre la cartographie suivant les axes YZ du nombre de décharges détectées lors de l'usinage du canal avec $H_C = 300 \mu\text{m}$. L'axe Y correspond à la position de l'outil. L'axe Z correspond à la profondeur de consigne. Nous avons regroupé le nombre de décharges détectées par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. L'échelle de couleur est sur 256 niveaux avec le niveau bas en bleu correspondant au minimum de décharges (0) et le niveau haut en rouge vif correspondant au maximum de décharges détectées par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$.

Comme prévu, le nombre de décharges est très important aux extrémités du canal (80 à 200) à cause des points singuliers. Pour les premières couches, il n'y aucune décharge (l'entrefer initial est de $5 \mu\text{m}$).

Si l'on exclut ces zones, les décharges sont réparties en :

- zones chaudes (couleurs jaune et rouge) avec un grand nombre de décharges : 30 à 50 décharges par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$;
- zones froides d'un bleu vif où le nombre de décharges est de 10 et 20 par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$;
- des zones très sombres où le nombre de décharges est inférieur à 10 par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$.

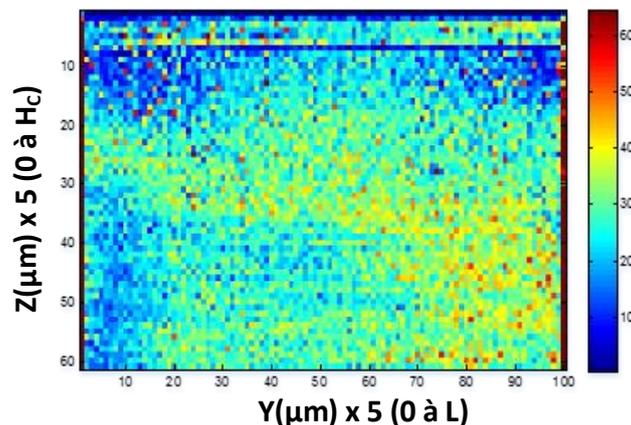


Figure 115 – Cartographie en couleur dans le plan YZ du nombre de décharges détectées par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ ($H_C = 300 \mu\text{m}$ et $L = 500 \mu\text{m}$). Echelle en X et Y : $5 \mu\text{m}$ / unité.

La Figure 116 est une représentation surfacique en 3D du nombre de décharges par tranches suivant Z d'épaisseur $5 \mu\text{m}$, qui illustre essentiellement les effets de bord.

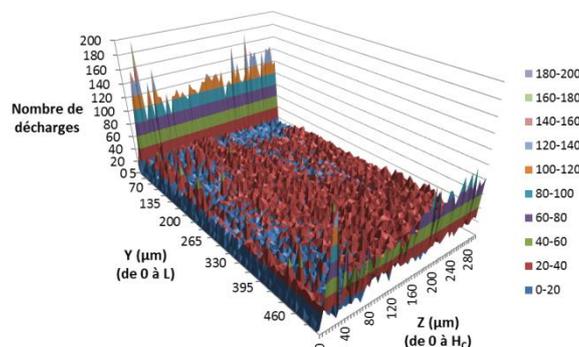


Figure 116 – Représentation surfacique en 3D du nombre de décharges détectées par tranche d'épaisseur $5 \mu\text{m}$ ($H_C = 300 \mu\text{m}$ et $L = 500 \mu\text{m}$).

La Figure 117 montre une superposition de la cartographie des contacts (points ronds en noir) et des décharges (pixels en couleur).

Aux extrémités du canal, les zones avec un grand nombre de contacts et de décharges se superposent.

La couleur bleu sombre représente des zones d'usinage où l'usinage est le moins efficace c'est-à-dire avec le moins de décharges (<10). Ces régions correspondent aussi aux endroits où l'on a le plus de contacts.

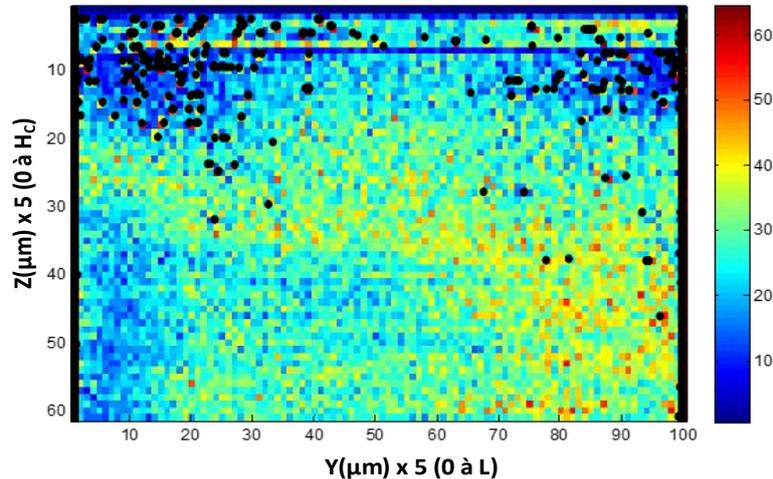


Figure 117 – Superposition de la cartographie des contacts et de la représentation en couleur des décharges ($H_c = 300 \mu m$). Echelle en X et Y : $5 \mu m$ / unité.

c) Etude des autres cas

Nous avons effectué la même analyse pour les canaux usinés avec les profondeurs de consigne de 50, 100, 150, 200, 250 et 300 μm . La Figure 118 rassemble les résultats.

Nous avons ainsi pu confirmer que :

- La majorité des contacts détectés se concentre dans les premiers 50-80 μm de consigne en Z et aussi aux extrémités latérales des canaux
- Les zones présentant un nombre important de contacts coïncident relativement bien avec les zones où l'on a détecté le nombre de décharges le plus faible (zones en bleu avec moins de 10 décharges par pixel de $5 \times 5 \mu m^2$).

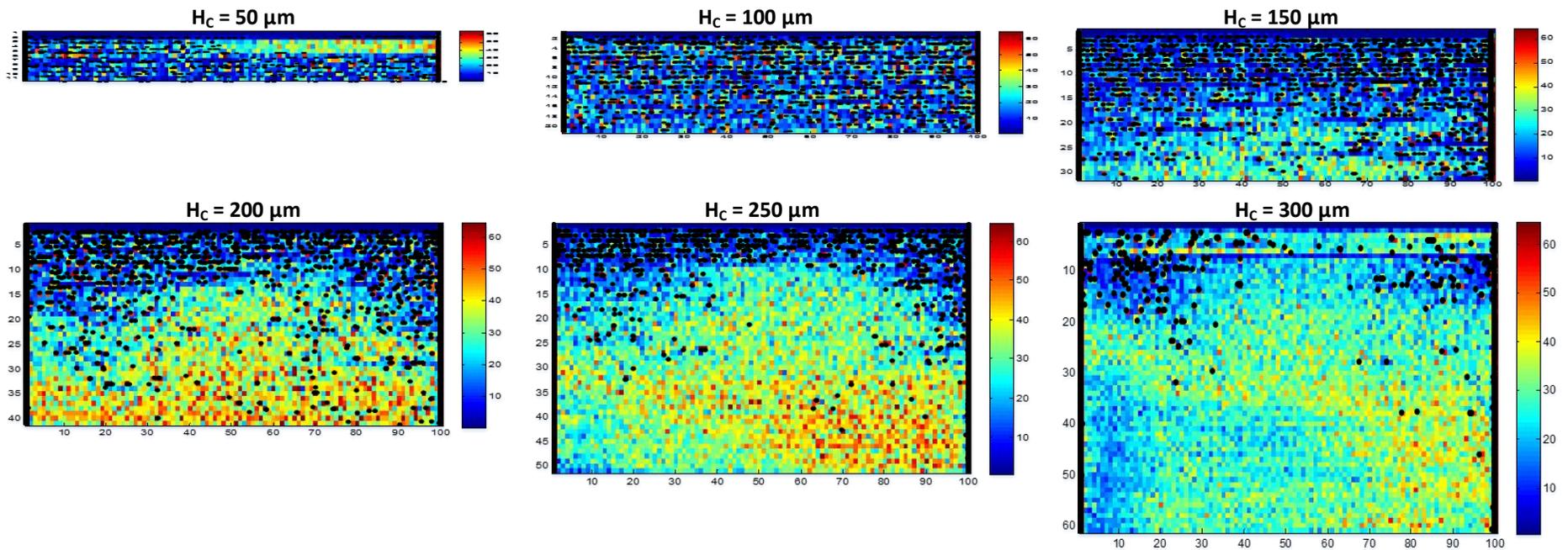


Figure 118 – Représentation graphique des décharges et des contacts des canaux en fonction de la profondeur de consigne : Six usinages différents effectués avec $H_c = 50, 100, 150, 200, 250$ et $300 \mu\text{m}$. Echelle en X et Y : $5 \mu\text{m} / \text{unité}$.

4.4.4. Discussion

Il apparaît donc que le nombre de contacts et l'usure de l'outil sont en relation l'un avec l'autre. Distinguer la cause de la conséquence n'est pas évident. Néanmoins, si la cause première était l'usure de l'outil, on peut supposer qu'une usure importante devrait diminuer le risque de collision avec le substrat. **Il est donc logique d'avancer qu'un grand nombre de contacts entraîne une forte usure de l'outil¹.**

En conséquence, notre interprétation est la suivante : dans la première 50-80 μm usinés, l'enlèvement de matière par couche est faible, sans doute inférieur à 1 μpas (Figure 108). L'enfoncement h de 1 μpas par couche est donc trop important par rapport à la quantité de matière enlevée, ce qui entraîne le grand nombre de contacts observés dans la partie supérieure de la Figure 114 et donc l'usure de l'outil. Pour les couches suivantes, l'enlèvement de matière est plus important, le nombre de contact diminue et donc aussi l'usure de l'outil (Figure 112).

En d'autres termes, l'usinage est difficile durant l'enlèvement des premiers 50-80 μm puis il devient plus aisé, ce qui peut être corroboré avec l'état de surface des canaux de la Figure 107 : médiocre pour H_C égale à 50 ou 100 μm puis bien meilleur. Ce résultat est contre-intuitif car l'on s'attend à ce que le renouvellement du diélectrique au fond d'une cavité profonde soit plus difficile.

4.4.5. Conclusion

Dans les conditions de l'expérience, lorsque la profondeur de consigne augmente :

- l'état de surface des canaux s'améliore : les bords sont plus nets, plus droits et plus réguliers ;
- la largeur des canaux usinés augmente et par conséquent la valeur du gap latéral ;
- l'usinage est plus efficace : le taux d'enlèvement de matière (TEM) augmente tandis que les taux d'usure de l'outil en absolu (TUO) et en relatif diminuent ;
- le nombre de décharges électriques détectées par mm^3 de matière enlevée est de $2,01 \pm 0,14 \times 10^7$ décharges/ mm^3 ;
- le nombre total de contacts détectés reste relativement constant ; ceux-ci sont essentiellement rencontrés au début de l'usinage, pendant le creusement des 50-80 premiers μm . Les effets de bord ont été observés et expliqués.

Par ailleurs, cette expérience a permis de montrer l'intérêt d'une cartographie des décharges et des contacts. Malgré les défauts du dispositif de caractérisation (2.2.4.e), il y a une corrélation qualitative entre les endroits où le nombre de contacts outil-pièce est important et ceux où le nombre décharges est faible.

Nous n'avons pas de certitude pour expliquer le faible enlèvement de matière au début des usinages. Nous pouvons toutefois avancer les hypothèses suivantes :

- (1) Différence d'état métallurgique de la pièce en surface et dans l'épaisseur, soit intrinsèquement, soit à cause de l'opération initiale de polissage [163]. On sait par ailleurs que le procédé de μEE modifie les propriétés des parties usinées (couche blanche [137]–[139]). Il conviendrait donc de procéder à une étude métallurgique (tailles des domaines,...).

¹ Il ne s'agit sans doute pas du seul facteur à considérer pour expliquer l'usure des outils.

(2) Difficulté à générer des décharges électriques en surface par rapport au volume ? Création de décharges latérales lorsque les canaux deviennent profonds ? Ce point pourrait être étudié en recouvrant latéralement l'électrode d'un diélectrique isolant.

4.5. Usinage d'un insert profond / Effet de la vitesse et verticalité des flancs

4.5.1. Objectif

Dans cette section, l'objectif est d'usiner une géométrie représentative d'un insert de moule d'injection avec une profondeur importante. Nous étudierons l'influence de la vitesse des axes X et Y. L'inclinaison des flancs de l'insert sera évaluée.

4.5.2. Conditions expérimentales

Nous avons usiné trois canaux rectangulaires de $500 \times 100 \mu\text{m}^2$ avec une profondeur de consigne H_C de $300 \mu\text{m}$ (Figure 119a). A chaque fois qu'un rectangle complet est décrit, l'outil s'enfonce d'un μpas de façon à usiner 960 couches ($300 \mu\text{m}$). Les canaux sont usinés à vitesses V_x et V_y croissant de 104, 156 à $312 \mu\text{m/s}$ ($V_x = V_y$). L'outil ayant un diamètre $25 \mu\text{m}$, il reste une nervure centrale. Les différents paramètres d'usinage sont résumés dans le Tableau 17.

La largeur des canaux est mesurée avec la caméra 1. Puis la pièce est moulée avec du PDMS (Figure 119b), ce qui permet de mesurer la largeur et la hauteur des motifs avec les caméras 1 et 2.

La Figure 119c montre le parcours de l'outil de manière détaillée. Celui-ci est positionné au coin inférieur gauche du rectangle à la distance de l'entrefer initial ϕ . Puis le générateur est mis en route. L'outil parcourt le rectangle à vitesse constante en une seule passe et s'enfonce en Z, lorsqu'il revient au point de départ, d'une valeur égale à h . Cette opération est répétée jusqu'à ce que l'outil se soit enfoncé d'une distance égale à H_C . A la fin de l'usinage, l'outil est remonté d'une hauteur égale à H_C et son usure est estimée à l'aide de la caméra 2. Il est ensuite décalé de $200 \mu\text{m}$ selon Y. Puis l'entrefer initial est ajusté de sorte que l'on peut recommencer l'usinage.

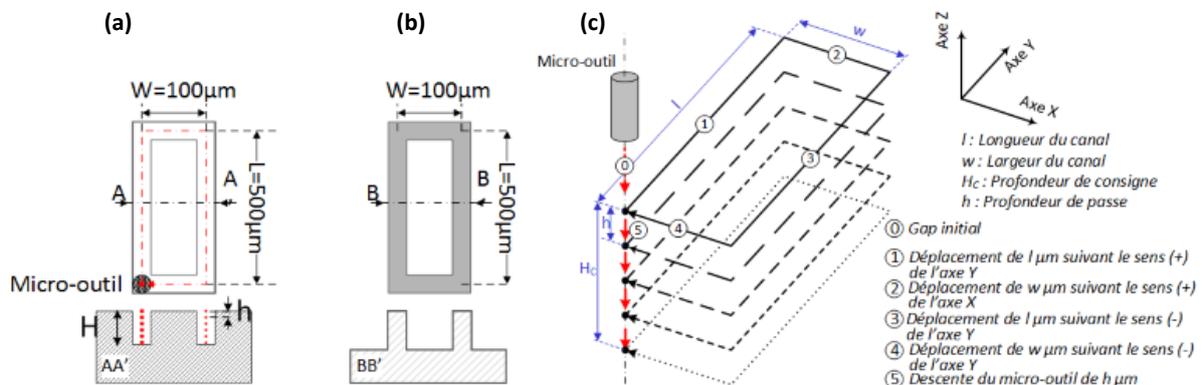


Figure 119 – (a) Canal rectangulaire de longueur L $500 \mu\text{m}$ et de largeur W $100 \mu\text{m}$ usiné avec une profondeur de consigne H_C de $300 \mu\text{m}$. (b) Moulage PDMS. (c) Parcours d'outil.

Générateur RC	Circuit de caractérisation	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none"> - $V_{EE} = 50 \text{ V}$ - $C_C = 4,7 \text{ nF}$ - $R_C = 100 \text{ } \Omega$ - $R_b = 0$ 	<ul style="list-style-type: none"> - $V_{Ref+} = 1,4 \text{ V}$ - $V_{Ref-} = 0,1 \text{ V}$ - $V_{Cont} = 0,1 \text{ V}$ - Diviseur = 30 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation : GBF - Commande : sinus - Amplitude : 1 V - Décalage : - 500 mV - Fréquence : 100 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau déionisée - Φ électrode = 25 μm - Entrefer initial $\varphi = 5 \text{ } \mu\text{m}$ - Profondeur de passe $h = 1 \text{ } \mu\text{pas}$ - Profondeur de consigne $H_c = 300 \text{ } \mu\text{m}$ - Vitesses $V_x = V_y = 104\text{-}156\text{-}312 \text{ } \mu\text{m/s}$ - Usinage : canaux rectangulaires $l = 500 \text{ } \mu\text{m}$; $w = 100 \text{ } \mu\text{m}$

Tableau 17 – Paramètres d'usinage – usinage d'un insert.

4.5.3. Résultats expérimentaux

a) Dimensions des canaux et de la nervure – facteur de forme

La Figure 120a montre le résultat des usinages en fonction de la vitesse. Lorsque la vitesse diminue, la profondeur et la largeur des canaux augmentent ; l'état de surface des parois verticales des murs est meilleur¹. La nervure centrale est aussi plus fine (minimum 24 μm). Le moulage en PDMS (Figure 120b) confirme l'élargissement des canaux avec la diminution de la vitesse. L'état de surface du PDMS correspondant du fond des canaux paraît plus lisse et plus homogène lorsque la vitesse diminue.

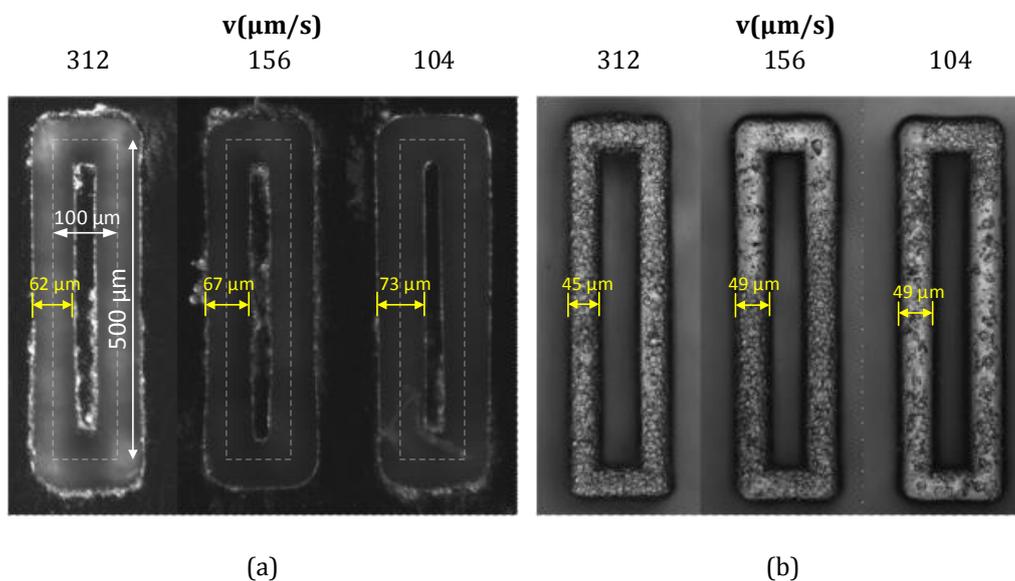


Figure 120 – Usinages réalisés avec trois vitesses de déplacement différentes : (a) pièces usinées ; (b) moulages en PDMS. Vues de dessus.

¹ Le résultat de la Figure 104 est confirmé mais avec une profondeur de consigne beaucoup plus importante.

La Figure 121 montre que la profondeur des canaux augmente et que la longueur d'usure du micro-outil diminue si la vitesse diminue.

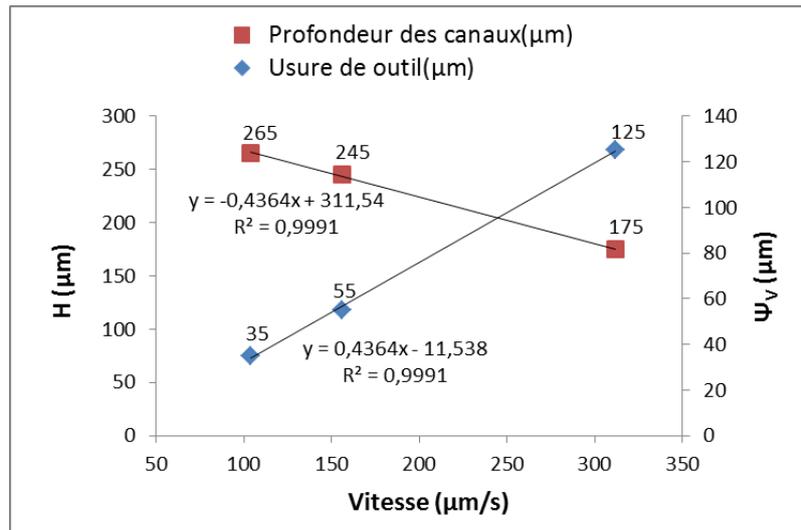


Figure 121 – Profondeur du canal et longueur d'usure de l'outil en fonction de la vitesse.

b) Verticalité des flancs

Soient γ_L et γ'_L le gap latéral, respectivement en haut (à la surface du substrat) et au fond des canaux (Figure 122).

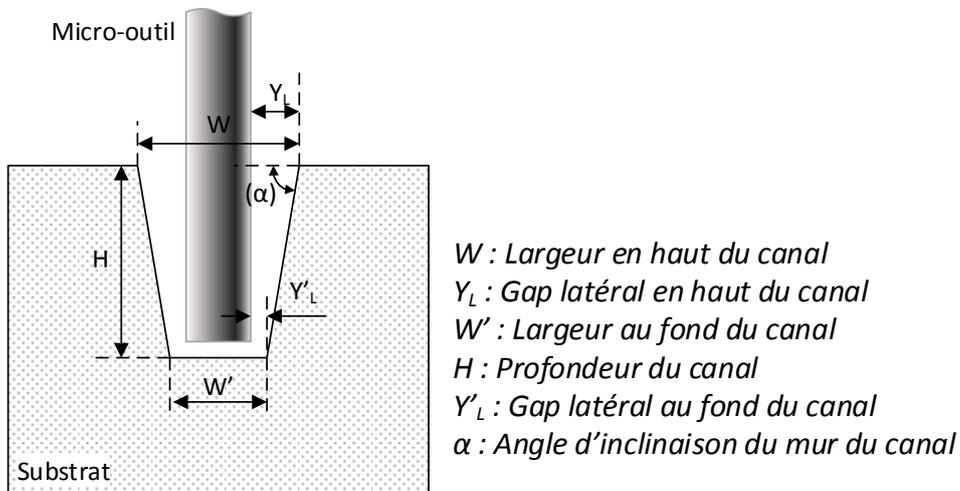


Figure 122 – Gap latéral en haut et au fond d'un canal.

Pour chaque valeur de vitesse, le Tableau 18 donne la valeur de γ_L , γ'_L , de la profondeur H des canaux ainsi que l'inclinaison α des flancs des canaux calculée d'après la relation ci-dessous. Le gap latéral au fond des canaux est de l'ordre de 10-12 μm et varie peu avec la vitesse. Le gap latéral au sommet des canaux diminue si la vitesse augmente.

L'inclinaison α des flancs ne dépend pas de la profondeur usinée ; elle est élevée et de l'ordre de 87°. Dans les conditions de cette expérience, l'élargissement du gap latéral au sommet des canaux n'est donc qu'un simple effet de proportionnalité.

$$\alpha (^{\circ}) = 90 - \tan^{-1} \left[\frac{Y_L - Y'_L}{H} \right] \quad (10)$$

$v_{x,y}$ ($\mu\text{m/s}$)	γ_L (μm)	γ'_L (μm)	H (μm)	α ($^{\circ}$)
104	24	12	265	87,4
156	21	12	245	87,1
312	18,5	10	175	87,2

Tableau 18 – Gap latéral en haut des canaux, gap latéral en bas des canaux et inclinaison des flancs en fonction de la vitesse des axes.

c) Usure de l'outil

La Figure 123 montre l'usure de l'outil après l'usinage des trois motifs. Celle-ci augmente fortement avec la vitesse des axes. Le TEM, le TUO et surtout le TURO augmentent avec la vitesse (Figure 124). En triplant la vitesse des axes de 104 à 312 $\mu\text{m/s}$, la profondeur du canal est réduite de 66 % (Tableau 18) : augmenter la vitesse des axes ne permet donc pas d'enlever plus rapidement de la matière à cause de la plus forte usure de l'outil.

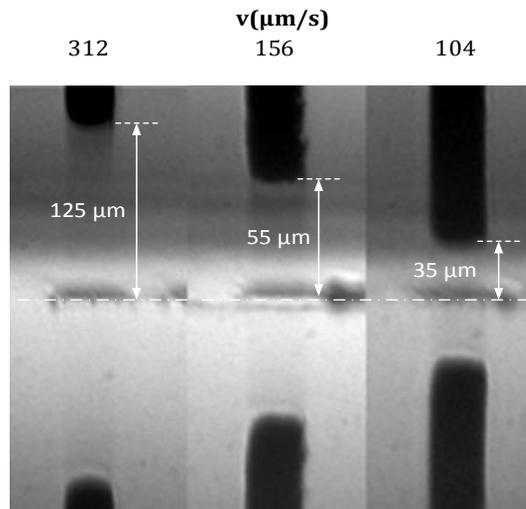


Figure 123 – Influence de la vitesse sur l'usure de l'outil.

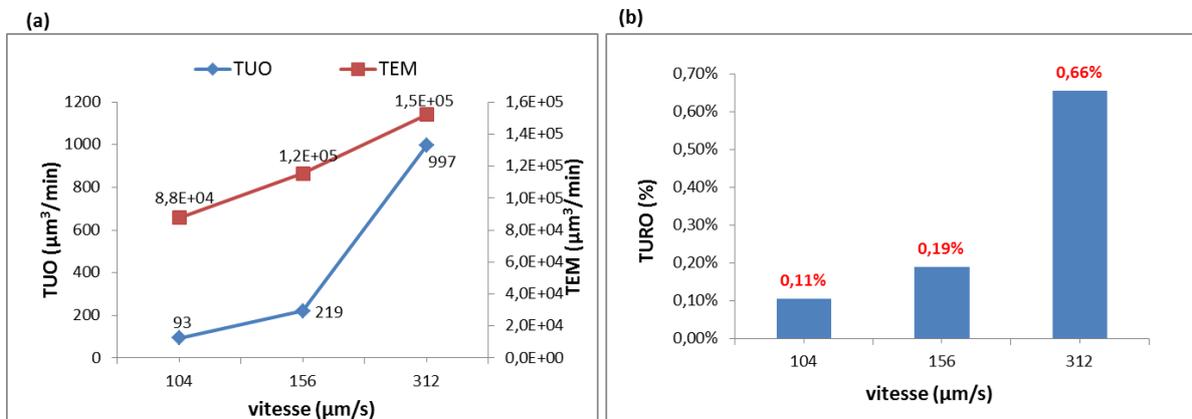


Figure 124 – (a) Influence de la vitesse sur le TUO et sur le TEM. (b) Influence de la vitesse sur le TURO.

d) Nombre de contact et décharges détectés

La caractérisation (Figure 125) montre que le nombre de contacts augmente et que le nombre de décharges détectées diminue lorsque la vitesse augmente. Ce dernier résultat est logique puisque la profondeur des canaux diminue. L'augmentation du nombre de contacts avec la vitesse entraîne une augmentation du taux d'usure et donc une diminution de la profondeur des canaux.

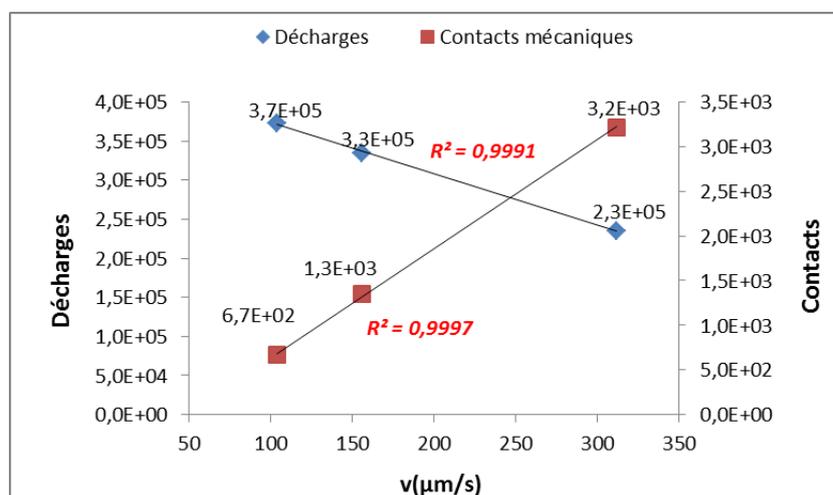


Figure 125 – Influence de la vitesse sur le nombre total des décharges et de contacts détectés par le circuit de caractérisation.

4.5.4. Conclusion

Si l'on ramène ces données au volume de matière enlevée, on trouve les valeurs du Tableau 19. Le nombre de décharges par unité de volume est du même ordre de grandeur pour les 3 vitesses. Pour une vitesse de 312 μm/s et une capacité de 4,7 nF, il est de l'ordre de $2,51 \times 10^7$ décharges/mm³. Cette valeur est proche de celle trouvée en section 4.4 en considérant la même vitesse et capacité, soit $(2,01 \pm 0,14) \times 10^7$ décharges/mm³.

Le TURO est du même ordre de grandeur : 0,66% dans le cas présent, contre 0,79% à la section 4.3 et 0,44% à la section 4.3.3. Dans la littérature, celui-ci varie de 1,4 % dans le meilleur des cas selon Srivastava et al. [164] à 60 % dans le cas le plus défavorable selon Yan et al. [165].

V (μm/s)	Nombre de déch/mm ³	Nombre de cont/mm ³	TEM (μm ³ /min)	TUO (μm ³ /min)	α ¹ (μm ³ /μ)
104	$2,31 \times 10^7$	$3,88 \times 10^7$	$8,76 \times 10^4$	93,1	7,37
156	$2,35 \times 10^7$	$4,99 \times 10^7$	$1,15 \times 10^5$	219	7,23
312	$2,51 \times 10^7$	$5,24 \times 10^7$	$1,52 \times 10^5$	997	6,79

Tableau 19 – Ordres de grandeur caractéristiques de l'usinage par EE rapportés au volume de matière enlevée.

¹ Le coefficient d'arrachement a été estimé en considérant que la chute de tension de la décharge est de 50 V avec la formule : $\frac{1}{2} C_C \Delta U^2$.

En conclusion, nous avons vu de nouveau dans cette étude que la vitesse d'usinage joue un rôle très important dans la μ EE. Sa valeur influence la qualité de surface des usinages. Elle affecte le taux d'usure de l'outil ainsi que le taux d'enlèvement de la matière.

En résumé :

- La qualité de surface des canaux est meilleure à faible vitesse.
- Le gap latéral au fond des canaux semble ne pas être affecté par la vitesse.
- Le gap latéral en haut des canaux s'agrandit au fur et à mesure que l'outil s'enfonce dans le substrat.
- L'usure de l'outil s'accroît avec l'augmentation de la vitesse, notamment par augmentation des contacts.

Pour creuser profond, il convient donc d'utiliser une vitesse de déplacement latérale lente. Par ailleurs une nervure de largeur $24\ \mu\text{m}$ et de hauteur $265\ \mu\text{m}$ (facteur de forme ~ 11) a été usinée dans l'acier inoxydable ; l'inclinaison des flancs est de $87,5^\circ$.

4.6. Taux de recouvrement latéral / Ebauche d'un insert

4.6.1. Objectif

La μ EE étant un procédé lent, il est souvent nécessaire d'adopter une stratégie en trois phases pour usiner une pièce :

- ébauche rapide de façon à enlever beaucoup de matière en acceptant un état de surface et une précision d'usinage médiocres ;
- semi-finition afin de continuer à enlever de la matière tout en améliorant les états de surface et la précision d'usinage ;
- finition de façon à aboutir à l'état de surface à la précision d'usinage souhaités.

Dans cette section, nous étudierons la phase d'ébauche dans le cas particulier d'un insert de moule. A la différence de celui de la section 4.5, nous usinerons une cavité de surface importante ($4 \times 2,8 \text{ mm}^2$ au lieu de $0,5 \times 0,1 \text{ mm}^2$) ; la nervure centrale n'ayant pas d'autre intérêt que de tester l'usinage de coins par l'extérieur (Figure 126).

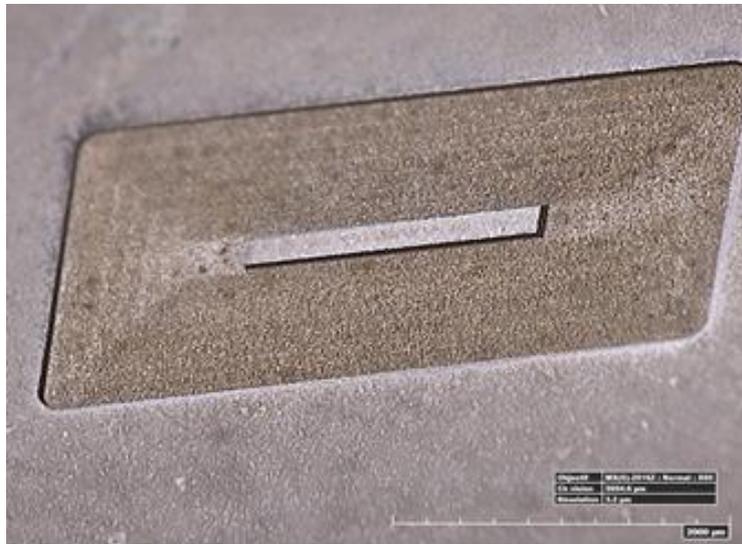


Figure 126 – Image de l'insert prise par un microscope numérique HIROX KH-8700 ($R=20\%$).

Nous utiliserons des outils de diamètre important ($250 \mu\text{m}$) avec un arasement non optimisé et non mis en rotation¹ ; les valeurs trouvées pour la verticalité des murs ou la planéité des fonds de cavité ne seront donc données qu'à titre indicatif. En effet, l'expérience montre qu'avec ces outils, il y a des dissymétries d'usinage² dues aux irrégularités de la surface et du contour de l'outil, à une planéité insuffisante et/ou à un manque de parallélisme par rapport au substrat³. Nous n'avons pas eu le temps d'améliorer ces points

Nous nous intéresserons essentiellement à l'enlèvement de la matière. Le paramètre étudié sera le recouvrement latéral des passes.

¹ Dans la littérature, la presque totalité des outils utilisés en μ EE est mise en rotation.

² Figure 156 par exemple.

³ Le passage de l'ébauche à la finition pourrait donc être effectué avec un micro outil de diamètre décroissant de façon à réduire ces effets.

4.6.2. Conditions expérimentales

Lorsqu'un outil effectue des balayages en X décalés en Y d'une distance e (Figure 127), le taux de recouvrement $R\%$ est défini comme la distance séparant deux passages de l'outil en Y exprimée en % du diamètre de l'outil (relation (11)). Il correspond au pourcentage de surface qui voit passer l'outil deux fois. Nous utiliserons trois valeurs différentes de recouvrement : 20, 50 et 75%.

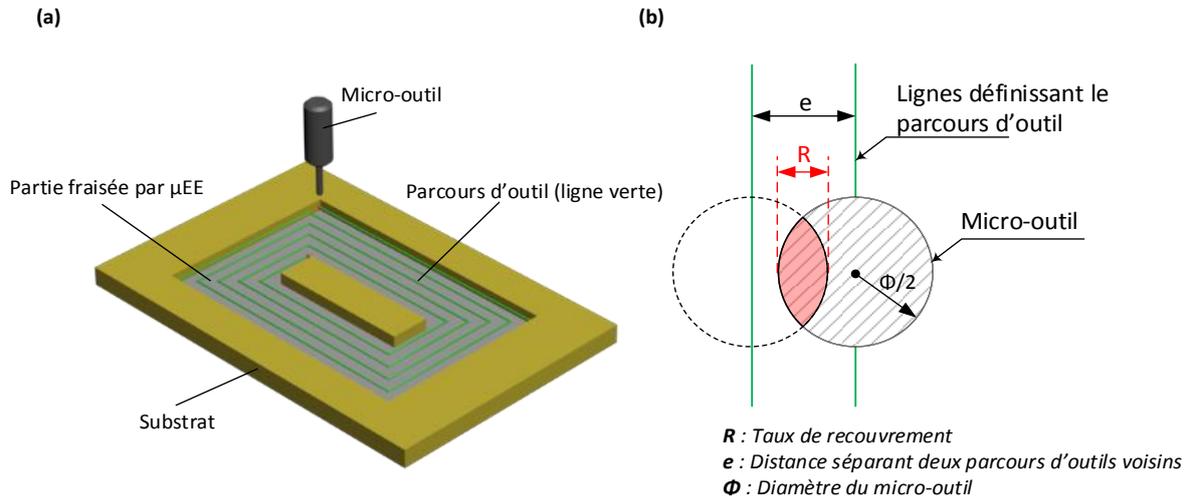


Figure 127 – Définition du taux de recouvrement latéral du parcours d'outil.

$$R (\%) = \left(\frac{\Phi - e}{\Phi} \right) \times 100 \quad (11)$$

L'insert (Figure 127a) a une forme parallélépipédique de dimensions $L_{01} \times W_{01}$ ($4000 \times 1800 \mu\text{m}^2$) avec une nervure centrale de dimensions $L_{02} \times W_{02}$ ($600 \times 2800 \mu\text{m}^2$). La profondeur de passe est de 3 μpas ($0,9375 \mu\text{m}$).

A la fin de l'usinage d'une couche, l'outil s'enfonce en un coin de la cavité avec une profondeur de passe de 3 μpas ($\sim 1 \mu\text{m}$). Puis il procède au parcours d'outil XY suivant en effectuant une symétrie de façon à homogénéiser le plus possible l'usure de l'électrode et à améliorer l'état de surface du fond de la cavité. Les points d'enfoncements sont donc aussi symétrisés.

La profondeur de consigne H_c est de 50 μm ou 114 μm en fonction des usinages. La vitesse des axes X et Y est de 312 $\mu\text{m/s}$. Les paramètres d'usinage sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Générateur RC	Caractérisation des décharges	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none"> - $V_{EE} = 50 \text{ V}$ - $C_C = 4,7 \text{ nF}$ - $R_C = 100 \text{ } \Omega$ - $R_b = 0$ 	<ul style="list-style-type: none"> - $V_{Ref+} = 1,4 \text{ V}$ - $V_{Ref-} = 0,1 \text{ V}$ - $V_{Cont} = 0,1 \text{ V}$ - Diviseur = 30 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation : GBF - Commande : sinus - Amplitude: 1 V - Décalage : - 0.5 V - Fréquence : 100 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau déionisée - Electrode $\Phi = 250 \text{ } \mu\text{m}$ - Entrefer initial $\varphi = 5 \text{ } \mu\text{m}$ - Profondeur de passe $h = 1 \text{ } \mu\text{pas}$ - Profondeur de consigne $H_c = 50\text{-}114\text{-}50 \text{ } \mu\text{m}$ - Taux de recouvrement $R(\%) = 20, 50 \text{ et } 75\%$. - Vitesse $V_x = V_y = 312 \text{ } \mu\text{m/s}$ - Usinage : Insert $L_{01} = 4000 \text{ } \mu\text{m}$; $W_{01} = 1800 \text{ } \mu\text{m}$; $L_{02} = 2800 \text{ } \mu\text{m}$; $W_{02} = 600 \text{ } \mu\text{m}$.

Tableau 20 – Paramètres d'usinage : taux de recouvrement de l'outil en phase d'ébauche.

4.6.3. Résultats expérimentaux

a) Recouvrement $R = 20\%$ - profondeur de consigne $H_c = 50 \text{ } \mu\text{m}$.

L'écart entre les passes est de $200 \text{ } \mu\text{m}$ pour un outil de diamètre $250 \text{ } \mu\text{m}$. L'espacement est donc important. La Figure 128 montre une vue du parcours d'usinage d'une couche (en rouge avec départ au coin supérieur droit pour la 1^{ère} couche) superposée à une image de la cavité usinée. La Figure 129a montre le résultat de l'usinage qui fait apparaître par endroit le recouvrement des passes. L'usure de l'outil est de $35 \text{ } \mu\text{m}$ (Figure 129b). La rugosité dans la zone usinée est de $R_a 681 \text{ nm}$ (Figure 129c).

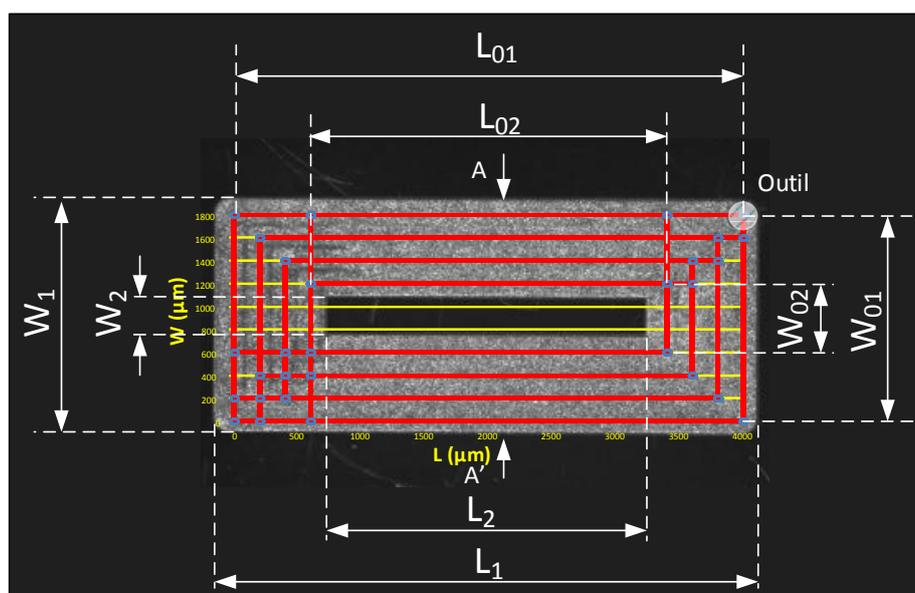


Figure 128 – Usinage d'un insert avec $R=20\%$: parcours d'outil d'une couche en rouge superposé au résultat de l'usinage (photographie).

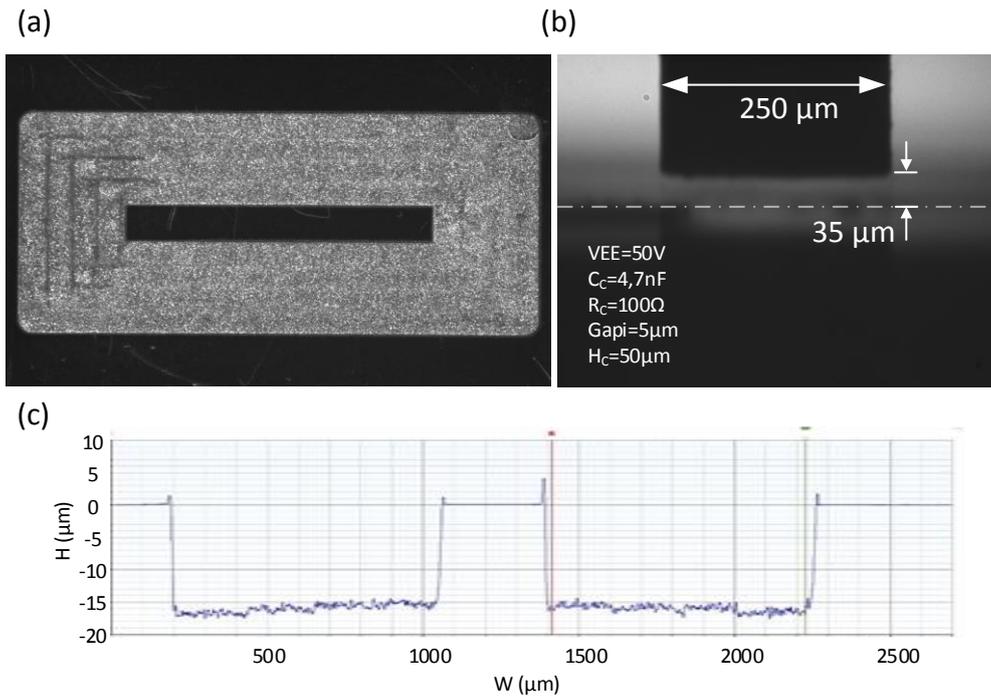


Figure 129 – (a) Résultat d'usinage avec un recouvrement $R = 20\%$ (vue de dessus avec la caméra) ; (b) usure de l'outil (vue de face avec la caméra) ; (c) Profil de la cavité mesuré au profilomètre mécanique DEKTAK 150.

Les dimensions W_1 , L_1 , W_2 , L_2 (Figure 128) du motif usiné ont été caractérisées par voie optique ainsi qu'avec le profilomètre optique et sont résumées dans le Tableau 21.

On en déduit le gap latéral Y_L à partir de :

$$L_1 = L_{01} + \phi + 2 \times Y_L \quad (12)$$

$$W_1 = W_{01} + \phi + 2 \times Y_L \quad (13)$$

Et

$$L_2 = L_{02} - (\phi + 2 \times Y_L) \quad (14)$$

$$W_2 = W_{02} - (\phi + 2 \times Y_L) \quad (15)$$

On trouve que Y_L est de l'ordre de $25 \mu\text{m}$. L'opérateur devra donc tenir compte du gap latéral pour aboutir à une cavité de dimension précise (nous laissons de côté cette question purement technique).

L_1 (μm)	W_1 (μm)	L_2 (μm)	W_2 (μm)	H (μm)	ψ_L (μm)	Y_L (μm)
4300	2100	2500	300	15	35	25

Tableau 21 – Dimensions de l'insert usiné avec $R= 20\%$; usure de l'outil et gap latéral.

b) Recouvrement R = 50 % - profondeur de consigne $H_c = 114 \mu\text{m}$.

L'écart entre les passes est de $125 \mu\text{m}$. L'espacement est donc réduit mais l'usinage dure plus longtemps. La Figure 130 montre une vue du parcours d'usinage (en rouge avec départ au coin supérieur droit) superposée à une image de la cavité usinée.

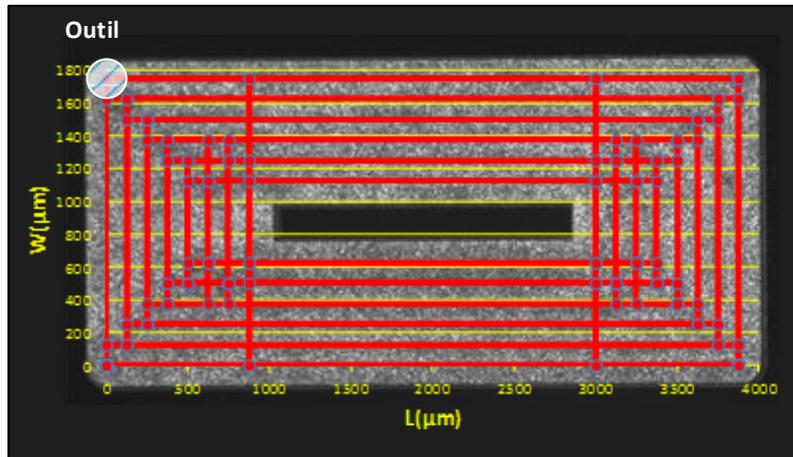


Figure 130 – Usinage d'un insert avec $R=50\%$: parcours d'outil d'une couche en rouge superposé au résultat d'usinage (caméra 2).

La Figure 131 montre le résultat de l'usinage qui fait aussi apparaître par endroit le recouvrement des passes. La rugosité mesurée au profilomètre mécanique au fond de la cavité est de $R_a 674 \text{ nm}$.

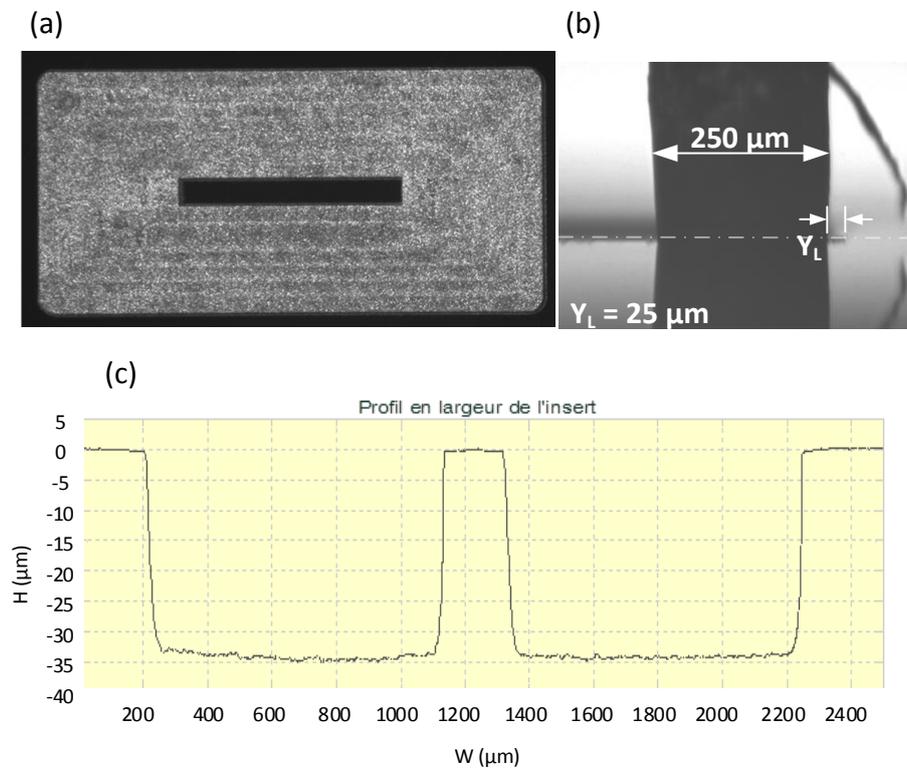


Figure 131 – (a) Insert usiné avec $R = 50\%$ (caméra 2) ; (b) mesure optique du gap latéral (caméra 1) ; (c) Profil de la cavité mesuré au profilomètre mécanique DEKTAK 150.

Les dimensions W_1 , L_1 , W_2 , L_2 du motif usiné sont résumées dans le tableau ci-dessous. L'usure de l'outil est importante ($80 \mu\text{m}$). Le gap latéral Y_L a été estimé par deux méthodes concordantes : la mesure directe par optique (Figure 131b) et via les équations (12) à (15) (Figure 131c). Il est d'environ $25 \mu\text{m}$

L_1 (μm)	W_1 (μm)	L_2 (μm)	W_2 (μm)	H (μm)	ψ_L (μm)	Y_L (μm)
4175	2050	1825	200	35	80	25

Tableau 22 – Dimensions de l'insert usiné avec $R=50\%$; usure de l'outil et gap latéral.

c) Recouvrement $R = 75\%$ - profondeur de consigne $H_c = 50 \mu\text{m}$.

L'écart entre les passes est de $62.5 \mu\text{m}$. La Figure 132 montre une vue du parcours d'usinage (en rouge avec départ au coin supérieur droit) superposée à une image de la cavité usinée.

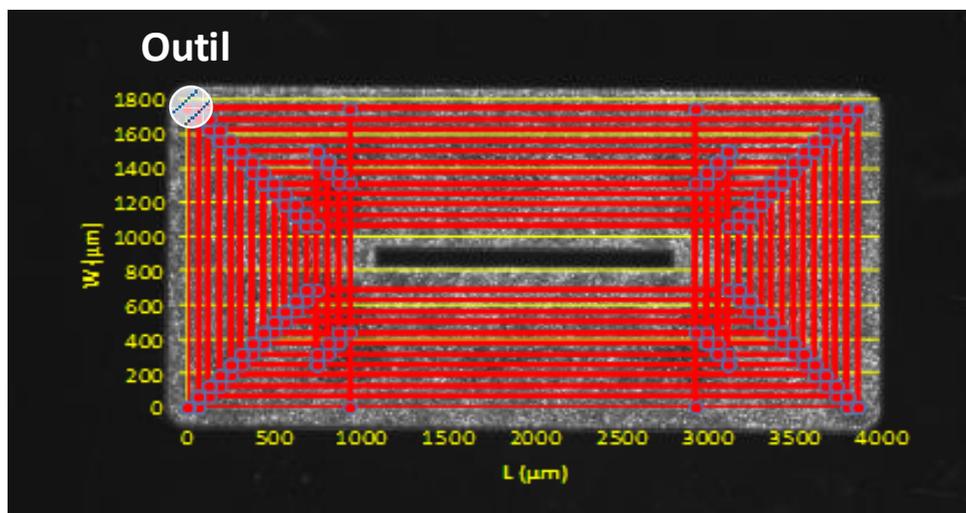


Figure 132 – Usinage d'un insert avec $R=75\%$: parcours d'outil d'une couche en rouge superposé au résultat d'usinage (photographie).

La Figure 133a montre le résultat de l'usinage qui ne fait plus apparaître le recouvrement des passes mais des zones de brillance différente. Sur la surface usinée apparaissent des taches sombres correspondant à des états de surface de faible rugosité et d'autres plus brillantes à cause de petits cratères diffractant la lumière. La Figure 133b montre l'usure frontale (Y_V) de l'électrode qui est de $31 \mu\text{m}$. La rugosité au fond de la cavité usinée est de $R_a 484 \text{ nm}$ (Figure 129c).

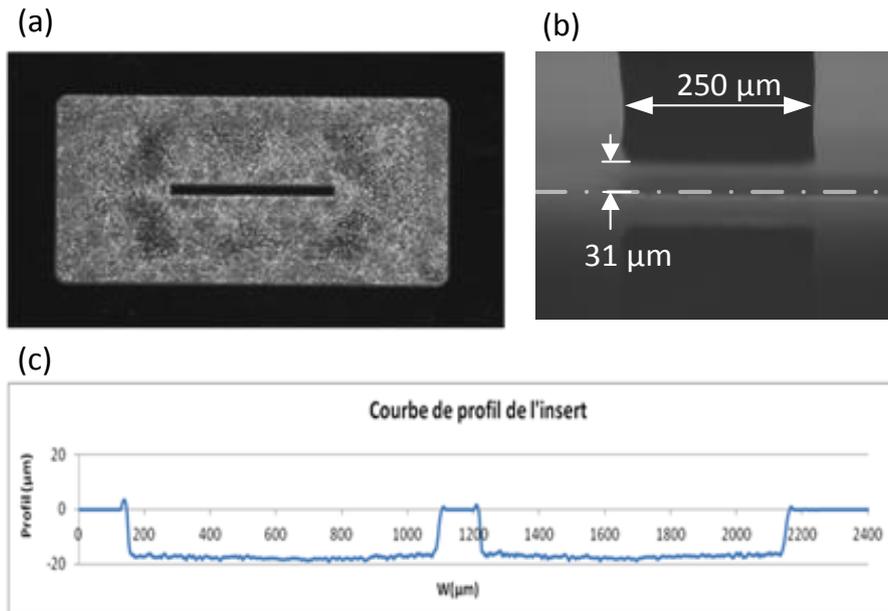


Figure 133 – (a) Insert usiné avec $R = 75\%$; (b) mesure optique de l'usure latérale de l'outil ; (c) Profil de la cavité mesuré au profilomètre mécanique DEKTAK 150.

Les dimensions W_1 , L_1 , W_2 , L_2 du motif usiné sont résumées dans le tableau ci-dessous ainsi que l'usure de l'outil et le gap latéral. Celui-ci est de $25\ \mu\text{m}$ et ne dépend pas du recouvrement latéral.

$L_1\ (\mu\text{m})$	$W_1\ (\mu\text{m})$	$L_2\ (\mu\text{m})$	$W_2\ (\mu\text{m})$	$H\ (\mu\text{m})$	$\psi_L\ (\mu\text{m})$	$Y_L\ (\mu\text{m})$
4175	2050	1700	75	19	31	25

Tableau 23 – Dimensions de l'insert usiné avec $R = 75\%$; usure de l'outil et gap latéral.

4.6.4. Conclusion

La figure ci-dessous permet de comparer la durée des usinages (après péréquation à une profondeur commune de consigne H_c de $50\ \mu\text{m}$). Un recouvrement de 75% conduit à un usinage de 10,5 h. A 50% l'usinage dure 7 h. A 20% il est d'environ 3 h.

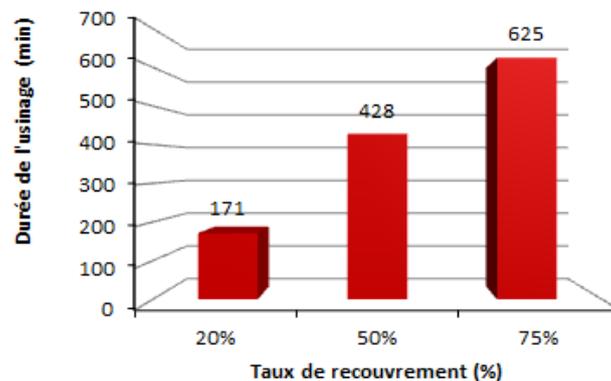


Figure 134 – Estimation de la durée d'usinage (minutes) rapportée à une profondeur de consigne de $50\ \mu\text{m}$ en fonction du taux de recouvrement.

La Figure 135a montre l'évolution du TEM, du TUO. Plus le recouvrement est faible plus les taux d'enlèvement et d'usure sont importants.

Le point important est que l'usure relative de l'outil diminue quand le recouvrement est important (passes resserrées). L'ordre de grandeur du TURO est de 2,5% à 21,1% en fonction du taux de recouvrement.

Si on veut usiner rapidement une cavité, le mieux est d'utiliser un taux de recouvrement faible car le rapport H/H_c est presque toujours de l'ordre de 30 à 40% et le R_a est meilleur que $1\ \mu\text{m}$.

Si on veut obtenir une surface avec une meilleure rugosité, il est indispensable de privilégier une valeur importante de recouvrement : l'usinage prendra plus de temps mais il sera de meilleure qualité avec une précision meilleure.

Ces résultats sont conformes à ce que l'on attend d'une phase d'ébauche.

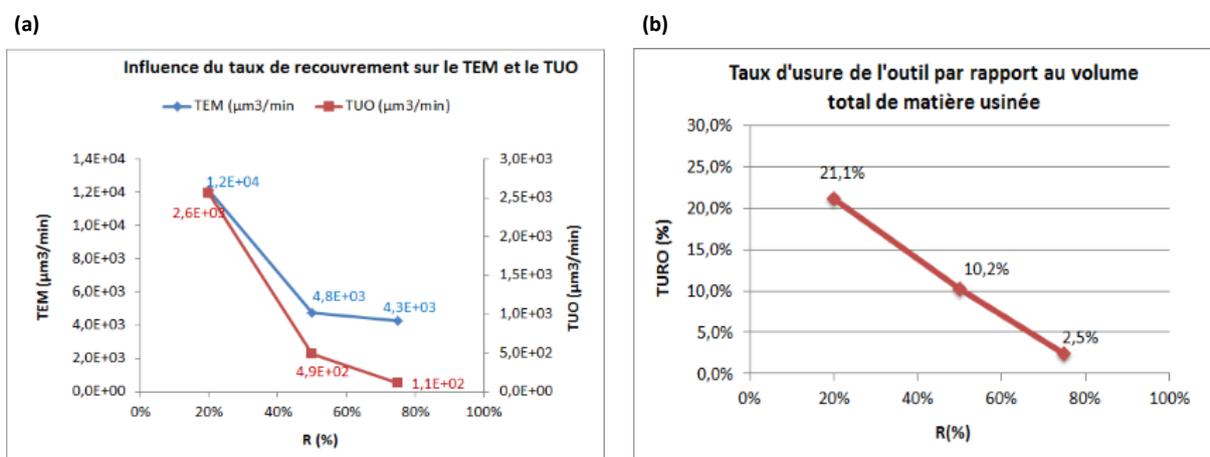


Figure 135 – Influence du taux de recouvrement sur le TEM, le TUO (a) et le TURO (b).

Pour réduire la durée de la phase d'ébauche, des solutions autres qu'un faible recouvrement pourraient être aussi étudiées : augmentation de la tension de travail et/ou de la capacité d'usinage et/ou de la vitesse des axes XY et/ou de la profondeur de passe.

Etant donné la hauteur usée de l'outil (31 à $80\ \mu\text{m}$), il est certain que l'on gagnerait du temps en compensant l'usure de l'outil avec le pousse fil¹.

¹ Faute de temps, nous n'avons pas pu procéder à des essais avec le dispositif installé dans la machine.

4.7. Régulation de l'entrefer électrode-substrat

4.7.1. Objectif

Dans cette section, nous allons utiliser le μC3 pour réguler la valeur de l'entrefer à l'aide de l'actionneur piézoélectrique. L'objectif sera de maintenir un régime homogène de décharges et de réduire voire d'éviter les collisions entre l'outil et la pièce.

4.7.2. Conditions expérimentales

a) Parcours d'usinage

Nous avons usiné trois canaux rectangulaires (cf. Figure 138) avec une profondeur de consigne respectivement de 50, 100 et 200 μm .

Générateur RC	Circuit de caractérisation	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none">- $V_{EE} = 50 \text{ V}$- $C_C = 1 \text{ nF}$- $R_C = 100 \ \Omega$- $R_b = 0$	<ul style="list-style-type: none">- $V_{\text{Ref}+} = 1,4 \text{ V}$- $V_{\text{Ref}-} = 0,1 \text{ V}$- $V_{\text{Cont}} = 0,1 \text{ V}$- Diviseur = 30	<ul style="list-style-type: none">- Voir section 2.2.4.b	<ul style="list-style-type: none">- Diélectrique : eau déionisée- Φ Electrode = 25 μm- Entrefer initial $\phi = 5 \ \mu\text{m}$- $H_c = 50\text{-}100\text{-}200 \ \mu\text{m}$- Profondeur de passe $h = 1 \ \mu\text{pas}$- Vitesse $V_x = 104 \ \mu\text{m/s}$- Usinage = canaux rectangles $L = 500 \ \mu\text{m}$; $W = 100 \ \mu\text{m}$

Tableau 24 – Paramètres d'usinage: Régulation du gap.

b) Principe de la régulation

On rappelle que l'entrefer initial est de 5 μm . L'outil est soumis à trois mouvements via par l'actionneur piézoélectrique (Figure 136) :

- Un mouvement ① de forme triangulaire d'amplitude 18 μm dont la fréquence est choisie par l'opérateur (dans notre cas 0,33 Hz) ; ce mouvement a pour but de faire évoluer lentement la valeur de l'entrefer.
- Un mouvement ② de forme triangulaire d'amplitude 9 μm et de fréquence 100 Hz ; ce mouvement rapide est prévu pour faciliter l'évacuation des débris dans l'entrefer.
- Un dernier mouvement ③ qui sert à réguler l'entrefer en faisant varier la ligne de base du mouvement ①, ce qui revient à faire varier la valeur moyenne de l'entrefer.

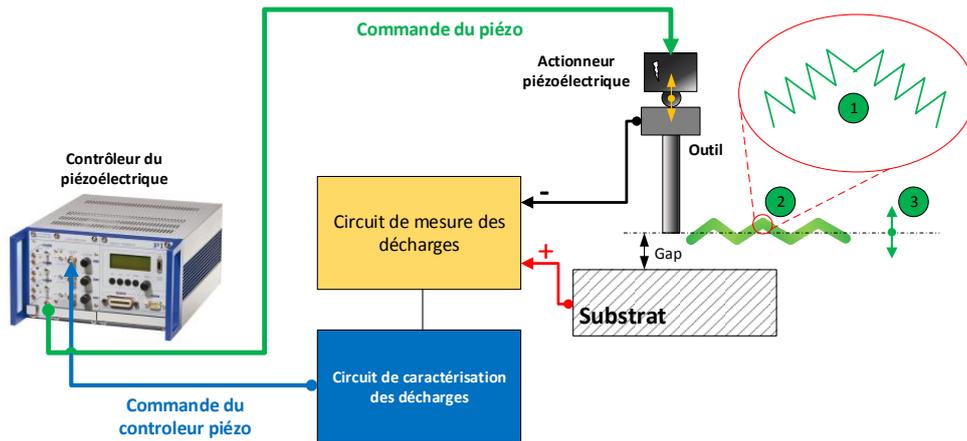


Figure 136 – Principe de la régulation de l'entrefer.

Le principe de la régulation est le suivant : le $\mu C3$ scrute les sorties des comparateurs du circuit de caractérisation et compte en temps réel les évènements (décharges et contacts). S'il compte au moins 5 décharges pendant une durée de 2 μs , le $\mu C3$ ordonne à l'actionneur piézoélectrique d'éloigner l'outil du substrat d'une distance de 45 nm via le mouvement ③. Dans le cas inverse, le $\mu C3$ ordonne à l'actionneur piézoélectrique de rapprocher l'outil du substrat de la même distance. Bien évidemment, il ne s'agit ici que d'un exemple de régulation dont les valeurs sont à optimiser.

c) Démonstration du principe de la régulation

L'interaction entre le dispositif de régulation et le circuit de caractérisation des décharges est montrée dans la figure ci-dessous à l'aide d'un oscilloscope numérique Tektronix DPO2024.

La Figure 137a montre les mouvements ① et ② du micro-outil via le capteur de position de l'actionneur piézoélectrique. Celui-ci oscille autour d'une position de référence.

Lorsque la condition sur la régulation est satisfaite, le circuit de régulation ordonne à l'actionneur piézoélectrique de rapprocher ou d'éloigner l'outil du substrat comme le montre la Figure 137b. Le signal rouge correspond à la somme des mouvements ① et ③. On voit donc nettement lorsque le processus de la régulation entre en jeu.

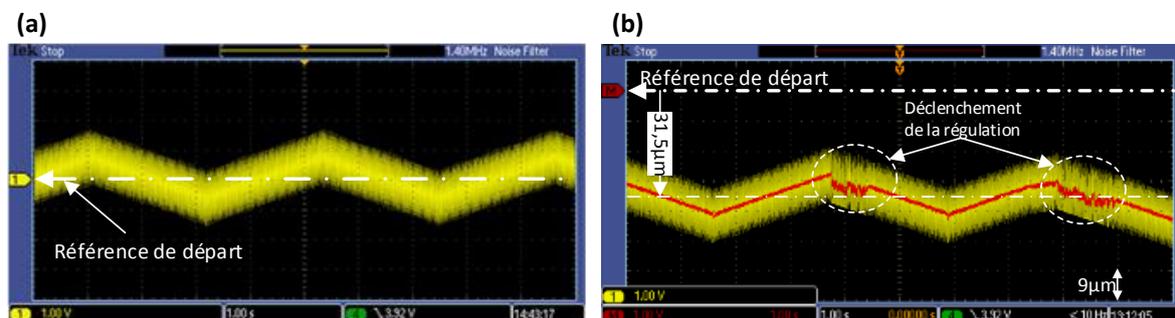


Figure 137 – Signaux de commande de la régulation: (a) début de l'usinage; (b) déclenchement de la régulation au cours de l'usinage¹.

¹ Notons que si le signal de commande de l'actionneur piézoélectrique est négatif, l'ordre est donné au micro-outil de s'éloigner du substrat.

Pour un usinage d'une profondeur de consigne de 200 μm , nous avons noté que le micro-outil s'est éloigné au total de 31,5 μm via le mouvement ③. Cela veut dire qu'en l'absence de régulation, le micro-outil serait entré en collision avec le substrat.

Le dégagement de l'outil suite à la régulation et celle de l'usure de l'outil doivent être pris en compte afin que les dimensions réelles de l'usinage concordent avec les profondeurs de consigne.

4.7.3. Résultats expérimentaux

a) Caractérisation optique des canaux usinés

La Figure 138a montre une vue de dessus des canaux usinés. Plus le canal est profond, plus sa largeur est grande (la partie centrale s'amincit nettement) ; le gap latéral augmente avec la profondeur.

La Figure 138b montre une vue de face des motifs moulés du PDMS. Les motifs sont plus larges à la surface du substrat qu'au fond de ces canaux ; les murs des usinages ne sont pas parfaitement droits mais penchés avec un angle que nous noterons β (Figure 139).

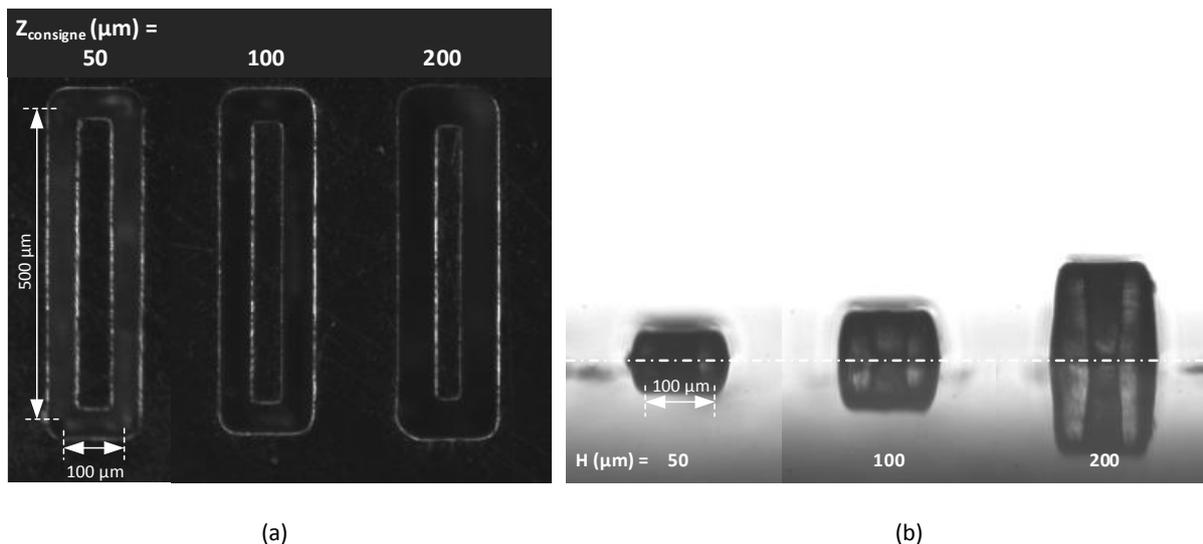


Figure 138 – Usinages de canaux rectangulaires avec régulation de l'entrefer. (a) Vue de dessus des canaux usinés; (b) Vue de face des motifs moulés en PDMS et de leur reflet.

La Figure 139 montre comment l'angle d'inclinaison est mesuré : directement sur les structures usinées (Figure 139b) et sur les pièces moulés en PDMS (Figure 139c). Cet angle dépend de la hauteur des flancs des canaux : plus le canal est profond, plus β est grand. Les ordres de grandeur sont de 82° (Figure 139b) et 85,5° (Figure 139c) pour le canal le plus profond ($H_c = 200 \mu\text{m}$)

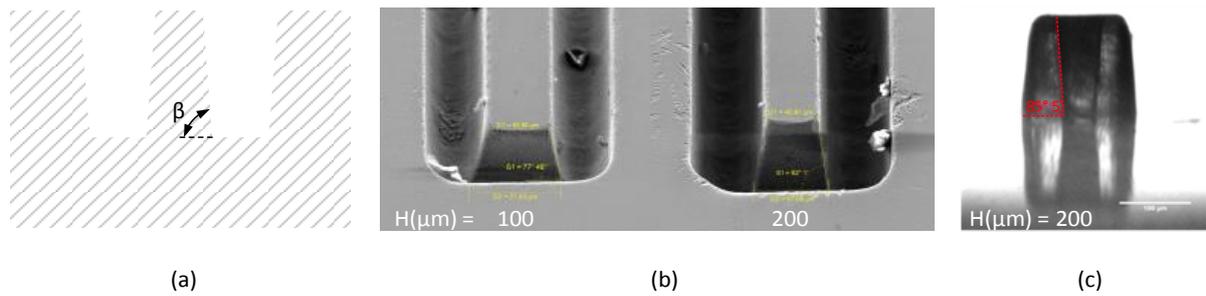


Figure 139 – Mesure de l'angle d'inclinaison β des flancs des canaux usinés. (a) Définition de l'angle d'inclinaison β ; (b) mesure de β au MEB pour une profondeur de consigne H_c de $100 \mu\text{m}$ ($\beta = 77,5^\circ$) et H_c de $200 \mu\text{m}$ ($\beta = 82^\circ$) ; (c) Mesure optique de β sur la pièce moulée en PDMS pour $H_c = 200 \mu\text{m}$ ($\beta = 85,5^\circ$).

Il est difficile d'obtenir des images optiques ou électroniques (MEB) nettes des flancs des structures usinées, notamment la plus profonde. En inclinant le substrat, nous avons tout de même réussi à obtenir des images de la structure la plus profonde avec un microscope numérique MEIJI MT8100L NUM (Figure 140a). La reconstitution en 3D (Figure 140b) montre la qualité de l'usinage des flancs verticaux pour le canal usiné à $H_c = 200 \mu\text{m}$. Le canal le plus profond a une profondeur de $156 \mu\text{m}$, une largeur de $55 \mu\text{m}$ avec un angle d'inclinaison d'environ 86°

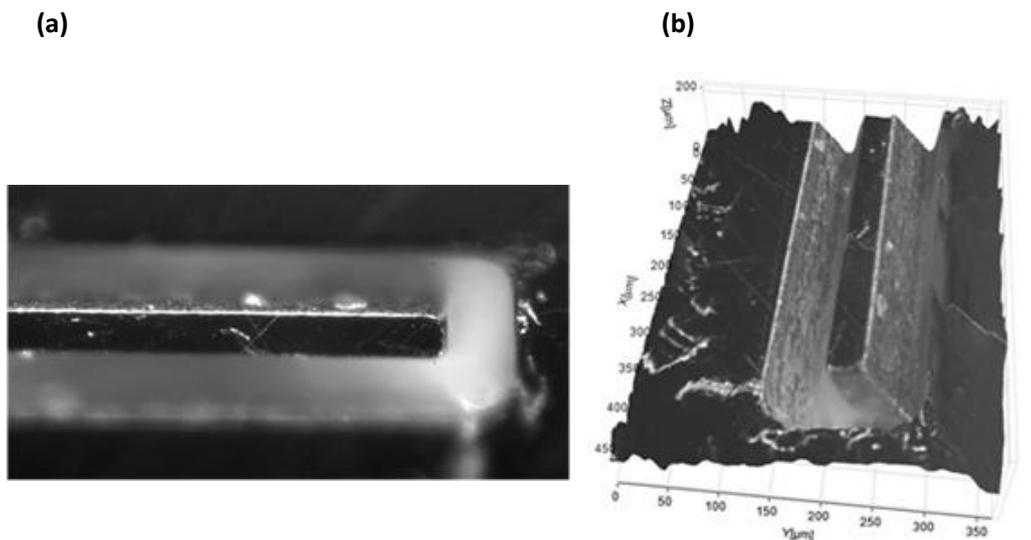


Figure 140 – (a) Mise au point sur le mur de la nervure centrale ; (b) Reconstitution en 3D du motif usiné ($H_c = 200 \mu\text{m}$). Microscope numérique MEIJI MT8100L NUM.

La Figure 141 montre l'évolution de la largeur et de la profondeur des canaux usinés en fonction de la profondeur de consigne. Pour ce qui concerne la profondeur atteinte, l'alignement des points montre que dans les conditions de cette expérience, la régulation assure un régime d'usinage uniforme. Par contre la largeur des canaux augmente avec l'augmentation de leur profondeur.

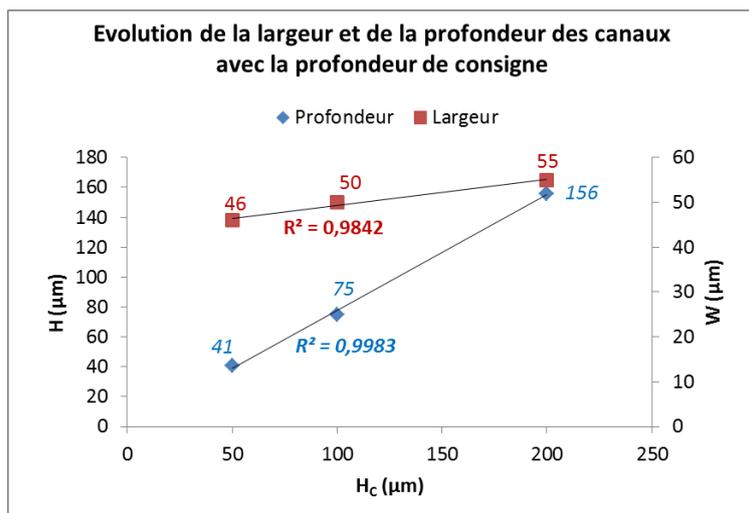


Figure 141 – Evolution de la largeur et de la profondeur des canaux usinés en fonction de la profondeur de consigne H_c (usinage avec régulation de l'entrefer).

b) Taux d'enlèvement de matière et usure

Contrairement aux expériences précédentes (section 4.3.3), les taux d'enlèvement de matière (TEM) et d'usure de l'outil (TUO) sont quasiment constants alors que la profondeur usinée triple d'un usinage à l'autre (Figure 142a) ; le protocole de régulation de l'entrefer donne donc des résultats satisfaisants sur ce point. Le TEM moyen avec régulation pour les 3 usinages avec les différents H_c est de $6.4 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{min}$.

La Figure 142 montre que le taux d'usure relative TURO ne dépend pas de H_c et qu'il est en moyenne de $0,27 \pm 0,05\%$.

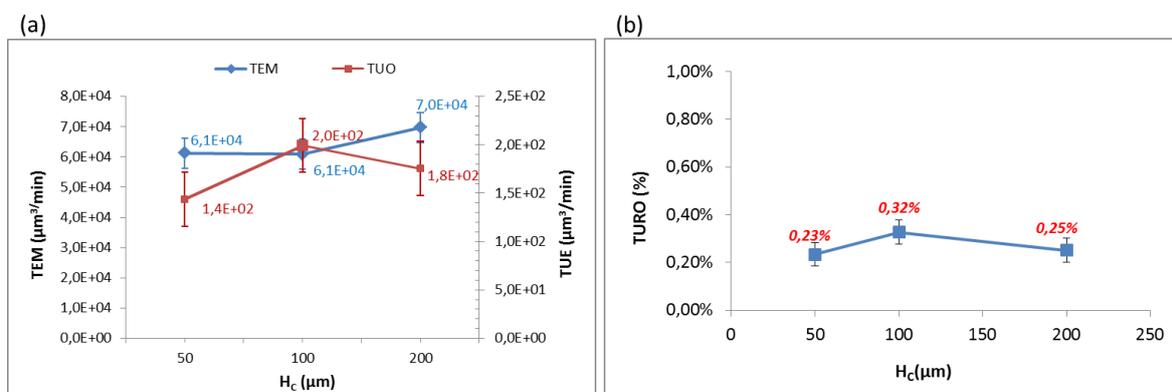


Figure 142 – TEM, TUO (a) et TURO (b) en fonction de H_c (régulation de l'entrefer).

c) Caractérisation électrique des canaux usinés

Le traitement des données de caractérisation des décharges montre que la régulation de l'entrefer a assuré une augmentation du nombre de décharges proportionnelle au fur et à mesure que l'outil s'enfonce dans la pièce (Figure 143a).

Le nombre des décharges détectées par couche de 1 μpas d'épaisseur se stabilise autour de 200 (Figure 143b). Toutefois on constate des variations significatives ; le nombre

pouvant dépasser 800 décharges pour certaines couches. Les paramètres de réglage du système de régulation ne sont donc pas optimum.

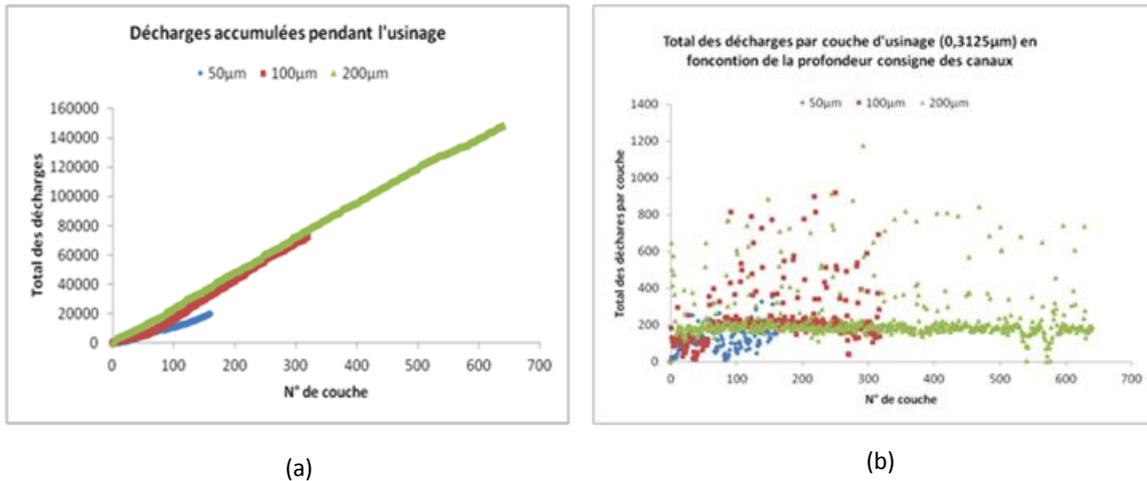


Figure 143 – Caractérisation des décharges électriques avec régulation du gap. (a) Décharges accumulées durant la durée totale des décharges ; (b) Nombre de décharges par couche usinée (profondeur de passe 1 µpas).

Si l'on ramène le nombre de décharges et de contacts au volume de matière enlevée, on trouve un rapport moyen de $1,58 \times 10^7$ décharges / mm^3 (Tableau 25). Par rapport au tableau 19, on notera que le coefficient d'arrachement est supérieur d'un facteur 10.

H_c (μm)	Nombre de déch/ mm^3	Nombre de cont/ mm^3	TEM ($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	TUO ($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	α^1 ($\mu\text{m}^3/\mu$)
50	$1,06 \times 10^7$	0,00	$6,13 \times 10^4$	$1,44 \times 10^2$	75,63
100	$1,94 \times 10^7$	$1,87 \times 10^6$	$6,09 \times 10^4$	$1,99 \times 10^2$	41,20
200	$1,73 \times 10^7$	$2,78 \times 10^6$	$6,97 \times 10^4$	$1,75 \times 10^2$	46,28

Tableau 25 – Ordres de grandeur caractéristiques de l'usinage par EE rapportés au volume de matière enlevée.

4.7.4. Conclusion

Nous avons donc démontré que si la profondeur de consigne augmente, beaucoup de paramètres restent constants grâce au protocole de régulation choisi : TEM, TUO et surtout le TURO. Le nombre des décharges détectées par volume de matière enlevé est en moyenne de $1,58 \times 10^7$ décharges / mm^3 . La profondeur usinée est proportionnelle à la profondeur de consigne ; le rapport H/H_c est de l'ordre de 80%.

Bien que cet essai de régulation se soit révélé satisfaisant, il n'en reste pas moins que de nombreux autres aspects devront être étudiés : amplitudes et fréquences des mouvements

¹ Le coefficient d'arrachement a été estimé en considérant que la chute de tension de la décharge est de 50 V avec la formule : $\frac{1}{2} C_c \Delta U^2$.

de l'actionneur piézoélectrique, formes d'onde des mouvements (triangle, sinusoïde,...), critère sur le nombre de décharges, etc.

Par ailleurs, dans l'Annexe 7, nous comparons deux usinages de cavités de $960 \times 960 \mu\text{m}^2$ avec et sans régulation. Nous verrons que la régulation de l'entrefer permet de :

- augmenter le nombre des décharges ;
- réduire l'usure de l'outil ;
- creuser des cavités plus profondes ;
- réduire le nombre de contacts entre l'outil et la pièce.

Toutes choses égales par ailleurs, le nombre de décharges détectées par volume de matière usinée avec et sans et régulation est respectivement de $1,78 \times 10^7$ décharges/ mm^3 et $2,63 \times 10^7$ décharges/ mm^3 . Le rapport H/H_C est de l'ordre de 14 % avec régulation et 6 % sans régulation.

Notons que le rapport H/H_C dépend de la géométrie à usiner : canal dans la section 4.7 et cavité dans l'Annexe 7.

4.8. Energie des décharges / effet de la résistance de ballast

4.8.1. Objectif

L'objectif ici est d'étudier l'influence d'une résistance de ballast R_b en série avec l'outil sur le processus d'usinage (Figure 62). Une étude ayant déjà été effectuée avec de l'air comme diélectrique [13], nous procéderons à des essais dans l'eau déionisée. Un oscilloscope numérique Tektronix DPO2024 sera utilisé pour caractériser la tension aux bornes de la capacité de travail et le courant traversant le micro-outil comme indiqué à la section 2.2.4.b.

4.8.2. Conditions expérimentales

Cinq canaux rectangulaires ont été usinés en faisant varier R_b de 5Ω à 500Ω . Le parcours d'usinage en XY est le même que dans la section 4.5. La profondeur de consigne H_c est de $160 \mu\text{pas}$; la profondeur de passe h est de $1 \mu\text{pas}$. L'outil a un diamètre de $9 \mu\text{m}$ avec un facteur de forme F_f supérieur à 50 (Figure 144). La tension d'usinage, la capacité de travail et la vitesse d'usinage valent respectivement 50 V , 1 nF et $156 \mu\text{m/s}$. Les conditions expérimentales sont résumées dans le Tableau 26. Les canaux sont moulés avec du PDMS.

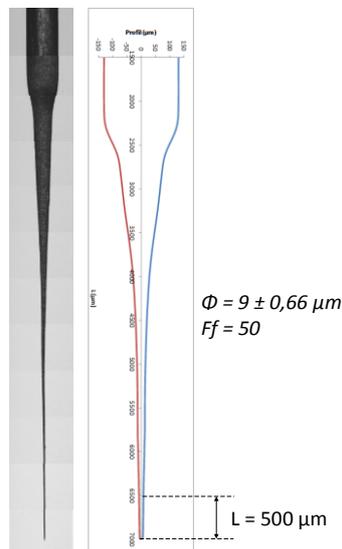


Figure 144 – Micro-outil $\phi 9 \mu\text{m}$: (a) vue optique ; (b) caractérisation au profilomètre laser.

Générateur RC	Circuit de caractérisation	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none"> - $V_{EE} = 50\text{V}$ - $C_C = 1 \text{ nF}$ - $R_C = 100 \Omega$ - $R_b = 5\text{-}20\text{-}100\text{-}200\text{-}500 \Omega$ 	<ul style="list-style-type: none"> - $V_{\text{Ref}+} = 1,4 \text{ V}$ - $V_{\text{Ref}-} = 0,1 \text{ V}$ - $V_{\text{Cont}} = 0,1 \text{ V}$ - Diviseur = 30 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation : GBF - Commande : sinus - Amplitude : 1 V - Décalage : $- 500 \text{ mV}$ - Fréquence : 100 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau déionisée - Electrode $\phi = 9 \mu\text{m}$ - Entrefer initial $\phi = 5 \mu\text{m}$ - Profondeur de passe $h = 1 \mu\text{pas}$ - Profondeur de consigne $H_c = 50 \mu\text{m}$ - Vitesses $V_x V_y = 156 \mu\text{m/s}$ - Usinage : canaux rectangles $L = 500 \mu\text{m}$; $W = 100 \mu\text{m}$

Tableau 26 – Paramètres d'usinage – Effet la résistance de ballast R_b .

4.8.3. Résultats expérimentaux

a) Caractérisations optiques

La Figure 145 montre une vue de dessus des motifs usinés et une vue de face des motifs moulés en PDMS (caméras de la machine de μ EE). En première analyse, les bords des canaux paraissent plus nets lorsque R_b augmente. Néanmoins, la Figure 146 et la Figure 147, qui montrent respectivement une vue au MEB des motifs usinés dans l'acier et de leur moulage en PDMS, ne permettent pas de conclure sur une amélioration des états de surface avec l'accroissement de R_b .

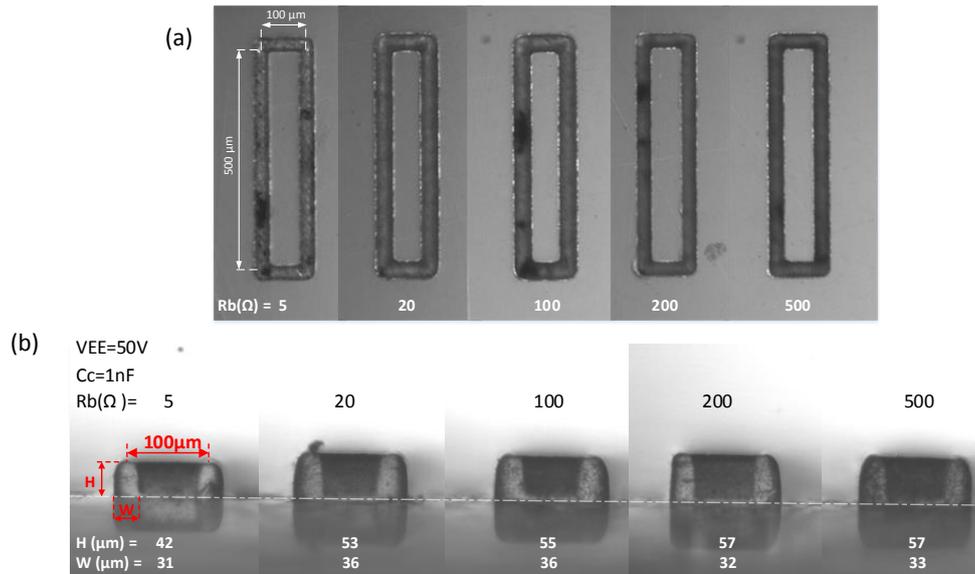


Figure 145 – Usinage de canaux avec différentes résistances de ballast de 5 à 500 Ω . (a) Vue de dessus des canaux usinés ; (b) vue de face des motifs en PDMS (reflets sur le substrat délimités par le pointillé). Caméras de la machine de μ EE.

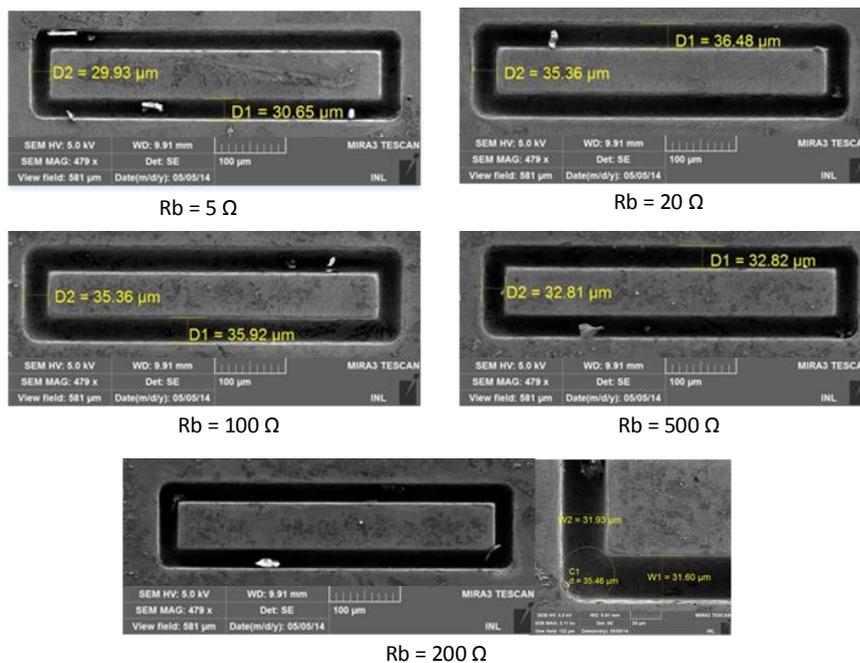


Figure 146 – Images au microscope électronique à balayage des canaux usinés.

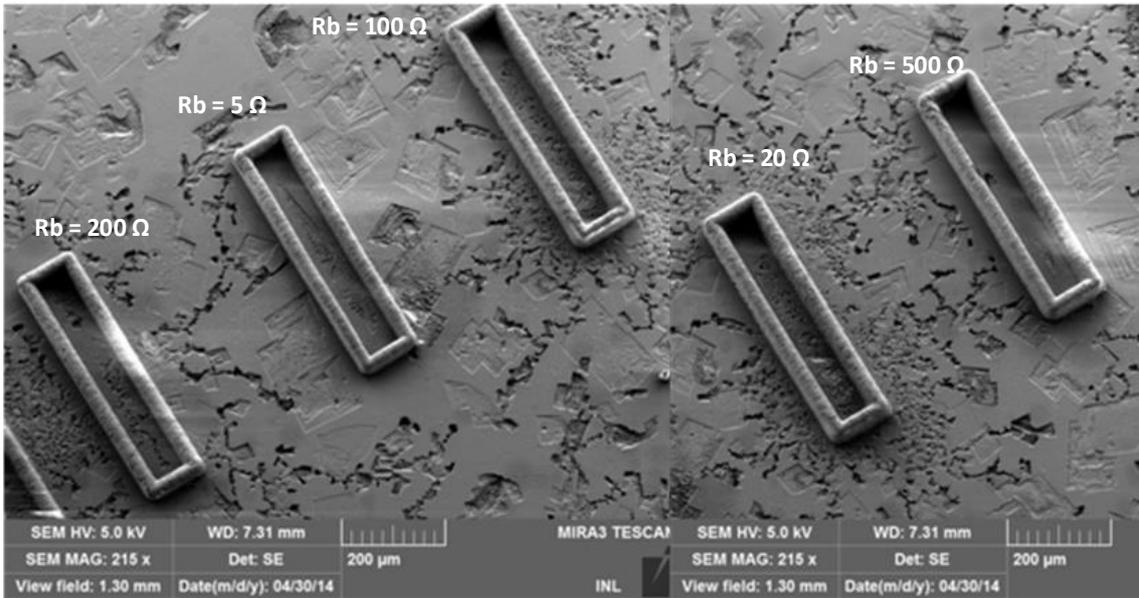


Figure 147 – Images au microscope électronique à balayage des motifs moulés en PDMS.

La Figure 148 montre que la profondeur H des canaux usinés augmente avec R_b puis atteint une valeur limite autour de 55-57 μm dès que R_b dépasse 20 Ω . La largeur W des canaux ne paraît pas affectée par R_b (mais ce point mériterait confirmation).

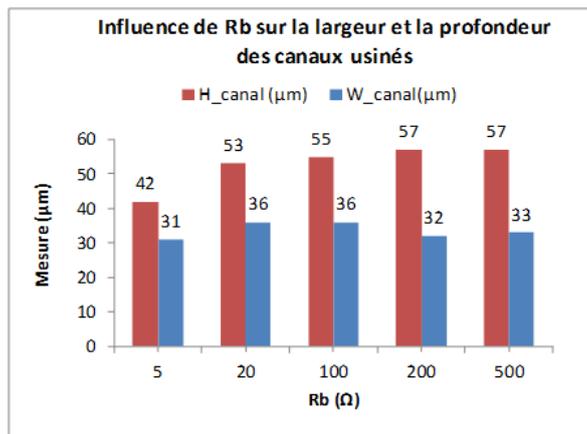


Figure 148 – Influence de R_b sur la profondeur H et la largeur W des canaux usinés (par recoupement des caractérisations optique et MEB sur les pièces usinées et moulées).

b) Caractérisations électriques à l'oscilloscope numérique

La Figure 149 montre la capture d'écran de décharges types¹ enregistrées à l'oscilloscope Tektronix DPO2024 en faisant varier R_b . Elles sont caractérisées par :

- la chute de potentiel ΔU entre le point haut de la capacité de travail et la masse (en vert)² ;
- le courant à travers l'outil (en violet) caractérisé notamment par la valeur crête I_d .

La chute de tension et le courant crête diminuent chacun d'un ordre de grandeur lorsque R_b passe de 5 à 500 Ω .

¹ Une étude statistique sur un plus grand nombre de décharges est prévue à la section 0.

² Afin de pouvoir détecter les décharges de faible intensité, le déclenchement de l'oscilloscope est effectué en mode AC avec la sonde de tension.

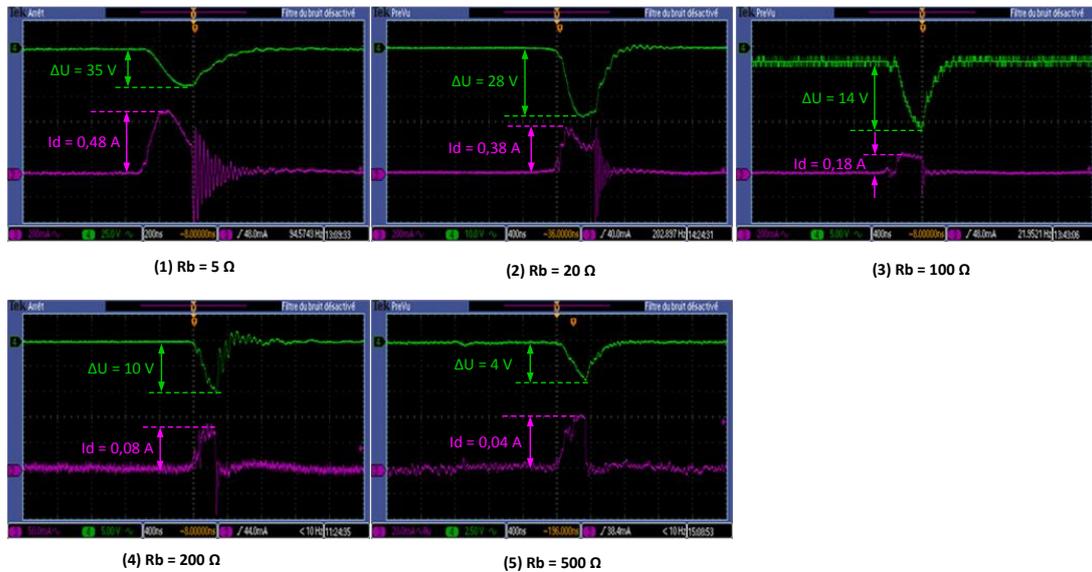


Figure 149 – Décharges types mesurées à l'oscilloscope numérique Tektronix DPO2024 avec : (1) $R_b = 5 \Omega$; (2) $R_b = 20 \Omega$; (3) $R_b = 100 \Omega$; (4) $R_b = 200 \Omega$; et (5) $R_b = 500 \Omega$.

Pour les différentes valeurs de R_b , l'énergie par décharge a été estimée en intégrant les données de l'oscilloscope numérique et en faisant la différence entre :

- l'intégrale du courant et de la tension aux bornes de C_C ;
- l'énergie dissipée par effet Joule dans R_b .

En écrivant cela, on suppose que l'ensemble « capacité de charge C_C – outil – entrefer - pièce » est isolé électriquement du générateur et qu'il y a un simple transfert d'énergie entre C_C et le plasma dans l'entrefer. Pendant une décharge, le courant est donc considéré comme nul dans la résistance de charge R_C . Dans l'air, cette approximation n'est valable que pour des décharges de courte durée [13].

Dans tous les cas, l'énergie dissipée par effet Joule correspond à moins de 1 % de l'énergie transmise par la capacité premier : la perte d'énergie par effet Joule dans R_b est donc négligeable pour les décharges considérées.

En conclusion, l'introduction de la résistance de ballast permet de réduire l'énergie par décharge d'environ $4,1 \mu\text{J}$ pour $R_b = 5 \Omega$ à 29 nJ pour $R_b = 500 \Omega$ (Figure 150). Cette énergie est suffisante pour creuser l'acier inoxydable et aboutir à un canal parfaitement défini.

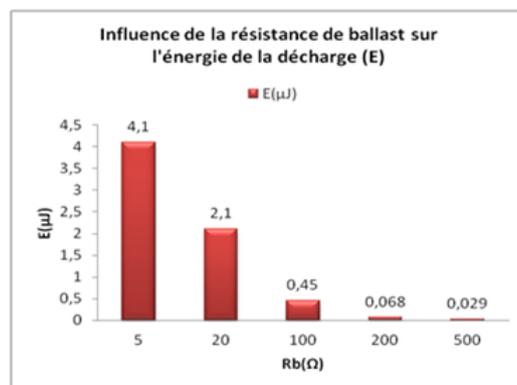


Figure 150 – Energie de décharges types en fonction de la résistance de ballast.

c) Caractérisations électriques avec la carte de caractérisation

La Figure 151 montre que le nombre total de décharges détectées avec le circuit de caractérisation diminue si la résistance de ballast augmente. Pour une valeur de R_b de 500Ω , plus aucune décharge n'est détectée. En réalité, pour cette valeur de R_b , la chute de tension mesurée en parallèle à l'oscilloscope numérique est de 4 V , donc inférieure à la valeur de 8 V nécessaire pour faire basculer les comparateurs. **Les décharges sont présentes mais le circuit de caractérisation ne les détecte pas**¹.

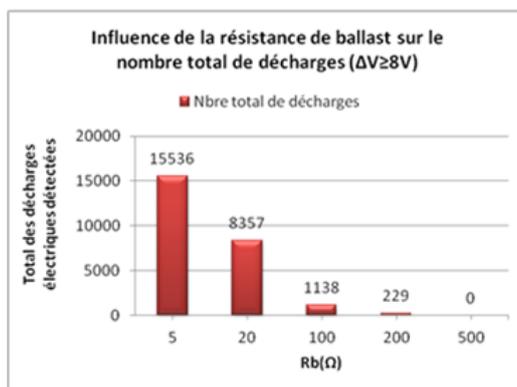


Figure 151 – Nombre de décharges détectées en fonction de la résistance de ballast : mise en évidence des insuffisances du circuit de caractérisation.

d) Enlèvement de matière et usure de l'outil

Les données de la section précédente ont permis d'évaluer le taux d'enlèvement de matière TEM en fonction de R_b . L'usure de l'outil TUO a été mesurée optiquement (Figure 152), ce qui a permis d'évaluer l'usure relative de l'outil TURO. Les résultats résumés au Tableau 26 montrent que le TURO diminue rapidement dès que R_b augmente. Pour une valeur de R_b supérieur à 100Ω , l'usure relative (difficile à mesurer avec les moyens de caractérisation disponibles) est inférieure à 0.01% .

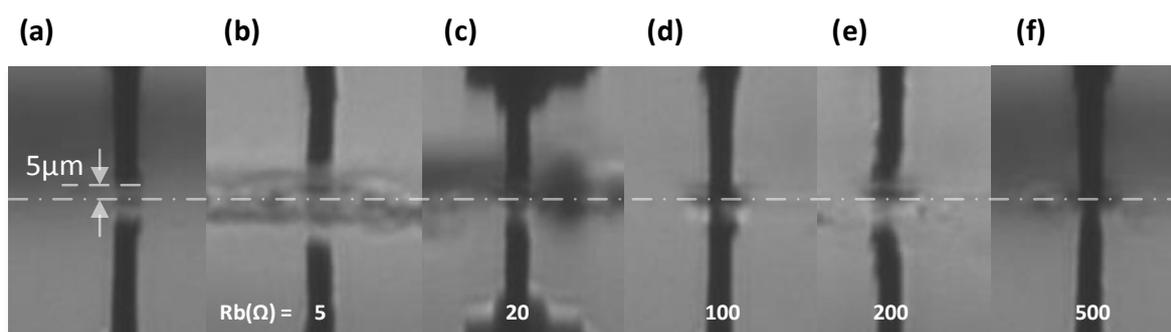


Figure 152 – (a) Entrefere initial à l'air. (b) à (f) Usure de l'outil pour différentes valeurs R_b .

¹ Le circuit de caractérisation n'était pas prévu à l'origine pour fonctionner avec un générateur à résistance de ballast.

Rb (Ω)	TEM ($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	TUO ($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	TURO (%)
5	6,2	30,0	0,05
20	9,1	24,0	0,03
100	9,4	< 1,0	< 0,01
200	8,7	< 1,0	< 0,01
500	9,0	< 1,0	< 0,01

Tableau 27 – Influence de Rb sur l'enlèvement de matière et l'usure de l'outil.

e) Estimation du gap vertical et du gap latéral

L'évolution de l'usure de l'outil avec R_b permet d'expliquer pourquoi la profondeur H des canaux augmente lorsque Rb passe de 5 à 20 Ω puis atteint une valeur limite. En effet, H est fonction de la profondeur de consigne H_c , de la valeur de l'entrefer initial φ , du gap vertical Y_v et de la hauteur usée de l'outil ψ_v .

En considérant les trois positions de l'outil décrites à la Figure 153, on peut écrire que :

$$\varphi + H + \Psi_v = Y_v + H_c \quad (16)$$

D'où on déduit que le gap vertical Y_v peut être évaluée à partir de :

$$Y_v = \varphi + H + \Psi_v - H_c \quad (17)$$

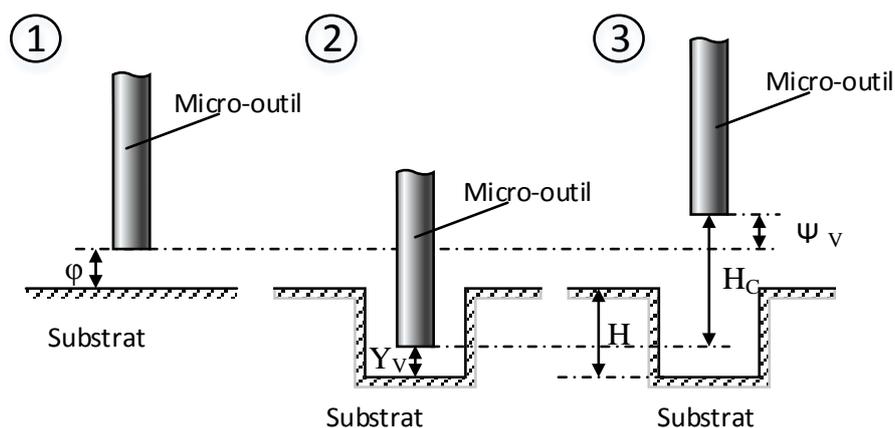


Figure 153 – (1) Outil en début d'usinage à l'entrefer initial ; (2) Outil en fin d'usinage à l'entrefer initial ; (3) Remontée de l'outil d'une valeur de H_c afin d'évaluer l'usure.

Dans nos conditions expérimentales, lorsque la résistance de ballast dépasse 100 Ω , l'usure de l'outil commence à devenir négligeable et il est alors normal que la profondeur

d'usinage atteint une valeur limite. Physiquement celle-ci est fixée par l'entrefer initial, la profondeur de consigne et le gap vertical.

Il est possible de déduire l'ordre de grandeur du gap vertical à partir de la relation (17).

Le résultat est donné dans le tableau suivant :

R_b (Ω)	H_c (μm) consigne	φ (μm) consigne	H (μm) mesuré	Y_v (μm) mesuré	ψ_v (μm) d'après (17)	Y_L (μm) mesuré
5	50	5	42	15	12	11,0
20	50	5	53	10	18	13,5
100	50	5	55	3	15	13,5
200	50	5	57	3	15	11,5
500	50	5	57	3	15	12,0

Tableau 28 – Estimation du gap vertical et latéral.

L'ordre de grandeur du gap vertical (Y_v) est en moyenne de 14,6 μm . Celui du gap latéral est en moyenne de 12,3 μm .

f) Nombre de décharges / cartographie des décharges

Etant donné les problèmes posés par la caractérisation en ligne à fort R_b (section 4.8.3.c), nous nous sommes limités à étudier le nombre de décharges générées pendant l'usinage pour une résistance de ballast de 5 Ω .

La Figure 154a montre le nombre total de décharges détectées en fonction de la profondeur d'enfoncement de l'outil (0 à 160 micropas). La progression est relativement linéaire. Il faut 15 536 décharges pour enlever un volume de 1 860 000 μm^3 , soit environ $0,84 \times 10^7$ décharges/ mm^3 .

Si l'on suppose que l'énergie moyenne par décharge est de 4,1 μJ , on obtient un coefficient d'arrachement de 29 $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$.

La Figure 154b montre une fluctuation du nombre de décharges détectées par tranche de 10 micropas d'épaisseur, avec une moyenne de 967 ± 232 décharge. Cette information pourrait être utilisée à l'avenir pour mieux définir la consigne de descente.

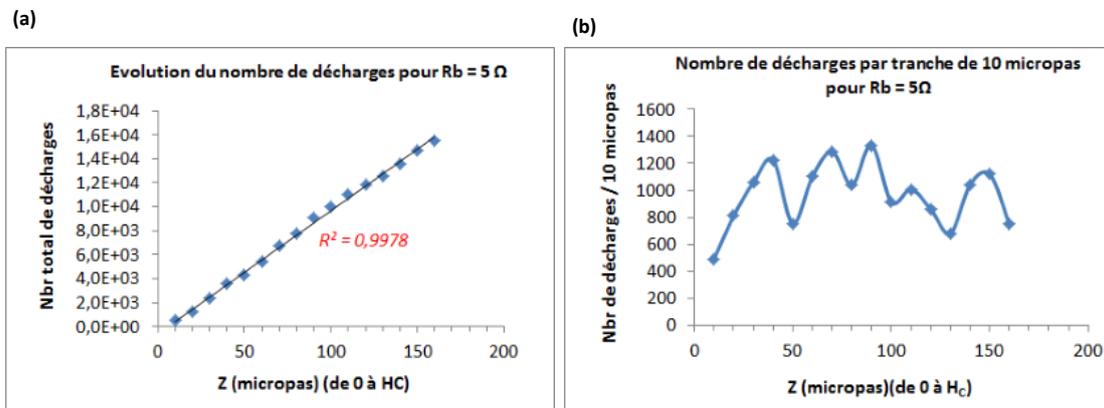


Figure 154 – (a) Evolution du nombre total de décharges suivant l'axe Z pour $R_b = 5 \Omega$. (b) Nombre de décharges détectées par tranches de 10 μpas pour $R_b = 5 \Omega$.

4.8.4. Conclusion

Dans cette étude nous avons démontré qu'il est possible d'usiner avec un outil de 9 μm de diamètre sans l'endommager. Peu de publications font état d'usinage avec des outils de diamètre inférieur à 10 μm [166].

Par ailleurs l'introduction d'une résistance de ballast a permis de réduire notablement l'énergie par décharge. Des canaux avec un bon état de surface ont été obtenus, et ce y compris aux plus faibles valeurs d'énergie (~ 29 nJ/décharge avec R_b 500 Ω). Il existe peu de publications faisant état d'usinage avec des énergies inférieures à 100 nJ [57] [167].

Dès que la valeur de la résistance de ballast dépasse 20 Ω , l'usure relative de l'outil est inférieure à 0.01 %. Ce résultat est important car une usure incontrôlée des micro-outils dégrade la précision d'usinage et constitue l'un des points bloquants en μEE [21], [168]–[174]. De nombreuses stratégies d'usinage (plus ou moins complexes) ont été publiées pour tenter de contourner ce problème [170], [172]–[175].

Pour expliquer la diminution de l'usure de l'outil avec la résistance de ballast, on peut constater que celle-ci impose instantanément une chute de tension à ses bornes, ce qui a pour effet de relever le potentiel de l'outil. Pour une tension de 50 V, on élimine ainsi toute possibilité d'inversion de polarité aux bornes de la capacité de travail C_C (Figure 63b). Cela pourrait expliquer au moins partiellement la diminution de l'usure des micro-outils : on sait en effet que les inversions de polarité sont une des causes d'usure.

Le gap vertical et le gap latéral ne varient pas dans nos conditions expérimentales avec R_b . Celle-ci ne paraît donc pas être la solution pour améliorer la résolution d'usinage. Néanmoins des canaux de 31 à 36 μm de largeur avec un rapport d'aspect de 2 ont été usinés dans l'acier inoxydable.

Lorsque R_b augmente de 5 à 500 Ω , l'énergie par décharge diminue mais nous n'avons pas pu vérifier si le nombre de décharges augmente en parallèle. En effet la carte de caractérisation des décharges est mise en défaut dès que R_b est supérieur à 100 Ω . Pour résoudre ce problème, des solutions seraient de diminuer le rapport d'atténuation du pont diviseur ou d'introduire une commande automatique de gain. Une autre possibilité, plus prometteuse, serait de développer un circuit de caractérisation permettant de détecter non seulement l'occurrence mais aussi l'énergie des décharges.

En réalité, nous allons voir ci-dessous qu'il y a plusieurs types de décharges possibles. L'objet de la section suivante sera de caractériser les décharges avec résistance de ballast à l'aide d'un oscilloscope numérique plus performant.

4.9. Usinage d'une cavité / Effet de la résistance de ballast

4.9.1. Objectif

Dans cette section, nous allons procéder à une étude statistique de l'énergie des décharges en fonction de la résistance de ballast. Celles-ci seront caractérisées avec un oscilloscope numérique LECROY HDO6104-MS de bande passante 1 GHz avec 2,5 Géch/s sur 4 voies. Une mémoire interne permet de procéder à des enregistrements par segments de mémoire avec un écart de temps de 1 μ s entre eux. Dans cette expérience, chaque segment correspond à l'enregistrement sur déclenchement de 10 signaux (décharges) se produisant les uns à la suite des autres. Le nombre de segments peut varier de 2 à 30 000. Un point important est la numérisation qui est effectuée sur 12 bits au lieu de 8 bits avec l'oscilloscope précédent.

4.9.2. Conditions expérimentales

Deux cavités de 960 x 960 μ m ont été usinées respectivement avec une résistance de ballast R_b de 0 et 100 Ω . L'outil a un diamètre de 250 μ m. Le parcours d'usinage en XY (Figure 155) est effectué à la vitesse 312 μ m/s. avec un recouvrement latéral de 75 % (décalage de 20 μ m). La profondeur de consigne H_c est de 18 μ pas (5,6 μ m) seulement mais cette fois-ci la profondeur de passe h est de 3 μ pas. L'usinage est donc limité à 6 couches. L'entrefer initial est de 5 μ m. La tension d'usinage est de 50 V. La capacité de travail est de 10 nF. Les conditions expérimentales sont résumées dans le Tableau 29.

Le parcours d'outil décrit un mouvement en aller-retour avec rotation de 90° à chaque couche. La descente en Z est effectuée en un coin de la cavité mais celui-ci change à chaque rotation.

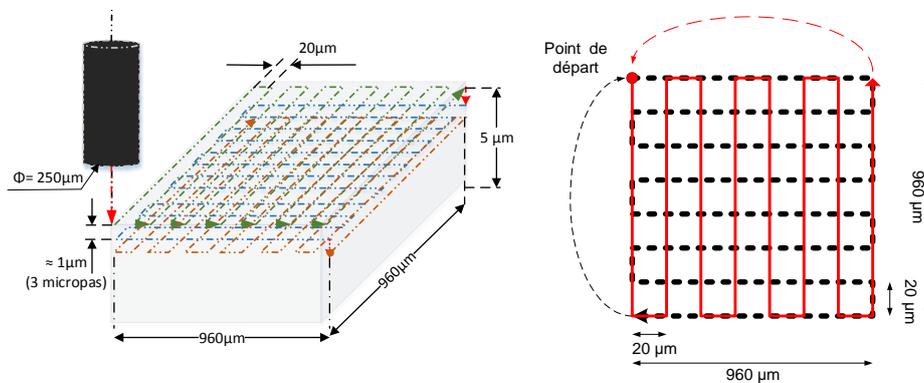


Figure 155 – Illustration du parcours d'outil pour l'usinage de la cavité carrée.

Générateur RC	Circuit de caractérisation	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none"> - $V_{EE} = 50V$ - $C_C = 10 \text{ nF}$ - $R_C = 100 \Omega$ - $R_b = 0 \Omega$ et 100Ω 	<ul style="list-style-type: none"> - $V_{Ref+} = 1,4 \text{ V}$ - $V_{Ref-} = 0,1 \text{ V}$ - $V_{Cont} = 0,1 \text{ V}$ - Diviseur = 30 	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation : GBF - Commande : sinus - Amplitude : 1 V - Offset : - 500 mV - Fréquence : 100 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau déionisée - Electrode $\phi = 250 \mu\text{m}$ - Entrefer initial $\phi = 5 \mu\text{m}$ - Profondeur de passe $h = 1 \mu\text{pas}$ - Profondeur de consigne $H_c = 18 \text{ micropas}$

			<ul style="list-style-type: none"> - Taux de recouvrement R% = 75 - Vitesses $V_x V_y = 312$ $\mu\text{m/s}$ - Usinage : cavité carrée L = $960 \mu\text{m}$; W = $960 \mu\text{m}$
--	--	--	---

Tableau 29 – Paramètres d'usinage – Usinage d'une cavité sans et avec R_b .

4.9.3. Résultats expérimentaux

a) Caractérisation optique

La Figure 156a montre une vue de dessous de la cavité usinée sans résistance de ballast (caméra de la machine de μEE). On note la présence de deux régions d'apparence différente. Une zone d'aspect « lisse ». Une zone avec des points brillants correspondant à des cratères importants laissés par les décharges électriques.

La Figure 156b montre l'usinage avec la résistance de ballast de 100Ω . On retrouve les régions mais les points brillants sont plus petits. L'image est moins contrastée que précédemment et l'état de surface est beaucoup plus régulier.

Qualitativement, on peut dire que l'introduction d'une résistance de ballast permet d'améliorer l'état de surface de la cavité, ce qui s'explique par la réduction de l'énergie par décharge. On notera que la surface du micro-outil n'a pas été arasée, d'où les défauts d'usinage aux coins des cavités.

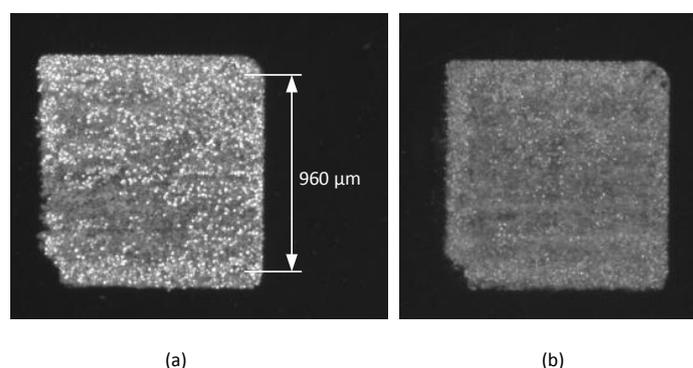


Figure 156 – Etat de surface d'une cavité usinée. (a) $R_b = 0 \Omega$. (b) $R_b = 100 \Omega$.

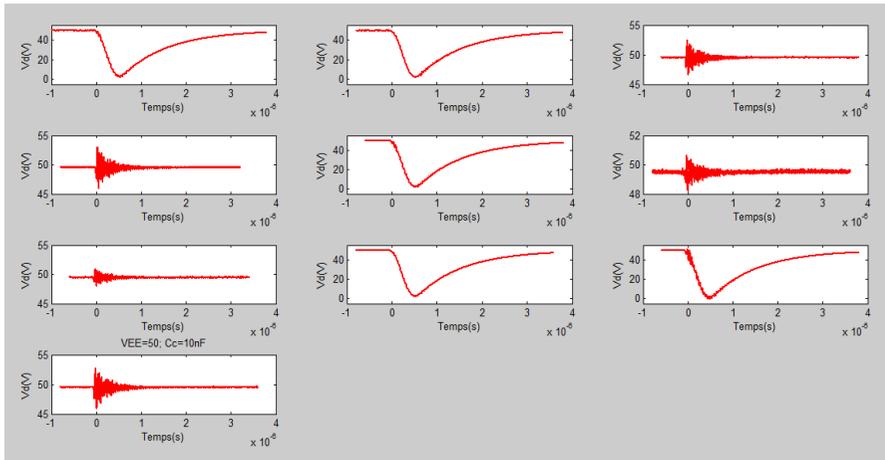
b) Caractérisation avec l'oscilloscope numérique

La Figure 157 montre les captures d'écran à l'oscilloscope de deux segments de mémoire avec 10 décharges par segment enregistrées respectivement avec $R_b = 0 \Omega$ et $R_b = 100 \Omega$. Nous avons mesuré à chaque fois, la chute de tension aux bornes de C_C et la variation du courant à travers le micro outil à l'aide de la sonde de courant à effet Hall.

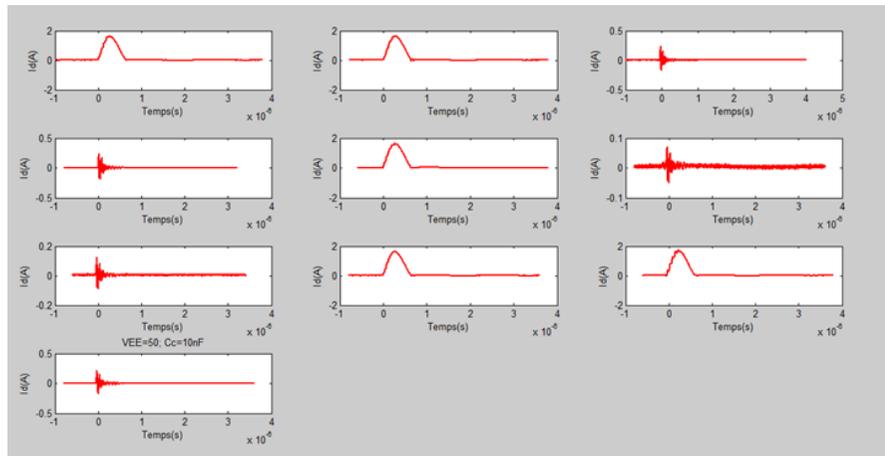
Deux types de signaux sont observés :

- Les signaux dits du type A (Figure 158) correspondant à des décharges d'allure conventionnelle présentes pour les valeurs de R_b 0Ω et 100Ω (avec un plateau de courant pour R_b 100Ω qui sera discuté ci-dessous).
- les signaux « non conventionnels » dits du type B (Figure 159) présents pour les valeurs de R_b 0 et 100Ω .

(a) $R_b = 0 \Omega$

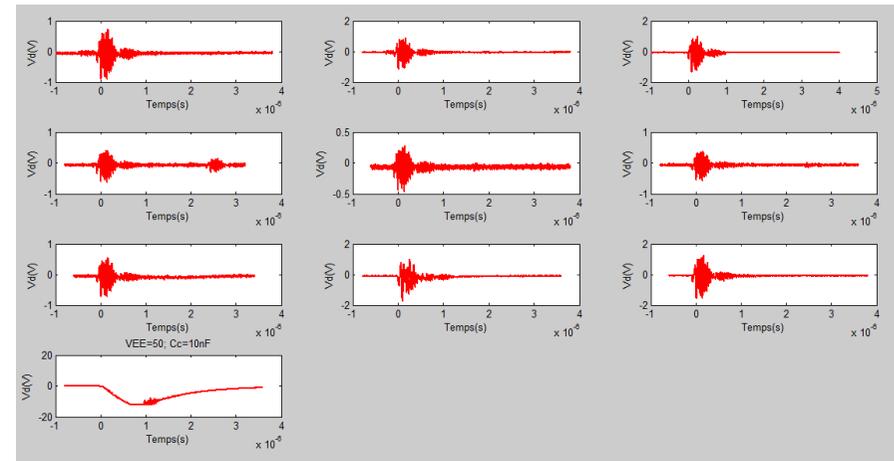


Tension aux bornes de la capacité de travail.

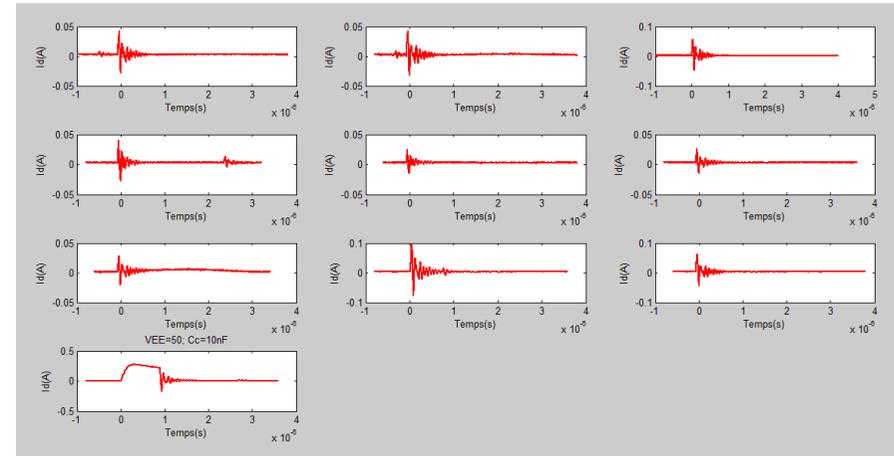


Courant des décharges.

(b) $R_b = 100 \Omega$



Tension aux bornes de la capacité de travail.



Courant des décharges.

Figure 157 – Enregistrement des signaux des décharges pour des usinages avec et sans résistance de ballast (oscilloscope LECROY).

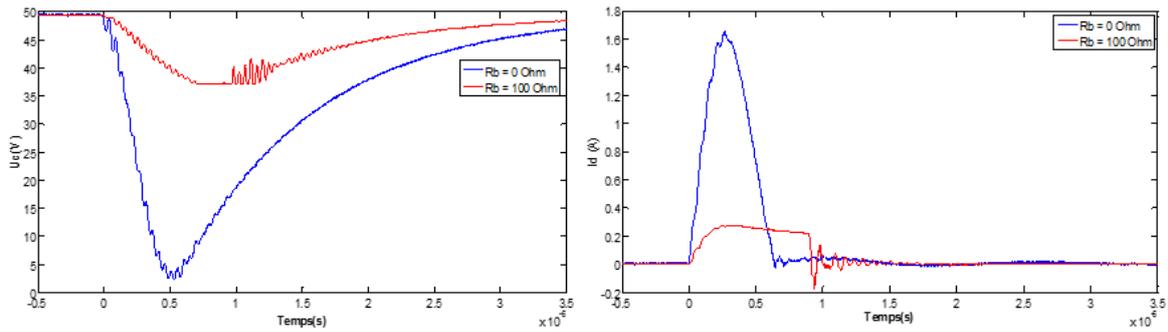


Figure 158 – Décharges de type A pour les valeurs de R_b 0 et 100 Ω .

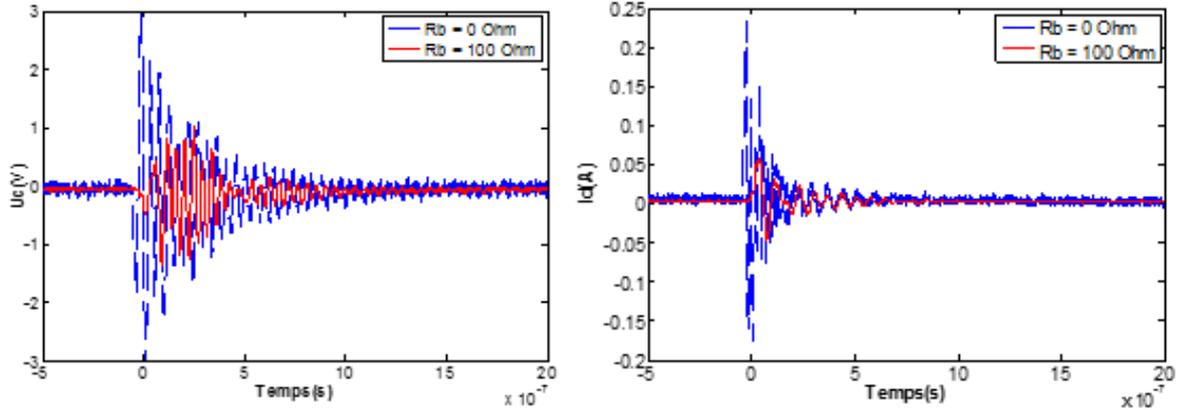


Figure 159 – Signaux de type B pour les valeurs de R_b 0 et 100 Ω .

L'énergie par décharge de type A a été calculée par Intégration du produit courant tension au cours du temps (Figure 160). Elle passe d'environ 20 μJ /décharge pour R_b 0 Ω (valeur couramment trouvée dans la littérature) à 2 μJ /décharge pour R_b 100 Ω .

Pour R_b 100 Ω , on note un allongement de la durée de la décharge (600 à 900 ns) avec la présence du plateau de courant. Ce phénomène avait été déjà observé par G. Girardin pour des décharges dans l'air [13], [109] et avait été attribué au fait que le générateur de tension alimente le plasma durant la phase plateau. Physiquement on passe d'un régime d'arc instable à un régime plus stable. D'après la bibliographie, il est possible d'observer des décharges lumineuses dans l'air en limitant le courant avec une résistance [176].

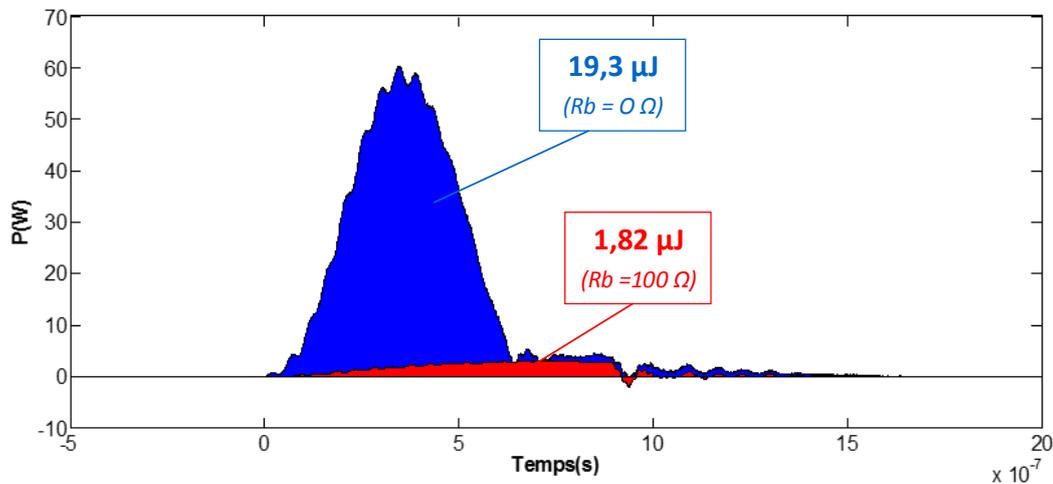


Figure 160 – Puissance instantanée véhiculée par les décharges de type A pour les valeurs de R_b 0 et 100 Ω .

L'énergie impliquée pour les signaux de type B est 1000 fois plus faible que pour les signaux de type A (Figure 161) et peut descendre jusqu'à 4 nJ/signal. Bien que cette valeur soit compatible avec un enlèvement de matière, nous n'avons aucune preuve directe sur la nature physique de ces signaux. Dans la suite du chapitre nous utiliserons le terme « décharge de type B » pour simplifier le langage. En effet, il peut s'agir de décharges électriques, d'amorces (streamers), d'usinage électrochimique (Figure 36) ou même de bruit électrique sans effet sur le creusement de la pièce. Une étude physique à l'aide d'une caméra iCCD serait nécessaire pour pouvoir étudier directement les streamers et les décharges et conclure sur la nature du mécanisme d'usinage. Il est de plus évident que l'impédance des câbles vient compliquer la forme des signaux électriques. Quoiqu'il en soit l'usinage par des décharges de très faible énergie est rarement mentionné dans la littérature [166], [167].

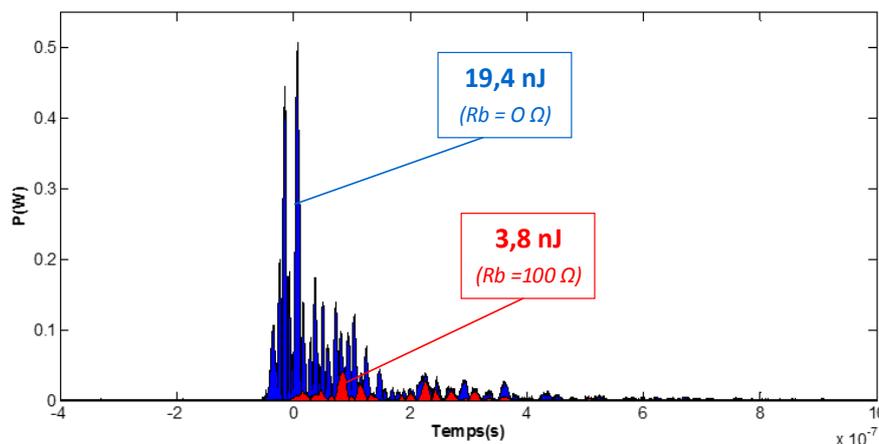


Figure 161 – Puissance véhiculée par les signaux de type B pour R_b 0 et 100 Ω .

La Figure 162 montre la répartition du nombre de décharges en fonction de leur énergie¹ sur un total de 210 décharges. Les enregistrements des décharges en courant et en tension ont été examinés un par un.

Pour $R_b = 0 \Omega$, on note la prédominance de décharges d'énergie 1-2 μJ et 10-15 μJ , qui sont toutes de type A. On trouve une distribution de fréquence d'énergie à deux pics comme déjà rapporté dans la littérature [177]. La chute de potentiel en moyenne est de $48,7 \pm 1,3 \text{ V}$.

Pour $R_b = 100 \Omega$, on note la prédominance de décharges de 0,5-10 nJ et 0,5-5 μJ . L'analyse des signaux électriques montre que les décharges de 0,5-5 μJ sont toutes des décharges de type A avec une chute de potentiel en moyenne de $10,8 \pm 1,6 \text{ V}$. Les décharges de 0,5-10 nJ sont toutes de type B.

¹ L'énergie est calculée par intégration de la puissance instantanée comme discuté plus haut.

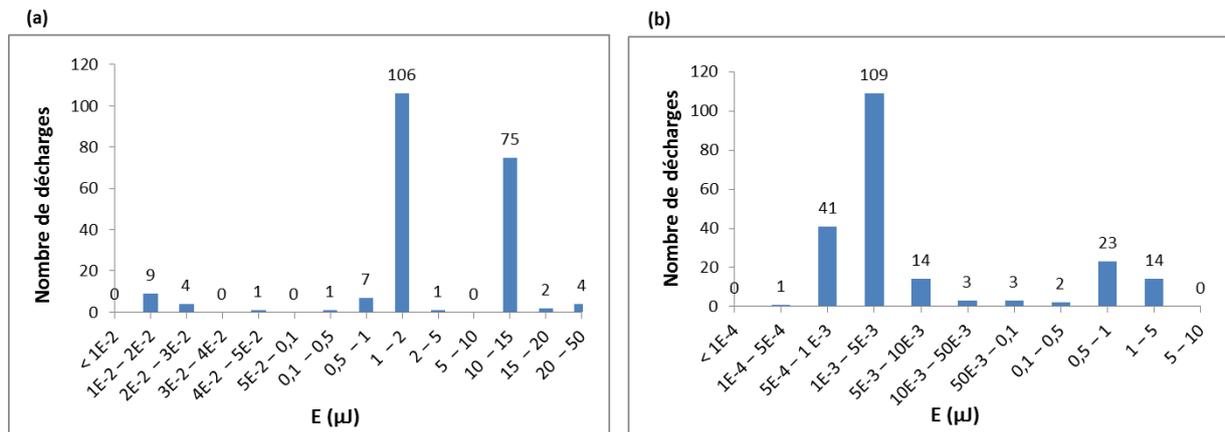


Figure 162 – Etude statistique des décharges détectées à l’oscilloscope numérique suivant leur énergie pour Rb 0 et 100 Ω (échantillon de 210 décharges).

Un seuil de discrimination de 8 V permettra donc de détecter toutes les décharges de type A pour les deux valeurs de la résistance de ballast. Nous avons par ailleurs vérifié que toutes les décharges de type B sont indétectables par la carte de caractérisation pour les deux valeurs de la résistance de ballast. Autrement dit, la carte de caractérisation ne détecte que les décharges de type A.

c) Caractérisation avec la machine de μEE.

Nous avons tracé à la Figure 163 la cartographie spatiale des décharges pour les cavités usinées avec Rb 0 et 100 Ω, et ce pour les six couches usinées. Chaque point dans le plan XY correspond à une décharge de type A. Les décharges de type B ne sont pas détectées.

Pour $R_b = 0 \Omega$, la distribution des décharges de type A est inhomogène. La 2^{ème} couche présente un grand nombre de décharges car l’énergie par décharge est importante. Le nombre de décharges par couche change de manière importante d’une couche à l’autre.

Pour $R_b = 100 \Omega$, l’énergie des décharges de type A est plus petite que précédemment. Moins de décharges sont détectées dans les premières couches puis leur nombre augmente progressivement avec une distribution dans l’espace XY un peu plus régulière.

Dans tous les cas, on note un grand nombre de décharges au bord des cavités.

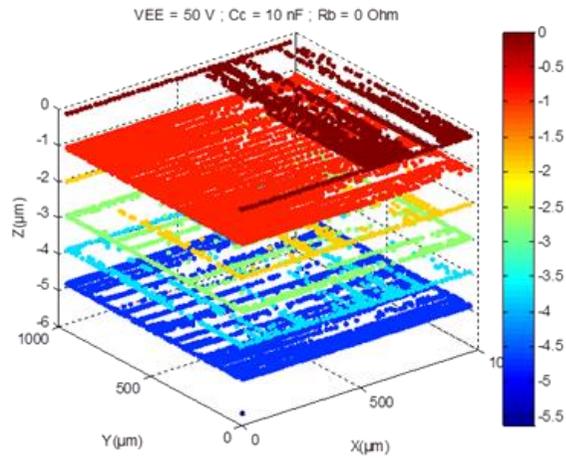
d) Superposition des caractérisations

Les données de la Figure 163 ont été retraitées en empilant les 6 couches et affichant le nombre de décharges de type A par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$: cf. Figure 164a pour Rb 0 Ω et Figure 164b pour Rb 100 Ω.

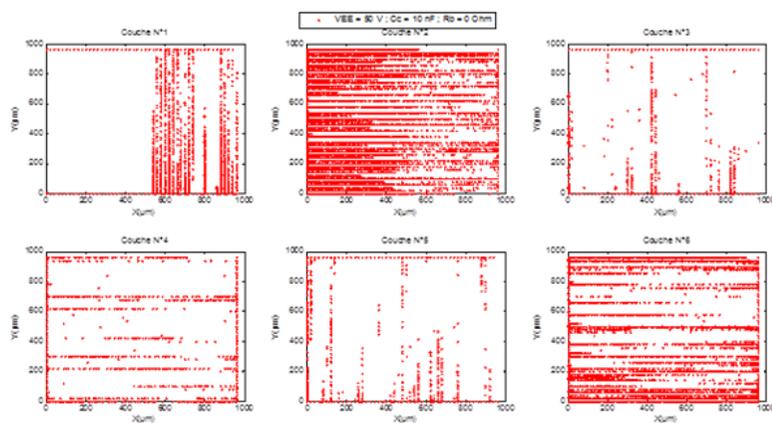
On observe une bonne concordance (d’ordre qualitatif) entre la position des décharges de type A et les zones avec des impacts importants. D’après ce qui précède, on peut supposer que les zones d’aspect plus lisse correspondent aux décharges de type B.

Comme prévu les impacts de décharges de type A sont plus petits avec R_b que sans R_b car on sait que l’énergie par décharges est plus petite.

(a) $R_b = 0 \Omega$

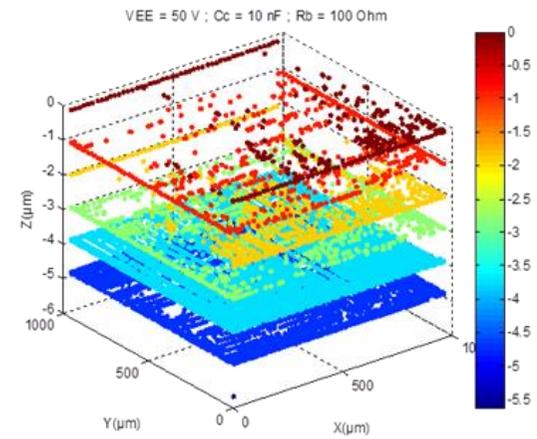


Distribution spatiale des décharges / Empilement des couches

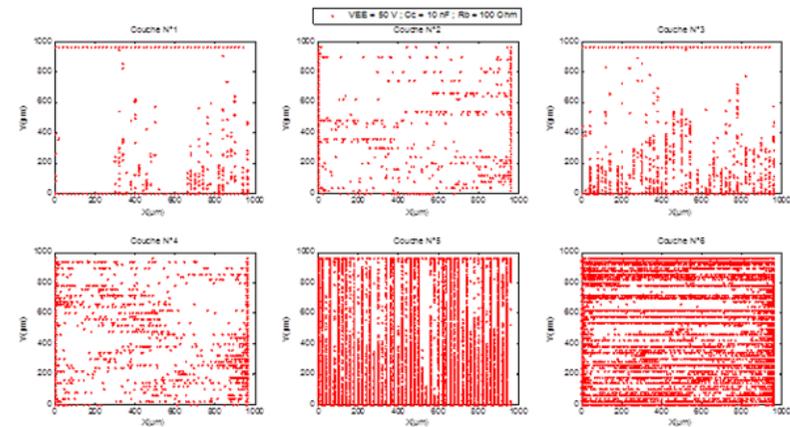


Distribution des décharges pour les 6 couches usinées

(b) $R_b = 100 \Omega$



Distribution spatiale des décharges / Empilement des couches



Distribution des décharges par les 6 couches usinées

Figure 163 – Reconstitution spatiale des décharges détectées de type A. (a) $R_b = 0 \Omega$. (b) $R_b = 100 \Omega$.

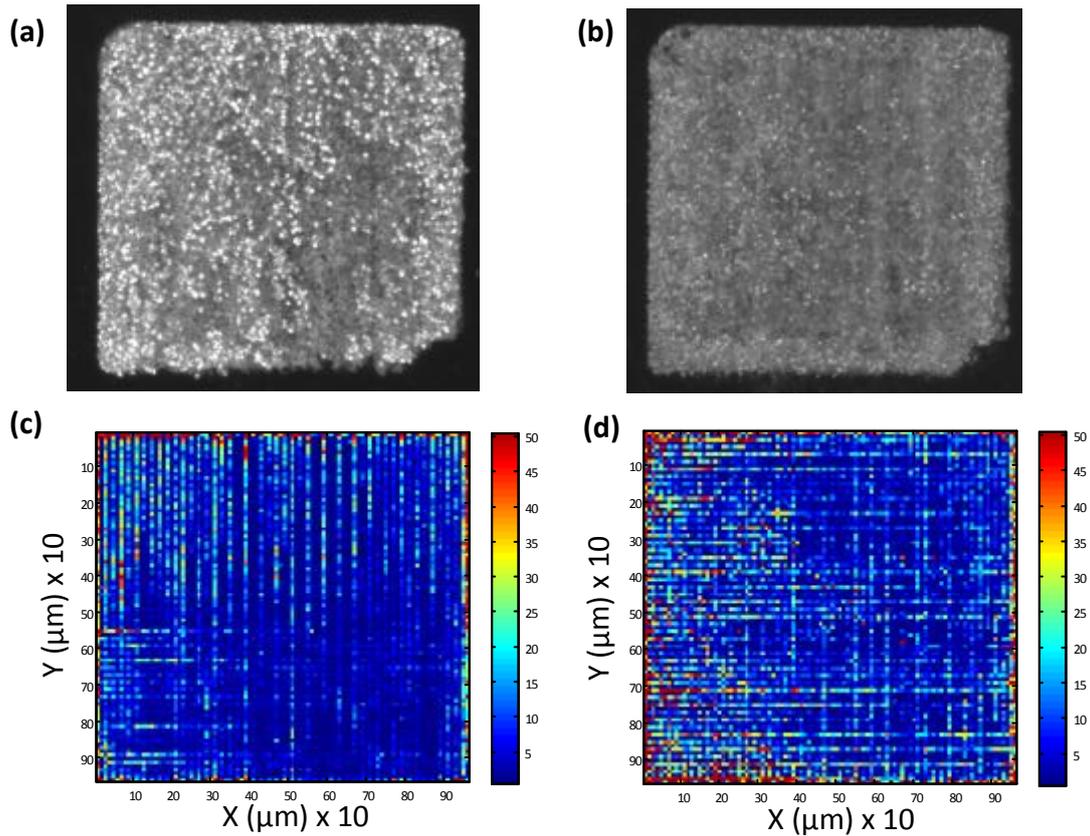


Figure 164 – (a) et (b) : vues optique de la cavité (cf. Figure 156). (c) et (d) : cartographie de décharges de type A par pixel de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ en XY, respectivement avec $R_b = 0 \Omega$ et $R_b = 100 \Omega$; chaque valeur représente la somme des décharges de type A pour les 6 couches de la Figure 163.

4.9.4. Conclusion

Nous avons donc mis en évidence deux types de signaux :

- Les signaux dits du type A (Figure 158) correspondant à des décharges d'allure conventionnelle
- les signaux « non conventionnels » dits du type B (Figure 159) présents pour les valeurs de R_b 0 et 100 Ω .

Ces signaux sont présents pour les valeurs de résistance de ballast 0 Ω et 100 Ω mais dans des proportions et avec des énergies différentes.

En l'absence de résistance de ballast, dans les conditions de l'expérience et sur l'échantillon considéré (210 décharges), 86 % des signaux sont de type A avec une prédominance de décharges de 1-2 μJ et 10-15 μJ . Les autres sont de type B avec une énergie inférieure.

En présence d'une résistance de ballast de 100 Ω , dans les conditions de l'expérience et sur l'échantillon considéré (210 décharges), 18 % des signaux sont de type A avec une

prédominance de décharges 0,5-5 μJ . Les autres sont de type B dont 79 % ont une énergie comprise entre 0,5-10 nJ.

Nous avons vérifié que la carte de la caractérisation du μC3 permet de caractériser toutes les décharges de type B (dans les limites décrites en section 2.2.4 e.). Elle ne détecte aucune décharge de type A.

Les cavités usinées pour $R_b = 0 \Omega$ et $R_b = 100 \Omega$ montrent deux régions d'apparence différente. Une zone avec des points brillants correspondant à des cratères importants laissés par les décharges électriques de type A. Une zone d'aspect « lisse » qui recouvre la régions où il n'y pas de décharges de type A et où l'on peut supposer que les décharges sont du type B. Comme prévu les cratères sont plus petits avec résistance de ballast que sans. Il y a une bonne concordance (d'ordre qualitatif) entre la cartographie des décharges en XY et les observations optiques.

En conclusion, l'ajout d'une résistance de ballast dans le circuit RC permet non seulement de diminuer l'énergie des décharges de type A, mais aussi d'augmenter le nombre des micro-décharges de très faible énergie de type B (quelques nJ). Cette diminution de l'énergie permet d'obtenir des surfaces de meilleure qualité.

Les énergies les plus faibles mentionnées par Sarix sont de 125 nJ/décharge (section 1.4.3.d), tandis que Mikrotool parvient à usiner avec des énergies de 30-60 nJ/décharge mais en utilisant la capacité parasite de la machine (section 1.4.3.e).

4.10. Usinage avec un micro-outil de 3 μm de diamètre

4.10.1. Objectif

Ici, nous procédons à des usinages avec un micro-outil de 3 μm de diamètre.

4.10.2. Conditions expérimentales

Nous avons utilisé une capacité de travail de faible valeur (100 pF et 1 nF) afin de limiter la quantité d'énergie des décharges. Ce choix n'est pas fortuit, car nous avons vu dans les sections précédentes (usinage avec résistance de ballast) que plus l'énergie de la décharge augmente plus l'usure de l'outil est forte.

Nous avons usiné trois canaux rectangulaires de la même forme en XY que celui de la Figure 119 mais avec des profondeurs de consigne H_c différentes : 5, 20 et 50 μm (l'entrefer initial reste inchangé à 5 μm). Ainsi le premier usinage se limite à effleurer simplement la surface puis l'on s'enfonce progressivement dans la matière lors des usinages suivants. La profondeur de passe est de 1 μpas avec un enfoncement qui a toujours lieu au même endroit. L'usinage a été réalisé à vitesse lente (104 $\mu\text{m/s}$). Le substrat est l'acier inoxydable de référence.

Les paramètres d'usinage sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Générateur RC	Caractérisation des décharges	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none">- $V_{EE} = 50 \text{ V}$- $C_C = 0,1 \text{ nF}$; 1 nF- $R_C = 100 \Omega$- $R_b = 0 \Omega$	<ul style="list-style-type: none">- $V_{Ref+} = 1,4 \text{ V}$- $V_{Ref-} = 0,1 \text{ V}$- $V_{Cont} = 0,1 \text{ V}$- Diviseur = 30	<ul style="list-style-type: none">- Voir section 2.2.4.d	<ul style="list-style-type: none">- Eau déionisée- Electrode $\Phi = 3 \mu\text{m}$- Entrefer initial $\varphi = 5 \mu\text{m}$- Profondeur de passe $h = 1 \mu\text{pas}$- Profondeur de consigne $H_c = 5 ; 20 \text{ et } 50 \mu\text{m}$- Vitesse $V_x V_y = 104 \mu\text{m/s}$- Usinage : canal rectangulaire $L = 500 \mu\text{m} ; W = 100 \mu\text{m}$

Tableau 30 – Paramètres d'usinage – Usinage de canaux avec un outil de 3 μm .

4.10.3. Résultats expérimentaux

a) Usinage avec une profondeur de consigne de 5 μm

La figure suivante montre les images MEB des canaux usinés avec une profondeur de consigne de 5 μm pour les deux valeurs de la capacité de travail. Comme indiqué précédemment, ce premier usinage se limite à effleurer simplement la surface puisque la valeur de l'entrefer initial est de 5 μm . La trace du canal est bien visible pour les deux usinages.

Dans le cas du canal usiné avec la capacité de travail de 0,1 nF, les images MEB montrent un canal central fin de largeur 6 μm constitué de micro-cratères laissés par les décharges électriques. Ce canal est entouré d'une bande plus lisse de largeur 16 μm . On se demande si la zone lisse n'est pas une zone nettoyée par le plasma, qui est généralement plus large que la zone affectée par la décharge électrique.

Sur les images de l'usinage réalisées avec une capacité de travail C_C de 1 nF, il y a essentiellement la bande lisse bien visible et de largeur 6 μm . A quelques endroits, on observe des cratères

Il serait nécessaire de répéter cette expérience à plusieurs reprises pour vérifier le caractère reproductible des résultats. Quoi qu'il en soit, dans les deux cas, l'usinage reste superficiel de sorte que le profilomètre mécanique du laboratoire ne permet pas de caractériser la profondeur d'usinage.

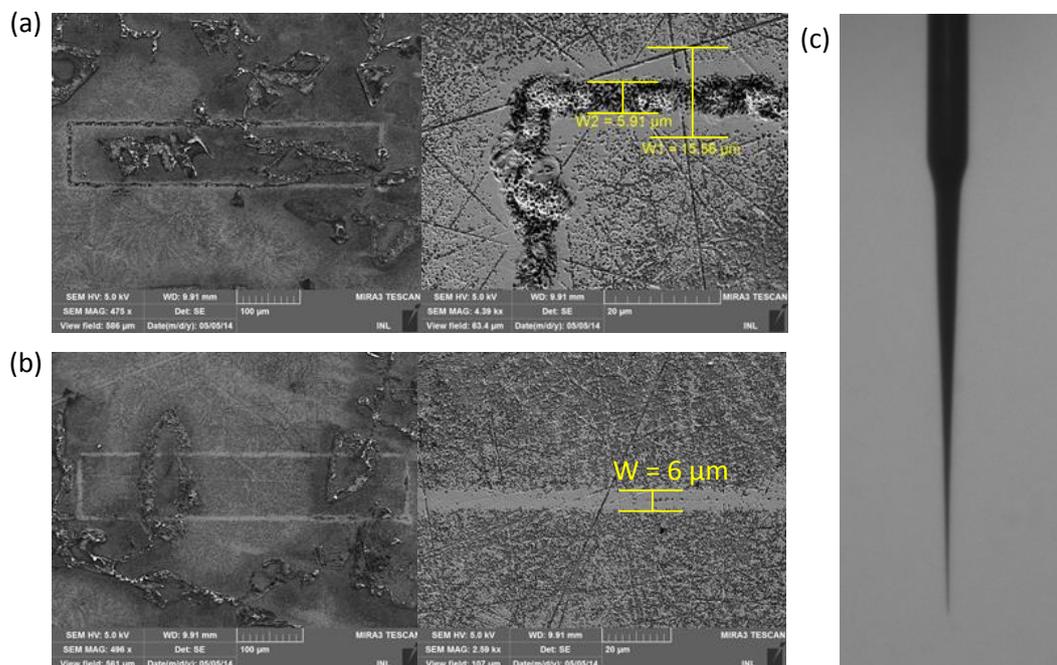


Figure 165 – Images des canaux usinées à $H_C = 5 \mu\text{m}$ avec : (a) $C_C = 0,1 \text{ nF}$; (b) $C_C = 1 \text{ nF}$; (c) vue de l'outil $\Phi 3 \mu\text{m}$ à la caméra 1.

b) Usinage par une profondeur de consigne de 20 μm

Le résultat des usinages est illustré par la Figure 166a et la Figure 166b pour les deux valeurs de capacités de travail. Cette fois-ci l'enfoncement est plus profond dans la pièce. Comme prévu, la trace du canal est plus nette que précédemment. L'usinage à 0,1 nF est plus net qu'à 1 nF. La largeur du canal est de l'ordre de 20 μm pour 0,1 nF et 17,5 μm pour 1 nF.

La longueur d'usure des micro-outils, mesurée à l'aide de la caméra 1, est montrée à la Figure 166c. On constate que l'électrode n'est pas endommagée et que la longueur usée est plus importante à 1 nF qu'à 0,1 nF, soit respectivement 7,5 μm et 6 μm . La longueur usée augmente avec l'énergie par décharge.

La profondeur d'usinage n'a pas été mesurée directement.

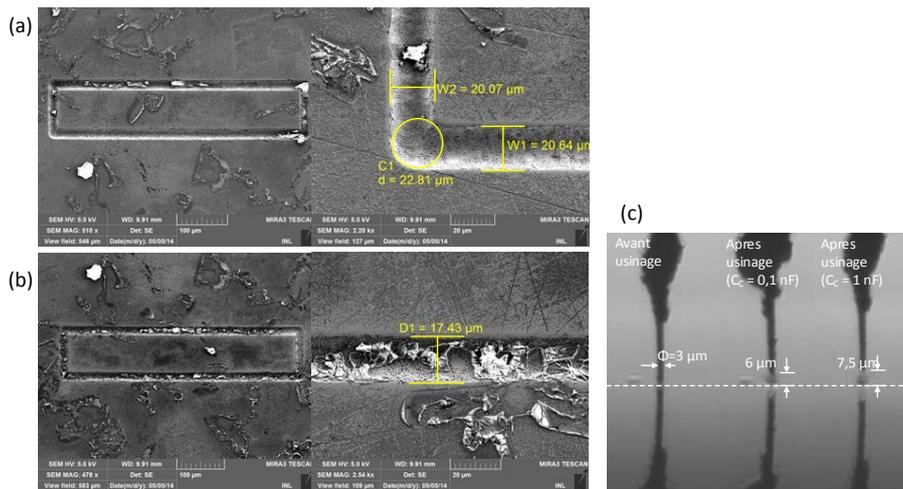


Figure 166 – Images des canaux usinées à $H_C = 20 \mu\text{m}$ avec : (a) $C_C = 0,1 \text{ nF}$; (b) $C_C = 1 \text{ nF}$; (c) longueurs d'usure du micro-outil.

c) Usinage par une profondeur de consigne de 50 μm

Les images à la caméra CCD des canaux usinés sont montrés à la Figure 167a pour les deux valeurs de capacité d'usinage. La différence de contraste entre les deux canaux s'explique par une différence de profondeur. On sait que le canal le plus sombre est le plus profond à cause de la difficulté que rencontre la lumière à éclairer une hauteur importante.

Cette hypothèse est appuyée par la Figure 167b qui montre que la longueur d'usure de l'outil dans le cas de l'usinage à 0,1 nF est nettement plus faible qu'à 1 nF. **Le canal usiné avec 0,1 nF est donc plus profond que celui usiné avec 1 nF**, ce qui est contre-intuitif puisque l'énergie par décharge est plus faible.

La Figure 167c montre les images MEB du canal usiné avec 0.1 nF. La largeur du canal est de l'ordre de 27,5 μm avec des bords nets. Compte tenu du diamètre de l'outil, la valeur du gap latéral est d'environ 12 μm , valeur comparable à celle trouvée à la section 4.8 avec un micro-outil de diamètre 9 μm .

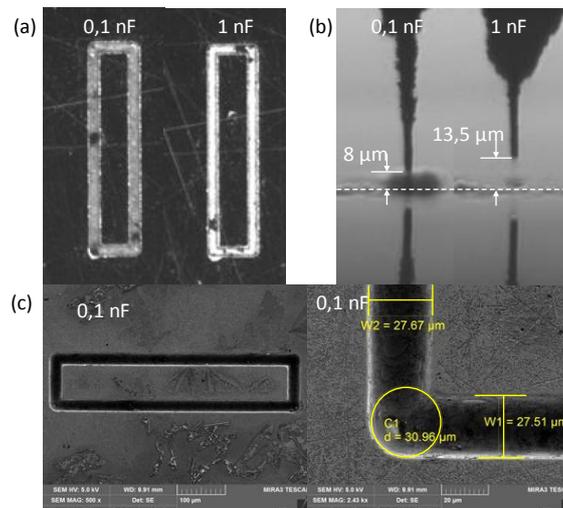


Figure 167 – (a) Images optiques des canaux usinées à $H_C = 50 \mu\text{m}$ avec : (b) longueur d'usure du micro-outil ; (c) Images MEB du canal usiné avec $C_C = 0,1 \text{ nF}$.

4.10.4. Conclusion

Cette série d'expériences démontre qu'il est possible d'usiner avec un micro-outil de 3 μm de diamètre sans l'endommager.

Les observations au MEB montrent que l'usinage est plus performant avec la capacité de 0,1 nF qu'à 1 nF. Cela peut paraître surprenant mais en réalité l'usinage dépend beaucoup de la longueur d'usure de l'outil. Comme celle-ci est plus petite avec une capacité de 0,1 nF, le canal usiné avec cette dernière est plus profond.

Nous n'avons pas observé de réduction de la largeur des canaux usinés avec de tels micro-outils. A faible profondeur de consigne, la largeur est de l'ordre de 20 μm mais elle passe rapidement à 30 μm dès que l'on enfonce le micro-outil. Ces valeurs ne sont pas très différentes de celles obtenues avec des micro-outils de diamètre 9 μm .

Bien évidemment, il conviendrait de faire varier les autres paramètres d'usinage, ce que nous n'avons pas eu le temps de faire (notamment la tension d'usinage).

Quoi qu'il en soit, dans les conditions expérimentales étudiées, faire passer le diamètre des micro-outils de 10 μm à 3 μm ne permet pas d'améliorer la résolution d'usinage. Ce résultat, bien que négatif, est important et pousse à explorer les pistes suivantes pour améliorer la résolution d'usinage :

i) Réduction des vibrations du micro-outil.

Des essais préliminaires effectués avec une caméra rapide MIRO 310 ont permis de montrer que la pointe de l'outil vibre de quelques μm autour de sa position centrale. Cet effet pourrait rendre compte à lui seul de la limite trouvée en termes de résolution d'usinage. Il s'explique par le fait que l'outil mince et long réagit aux sollicitations mécaniques (mouvements des axes) et thermiques de la machine (vibrations du châssis).

Une étude très soignée est donc souhaitable pour réduire l'amplitude des vibrations en rigidifiant l'ensemble de la machine et en découplant mécaniquement le porte-outil. Il paraît nécessaire de réduire les sources de vibrations, notamment celles dues aux moteurs en adoptant une commande en \sin^2 , etc.

Il serait aussi utile de ne pas travailler avec des micro-outils trop longs pour réduire l'amplitude des vibrations. Enfin un recuit du tungstène devrait permettre de rigidifier l'outil.

A moyen terme, un contrôle actif des vibrations du micro-outil pourrait être envisagé.

ii) Isolation électrique du micro-outil.

Un autre point important est qu'il paraît nécessaire de gainer le micro-outil d'une couche d'isolant électrique pour éviter l'effet d'élargissement du canal lorsque l'on enfonce l'outil dans la pièce. Il est nécessaire que cette couche soit de faible épaisseur (0,5 à 2-3 μm) avec une isolation électrique d'excellente qualité. Le PDMS ou du parylène pourraient constituer des matériaux intéressants pour une telle application.

Il conviendrait en parallèle d'améliorer l'état de surface des micro-outils pour faciliter leur recouvrement. Des essais préliminaires d'électropolissage électrochimique ont été effectués.

4.11. Conclusion du chapitre

Il est important de noter que nous n'avons pas procédé à une étude systématique de l'effet de la capacité et de la tension de travail sur les usinages. Nous avons utilisé une tension d'usinage de 50 V et une capacité de travail entre 100 pF et 22 nF, le plus souvent 5 à 22 nF.

a) Usinage de canaux simples sans régulation

Pour des canaux, il apparait que l'effet de la vitesse de translation des axes XY est important. Plus la vitesse est lente, plus les canaux sont profonds et larges et plus les bords sont nets. La gamme de vitesse 104-156-312 $\mu\text{m/s}$ constitue un bon compromis entre qualité d'usinage et temps de fabrication.

Par ailleurs, lorsque la profondeur de consigne augmente de 50 à 300 μm :

- l'état de surface des canaux s'améliore : les bords sont plus nets, plus droits et plus réguliers ;
- la largeur des canaux usinés augmente et par conséquent la valeur du gap latéral (de 10 à 18 μm) ;
- l'usinage est plus efficace : le taux d'enlèvement de matière TEM augmente ($6,6 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{min}$ à $12 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{min}$) tandis que les taux d'usure de l'outil en absolu et en relatif diminuent, soit de $920 \mu\text{m}^3/\text{min}$ à $550 \mu\text{m}^3/\text{min}$ pour le TUO et 1,4 % à 0,44 % pour le TURO ;
- le nombre de décharges électriques détectées par mm^3 de matière enlevée reste stable autour de $2,01 \pm 0,14 \times 10^7$ décharges/ mm^3 ;
- le nombre total de contacts détectés reste relativement constant ; ceux-ci sont essentiellement rencontrés au début de l'usinage, pendant le creusement des 50-80 premiers μm . Les effets de bord ont été observés et expliqués.

La cartographie des décharges et des contacts montre qu'il y a une corrélation qualitative entre les endroits où le nombre de contacts outil-pièce est important et ceux où le nombre de décharges est faible.

Le canal le plus étroit, que nous ayons obtenu, a une largeur de 45 μm une profondeur de 57 μm . Le canal le plus profond atteint 210 μm avec une largeur de 61 μm .

En usinant un canal replié sur lui-même, il a été possible de dégager une nervure de largeur 24 μm et de hauteur 256 μm , soit un facteur de forme de 10,6 (Section 4.5.3).

b) Usinage de canaux simples avec régulation

Nous avons mis en place un premier protocole de régulation qui permet de garder un TEM, un TUO et un TURO constants en fonction de la profondeur de consigne (soit $6,4 \times 10^4 \mu\text{m}^3/\text{min}$, $1,7 \times 10^2 \mu\text{m}^3/\text{min}$ et 0,27 % respectivement pour le TEM, le TUO et le TURO). La profondeur usinée est proportionnelle à la profondeur de consigne ; le rapport H/H_C est de l'ordre de 80%. Le nombre des décharges détectées par volume de matière enlevé est en moyenne de $1,58 \times 10^7$ décharges / mm^3 .

c) Usinage de cavités.

Sans régulation, l'usure relative de l'outil diminue quand les passes sont resserrées (recouvrement important).

Comme montré à l'Annexe 7, l'introduction d'une régulation permet de :

- augmenter le nombre des décharges ;
- réduire l'usure de l'outil ;
- creuser des cavités plus profondes ;
- réduire le nombre de contacts entre l'outil et la pièce.

d) Influence de la résistance de ballast

L'un des rôles de la résistance de ballast R_b est de réduire l'énergie par décharge. On peut s'interroger sur le lien exact entre les deux.

Un premier mécanisme est une réduction de l'énergie par effet Joule dans R_b . Cependant cet effet est mineur : nous avons vu que l'énergie dissipée dans une décharge est bien supérieure à l'énergie dissipée par effet Joule dans R_b . (rapport 1 à 100 en section 4.8).

Il existe donc un autre mécanisme d'action. En fait, R_b s'ajoute à la résistance du plasma pour augmenter la valeur de la résistance vue par le condensateur. Elle permet d'allonger la constante de temps du système. L'énergie emmagasinée dans la capacité est « vidée » plus lentement lors d'une décharge, ce qui diminue le courant crête.

Quelquefois, l'introduction de R_b a pour effet de modifier le profil du courant (Figure 158) avec l'apparition d'un plateau de courant, ce qui conduit à l'allongement de la durée de la décharge. Cet effet avait déjà été observé dans l'air (Annexe 1) et pourrait traduire le passage d'une décharge instable à une décharge lumineuse plus stable.

L'autre utilité de R_b est de diminuer l'usure du micro-outil. Il s'agit d'un résultat important. R_b permet de relever le potentiel de l'outil par rapport à la référence et d'éviter un changement de polarité (Figure 149), qui est une cause importante d'usure.

L'énergie par décharge est fortement réduite par R_b . Des usinages de qualité ont été obtenus avec des décharges de 1 à 10 nJ. Il existe peu d'articles dans la littérature faisant état d'usinages avec des énergies aussi faibles. Citons, par exemple, les travaux d'Egashira et al. [166], [167], [178], [179]. Les exemples publiés d'usinage (perçage de simples trous) sont obtenus à faible tension d'usinage (7 V dans [166]) avec la capacité parasite de la machine, qui est par nature difficile à maîtriser.

Un autre intérêt de R_b est donc qu'elle permet d'opérer avec une capacité de travail parfaitement définie et avec une tension d'usinage (p.e. 50 V) très nettement au-dessus des tensions de polarisation des circuits et du bruit généré par les décharges.

e) Usinage avec des micro-outils de 3 et 9 μm de diamètre.

Nous avons démontré qu'il est possible d'usiner de l'acier inoxydable avec des micro-outils aussi fins dans les endommager.

Malheureusement le passage de 9 à 3 μm de diamètre d'outil ne s'est pas traduit par une amélioration de la résolution d'usinage. Plusieurs pistes ont été proposées pour tenter à l'avenir résoudre cette difficulté : réduction des vibrations mécaniques du micro-outil et/ou réduction du gap latéral par un gainage du micro-outil avec un diélectrique isolant.

CONCLUSION GENERALE

a) Bilan

Dans ce mémoire, nous avons étudié les possibilités de miniaturisation de l'usinage par électroérosion et plus précisément du fraisage par microélectroérosion (μ EE).

Le grand intérêt de ce procédé est qu'il permet d'usiner des matériaux durs à condition qu'ils soient conducteurs d'électricité ou semi-conducteurs.

L'autre intérêt du fraisage par μ EE est qu'il s'agit un procédé sans contact mécanique direct entre l'outil et la pièce, ce qui permet d'utiliser des micro-outils de petites dimensions. **Au cours de ce travail, nous avons ainsi notamment démontré qu'il est possible d'usiner de l'acier inoxydable avec des micro-outils de 3 μ m de diamètre sans les endommager.**

Pour ce faire, nous avons continué à améliorer le procédé de fabrication des micro-outils breveté par l'INL qui repose sur la gravure électrochimique de barreaux de tungstène. Nous avons obtenu de manière automatisée des micro-outils de diamètre $32,61 \pm 0,31 \mu\text{m}$, sur une longueur de 3 mm, soit un facteur de forme de 91. L'écart type a ainsi été divisé par 2 par rapport à l'état de l'art antérieur au laboratoire grâce à une amélioration du dispositif expérimental.

Des micro-outils de diamètre nettement inférieur, jusqu'au μm , ont aussi été élaborés par cette méthode mais, à cette échelle, l'intervention de l'opérateur est, pour l'instant, toujours nécessaire pour une correction manuelle des dérives.

Il aurait été possible d'aller plus loin mais mes encadrants m'ont demandé de concentrer les efforts sur l'enlèvement de matière par μ EE.

Pour pouvoir mettre en œuvre des micro-outils aussi fins, il a été nécessaire de développer au laboratoire **une machine de fraisage par μ EE de 2^{ème} génération.**

Cette machine est dotée d'une **architecture électronique à trois microcontrôleurs**, solution qui permet de suivre les nombreux événements qui peuvent intervenir à tout moment pendant le processus d'usinage : contact outil-substrat susceptible de détériorer des outils ultra fins fragiles, décharges rapides, etc.

Une caractérisation en ligne des décharges et des contacts a été développée, y compris avec des informations spatiales. Il est possible ainsi d'obtenir une **cartographie de l'occurrence des décharges et des contacts**, par une méthode originale, qui permet de mieux comprendre la succession des événements qui interviennent au cours d'un usinage.

Des essais d'usinage de canaux, cavités et inserts ont été réalisés dans l'acier inoxydable. Cette série d'expériences a été menée durant la dernière phase du développement de la machine. Notre objectif était de procéder à des usinages préliminaires tout en déboguant les programmes des microcontrôleurs. C'est la raison pour laquelle, nous n'avons pas suivi un plan d'expérience permettant de rendre compte des effets des paramètres d'une manière systématique. L'idée était plutôt d'avoir accès aux ordres de grandeur caractéristiques du procédé (taux d'enlèvement de matière, usure de l'outil,

résolution d'usinage, état de surface,...) et d'aboutir à un jeu de paramètres d'usinage du matériau choisi pour la pièce, en l'occurrence un acier inoxydable.

En ce qui la résolution d'usinage, nous n'avons pas observé d'amélioration lorsque l'on utilise un micro-outil de 3 μm de diamètre à la place d'un micro-outil de 9 μm de diamètre. La raison est sans doute à chercher du côté des vibrations de la machine qu'il conviendra de minimiser.

Le générateur de décharges mis en place dans la machine permet de créer des décharges de l'ordre du μJ / étincelle. **Cependant, l'introduction d'une résistance de ballast a permis de mettre en évidence l'existence de décharges dites non conventionnelles car leur énergie est très faible, de l'ordre de 1 à 10 nJ / étincelle pour les moins énergétiques.** Il s'agit d'une gamme d'énergie inhabituelle ; les énergies par étincelle les plus faibles rapportées par la littérature et conduisant à un usinage sont de l'ordre de 30-100 nJ mais elles sont obtenues par l'intermédiaire de la capacité parasite de la machine. **L'introduction de la résistance de ballast permet de travailler avec des capacités de travail standard (1-10 nF) avec une tension d'usinage de 50 V, ce qui devrait permettre de mieux maîtriser le procédé d'usinage.**

L'effet de la résistance de ballast est aussi de réduire de manière considérable l'usure du micro-outil. Il s'agit d'un résultat important car **l'usure incontrôlée des micro-outils en μEE dégrade la précision des pièces**, ce qui constitue l'un des points bloquant le développement du procédé. Il nous reste toutefois à démontrer de manière rigoureuse que la réduction de l'usure se traduira effectivement par une meilleure précision d'usinage.

b) Perspectives à court terme avec la machine de 2^{ème} génération

Les possibilités offertes par la machine de μEE de 2^{ème} génération n'ont pas encore été complètement exploitées.

Il reste beaucoup à faire pour étudier le procédé d'usinage avec les décharges non conventionnelles de 1 à 10 nJ. Il conviendra de vérifier si ce nouveau régime d'usinage permet d'améliorer la précision d'usinage.

Par ailleurs, la nature physique de ces décharges n'est pas comprise. On ne sait pas s'il s'agit juste d'étincelles de faible énergie ou même de streamers dont il est bien connu, qu'ils sont la cause des claquages dans les diélectriques. Il est possible aussi qu'il y ait une part d'usinage électrochimique (toutes les expériences ont été menées dans l'eau déionisée pour l'instant).

Grâce aux possibilités offertes par la caractérisation en ligne des décharges, il est possible de connaître la position dans l'espace et dans le temps des décharges et des contacts outil-substrat. Cette cartographie permet de relier (pour l'instant qualitativement) l'état de surface de la pièce usinée à la position des décharges et des contacts, ce qui constitue une mine d'informations et offre des possibilités inédites. Il devrait être possible par exemple de prédire l'état de surface d'une pièce en cours d'usinage sans avoir à effectuer une mesure mécanique. Bien évidemment, cette information pourrait être utilisée durant

l'usinage pour compenser les défauts, accélérer l'enlèvement de matière là où un état de surface médiocre est suffisant, etc.

Il est dommage que nous n'ayons pas eu le temps de tester dans la machine de 2^{ème} génération les possibilités offertes par le générateur de décharges avec une cellule RC pilotée par MOSFETs (Figure 44).

Avec le générateur RC, utilisé dans le cadre de cette thèse, il y a toujours une tension entre l'électrode et la pièce pendant les déplacements ce qui engendre des points stationnaires, qui détériorent le résultat final de l'usinage. Ces points sont particulièrement visibles lors des changements de sens des axes ou lors des démarrages/arrêts.

A l'avenir il devrait être possible de réduire ces effets par une meilleure imbrication de la commande des axes avec le générateur pilotée par MOSFETs.

Par ailleurs, il serait utile d'étudier de près les modes de vibration des micro-outils pour les réduire. En effet, des essais effectués avec une caméra à très grande cadence ont mis en évidence des vibrations d'amplitude de quelques μm . Cela pourrait expliquer pourquoi le gain en résolution d'usinage n'est pas significatif lorsque l'on utilise des micro-outils de $\varnothing 3 \mu\text{m}$ par rapport à $\varnothing 9 \mu\text{m}$. Par ailleurs il apparait nécessaire de travailler à l'avenir sur la réduction du gap latéral par un gainage du micro-outil avec un diélectrique isolant.

Enfin, il conviendrait donc de poursuivre les essais d'usinages avec la machine développée dans le cadre de cette thèse de manière systématique. Nous n'avons pas fait varier la tension d'usinage. Il parait aussi nécessaire de tester d'autres diélectriques que l'eau déionisée.

c) Perspectives à plus long terme

Par ailleurs, il serait pertinent à notre avis :

- (1) D'être capable d'usiner uniquement avec des décharges de type B (peu énergétiques), ce qui revient à empêcher la création ou à stopper le développement de décharges de type A (très énergétiques).
- (2) D'avoir accès non pas seulement à l'occurrence des décharges dans le temps (caractérisation en ligne) et dans l'espace (cartographie) mais aussi à leur énergie.
- (3) De développer les méthodes de commande électronique permettant d'avoir des décharges iso-énergétiques et de les appliquer au fraisage par μEE (cf. section 1.3.2. d).
- (4) De développer les méthodes de régulation du process (logique floue, algorithmes génétiques,...) en prenant avantage des mesures de l'énergie de décharges et des possibilités offertes par la caractérisation en ligne ainsi que la cartographie des décharges.
- (5) D'améliorer la méthode de détection des décharges et des contacts de façon à pouvoir détecter tous les événements en réduisant l'incertitude sur leur position spatiale et temporelle ainsi que sur leur nombre.

(6) D'améliorer la partie mécanique de la machine en réduisant les vibrations du micro-outil et en utilisant des axes de très grande précision avec des codeurs optiques (point important pour la cartographie des décharges). Le passage à une machine 5 axes devrait permettre de développer de nouvelles applications dans les outillages pour la Plastronique [8].

Toutes ces améliorations sont à la limite des possibilités actuelles de l'Electronique et nécessitent une modification conséquente de l'architecture actuelle. En effet, les microcontrôleurs utilisés actuellement dans la machine de 2^{ème} génération ont des capacités de mémoires très petites et un nombre de périphériques limités. La solution serait de passer à des microcontrôleurs ou des FPGA 32 bits beaucoup plus performants.

ANNEXES

Characterization and modeling of electrical discharges in air for micro EDM machining

M. Cabrera, Y. Layouni, G. Girardin, R. Dahmani, V. Semet

*Institut des Nanotechnologies de Lyon, UMR 5270 CNRS INSA ECL UCB CPE
Université Claude Bernard Lyon 1, 43 Bd du 11 Novembre 1918, F69622 Villeurbanne Cedex, France
michel.cabrera@univ-lyon1.fr*

Abstract

In order to gain insight into the basic process involved in micro EDM milling at micrometric gap, micro electrical discharges are performed in air between a tungsten micro tool and a stainless steel workpiece. Micro discharges are characterized in terms of voltage and current. Depending on the machine parameters, pulse peak current from 40 mA to 8 A are observed with 1.6 nJ to 144 μ J energy. Pulse current duration (80-1550 ns) depends mainly on the machine capacitance (0.1-100 nF) while the peak pulse current is proportional to the voltage drop of the RC generator. A PSpice model of the micro discharge is proposed, which allows characterizing the micro-plasma in terms of inductance (2-4 μ H) and resistance (\sim 1 Ω).

Keywords: Micro EDM; Electrical discharge; Micro-plasma; Plasma inductance; Plasma resistance.

1. Introduction

The aim of this paper is to gain insight into the basic process involved in micro EDM milling at micrometric gap. Due to the tiny working volume and the stochastic nature of EDM, there is still insufficient knowledge in order to overcome the actual limits of micro EDM [1,2].

Therefore micro electrical discharges will be performed in air (as for in dry EDM) between a tungsten micro tool and a stainless steel workpiece and will be characterized in terms of current and voltage. The influence of the applied voltage and working capacity on the peak current will be reported. A PSpice model of the micro discharge will be proposed. This will allow characterizing the micro-plasma in terms of inductance and resistance.

2. Experimental section

The experimental set up (Fig. 1) is composed of the milling micro EDM machine in development in our laboratory [3,4] installed on a vibration isolation workstation. Horizontal XY and vertical Z stages with step by step motors allow moving respectively the part and the micro-tool. In addition, the gap is adjusted with a Z piezoelectric actuator (90 μ m travelling range with 0.1 μ m resolution). The electrodes are in a point to plane configuration in order to facilitate electrical breakdown.

The electrical generator is of RC type with a 100 Ω resistor (R_T) and a working capacitance (C_T) from 0.1 to 100 nF (C_T). A 200 MHz bandwidth DPO 2024 Tektronix oscilloscope is used to record:

- The current from the power supply to the resistor R_T with a 100 MHz TCPA300 Tektronix DC current probe.
- The current across the micro tool with a 200 MHz 2877 AC Pearson probe

- The voltage across the working capacity.

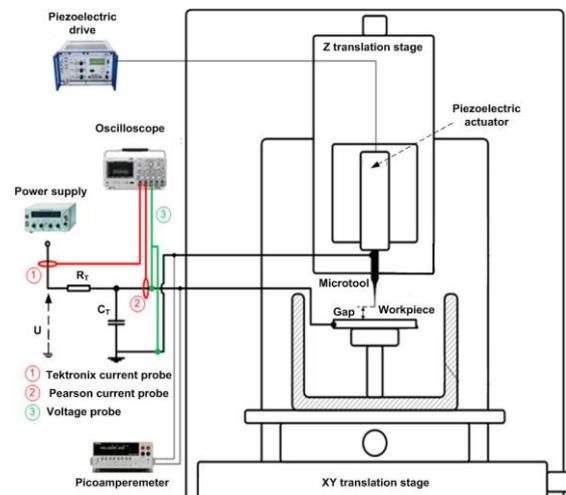


Fig. 1. Experimental set up with RC generator.

All tungsten micro-tools are dressed in the machine with a conical shape by electrochemical machining as explained in [3,4]. In order to precisely define the gap, 0.5 V voltage is applied while moving downward the tool with the piezoelectric actuator until a current is detected with a Keithley 6485 picoamperemeter (typically 0.02 μ A). The contact point, which, is estimated at a few tenth of micrometer is taken as the reference for the gap distance. Then the tool is moved upward of a known value so that the gap will be adjusted from 1 μ m to 7 μ m.

A long distance zoom with CCD camera allows observing the gap as long as the experiments are performed in air. Fig. 2 shows a view of tool with 15 μ m apex above the workpiece.

When the tool is at the right distance, the

operating voltage U (Fig.1) is slowly increased until the first discharge is detected with the oscilloscope when triggering with the Pearson probe. Fig. 3 shows the typical voltage across the capacitance and the current discharge in a $3 \mu\text{m}$ gap. Key parameters of the discharge (voltage drop ΔU during the discharge, peak current I_c , duration δ of the current peak) are defined in Fig. 3.

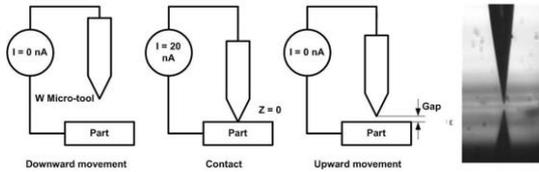


Fig. 2. Protocol for the adjustment of the gap.

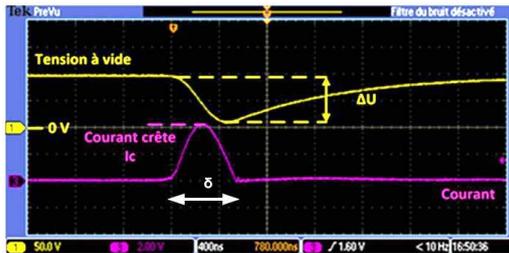


Fig. 3. Voltage and current during a discharge ($U = 100 \text{ V}$, $C_T = 10 \text{ nF}$, $R_T = 100 \Omega$, $\text{gap} = 3 \mu\text{m}$).

When repeating the experiments with varying operating conditions (C_T , U , gap value,...), the signals may become more complex with more than one discharge, overshoot, secondary oscillations, streamers, etc. However, the overall shape remains unchanged. Firstly, there is peak current and a voltage drop due to the fast discharge. Secondly, during the fall down of the current discharge there is a voltage recovery of the capacitance thanks to the power supply. To illustrate this, Fig. 4 shows examples of discharges obtained at decreasing operating voltage.

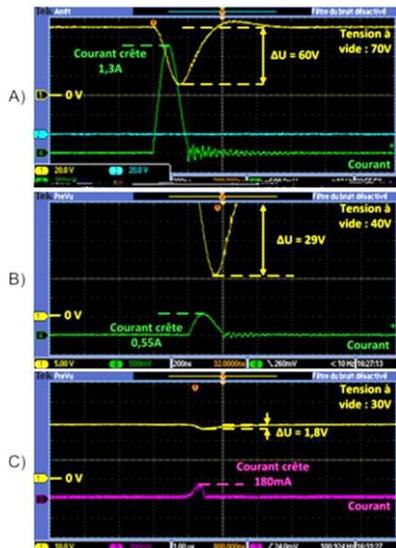


Fig. 4. Voltage and current during a discharge at 70V, 40V, 30V operating voltage ($C_T = 1 \text{ nF}$, $R_T = 100 \Omega$, $\text{gap} = 3 \mu\text{m}$).

When repeating this experiment at varying capacitance for a $3 \mu\text{m}$ gap, the peak current I_c varies linearly with the voltage drop ΔU as shown in Fig. 5.

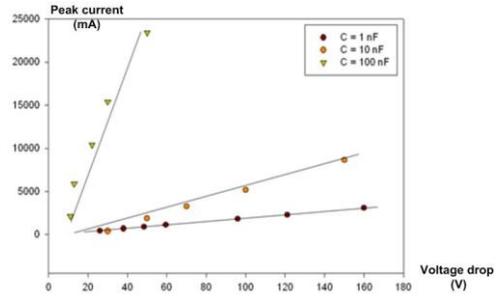


Fig. 5. Peak current I_c vs voltage drop ΔU for three different capacitance C_T ($R_T = 100 \Omega$, $\text{gap} = 3 \mu\text{m}$).

An important observation is that the duration δ of the current peak depends on the working capacitance (Table 1) and not on the operating voltage. This result has proved to be true for 95% of 500 discharges performed with C_T varying from 0.1 to 100 nF and U varying from 40 to 150 V. Fig. 6 gives consistent examples as regards δ for discharges at different capacities with 80 V operating voltage.

Table 1

Pulse current duration vs machine capacitance at $3 \mu\text{m}$ gap.

Capacitance C_T (nF)	Current pulse duration δ (ns)
0.1	80 ± 5
1	200 ± 10
10	550 ± 20
100	1550 ± 50

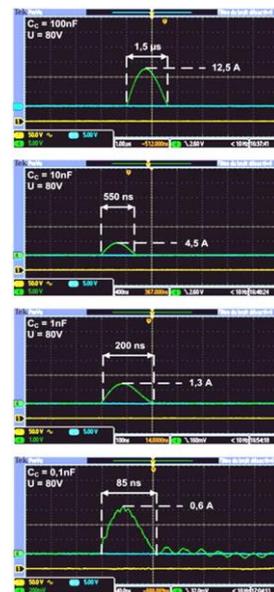


Fig. 6. Pulse current of discharges at 80 V operating voltage for $C_T = 100 - 10 - 1 - 0.1 \text{ nF}$ ($R_T = 100 \Omega$, $\text{gap} = 3 \mu\text{m}$).

Depending on operating voltage and machine capacitance, extreme discharges have been obtained with the same tool (Fig. 7):

- High energy discharge: $C_T = 10 \text{ nF}$, $U = 150 \text{ V}$, $\Delta U = 170 \text{ V}$ (which means a polarity change), $I_c = 8.2 \text{ A}$, $\delta = 550 \text{ ns}$.
- Low energy discharge: $C_T = 1 \text{ nF}$, $U = 20 \text{ V}$, $\Delta U = 1.8 \text{ V}$, $I_c = 40 \text{ mA}$, $\delta = 190 \text{ ns}$.

If we assume that the energy transmitted to the part is proportional to $\frac{1}{2} C \Delta U^2$, then we find respectively $144.5 \text{ }\mu\text{J}$ and 1.6 nJ for the previous discharges. Pulse current duration δ is respectively 550 ns and 190 ns . So the results presented in Table 1 are consistent within 5 orders of magnitude of energy.

In the context of micro EDM, discharges with 3 nJ energy have been already reported by [5] and are possibly suitable for high resolution machining. However, from the practical point of view, it is important to note that these low energy discharges can be hardly differentiated from the electric noise in the device. Therefore we suggest that, in the future, a way to differentiate them from the noise is to look at the duration of the current pulse.



Fig. 7. $144.5 \text{ }\mu\text{J}$ (left) and 1.6 nJ (right) discharges in air. Voltage (yellow line) and current (green line) vs time.

As regards the dependence of the peak pulse current I_c with the gap, Fig. 8 shows the linear dependence of I_c versus the drop voltage at $1, 3$ and $5 \text{ }\mu\text{m}$ gap for 1 nF capacitance. For all discharges, δ is in the 200 ns range of Table 1 independently from the gap value. Peak currents at 3 and $5 \text{ }\mu\text{m}$ gap are closed together but are slightly and significantly lower than the one at $1 \text{ }\mu\text{m}$. This may be explained by the decrease of the plasma resistance.

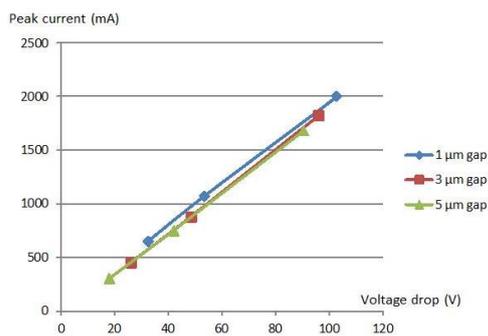


Fig. 8. Peak current I_c vs voltage drop ΔU at $1, 3$ and $5 \text{ }\mu\text{m}$ gap ($R_T = 100 \text{ }\Omega$, $C_T = 1 \text{ nF}$).

3. PSpice model of the discharge

In order to take advantage of the relationship of Fig. 5 between peak current and voltage drop at

constant gap, it is possible to propose a PSpice RLC model of the discharge, as shown in Fig. 9, where:

- C_T is the capacitance of the machine as set up by the operator (the stray capacitance is neglected).
 - R and L are respectively the average resistance and inductance of the micro plasma during the discharge.
- So only R and L are unknown.

The energy involved in the discharge is taken into account with the ΔU voltage drop across the capacitance (measured with the oscilloscope) at the beginning of the discharge ($t = 0 \text{ s}$). The current at $t = 0 \text{ s}$ in the inductance is set at 0 A .

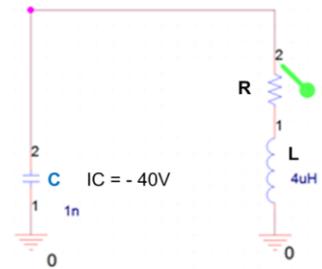


Fig. 9. PSpice model of a microdischarge.

Physically we assume in this model that the discharge is so fast that it follows its own development independently from the power supply: the energy is directly transmitted from the capacitance to the plasma.

This is illustrated in Fig. 10 which shows, with the help of the two current sensors of Fig. 1, that the peak current in the micro-plasma is achieved (within a bit more than 50 ns) before the power supply starts to deliver again energy to the capacitance (which starts at 50 ns). After this stage the power supplies again the capacitance with $R_T C_T$ time constant (100 ns) while the plasma is terminating.

So it takes some time to the power supply to react to the shortening of the capacitance during the discharge. This delay depends on the exact constitution of the power supply and electric lines impedance and could be evaluated independently from the discharge with electronic loads.

However, as a first approximation, we can consider that these events (EDM discharge and reaction of the power supply) are performed independently. Therefore, we propose the model of Fig. 9 for the plasma discharge

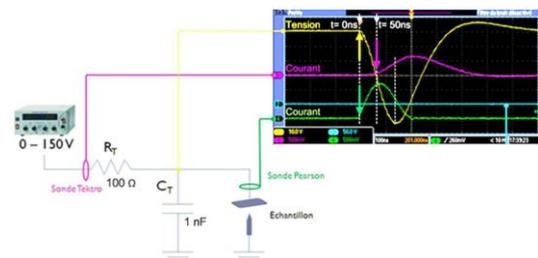


Fig. 10. Voltage drop (yellow), pulse current in the plasma (green) and current flowing into the power supply (violet) ($R_T = 100 \text{ }\Omega$, $C_T = 1 \text{ nF}$, gap = $3 \text{ }\mu\text{m}$, $I_c = 1.3 \text{ A}$, $\Delta U = 65 \text{ V}$).

The analysis of the experimental data shows that the suitable set of parameters for the plasma resistance and inductance of the model corresponds to an under damped second order linear system. An example of simulation is shown in Fig. 11 which qualitatively fits to the experimental data (see below) at the condition to consider only the first pulse of current. With the approximations discussed above, secondary oscillations are not taken into account since we suppose that the plasma is naturally switched off at the end of the first current pulse.

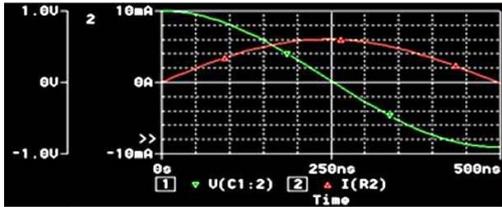


Fig. 11. Current (green) - voltage (red) simulation of a discharge with the PSpice model.

In the case of such a linear system, it is possible to estimate the plasma inductance L from the value of the machine capacitance C_T and the measurement of the pulse current duration δ from:

$$\delta = \pi \sqrt{LC_T} \quad (1)$$

The result is summarized in Table 2 which shows that the plasma inductance is in the 2-4 μH range.

Table 2. Plasma inductance of the microdischarges performed in the experimental set up.

C (nF)	δ (ns)	L (μH)
1	200	4
10	550	3
100	1550	2

As for the plasma resistance R , the analysis of experimental data shows that a low value of about 1 Ω is suitable.

Moreover with this model, it is possible to compare the predicted peak current (calculated with the model from the measured drop voltage) and the measured peak current. The results are listed in Table 3 for three different capacitance values and drop voltages. The maximum difference between both values of current is no more than 25%.

The model systematically underestimates the peak current, especially at low current level. The reason is probably that the power supply is fast enough to feed the end of the discharge with some energy. We are working on the PSpice model in order to take this effect into account.

Table 3. Model vs experimental data for peak current for different machine capacitances and operating voltages

U/ ΔU^* (V)	Ic* (mA)	Ic** (mA)	$\Delta Ic/Ic$ (%)
Model values $C_T = 1 \text{ nF}$, $R = 1 \Omega$, $L = 4 \mu\text{H}$			
50/40	688	602	12.5
70/60	1110	905	18.5
100/94	1820	1405	22.9
Model values $C_T = 10 \text{ nF}$, $R = 1 \Omega$, $L = 3.2 \mu\text{H}$			
50/40	1900	2133	12.3
70/60	3260	3189	2.2
100/94	5160	5014	2.8
Model values $C_T = 100 \text{ nF}$, $R = 1 \Omega$, $L = 2.5 \mu\text{H}$			
50/40	5880	6860	16.6
70/60	10400	10298	1
100/94	15400	16124	4.7

* Experimental data **From model value

4. Conclusions

With our experimental set up, the peak current of the discharge is proportional to the voltage drop. The peak duration of the current depends mainly on the machine capacitance. A PSpice model of the micro discharges has been proposed, which allows characterizing the micro-plasma in terms of inductance (2-4 μH) and resistance ($\sim 1 \Omega$). It predicts also peak current values with accuracy better than 25%.

Acknowledgements

This work was financed by the FUI ConProMi (FEDER and Région Rhône Alpes). G. Girardin acknowledges also the support of the CNRS and DGA.



References

- [1] Pham DT, Dimov SS, Bigot S, Ivanov A and Popov K. Micro-EDM-recent developments and research issues. J. Mat. Proc. Tech. 149 (2004) 50-57.
- [2] Uhlmann E., Piltz S and Doll U., Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining, J. Mat. Proc. Tech, 167 (2005) 488-493.
- [3] Layouni Y., Girardin G., Benilov A., Semet V., Morin P., Cabrera M., Onboard Electrochemical Fabrication of Microelectrodes for Micro EDM Milling Micro and Nanosystems, Vol 3, n°3 (2011) 215-221.
- [4] Girardin G., Layouni Y., Morin P., Cabrera M., Micro EDM with the in situ electrochemical fabrication and regeneration of the tungsten microelectrode tool Int. J. Mater. Form. Vol. 3, Suppl 1 (2010) 1083 – 1086.
- [5] Egashira K., Morita Y., and Hattori Y., Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes, Precision Engineering, vol. 34, n°1 (2010) 139-144.

R. Dahmani, Y.Layouni, V. Semet, M. Cabrera

Université de Lyon, Institut des Nanotechnologies de Lyon (INL), UMR 5270 CNRS INSA ECL UCB CPE,
Bât. L. Brillouin, 43 Bd du 11 Nov. 1918, F69622 Villeurbanne, France
michel.cabrera@univ-lyon1.fr

Abstract

The aim of this paper is to report on micro EDM milling of stainless steel with ultrathin and high aspect ratio microtools and explore possibilities for machining with small discharges using a ballast resistor. Machining of channels is demonstrated with a 9 μm tungsten microtool with 29 nJ/discharge without damaging the tool. Depending on the value of the ballast resistor R_b , the channel width is about 31-36 μm with aspect ratio of 1.4-1.8. The most significant result is that the relative tool wear ratio is below 0.01% when R_b is greater than 100 Ω . It allows machining at 50 V operating voltage with 1 nF working capacitance without using the stray capacitance of the machine.

Keywords: Micro EDM; Micro EDM milling; Microtool; Tool wear; Stainless steel.

1. Introduction

Micro electrical discharge milling is a process of growing importance, which allows machining of complex parts made of electrically conductive material by controlling the three dimensional path of a thin cylindrical microtool [1]. Contrary to micromilling based on chips formation, micro EDM milling is a non-contact process so that ultrathin microtools can be in theory used. However, the process is still challenging as regards many aspects (discharge energy, vibrations,...) [2,3]. Therefore, the aim of this paper is to report on the machining with ultrathin and high aspect ratio microtools and on the use of small energy discharges.

2. Experimental set up

This work is based on the 2nd generation micro EDM milling machine, which has been entirely developed in our laboratory. Among other features, the microtool manufacturing is made by electrochemistry. The machine has also a generator allowing generating low energy discharges.

The machine has basically two functions:

- To etch cylindrical ultrathin microtools by electrochemical dissolution of tungsten rods in the microtool manufacturing station (5Mol/L NaOH).
- To machine parts by micro EDM milling with these tools in the micro EDM station.

The machine (Fig. 1) is equipped with translation stages with stepper motors (0.3125 μm microstep), which allow moving the two stations and the microtool respectively in the horizontal XY and vertical Z directions. The gap between the tool and the part is adjusted with a piezoelectric actuator (90 μm range; 1.8 nm resolution) and the tool wear is compensated with a stick slip actuator. A side view camera, with a Navitar x12 zoom, allows viewing the tool (camera 1). A top view camera with a second Navitar x12 zoom

allows viewing the part (camera 2). All components are installed on a vibration isolation workstation.

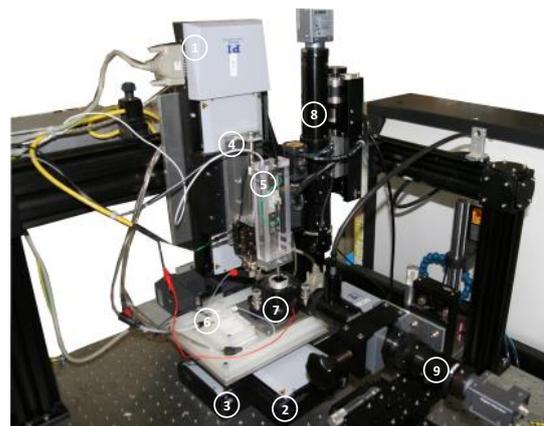


Fig. 1. 2nd generation Micro EDM milling machine: (1) Z translation stage; (2) Y translation stage; (3) X translation stage; (4) Piezoelectric actuator; (5) Stick slip actuator; (6) Microtool manufacturing station; (7) Micro EDM station; (8) Camera 2; (9) Camera 1.

The 1st generation of micro EDM milling machine and the microtool manufacturing station have been already described [4-6]. Therefore, we shall report here only briefly on the new features of the 2nd generation machine, which are mainly related to the electronics.

This one is based on a parallel architecture (Fig. 2) with 3 microcontrollers (μC) in order to (1) monitor the process, (2) detect events which may happen simultaneously and (3) trigger actions with a fast response time, such as:

- Movements of the microtool and of the part.
- Discharge generation (see RC generator below).
- Discharge characterization with the help of a series of voltage comparators [6].
- Detection of the contact between the tool and the part (see below).
- Retraction of the microtool in case of contact.

a 9 μm diameter microtool. No spindle is used to rotate the tool. The first challenge is to avoid the destruction of the tool during a possible collision. The second challenge is to reduce the discharge energy in order to improve machining resolution.

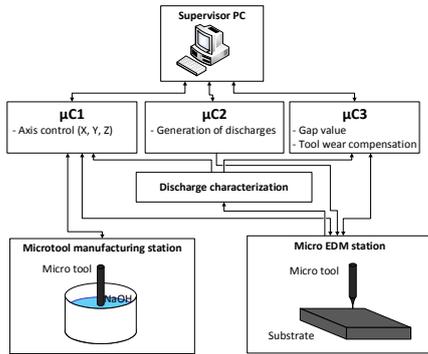


Fig. 2. Parallel architecture of the electronics of the machine.

In its simplest form, the generator of electrical discharges is of RC type with a resistor R_c and a working capacitance C_c . In addition, a ballast resistor R_b has been introduced in series with the microtool in order to reduce the energy of the discharges (Fig. 3). The part is at positive polarity.

A 200 MHz bandwidth DPO 2024 Tektronix oscilloscope is used to record:

- The current flowing through the microtool with a 100 MHz TCPA300 Tektronix DC current probe.
- The voltage across the working capacitance C_c with a 100 MHz differential voltage P5205 Tektronix probe.

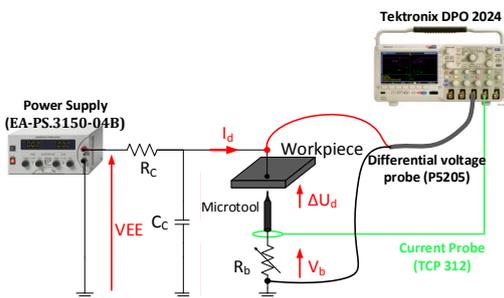


Fig. 3. $R_c C_c$ discharge generator with R_b ballast resistor operating at VEE voltage.

3. Machining of stainless steel

3.1. Electrochemical etching of the microtool

The machine allows electrochemical etching of tungsten rods with 250 μm initial diameter down to 4-10 μm diameter with very high aspect ratio (see ref [4-6] for details, including repeatability of the tool realization). Fig. 4 shows a view of a tungsten microtool with 9 μm average diameter (0.66 μm STD) along the 500 μm working length as imaged with camera 1 and characterized with a Mitutoyo LSM-500S laser profilometer (working range: 5 μm - 2 mm; precision: 10 nm). The aspect ratio of the microtool is about 50.

The microtool is used for machining stainless steel substrates in deionized water. To prepare the substrates, a sheet with mirror like aspect (ref 559-206 from Radiospares) is cut with plasma into

20x20x0.6 mm pieces. All substrates are polished.

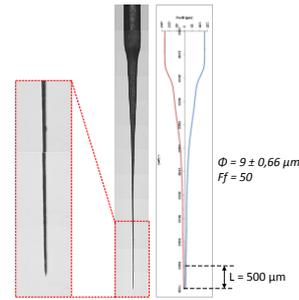


Fig. 4. Microtool with 9 μm diameter and aspect ratio of 50.

3.2. Machine set up

The initial gap between the microtool and the part is set up without deionized water (Fig. 5): the tool is slowly translated downward until electrical contact is reached and moved upward of 5 μm . Then a goniometer allows adjusting the gap during the lateral movement of the part so that it remains in the 5+/-1 μm range for 500 μm XY translations (as checked with camera 1). Then deionized water is added and machining can be started.

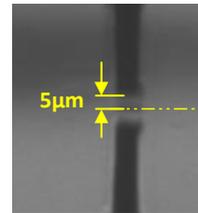


Fig. 5. Initial gap between the microtool and the part (direct image and image reflected by the substrate).

The channel shown in Fig. 6a is machined with the 500x100 μm XY rectangular tool path of Fig. 7 at 156 $\mu\text{m}/\text{s}$ speed. The tool always moves down of one microstep h (0.3125 μm) when coming back at the same corner. Then the machining cycle is repeated again. A total of 160 layers is machined so that the theoretical height H_c of the channel is 50 μm .

A voltage comparator allows comparing the voltage across C_c with a threshold value (typically 0.5 V). When the voltage is below this threshold, the tool is retracted and flushing is performed long enough in order to recover the gap isolation. Then the tool is moved down to its original position and machining is started again.

A series of channels have been machined at different values of R_b (5 to 500 Ω) with 50 V VEE, 100 Ω R_c and 1 nF C_c . The initial gap was checked for each channel. After each machining, the tool wear was measured with camera 1. The parts were also molded with polydimethylsiloxane PDMS (Fig. 6b).

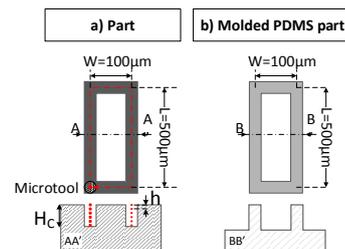


Fig. 6. (a) Dimensions of the machined part. (b) Molded part.

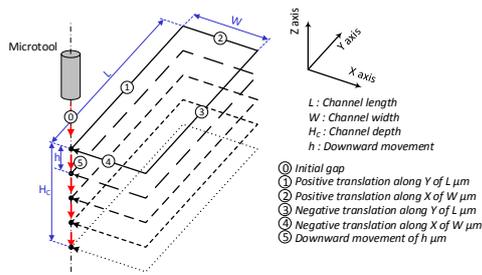


Fig. 7. Tool path for micro EDM milling.

3.3. Characterization of discharge energy

Fig. 8 shows typical waveforms of voltage across the capacitance C_C and current discharge at different R_b . The discharge energy is calculated by integrating the recorded voltage and current and subtracting the energy dissipated in R_b . Typical discharge energies vary from 4.1 μJ for $R_b = 5 \Omega$ to 29 nJ for $R_b = 500 \Omega$ (Fig. 9).

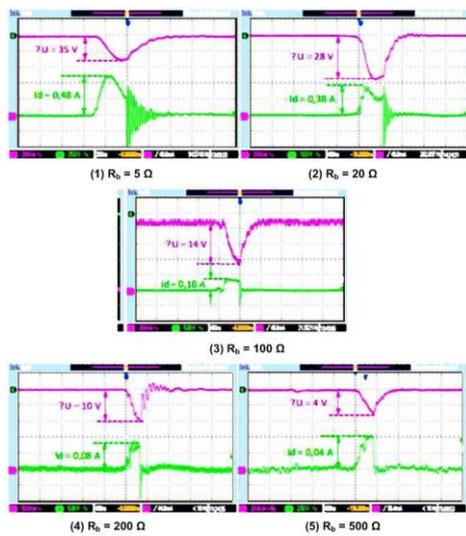


Fig. 8. Voltage and current during a discharge at $R_b = 5, 20, 100, 200$ and 500Ω ($V_{EE} = 50 \text{ V}$, $C_C = 1 \text{ nF}$, $R_C = 100 \Omega$, initial gap = $5 \mu\text{m}$).

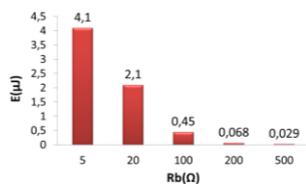


Fig. 9. Variation of the discharge energy with the value of the ballast resistor.

3.4. Characterization of machined microchannels

Fig. 10 shows top views of the machined channels recorded with camera 1. The images tend to show that the higher the R_b , the sharper the channel edges. However, views with a scanning electron microscope (SEM) do not confirm this statement (Fig. 11).

As regards the molded part, Fig. 12 is a side view with camera 1 and Fig. 13 is a top view with the SEM. They show similar surface roughness for all

values of R_b .

Fig. 14 shows the depth H and width W of the molded channels at different R_b as measured with the SEM and camera 1. As molding with PDMS is very precise [7], the geometrical measurements characterize mainly micro-EDM.

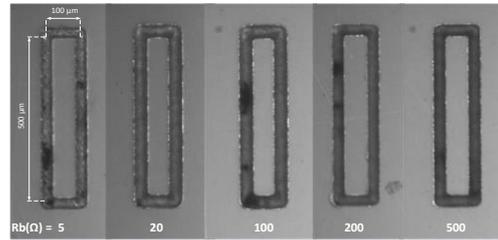


Fig. 10. Top views of the channels machined in stainless steel (camera 2).

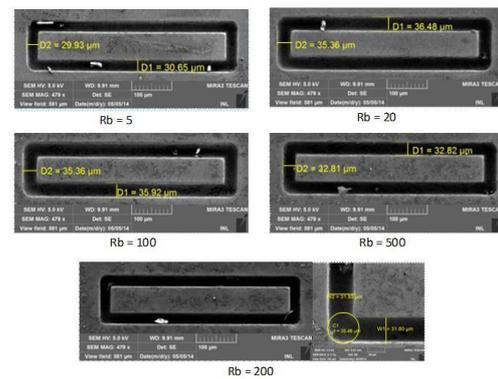


Fig. 11. Top view of the channels machined in stainless steel (SEM).

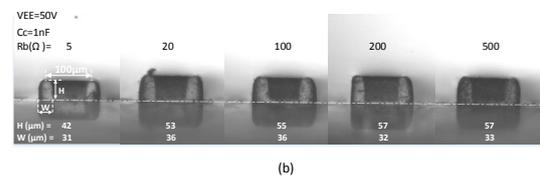


Fig. 12. Side view of the channels molded with PDMS (camera 1) with mirrored image.

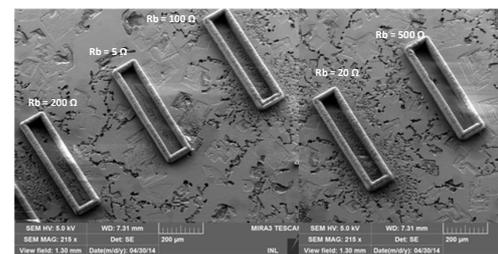


Fig. 13 Top view of the channels molded with PDMS (SEM).

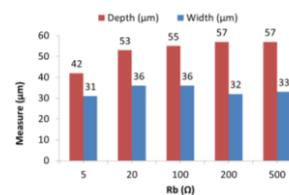


Fig. 14. Depth and width of the molded channels at different values of ballast resistor.

So, thanks to the use of R_b , machining has been demonstrated with an energy as low as 29 nJ/discharge at 1 nF capacitance and 50 V operating voltage. In the literature, the use of such small energy discharges has been rarely reported and is performed in general with the stray capacitance of the machine at low operating voltage [2, 3]. This is a disadvantage since the performance of the machine is less predictable: the stray capacitance may vary from one machine to another and the operating voltage is close to the polarization voltage of the components and the electrical noise.

3.5. Removal rate and tool wear

The $\varnothing 9 \mu\text{m}$ microtool is not damaged during the machining. This demonstrates that the electronics of the machine (Fig. 2) protects the microtool in an efficient manner.

Fig. 15 shows the final gap after the machining of every channel. The worn length of the tool is deduced by comparison with the initial gap (Fig. 5). This allows estimating (Table 1):

- The tool removal rate (TRR), which is the ratio of the worn volume of the tool with machining time.
- The material removal rate (MRR) which is the ratio of the volume removed from the part with machining time.
- The relative tool wear RTW which is the ratio of TRR with MRR.

RTW decreases when R_b increases. For R_b greater than 100 Ω , RTW below 0.01% is obtained.

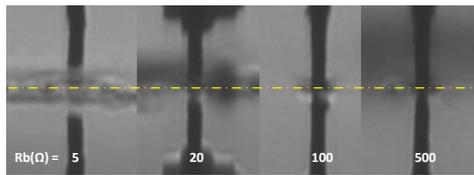


Fig. 15. Gap after the machining of the channels showing tool wear (direct image and image reflected by the substrate).

Table 1.

Material removal rate, tool removal rate, relative tool wear and energy / discharge at different values of ballast resistor.

R_b (Ω)	MRR ($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	TRR ($\mu\text{m}^3/\text{min}$)	RTW (%)	E (μJ)
5	6.2×10^4	30	0.05	4.1
20	9.1×10^4	24	0.03	2.1
100	9.4×10^4	< 1	< 0.01	0.45
200	8.7×10^4	< 1	< 0.01	0.068
500	9.0×10^4	< 1	< 0.01	0.029

3.6. Machining resolution

Other attempts of machining have been performed successfully with a $\varnothing 3 \mu\text{m}$ microtool without damaging the tool. However, the channel width is not significantly smaller than with the $\varnothing 9 \mu\text{m}$ one. This is attributed to vibrations which induce $\pm 5 \mu\text{m}$ oscillations of the apex of the tool tips (as imaged with a slow motion camera at 2000 images/s). Vibrations are present for all tips.

4. Conclusions

With the 2nd generation micro EDM milling machine developed in our laboratory, it has been possible to fabricate ultrathin ($\varnothing 9 \mu\text{m}$) high aspect ratio (~ 50) tungsten microtool and machine stainless steel channels without damaging the microtool.

Different possibilities to improve machining resolution have been explored.

The first one was to reduce the energy per discharge. This has been performed with a ballast resistor. Parts have been successfully machined with 29 nJ/discharges using a 500 Ω ballast resistor at 50 V and 1 nF working capacitance. Operating at such a medium range voltage without relying on the machine stray capacitance is an advantage. With a ballast resistor of 100 Ω , the relative tool wear was below 0.01%. This is the most significant result of this work since tool wear in μEDM milling is known to affect part accuracy so that complex strategies are proposed to overcome this problem [1]. Although no significant result has been shown on the surface characteristics of the channels, future work will evaluate if the reduction of the tool wear allows improving the machining accuracy. However, depending on the value of the ballast resistor R_b , the channel width is about 31-36 μm with aspect ratio of 1.4-1.8.

The second possibility to improve machining resolution was to use microtools with 3 μm diameter. Successful attempts have been performed without damaging the tool. However, no improvement was found in terms of machining resolution. Therefore, the mechanical stability of the machine is currently being improved in order to reduce the tip oscillations.

Acknowledgements

This work was financed by the FUI ConProMi.

References

- [1] D.T. Pham et al. "Micro-EDM-recent developments and research issues", J. Mat. Proc. Tech., 2004; 149: 50-57.
- [2] K. Egashira et al., "Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes", Precision Engineering, 2010; 34: 139-144.
- [3] K. Egashira et al., "Electrical discharge machining with ultralow discharge energy", Precision Engineering, 2010; 30: 414-420.
- [4] Y. Layouni Y. et al., "Onboard Electrochemical Fabrication of Microelectrodes for Micro EDM Milling", Micro and Nanosystems, 2011; 3: 215-221.
- [5] G. Girardin et al, "Micro EDM with the in situ electrochemical fabrication and regeneration of the tungsten microelectrode tool", Int. J. Mater. Form., 2010; 3: 1083-1086.
- [6] G. Girardin, "Développement d'un procédé d'usage par micro-électroérosion", PhD thesis, Université de Lyon, Lyon, 2013.
- [7] Y. Xia et al., "Soft Lithography", Angewandte Chemie International Edition, 1998; 37: 550-575.

ANNEXE 3 - COMMANDE DE L'ACTIONNEUR PIEZOELECTRIQUE VIA LE μ C3

La commande de l'actionneur piézoélectrique est assurée par la carte μ C3.

Il est possible de régler l'entrefer avec la carte μ C3. En effet celle-ci commande la position et le mouvement de l'actionneur piézoélectrique et lit en parallèle les données du circuit de caractérisation des décharges. Cette solution a été mise en œuvre dans la section 4.7, dont l'intérêt est qu'elle est indépendante des mouvements des platines de translation XYZ.

Nous donnons ci-dessous quelques détails sur le fonctionnement de la commande de l'actionneur piézoélectrique pour des travaux ultérieurs.

Le PC superviseur envoie la commande de l'actionneur piézoélectrique au μ C3 sous forme d'une trame via la liaison série RS232 (COM6). La Figure 168 montre le panneau de commande LabView avec les différents paramètres de la trame.

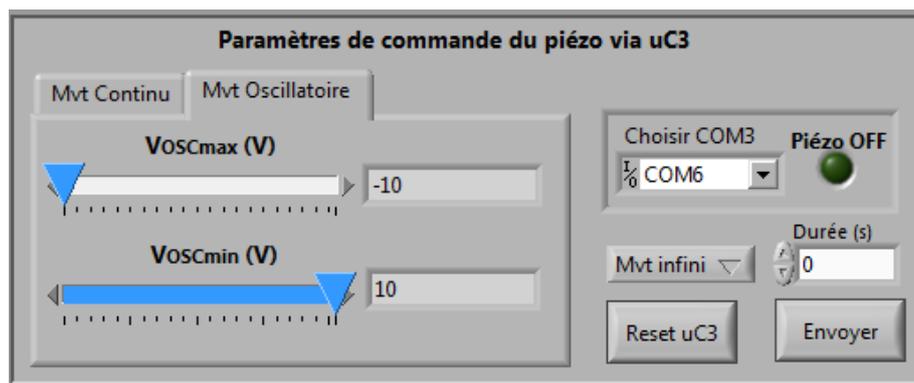


Figure 168 – Paramètres de commande de l'actionneur piézoélectriques.

Celle-ci se présente comme suit :

S[C] **Mode**[C] **V_{OSCmin}** [U16] **V_{OSCmax}**[U16] **Durée**[U16]

Les paramètres ont la signification suivante :

- S : nature du mouvement avec deux valeurs possibles :
 - « C » dans le cas d'une position fixe;
 - « O » dans le cas d'un mouvement oscillatoire ;
- Mode : type du mouvement s'il est de nature oscillatoire (triangulaire, dents de scie, sinusoïdale, rectangulaire, ...etc.) ;
- « V_C : tension de commande qui détermine la position de l'outil en position fixe.
- V_{OSCmin} et V_{OSCmax} pour les dynamiques min ($\varphi - z_{Min}$) et max ($\varphi + z_{Max}$) lors d'un mouvement oscillatoire (Figure 169b). Ces paramètres sont des entiers codés sur 16 bits ;

- Durée : nombre d'oscillation (noté durée) : dans le cas d'un mouvement infini, l'actionneur piézoélectrique vibre sans interruption. Dans le cas d'un mouvement fini, le nombre d'oscillations est fixé par la durée.

La position de référence $z = 0$ correspond à la face supérieur du substrat.

La Figure 169a montre la procédure de réglage de l'entrefer initial avec le mode « C » :

- tout d'abord, le micro-outil est positionné grossièrement au-dessus du substrat à l'aide de la caméra 1 ① ;
- puis, à l'aide de l'actionneur piézoélectrique, il est approché de la surface du substrat jusqu'à court-circuiter l'ensemble ②, sachant que le substrat est porté à un potentiel positif compris entre 5 et 10V et que le micro-outil est à la masse;
- lorsque le court-circuit est détecté, la descente de l'outil est immédiatement arrêté, puis il sera remonté de la valeur de l'entrefer initial (5 à 10 μ m) ③ ;

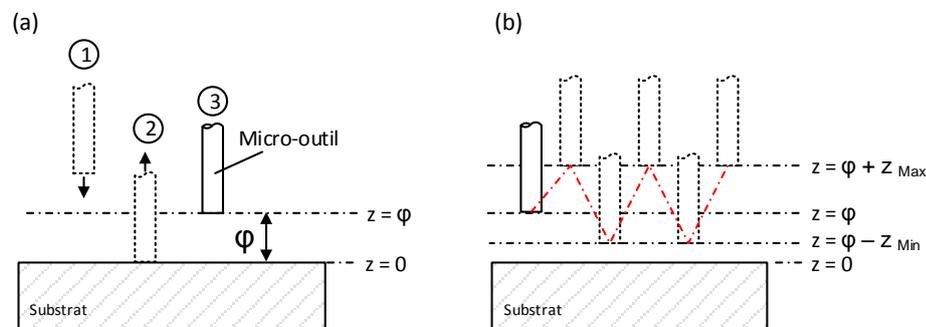


Figure 169 – (a) Réglage de l'entrefer initial via l'actionneur piézoélectrique en mode continu ; (b) commande en mode oscillatoire des vibrations du micro-outil.

D'un point de vue électronique, le μ C3 commande en sortie un DAC7614, qui est un convertisseur numérique analogique (CNA) à 4 quatre sorties (A, B, C, D) et qui dispose de deux bits d'adresse ainsi que de 12 bits de données. La sélection de l'une des quatre sorties se fait en fonction de l'état logique des deux bits d'adresse comme l'indique le tableau suivant :

Adresse	Sortie sélectionnée
00	A
01	B
10	C
11	D

Tableau 31 – Sélection de l'une des sorties du DAC.

Les données sont transmises sur 12 bits et seront ensuite converties en une tension analogique puis amplifiée.

Pour cela, nous avons choisi un montage qui permet d'avoir des variations entre +2,5 V et -2,5 V. La tension de sortie du convertisseur est calculée à partir de l'équation suivante :

$$V_{OUT-DAC} = V_{REFL} + \frac{(V_{REFH} - V_{REFL})}{4096} \times N$$

N est un entier compris entre 0 et 2^{12} , correspondant au code binaire de la donnée envoyée sur 12 bits. V_{REFL} et V_{REFH} sont respectivement les tensions de références basse et haute du convertisseur.

Les tensions de référence du DAC (V_{REFL} et V_{REFH}) doivent être stables. Pour cela, elles sont générées par un circuit AD680 pour la référence +2,5 V et un circuit AD780 pour la référence -2,5 V (Figure 170).

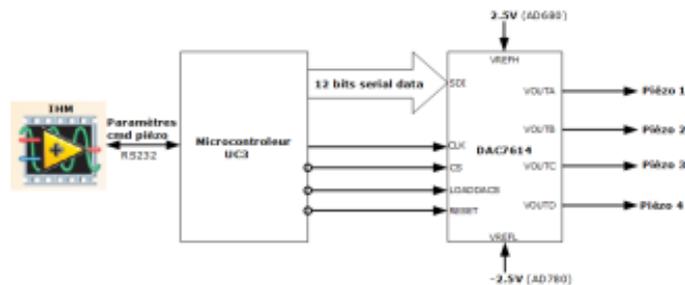


Figure 170 – Commande du DAC7614.

L'équation précédente se simplifie et devient:

$$V_{OUT-DAC} = -2,5 V + \frac{5 V \times N}{4096}$$

On vérifie bien que :

- pour $N = 0$, $V_{OUT-DAC} = -2,5 V$;
- pour $N = 4096$, $V_{OUT-DAC} = +2,5 V$.

Afin que la commande de l'actionneur piézoélectrique varie entre -10 et +10 V, les sorties du DAC7614 sont amplifiées par un gain de 4 en utilisant un OPA2107 en montage non inverseur comme le montre la Figure 171.

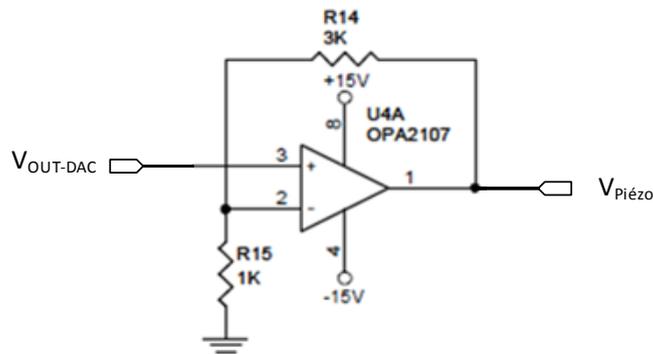


Figure 171 – Circuit d'amplification de la tension de sortie du DAC7614.

La plus petite tension de commande tension V_{LSB}^1 (avec amplification) que peut générer le DAC7614 est de 4,9 mV. Le plus petit déplacement qu'on peut donc obtenir avec cette tension de commande est d'environ 44 nm, sachant qu'une tension de commande de 10 V fait déplacer l'actionneur piézoélectrique de 90 μm .

¹ Least Significant Bit (en français Bit de poids faible).

ANNEXE 4 - EFFET DES MENISQUES SUR LE DIAMETRE CENTRAL DE L'HALTERE

Notre objectif dans cette annexe est de vérifier l'exactitude du modèle mathématique développé par Lim et al. [180] qui sert à prédire le volume de matière gravée en prenant en compte les effets du ménisque.

Lim et al. ont supposé que la forme de l'outil suit une loi parabolique $y = f(x^2)$ au niveau du ménisque durant le processus de gravure (relation suivante) :

$$y = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{(\phi_0 - \phi)}{\lambda^2} \times x^2 + \phi \right]$$

Ensuite Girardin [13] a généralisé ce modèle en prenant en compte l'existence des ménisques haut et bas, respectivement à l'interface NaOH-air et à l'interface huile-NaOH (Cf. Figure 89.c). Il propose de prendre en compte les volumes enlevés à l'aide des paramètres λ_1 et λ_2 comme illustré sur la Figure 172 :

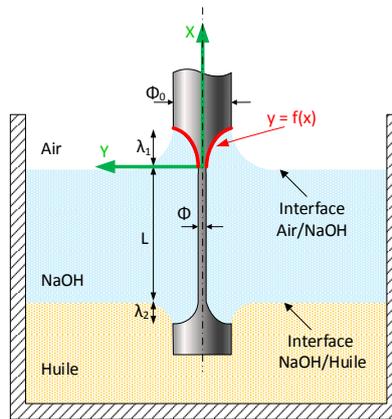


Figure 172 – Approximation parabolique du ménisque.

Girardin en déduit :

- Le volume V_{MH} de matière enlevée au niveau du ménisque haut :

$$\begin{aligned} V_{MH} &= \pi \cdot \left(\frac{\phi_0}{2}\right)^2 \cdot \lambda_1 - \int_0^{\lambda_1} y^2 dx \\ &= \frac{1}{15} \cdot \pi \cdot \lambda_1 \cdot [-2 \cdot \phi^2 - \phi_0 \cdot \phi + 3 \cdot \phi_0^2] \end{aligned}$$

- Ainsi que le volume V_{MB} de matière enlevée au niveau du ménisque bas :

$$V_{MB} = \pi = \frac{1}{15} \cdot \pi \cdot \lambda_2 \cdot [-2 \cdot \phi^2 - \phi_0 \cdot \phi + 3 \cdot \phi_0^2]$$

Le volume total gravé $\Delta V'$ est la somme des volumes enlevés aux niveaux de la partie centrale de l'altère ΔV et des deux ménisques, soit :

$$\begin{aligned} \Delta V' &= \Delta V + V_{MH} + V_{MB} \\ &= \frac{\pi \cdot L}{4} (\phi_0^2 - \phi^2) \\ &\quad + \frac{1}{15} \cdot \pi \cdot [-2 \cdot \phi^2 - \phi_0 \cdot \phi + 3 \cdot \phi_0^2] \cdot (\lambda_1 + \lambda_2) \end{aligned}$$

Nous avons souhaité vérifier expérimentalement si l'approximation du ménisque par une parabole est correcte. La Figure 173a montre le profil d'un haltère mesuré à l'aide du profilomètre laser. Les profils des ménisques correspondent à une fonction polynomiale de degré 4 et non pas de degré 2. L'écart entre la mesure et le modèle basé sur l'approximation parabolique¹ est donc conséquent (Figure 173bc).

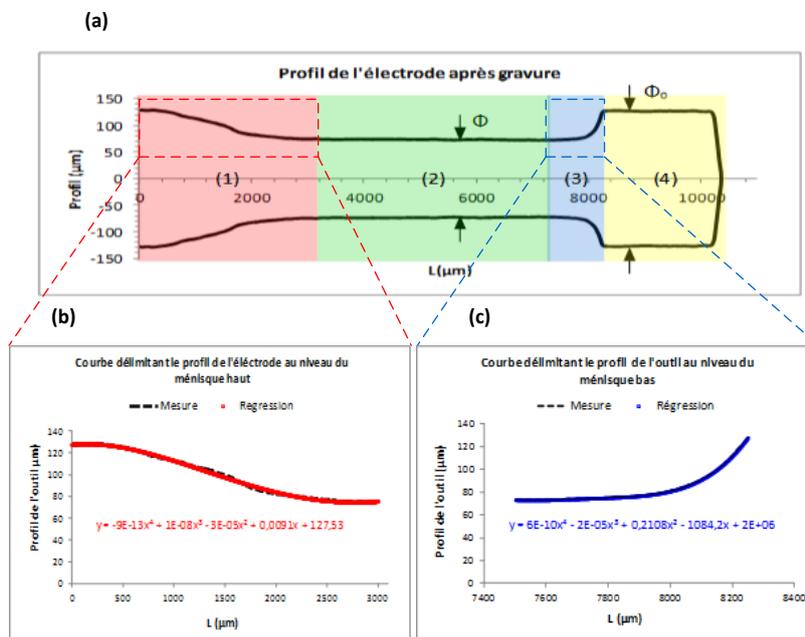


Figure 173 – (a) Profil de l'outil mesuré au profilomètre laser ; Courbes de régression du profil de l'outil au niveau du ménisque haut (b) et bas (c).

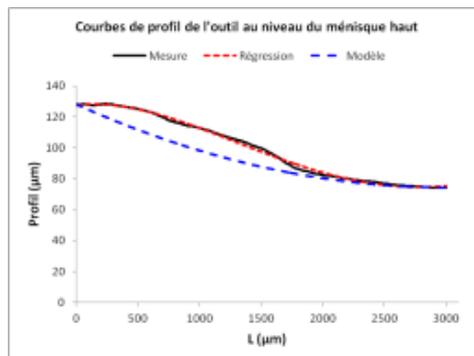


Figure 174 – Comparaison entre les profils décrits par la mesure au profilomètre laser, la courbe de régression et le modèle mathématique décrit par Lim et al. [180].

¹ Dans cet exemple, nous avons pris les valeurs h_1 et h_2 donné par G. Girardin, soit respectivement 3 mm et 1,5 mm

Dans l'article de Lim, les outils sont gravés dans une cuve avec un électrolyte stationnaire alors que dans nos expériences, il y a un fort renouvellement de l'électrolyte. Nous n'avons pas eu le temps de vérifier si cela explique les différences de profil de gravure.

Quoi qu'il en soit, la conclusion est que l'approximation parabolique n'est pas pertinente dans notre dispositif expérimental.

Dans la gravure de la section 3.4.4, il est possible, à partir des données du profilomètre, d'estimer directement les valeurs de ΔV , V_{MH} et V_{MB} . On trouve pour ΔV , V_{MH} et V_{MB} respectivement $2,03 \times 10^8 \mu\text{m}^3$, $1,24 \times 10^8 \mu\text{m}^3$ et $3,32 \times 10^7 \mu\text{m}^3$. La somme des trois termes fait que le volume total de matière enlevé est de $3,6 \times 10^8 \mu\text{m}^3$.

On peut aussi estimer le volume de matière enlevé à partir de la formule (8), qui néglige la forme des ménisques. On trouve alors que le volume total de matière enlevé est de $3,29 \times 10^8 \mu\text{m}^3$, soit un écart de 9 %.

Une autre conclusion est que dans ce cas particulier, ne pas tenir compte de la forme des ménisques revient à sous-estimer la quantité de matière enlevée de 9%.

ANNEXE 5 - PARCOURS D'OUTIL ET FABRICATION ASSISTEE PAR ORDINATEUR (FAO)

Le parcours d'outil est un fichier contenant le programme de pilotage des 3 axes de la machine. Il comporte un ensemble de lignes de commandes permettant d'exécuter les différents mouvements de la machine d'une manière asynchrone ou synchrone [181].

Dans le cas d'une pièce complexe, pour pouvoir obtenir le fichier du parcours d'outil, les étapes à suivre sont les suivantes (Figure 175) :

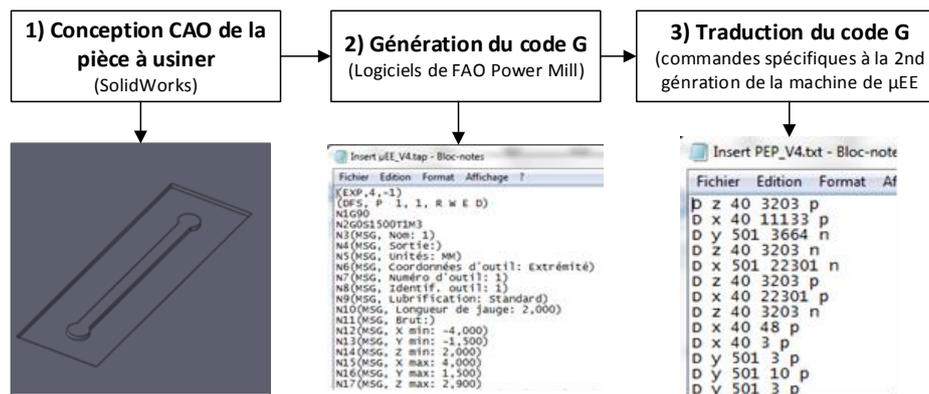


Figure 175 – Etapes de génération du parcours d'outil.

1) Conception assistée par ordinateur (CAO)

Cette étape consiste à réaliser le modèle virtuel 3D de la pièce à fabriquer en utilisant un logiciel de CAO tel que SolidWorks.

2) Elaboration du parcours d'outil et génération du code machine

La seconde étape consiste à transférer le modèle 3D virtuel dans le logiciel de fabrication assistée par ordinateur PowerMill¹.

Celui-ci permet de choisir les paramètres d'usinage :

- forme de l'outil ;
- vitesse de coupe ;
- mode d'usinage.

A partir des données du modèle virtuel 3D et des paramètres d'usinage, PowerMill génère un code numérique au format standard appelé code G ou code ISO.

3) Elaboration du parcours d'outil et génération du code machine

La troisième étape consiste à traduire le code G dans un ensemble de commandes compréhensible par la machine de µEE. Cette tâche est assurée par le PC superviseur

¹ Est un logiciel permettant de programmer le parcours d'outil des machines-outils 2 à 5 axes, développé par DELCAM

La syntaxe de celles-ci est sous la forme suivante :

**[Mode de déplacement] [Nom de l'axe] [Vitesse de déplacement] [Distance à parcourir]
[Sens de déplacement]**

La signification des paramètres est la suivante :

- Mode de déplacement : en mode usinage, le déplacement est désigné par la lettre « D » et « P » en mode de positionnement. Dans le premier cas tous les paramètres sont choisis par l'opérateur ou générés automatiquement dans le parcours d'outil. Dans le second cas, les paramètres sont imposés par les coordonnées (X, Y, Z) de la position programmée et la vitesse de positionnement est rapide (4 mm/s).
- Nom de l'axe : comme le déplacement des trois axes X, Y et Z sont synchrones, ceux-ci sont désignés par leurs lettres respectives « x », « y » et « z ».
- Vitesse de déplacement : il s'agit en réalité de la durée du créneau permettant de déplacer l'axe concerné d'une distance de 1 micropas ; ce paramètre est exprimé en μs .
- Distance à parcourir : la distance de déplacement exprimée en micropas (0,3125 μm).
- Et enfin le sens de déplacement : n pour le sens négatif et p pour le sens positif.

ANNEXE 6 - RUGOSITE DE SURFACE

La rugosité de surface R_a représente la moyenne arithmétique des valeurs absolues des ordonnées des pics et des creux $Z(x)$ à l'intérieur de la longueur de base "l" .

Elle est calculée par la relation suivante :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| \cdot dx$$

Les intégrales sont calculées sur des longueurs normalisées : 0,08 mm ; 0,25 mm ; 0,8 mm ; 2,5 mm ; 8 mm.

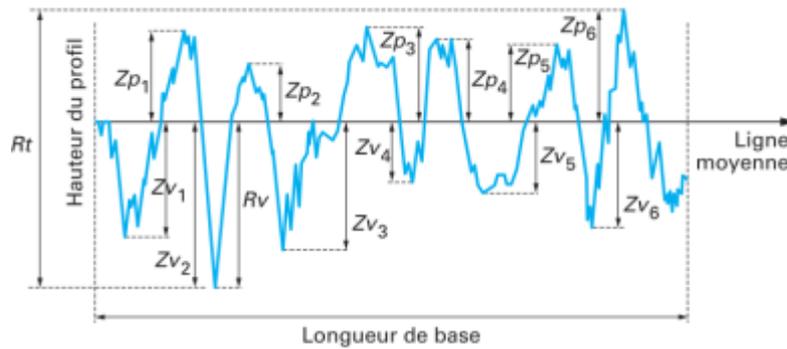


Figure 176 – Représentation de la rugosité de surface avec ses pics et ses creux[182].

Le tableau suivant montre les conditions à appliquer pour une mesure de rugosité fiable :

Longueur de base (mm)	Longueur de mesure (mm)	Rayon de la pointe (µm)	Ra (µm)
8	40	10	10 à 80
2,5	12,5	5	2 à 10
0,8	4	2	0,1 à 2
0,25	1,25	2	0,02 à 0,1
0,08	0,4	2	0 à 0,02

Tableau 32 – Choix des conditions de mesure de la rugosité R_a [183].

Dans ce manuscrit, les caractérisations de surfaces ont été effectuées avec un profilomètre mécanique Veeco Dektak 150. Nous avons à notre disposition deux pointes hémisphériques de rayon respectivement 12,5 µm et 2,5 µm.

ANNEXE 7 - COMPARAISON ENTRE UN USINAGE AVEC ET SANS REGULATION

Cette annexe a pour objectif d'étudier l'intérêt de la régulation de l'entrefer dans le cas de l'usinage d'une cavité. Pour ce faire, nous avons usiné deux cavités de forme carrée de 960 μm de côté avec et sans régulation de l'entrefer. La profondeur de consigne H_c est de 100 μm (Tableau ci-dessous). Le diamètre de l'outil est de 47 μm . Le protocole de régulation est celui de la section 4.7.

Générateur RC	Caractérisation des décharges	Actionneur piézoélectrique	Procédé
<ul style="list-style-type: none"> - $V_{EE} = 50 \text{ V}$ - $C_C = 22 \text{ nF}$ - $R_C = 100 \ \Omega$ - $R_b = 0$ 	<ul style="list-style-type: none"> - $V_{Ref+} = 1,4 \text{ V}$ - $V_{Ref-} = 0,1 \text{ V}$ - $V_{Cont} = 0,1 \text{ V}$ - Diviseur = 30 	<ul style="list-style-type: none"> - Voir section 2.2.4.d 	<ul style="list-style-type: none"> - Eau déionisée - Electrode $\Phi = 47 \ \mu\text{m}$ - Entrefer initial $\varphi = 5 \ \mu\text{m}$ - Profondeur de passe $h = 3 \ \mu\text{pas}$ - Profondeur de consigne $H_c = 100 \ \mu\text{m}$ - Taux de recouvrement $R(\%) = 57 \ \%$. - Vitesse $V_x V_y = 312 \ \mu\text{m/s}$ - Usinage : cavité $L = 960 \ \mu\text{m}$; $W = 960 \ \mu\text{m}$.

Tableau 33 – Paramètres d'usinage – Usinage de deux cavités sans et avec régulation de l'entrefer.

Les images optiques des cavités prises avec la caméra 2 sont montrées à la Figure 177. De manière qualitative, nous ne distinguons aucune différence entre les deux cavités. Il apparaît que leur état de surface est quasiment identique. Le protocole de régulation considéré n'a donc pas d'influence sur la qualité de la surface usinée.

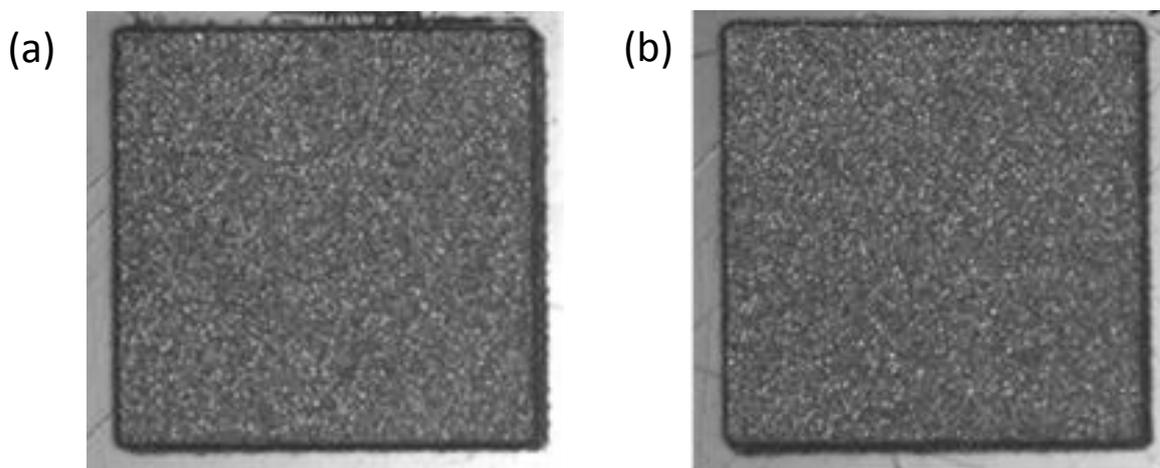


Figure 177 – Images des cavités usinées sans (a) et avec (b) régulation de l'entrefer.

La caractérisation montre que les décharges sont plus nombreuses dans le cas de l'usinage avec régulation ; le nombre de contacts reste dans le même ordre de grandeur (Figure 178).

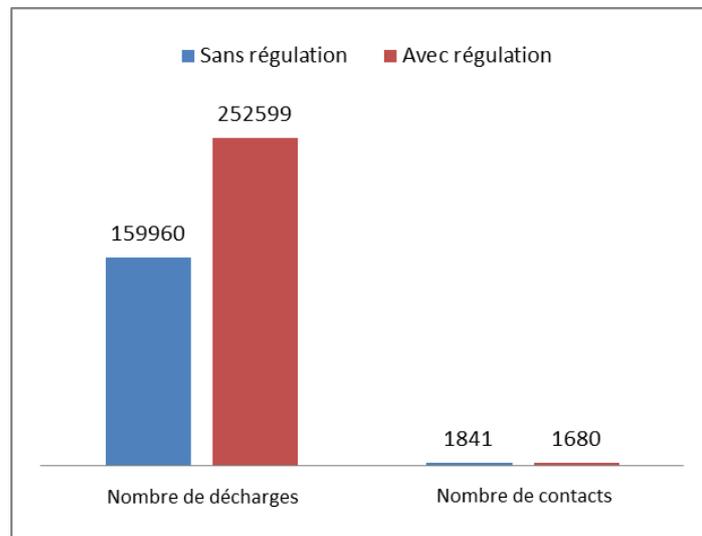


Figure 178 – Caractérisation des décharges et des contacts détectés pour les cavités sans et avec régulation de l'entrefer. En bleu : sans régulation. En rouge : avec régulation.

Ce constat laisse penser que la cavité usinée avec régulation est plus profonde et que l'usure de l'outil est plus faible. Effectivement les résultats expérimentaux regroupés au Tableau 34 montrent que la régulation permet de doubler la profondeur usinée (H) de faire passer le TURO de 10 % à 4 %.

Mode d'usinage	$\Psi_v(\mu\text{m})$	H (μm)	TURO (%)	déch/mm ³	Cont/mm ³	α ($\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$)
sans régulation	94	6	10,72%	$2,63 \times 10^7$	$2,82 \times 10^6$	1,38
avec régulation	86	14	4,20%	$1,78 \times 10^7$	$2,81 \times 10^6$	2,04

Tableau 34 – Ordres de grandeur caractéristiques de l'usinage par EE rapportés au volume de matière enlevée.

ANNEXE 8 - AUTRES EXEMPLES D'USINAGE

Nous avons regroupé dans cette annexe des exemples d'usinage qui nous semble intéressants mais que nous n'avons pas pu exploiter de manière plus approfondie par manque de temps. Tous les essais ont été effectués avec de l'acier inoxydable (AISI 316L).

La Figure 179 montre un exemple d'usinage avec un outil de diamètre $5\ \mu\text{m}$; la largeur du sillon central du canal est d'environ $10\ \mu\text{m}$ environ. Les cavités en haut du canal correspondent à la remontée en Z de l'outil (il aurait fallu pouvoir couper le générateur).

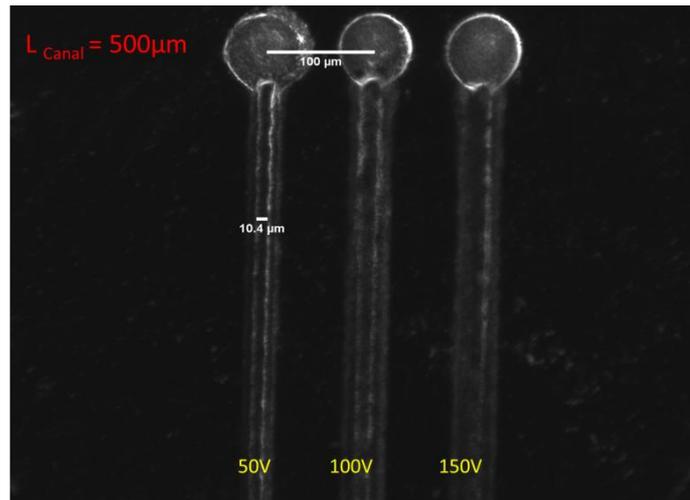


Figure 179 – Micro-canaux de $10,4\ \mu\text{m}$.

($\Phi_{\text{Electrode}} < 5\ \mu\text{m}$; $C_C = 22\ \text{nF}$; $VEE = 50\ \text{V}$; $\text{Entrefer initial} = 10\ \mu\text{m}$; $\text{enfoncement } H \text{ de l'électrode} = 5\ \mu\text{m}$)

La Figure 180 montre une épaisseur de matière de $5\ \mu\text{m}$ entre deux trous de diamètre $45\ \mu\text{m}$ et $39\ \mu\text{m}$ (respectivement de gauche à droite)

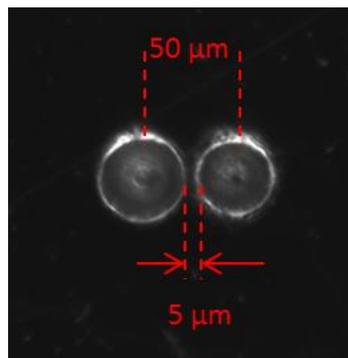


Figure 180 – Mur fin de $5\ \mu\text{m}$ séparant deux trous profonds.

($\Phi_{\text{Electrode}} = 10\ \mu\text{m}$; $C = 22\ \text{nF}$; $\text{entrefer initial} = 10\ \mu\text{m}$; $\text{enfoncement } H_c = 25\ \mu\text{m}$)

La Figure 181 montre l'usinage d'un trou profond de $150\ \mu\text{m}$ (consigne enfoncement $200\ \mu\text{m}$) avec une électrode de $15\ \mu\text{m}$ ($5\ \mu\text{m}$ sur la pointe). Le diamètre du trou est de $25\ \mu\text{m}$. Le facteur de forme est donc de 6.

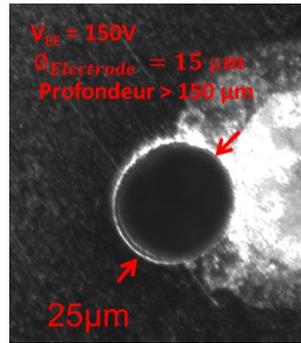


Figure 181 – Trous profonds.
 ($\Phi_{\text{Electrode}} = 5 \mu\text{m}$ sur la pointe)

La Figure 182 montre une épaisseur de parois de $13 \mu\text{m}$.

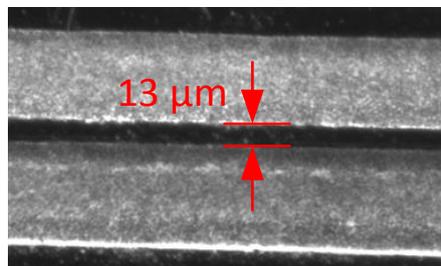


Figure 182 – Mur fin de $13 \mu\text{m}$.
 ($\Phi_{\text{Electrode}} = 14 \mu\text{m}$; $C = 22 \text{ nF}$; entrefer initial $H = 10 \mu\text{m}$; enfoncement $10 \mu\text{m}$)

La Figure 183 montre un effet très intéressant à haute tension que nous n'avons pas le temps d'étudier de manière plus détaillée. La figure de gauche montre l'usinage de canaux à tension d'usinage croissante de 50 à 300 V. Plus la tension est élevée, plus le canal est fin, ce qui est contre intuitif. La figure de droite montre le profil des canaux mesuré à l'aide du profilomètre mécanique avec une pointe de rayon de courbure $12,5 \mu\text{m}$. On notera que le diamètre de l'outil est de $5 \mu\text{m}$ seulement avec un entrefer initial de $5 \mu\text{m}$. Il est possible qu'il s'agisse d'un effet dû à l'amplification du champ électrostatique sous la pointe, ce qui pourrait conduire à une sorte de focalisation.

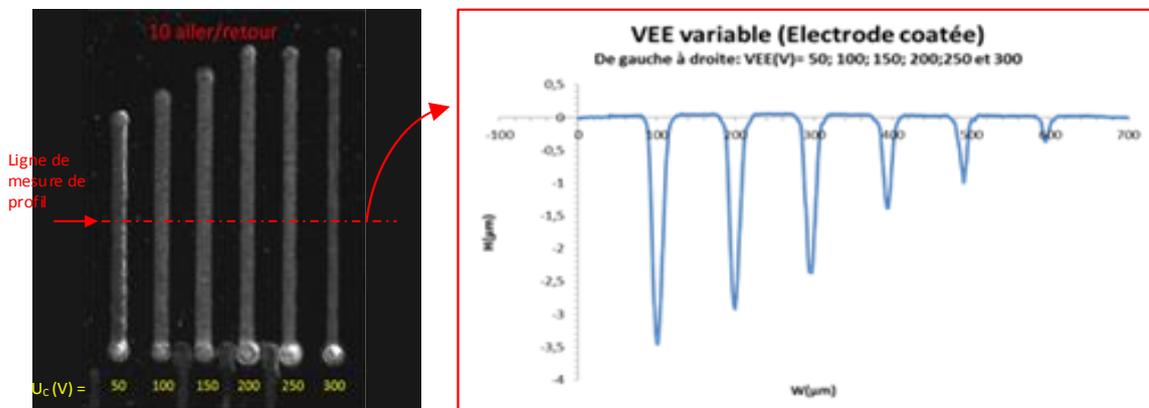


Figure 183 – A gauche : images optiques de canaux usinés avec des tensions de 50 à 300 V. A droite : caractérisation au profilomètre mécanique.

($\Phi_{\text{Electrode}} = 5 \mu\text{m}$; $C = 22 \text{ nF}$; entrefer initial $5 \mu\text{m}$; enfoncement $10 \mu\text{m}$)

La Figure 184 montre l'usinage d'une spirale d'Archimède de diamètre de 6mm et l'écart entre deux spires est de $100 \mu\text{m}$.

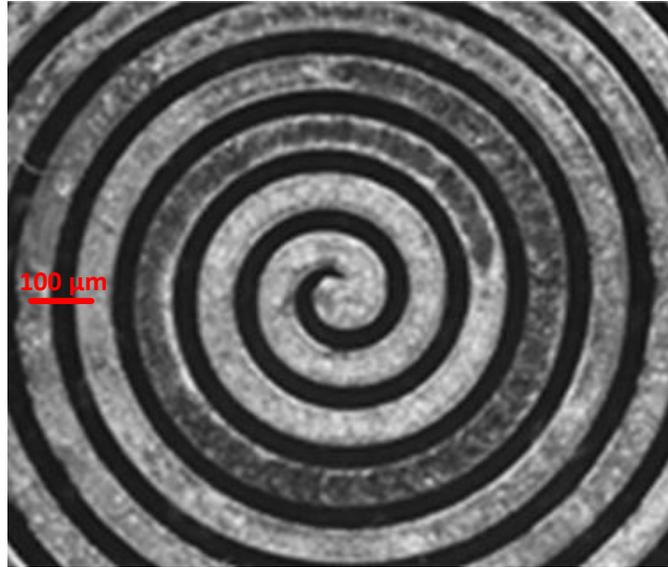


Figure 184 – Spirale d'Archimède.

($\Phi_{\text{Electrode}} = 20 \mu\text{m}$; $V_{EE} = 50\text{V}$; $C_C = 22 \text{ nF}$; entrefer initial $5 \mu\text{m}$; enfoncement $20 \mu\text{m}$)

ANNEXE 9 - PROBLEMES RENCONTRES LORS DES USINAGES

Dans cette annexe nous avons fait une liste de quelques problèmes rencontrés lors des essais d'usinage.

La Figure 185 montre la destruction d'un micro-outil par un arc électrique. Ce problème est difficile à éviter lorsque les outils sont de moins de 20 μm de diamètre. Les ramifications montrent probablement des filaments de matières en fusion.

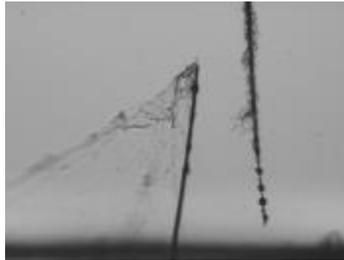


Figure 185 – Destruction d'un micro-outil par un arc électrique.

La Figure 186 montre un outil avant et après un usinage. On aperçoit les débris de matière usinés collés sur le micro-outil.

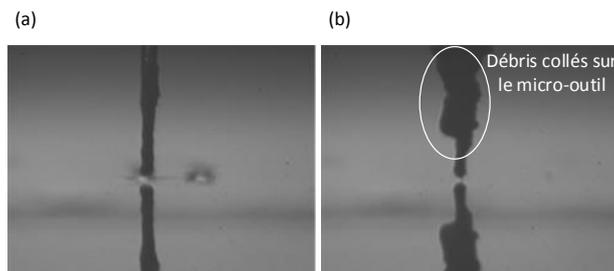


Figure 186 – Outil avant (a) et après (b) un usinage montrant le collage de débris.

La ci-dessous montre l'élargissement d'un canal aux points d'arrêt de la trajectoire de l'outil. Ce problème pourra être réglé à l'avenir en adaptant les vitesses de déplacement des axes (décélération en s'approchant des points d'arrêt et accélération en s'éloignant) et/ou en désactivant le générateur de décharges.

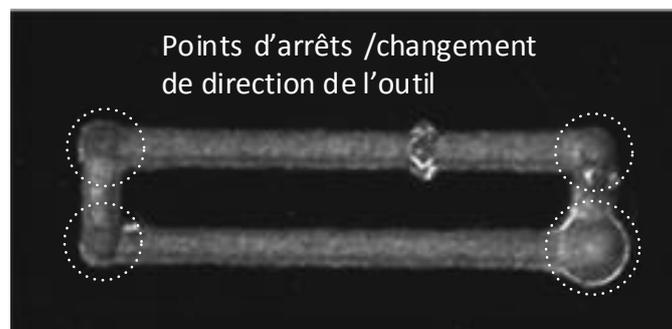


Figure 187 – Usinage de cavité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Cusanelli, M. Minello, and F. Torchia, "Properties of Micro-Holes for Nozzle by Micro-EDM in 15th International Symposium on ElectroMachining (ISEM XV), Proceeding, 2007."
- [2] O. de la Iglesia, V. Sebastián, R. Mallada, G. Nikolaidis, J. Coronas, G. Kolb, R. Zapf, V. Hessel, and J. Santamaría, "Preparation of Pt/ZSM-5 films on stainless steel microreactors," *Catal. Today*, vol. 125, no. 1–2, pp. 2–10, Jul. 2007.
- [3] L. G. Fréchet, S. A. Jacobson, K. S. Breuer, F. F. Ehrich, R. Ghodssi, R. Khanna, C. W. Wong, X. Zhang, M. A. Schmidt, and A. H. Epstein, "Demonstration of a microfabricated high-speed turbine supported on gas bearings," *Solid-State Sens. Actuator Work.*, 2000.
- [4] J. Peirs, D. Reynaerts, and F. Verplaetsen, "A microturbine for electric power generation," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 113, no. 1, pp. 86–93, Jun. 2004.
- [5] C. K. Malek, J.-C. Jeannot, and " M. Froelicher, "Multi-material micro/nanomanufacturing at FEMTO-innovation," *International Journal of Technology Transfer and Commercialisation*, vol. 7, no. 2–3, pp. 209–219, 2008."
- [6] T. Velten, H. H. Ruf, D. Barrow, N. Aspragathos, P. Lazarou, E. Jung, C. K. Malek, M. Richter, J. Kruckow, A. Member, and M. Wackerle, "Packaging of Bio-MEMS : Strategies , Technologies , and Applications," vol. 28, no. 4, pp. 533–546, 2005.
- [7] R. A. M. Receveur, F. W. Lindemans, and N. F. De Rooij, "Microsystem technologies for implantable applications," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 17, no. 5, pp. R50–R80, May 2007.
- [8] K. Cheval, J. Coulm, S. Gout, Y. Layouni, P. Lombard, D. Léonard, F. Bessueille, V. Semet, and M. Cabrera, "Progress in the manufacturing of molded interconnected devices by 3D Microcontact Printing, *Advances Materials Research Vol 1038 (2014)* pp 57-60."
- [9] I. Ait-Ali, P. Morin, V. Semet, M. Cabrera, and R. Ferrigno, "High precision machining strategy for the integration of electrochemical cells in Cyclic Olefin Copolymer microfluidic devices, *Procedia Engineering (2012)*, Vol 47, pages 450–453."
- [10] K. P. Rajurkar, G. Levy, A. Malshe, M. M. Sundaram, J. McGeough, X. Hu, R. Resnick, and A. DeSilva, "Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 2, pp. 643–666, Jan. 2006.
- [11] M. P. Jahan, M. Rahman, and Y. S. Wong, "A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 51, no. 12, pp. 837–858, Dec. 2011.

- [12] T. Gietzelt and L. Eichhorn, *Mechanical Micromachining by Drilling, Milling and Slotting*, DOI: 10.5772/34124 in “*Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nano Structures*”, book edited by Mojtaba Kahrizi, ISBN 978-953-307-906-6, Published: Febru. .
- [13] Girardin Guillaume, “Développement d’un procédé d’usinage par micro-électroérosion Thèse de l’Ecole Doctorale EEA (Electronique, Electrotechnique et Automatique) de l’Université Claude Bernard Lyon 1 soutenue le 20 décembre 2012, N° d’ordre : 315-2012.”
- [14] M. Cabrera, P. Morin, G. Girardin, Y. Layouni, and V. Semet, “Procédé et dispositif de fabrication d’un cylindre de diamètre micrométrique, - brevet européen EP2555897 délivré le 13/02/2013 - brevet français FR1001407 délivré le 07/10/2011,” .
- [15] M. Cabrera, “Machine et procédé d’usinage d’une pièce par micro-electroérosion Machine and method for machining a part by micro-electrical discharge machining. - brevet d’invention français FR0805148 délivré le 09/09/2011 - brevet d’invention européen EP2326450 délivré le 25/12/2013.
- [16] Y. Layouni, G. Girardin, A. Benilov, V. Semet, P. Morin, and M. Cabrera, “Micro EDM Milling with Automated Electrochemical Fabrication of the Cylindrical Microtool,” *Micro Nanosyst.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2011.
- [17] A. Benilov, “Nouveaux procédés d’élaboration et de mise en oeuvre de capteurs et microsystèmes en silicium et silicium poreux par des méthodes luminescentes et électriques, thèse de l’Ecole Centrale de Lyon, n° ordre 2007-18, soutenue le 17 juillet 2007,” 2007.
- [18] K. Ojha, R. K. Garg, and K. K. Singh, “MRR Improvement in Sinking Electrical Discharge Machining : A Review,” *J. Minearls Mater. Charact. Eng.*, vol. 9, no. 8, pp. 709–739, 2010.
- [19] A. Anders, “Tracking down the origin of arc plasma science,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 31, no. 5, pp. 1052–1059, Oct. 2003.
- [20] A. Descoedres, “characterization of electrical discharge machining plasmas. Thèse N° 3542 de l’Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne pour l’obtention du grade de docteur ès sciences,” 2006.
- [21] S. Singh, S. Maheshwari, and P. C. Pandey, “Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 272–277, Jun. 2004.
- [22] A. Pandey and S. Singh, “Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining : A review,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 6, pp. 2172–2191, 2010.
- [23] C. B. Reddy, G. J. Reddy, and C. E. Reddy, “Growth of Electrical Discharge Machining and Its Applications – A Review,” *Int. J. Eng. Res. Dev.*, vol. 4, no. 12, pp. 13–22, 2012.

- [24] D. Sudhakara, B. V. Naik, and B. Sreenivasulu, "The experimental analysis of surface characteristics of inconel-718 using electrical discharge machining," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 371–388, 2012.
- [25] B. M. Schumacher, R. Krampitz, and J.-P. Kruth, "Historical Phases of EDM Development Driven by the Dual Influence of 'Market Pull' and 'Science Push,'" *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 5–12, 2013.
- [26] L. Bianchi and E. Regal, "Usinage par électroérosion," *Tech. l'ingénieur*, vol. B7310, pp. 2–24, 1987.
- [27] C. Joseph, "Contribution à l'accroissement des performances du processus de μ EDM par l'utilisation d'un robot à dynamique élevée et de haute précision. thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne," vol. 3281, 2005.
- [28] A. Descoedres, C. Hollenstein, G. Walder, and R. Perez, "Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 22, pp. 4066–4073, Nov. 2005.
- [29] A. Descoedres, C. Hollenstein, R. Demellayer, and G. Walder, "Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 184–190, Jun. 2004.
- [30] W. Natsu, S. Ojima, T. Kobayashi, and M. Kunieda, "Temperature Distribution Measurement in EDM Arc Plasma Using Spectroscopy," *JSME Int. J. Ser. C Mech. Syst. Mach. Elem. Manuf.*, vol. 47, no. 1, pp. 384–390, 2004.
- [31] A. Kojima, W. Natsu, and M. Kunieda, "Spectroscopic measurement of arc plasma diameter in EDM," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 203–207, Jan. 2008.
- [32] K. Albinski, K. Musiol, A. Miernikiewicz, S. Labuz, and M. Malota, "The temperature of a plasma used in electrical discharge machining," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 5, pp. 736–742, 1996.
- [33] B. M. Schumacher, "After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 2004, pp. 376–381.
- [34] C. Joseph, "Contribution à l'accroissement des performances du processus de μ EDM par l'utilisation d'un robot," Thèse n°3281, EPFL, 142 p., 2005.
- [35] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, A. J. Schwabe, and H. Yamashita, "Propagation and Structure of Streamers in liquid Diele," pp. 6–17, 1998.
- [36] T. Aka-Ngnui and A. Beroual, "Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 1408–1412, 2001.

- [37] J. Qian, R. P. Joshi, E. Schamiloglu, J. Gaudet, J. R. Woodworth, and J. Lehr, "Analysis of polarity effects in the electrical breakdown of liquids," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 2, pp. 359–369, Jan. 2006.
- [38] J. Qian, R. P. Joshi, J. Kolb, K. H. Schoenbach, J. Dickens, A. Neuber, M. Butcher, M. Cevallos, H. Krompholz, E. Schamiloglu, and J. Gaudet, "Microbubble-based model analysis of liquid breakdown initiation by a submicrosecond pulse," *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 11, p. 113304, 2005.
- [39] Y. S. Wong, L. C. Lim, I. Rahuman, and W. M. Tee, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 79, no. 1–3, pp. 30–40, Jul. 1998.
- [40] W. Natsu, M. Shimoyamada, and M. Kunieda, "Study on Expansion Process of EDM Arc Plasma," *JSME Int. J. Ser. C*, vol. 49, no. 2, pp. 600–605, 2006.
- [41] G. Vasudevamurthy and T. W. Knight, "Effect of system parameters on size distribution of 304 stainless steel particles produced by electrical discharge mechanism," *Mater. Lett.*, vol. 61, no. 27, pp. 4872–4874, Nov. 2007.
- [42] J.-C. Diot, W. Zaugg, G. Naville, and J.-P. Briffod, "Rotative tool-electrodes of simple shapes for 3D electroerosive machining. U.S. Patent 61844862001," 2001.
- [43] K. H. Ho and S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, no. 2003, pp. 1287–1300, 2003.
- [44] D. T. Pham, S. S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, and K. Popov, "Micro-EDM—recent developments and research issues," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 50–57, Jun. 2004.
- [45] R. K. Garg, K. K. Singh, A. Sachdeva, V. S. Sharma, K. Ojha, and S. Singh, "Review of research work in sinking EDM and WEDM on metal matrix composite materials," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 50, no. 5–8, pp. 611–624, Feb. 2010.
- [46] M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, and B. M. Schumacher, "Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 64–87, 2005.
- [47] M. P. Jahan, M. Rahman, and Y. S. Wong, "A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 51, no. 12, pp. 837–858, Dec. 2011.
- [48] S. Sommer, C. & Sommer, *Complete EDM Handbook : Wire EDM, RAM EDM, Small Hole EDM, Practical Information for Designers, Engineers, Machinists, Tool and Die Makers, Mold Makers and Others in the Machining Fields. Advance Publ.* 2005.
- [49] M. Munz, M. Risto, and R. Haas, "Specifics of Flushing in Electrical Discharge Drilling," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 83–88, 2013.

- [50] P. Kuppan, a. Rajadurai, and S. Narayanan, "Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 38, no. 1–2, pp. 74–84, May 2007.
- [51] M. Sen and H. Shan, "A review of electrochemical macro- to micro-hole drilling processes," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 2, pp. 137–152, Feb. 2005.
- [52] J. Richard and R. Demellayer, "Micro-EDM-milling Development of New Machining Technology for Micro-machining," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 292–296, 2013.
- [53] K. Liu, B. Lauwers, and D. Reynaerts, "Process capabilities of Micro-EDM and its applications," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 47, no. 1–4, pp. 11–19, Apr. 2010.
- [54] F. Han, "Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control," *Precis. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 378–385, Oct. 2004.
- [55] S. Mahendran, R. Devarajan, T. Nagarajan, and A. Majdi, "A Review of Micro-EDM. Proceedings of the International MultiConference of Engineering and Computer Scientists, Hong Kong," 2010, vol. 2.
- [56] A. Shah, V. Prajapati, P. Patel, and A. Pandey, "Development of pulsed power dc supply for micro edm," *UGC Natl. Conf. Adv. Comput. Integr. Manuf.*
- [57] G. Bissacco, H. N. Hansen, G. Tristo, and J. Valentincic, "Feasibility of wear compensation in micro EDM milling based on discharge counting and discharge population characterization," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 231–234, Jan. 2011.
- [58] D. K. Chung, B. H. Kim, and C. N. Chu, "Micro electrical discharge milling using deionized water as a dielectric fluid," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 17, no. 5, pp. 867–874, May 2007.
- [59] G. Paul, S. Roy, S. Sarkar, N. Hanumaiah, and S. Mitra, "Investigations on influence of process variables on crater dimensions in micro-EDM of γ -titanium aluminide alloy in dry and oil dielectric media," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 5–8, pp. 1009–1017, 2012.
- [60] Y. . Wong, M. Rahman, H. . Lim, H. Han, and N. Ravi, "Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 140, no. 1–3, pp. 303–307, Sep. 2003.
- [61] M. Kunieda, "Challenges to miniaturization in micro EDM," *ASPE Proc. Annu. Meet.*, vol. 23, 2008.
- [62] H. V. Sinh, B. T. Long, and N. C. Hien, "A study of method to control EDMing process," *Hanoi Univ. Technol. Ritsumeikan Univ. Jt. Symp. Sensory-Motor Coord. Robot. Manip.*, pp. 91–96, 2004.

- [63] F. Han, Y. Yamada, T. Kawakami, and M. Kunieda, "Experimental attempts of sub-micrometer order size machining using micro-EDM," *Precis. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 123–131, Apr. 2006.
- [64] A. Benilov, V. Skryshevsky, Y. Robach, and M. Cabrera, "Micro and nano electrical discharge machining in microfluidics and micro nanotechnology," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 1, pp. 1315–1318, 2008.
- [65] A. B. M. A. Asad, "Micro-EDM process for tool-base compound micromachining, PhD thesis, National University of Singapor (2012)."
- [66] E. Uhlmann, S. Piltz, and U. Doll, "Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining—Recent development," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 167, no. 2–3, pp. 488–493, Aug. 2005.
- [67] "4M | Multi Material Micro Manufacture Network of Excellence," [Online]. Available: <http://www.4m-net.org/>.
- [68] M. P. Jahan, Y. S. Wong, and M. Rahman, "A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 8, pp. 3956–3967, Apr. 2009.
- [69] O. Blatnik, J. Valentin, and M. Junkar, "Comparison of optimal machining parameters of sinking EDM and micro EDM processes," *Int. Conf. Multi-material micro Manuf. Karlsruhe, Ger.*, pp. 473–476, 2005.
- [70] G. L. Benavides, L. F. Bieg, M. P. Saavedra, and E. a. Bryce, "High aspect ratio meso-scale parts enabled by wire micro-EDM," *Microsyst. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 395–401, Sep. 2002.
- [71] A. Schoth, R. Förster, and W. Menz, "Micro wire EDM for high aspect ratio 3D microstructuring of ceramics and metals," *Microsyst. Technol.*, vol. 11, no. 4–5, pp. 250–253, Apr. 2005.
- [72] M.-T. Yan, C.-W. Huang, C.-C. Fang, and C.-X. Chang, "Development of a prototype Micro-Wire-EDM machine," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 99–105, Jun. 2004.
- [73] D.-T. Pham, S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, and K. Popov, "Micro-EDM Drilling : Accuracy Study," *Adv. Integr. Des. Manuf. Mech. Eng.*, pp. 281–294, 2005.
- [74] C. Diver, J. Atkinson, H. J. Helml, and L. Li, "Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 296–303, Jun. 2004.
- [75] T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, T. Suzuki, and N. Kinoshita, "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 431–434, Jan. 1985.

- [76] D. K. Chung, B. H. Kim, and C. N. Chu, "Micro electrical discharge milling using deionized water as a dielectric fluid," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 17, no. 5, pp. 867–874, May 2007.
- [77] K. Y. Song, D. K. Chung, M. S. Park, and C. N. Chu, "Micro electrical discharge milling of WC-Co using a deionized water spray and a bipolar pulse," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 4, pp. 1–10, Apr. 2010.
- [78] H.-L. Yu, J.-J. Luan, J.-Z. Li, Y.-S. Zhang, Z.-Y. Yu, and D.-M. Guo, "A new electrode wear compensation method for improving performance in 3D micro EDM milling," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 5, p. 7pp, May 2010.
- [79] K. Takahata, N. Shibaike, and H. Guckel, "High-aspect-ratio WC-Co microstructure produced by the combination of LIGA and micro-EDM," *Microsyst. Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 175–178, 2000.
- [80] M. T. Richardson and Y. B. Gianchandani, "Achieving precision in high density batch mode micro-electro-discharge machining," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 18, no. 1, p. 12pp, Jan. 2008.
- [81] I. Ait-ali, "Développement et intégration de microcapteurs de pH et de température dans des dispositifs microfluidiques polymères. Thèse de doctorat soutenue publiquement le 13-01-2014 à l'institut des nanotechnologies de Lyon INL," 2014.
- [82] S.-T. Chen, H.-Y. Yang, and C.-W. Du, "Study of an ultrafine w-EDM technique," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 19, no. 11, p. 8pp, Nov. 2009.
- [83] T. Masuzawa, J. Tsukamoto, and M. Fujino, "Drilling of Deep Microholes by EDM," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 195–198, Jan. 1989.
- [84] M. L. Jeswani, "Small hole drilling in edm," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, vol. 19, no. 3, pp. 165–169, 1979.
- [85] B. Jha and M. Rao, "An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining," *J. Eng. Tehcnology Rev.*, vol. 4, no. 2, pp. 118–130, 2011.
- [86] M. Ay, U. Çaydaş, and A. Hasçalık, "Optimization of micro-EDM drilling of inconel 718 superalloy," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 5–8, pp. 1015–1023, Jul. 2012.
- [87] Z. Wansheng, W. Zhenlong, D. Shichun, C. Guanxin, and W. Hongyu, "Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 120, no. 1–3, pp. 101–106, Jan. 2002.
- [88] J. Fleischer, T. Masuzawa, J. Schmidt, and M. Knoll, "New applications for micro-EDM," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 246–249, Jun. 2004.
- [89] Masuzawa and T., "Micro-EDM, in : Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining (ISEM. 13), Bilbao, Spain," vol. 1, pp. 3–20, 2001.

- [90] S. P. Moylan, S. Chandrasekar, and G. L. Benavides, “High-Speed Micro-Electro-Discharge Machining. Sandia Report SAND2005-5023 (Oak Ridge, TN : United States Department of Energy),” 2005.
- [91] I. M. F. Bragança, G. R. Ribeiro, L. M. M. Alves, and P. A. R. Rosa, “MACHINE TOOL DEVELOPMENT FOR MICRO-EDM,” *6^o CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 11 a 15 de Abril de 2011. Caxias do Sul - RS*, 2011.
- [92] M. Garzon, O. Adams, D. Veselovac, M. Blattner, R. Thiel, and a. Kirchheim, “High Speed Micro Machining Processes Analysis for the Precision Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 609–614, 2012.
- [93] “<http://www.posalux.net/site/fr/technology/edm>.” .
- [94] “<http://mikrotools.com/>.” .
- [95] T. Masaki, T. Mizutani, A. Tanaka, and K. Yonemauchi, “U.S. Patent No. 4,900,890. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.,” 1990.
- [96] C. J. Morgan, “Micro electro-discharge machining: techniques and procedures for micro fabrication, PhD thesis, University of Kentucky, 2004,” 2004.
- [97] Morgan, C. J. Vallance, R. R., & Marsh, and E. R., “Micro-machining and micro-grinding with tools fabricated by micro electro-discharge machining,” *Int. J. Nanomanuf.*, vol. 1, no. 2, pp. 242–258, 2006.
- [98] C. Morgan, S. Shreve, & Vallance, and R. R., “Precision of micro shafts machined with wire electro-discharge grinding. In Proceedings of the Winter Topical Meeting on Machines and Processes for Micro-Scale and Meso-Scale Fabrication, Metrology, and Assembly,” *Am. Soc. Precis. Eng.*, 2003.
- [99] M. M. Anwar, “A study on micro-patterning of polypyrrole using micro-electro-discharge machining. A PHD thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master Of Applied Science of the University Of Singapore,” 2012.
- [100] T. T. Öpöz, “Manufacturing of micro holes by using micro electric discharge machining (Micro-EDM), Master thesis, Atilim University,” 2008.
- [101] F. Leleu, “Micro-fraisage 3D assisté par électro-érosion, Journée « De la micro-plasturgie à la nano-plasturgie », PEP Centre Technique de la Plasturgie, Oyonnax, 8 Décembre 2011. <http://www.innovdays-plasturgie.com/innovdays/Illustrations/Documents/InnovDays/2011/2>.” .
- [102] K. Liu, E. Ferraris, J. Peirs, B. Lauwers, and D. Reynaerts, “Process Capabilities of Micro-EDM and its applications,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 47, no. 1–4, pp. 11–19, 2009.

- [103] K. Liu, D. Reynaerts, and B. Lauwers, "Influence of the pulse shape on the EDM performance of Si₃N₄-TiN ceramic composite," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 217–220, Jan. 2009.
- [104] R. Jurischka, A. Schoth, C. Müller, C. Baggi, R. Gallera, and Reinecke H., "Rapid Hybrid Tooling based on CNC- and μ EDM-milling to fabricate Lab-on-a-Chip Systems," *Proc. 3rd Int. Conf. Multi-Material Micro Manuf. 4M2007, Borovets, Bulg. 3-5 Oct. 2007*.
- [105] M. D. Nguyen, M. Rahman, and Y. S. Wong, "Enhanced surface integrity and dimensional accuracy by simultaneous micro-ED/EC milling," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 191–194, Jan. 2012.
- [106] G. Girardin, Y. Layouni, P. Morin, and M. Cabrera, "Micro EDM with the in situ electrochemical fabrication and regeneration of the tungsten microelectrode tool," *Int. J. Mater. Form.*, vol. 3, no. 1, pp. 1083–1086, 2010.
- [107] D. Dornfeld, S. Min, and Y. Takeuchi, "Recent Advances in Mechanical Micromachining," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 2, pp. 745–768, 2006.
- [108] Y. Layouni, G. Girardin, A. Benilov, V. Semet, P. Morin, and M. Cabrera, "Onboard Electrochemical Fabrication of Microelectrodes for Micro EDM Milling," *Micro Nanosyst.*, vol. 3, pp. 215–221, 2011.
- [109] M. Cabrera, Y. Layouni, G. Girardin, R. Dahmani, and V. Semet, "Characterization and modeling of electrical discharges in air for micro EDM machining," in *Proceedings of the 4M2013, San Sebastian, Spain, 8th - 10th October 2013*, pp. 1–4.
- [110] J. Chae, S. S. Park, and T. Freiheit, "Investigation of micro-cutting operations," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 3–4, pp. 313–332, Mar. 2006.
- [111] X. Ding, D. L. Butler, G. C. Lim, C. K. Cheng, K. C. Shaw, K. Liu, W. S. Fong, and H. Y. Zheng, "Machining with micro-size single crystalline diamond tools fabricated by a focused ion beam," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 19, no. 2, p. 025005, Feb. 2009.
- [112] P. Li, D. Zdebski, H. H. Langen, a M. Hoogstrate, J. a J. Oosterling, R. H. Munnig Schmidt, and D. M. Allen, "Micromilling of thin ribs with high aspect ratios," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 11, p. 115013, Nov. 2010.
- [113] G. Barillaro, a. Nannini, and M. Piotta, "Electrochemical etching in HF solution for silicon micromachining," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 102, no. 1–2, pp. 195–201, Dec. 2002.
- [114] L. Cagnon, V. Kirchner, M. Kock, R. Schuster, G. Ertl, W. T. Gmelin, and H. Kück, "Electrochemical Micromachining of Stainless Steel by Ultrashort Voltage Pulses," *Zeitschrift für Phys. Chemie*, vol. 217, no. 4–2003, pp. 299–314, Apr. 2003.

- [115] H. Hocheng, Y. H. Sun, S. C. Lin, and P. S. Kao, "A material removal analysis of electrochemical machining using flat-end cathode," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 140, no. 1–3, pp. 264–268, Sep. 2003.
- [116] B. H. Kim, C. W. Na, Y. S. Lee, D. K. Choi, and C. N. Chu, "Micro Electrochemical Machining of 3D Micro Structure Using Dilute Sulfuric Acid," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 191–194, 2005.
- [117] J. Kozak, K. P. Rajurkar, and Y. Makkar, "Study of Pulse Electrochemical Micromachining," *J. Manuf.*, no. 2001, pp. 7–14, 2004.
- [118] B. J. Park, B. H. Kim, and C. N. Chu, "The Effects of Tool Electrode Size on Characteristics of Micro Electrochemical Machining," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 1, pp. 197–200, 2006.
- [119] H. S. Shin, B. H. Kim, and C. N. Chu, "Analysis of the side gap resulting from micro electrochemical machining with a tungsten wire and ultrashort voltage pulses," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 18, no. 7, p. 075009, Jul. 2008.
- [120] Y. Wang, H. Chen, Z. Wang, Z. Zhou, and D. Shan, "Development of a Soft-Computer Numerical Control System for Micro - Electrochemical Machining," *Am. J. Nanotechnol.*, vol. 1, no. 2, pp. 51–55, 2010.
- [121] R. Wüthrich and V. Fascio, "Machining of non-conducting materials using electrochemical discharge phenomenon—an overview," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 9, pp. 1095–1108, Jul. 2005.
- [122] R. Wüthrich and A. Allagui, "Building micro and nanosystems with electrochemical discharges," *Electrochim. Acta*, vol. 55, no. 27, pp. 8189–8196, Nov. 2010.
- [123] D. Zhu, K. Wang, and N. S. Qu, "Micro Wire Electrochemical Cutting by Using In Situ Fabricated Wire Electrode," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 241–244, 2007.
- [124] H. Klank, J. P. Kutter, and O. Geschke, "CO₂-laser micromachining and back-end processing for rapid production of PMMA-based microfluidic systems," *R. Soc. Chem.*, vol. 2, no. 4, pp. 242–246, Nov. 2002.
- [125] J.-Y. Cheng, C.-W. Wei, K.-H. Hsu, and T.-H. Young, "Direct-write laser micromachining and universal surface modification of PMMA for device development," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 99, no. 1, pp. 186–196, Apr. 2004.
- [126] H. Y. Zheng and Z. W. Jiang, "Femtosecond laser micromachining of silicon with an external electric field," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 1, p. 017001, Jan. 2010.
- [127] K. Liu, Z. NiCkolov, J. Oh, and H. "Moses" Noh, "KrF excimer laser micromachining of MEMS materials: characterization and applications," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, no. 1, p. 015012, Jan. 2012.

- [128] W. Longsine-Parker and A. Han, "Laser stenciling: a low-cost high-resolution CO₂ laser micromachining method," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 22, no. 1, p. 015006, Jan. 2012.
- [129] M. Farsari, G. Filippidis, S. Zoppel, G. a Reider, and C. Fotakis, "Efficient femtosecond laser micromachining of bulk 3C-SiC," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 15, no. 9, pp. 1786–1789, Sep. 2005.
- [130] S. Kim, B. H. Kim, D. K. Chung, H. S. Shin, and C. N. Chu, "Hybrid micromachining using a nanosecond pulsed laser and micro EDM," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 20, no. 1, p. 015037, Jan. 2010.
- [131] G. Della Valle, R. Osellame, and P. Laporta, "Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses," *J. Opt. A Pure Appl. Opt.*, vol. 11, no. 1, p. 013001, Jan. 2009.
- [132] T. Endo, T. Tsujimoto, and K. Mitsui, "Study of vibration-assisted micro-EDM — The effect of vibration on machining time and stability of discharge," *Precis. Eng.*, vol. 32, pp. 269–277, 2008.
- [133] P. J. Liew, J. Yan, and T. Kuriyagawa, "Fabrication of deep micro-holes in reaction-bonded SiC by ultrasonic cavitation assisted micro-EDM," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 76, pp. 13–20, Jan. 2014.
- [134] T. Ichikawa and W. Natsu, "Realization of Micro-EDM under Ultra-Small Discharge Energy by Applying Ultrasonic Vibration to Machining Fluid," *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 326–331, Jan. 2013.
- [135] A. Gangadhart, M. S. Shunmugam, and P. K. Philip, "Pulse train studies in EDM with controlled pulse relaxation," *Int. J. Tools Manuf.*, vol. 32, no. 5, pp. 651–657.
- [136] D. Okano, "Simple method of determining plasma impedance of streamer discharge in atmospheric air.," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 82, no. 12, pp. 1–5, Dec. 2011.
- [137] B. Ekmekci, "Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM)," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, no. 23, pp. 9234–9240, Sep. 2007.
- [138] K. U. Leuven and S. Integrity, "Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining," vol. 44, no. I, pp. 169–172, 1995.
- [139] H. T. Lee and T. Y. Tai, "Relationship between EDM parameters and surface crack formation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 142, no. 3, pp. 676–683, Dec. 2003.
- [140] C. Ferri, A. Ivanov, and A. Petrelli, "Electrical measurements in μ -EDM," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 18, no. 9, p. 13, 2008.
- [141] H. S. Lim, Y. S. Wong, M. Rahman, and M. K. Edwin Lee, "A study on the machining of high-aspect ratio micro-structures using micro-EDM," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 140, no. 1–3, pp. 318–325, Sep. 2003.

- [142] M. Rahman, H. S. Lim, K. S. Neo, a. Senthil Kumar, Y. S. Wong, and X. P. Li, "Tool-based nanofinishing and micromachining," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 185, no. 1–3, pp. 2–16, Apr. 2007.
- [143] M. Sablier, "Usinage électrochimique," *Tech. l'ingénieur*, vol. B7270, pp. 2–14, 1996.
- [144] S. Singh and A. Bhardwaj, "Review to EDM by Using Water and Powder-Mixed Dielectric Fluid," *J. od Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 199–230, 2011.
- [145] A. J. Melmed, "The art and science and other aspects of making sharp tips," *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 9, no. 2, p. 601, Mar. 1991.
- [146] M. Salerno, "Coating of tips for electrochemical scanning tunneling microscopy by means of silicon, magnesium, and tungsten oxides.," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 81, no. 9, p. 093703, Sep. 2010.
- [147] B.-F. Ju, Y.-L. Chen, and Y. Ge, "The art of electrochemical etching for preparing tungsten probes with controllable tip profile and characteristic parameters.," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 82, no. 1, p. 013707, Jan. 2011.
- [148] Y. Liu, D. Zhu, Y. Zeng, and H. Yu, "Development of microelectrodes for electrochemical micromachining," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 1–4, pp. 195–203, Nov. 2010.
- [149] Z.-W. Fan and L.-W. Hourng, "The analysis and investigation on the microelectrode fabrication by electrochemical machining," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 7–8, pp. 659–666, Jun. 2009.
- [150] M. Kulawik, M. Nowicki, G. Thielsch, L. Cramer, H.-P. Rust, H.-J. Freund, T. P. Pearl, and P. S. Weiss, "A double lamellae dropoff etching procedure for tungsten tips attached to tuning fork atomic force microscopy/scanning tunneling microscopy sensors," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 74, no. 2, p. 1027, 2003.
- [151] A. Lucier, "Preparation and Characterization of Tungsten Tips Suitable for Molecular Electronics Studies. Thesis submitted to McGill University in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Science," 2004.
- [152] M. Anik, "pH-dependent anodic reaction behavior of tungsten in acidic phosphate solutions," *Electrochim. Acta*, vol. 54, no. 15, pp. 3943–3951, Jun. 2009.
- [153] M. Anik, "Anodic reaction characteristics of tungsten in basic phosphate solutions," *Corros. Sci.*, vol. 52, no. 9, pp. 3109–3117, Sep. 2010.
- [154] H.-J. Lim, Y.-M. Lim, and S. H. Kim, "Fabrication of tungsten micro-punch for micro-nozzles," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, no. 8, p. 3470, 2001.
- [155] M. Anik and K. Osseo-Asare, "Effect of pH on the Anodic Behavior of Tungsten," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 149, no. 6, p. B224, 2002.

- [156] R. D. Armstrong, K. Edmondson, and R. E. Firman, "The anodic dissolution of tungsten in alkaline solution," *J. Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.*, vol. 40, no. 1, pp. 19–28, Nov. 1972.
- [157] G. S. Kelsey, "The Anodic Oxidation of Tungsten in Aqueous Base," *J. of Electrochem. Soc.*, vol. 124, no. 6, pp. 814–819, 1977.
- [158] a. D. Davydov, a. P. Grigin, V. S. Shaldaev, and a. N. Malofeeva, "Limiting Current of Tungsten Electrochemical Dissolution under Conditions of Natural Convection: Vertical Plane Electrode," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 149, no. 1, p. E6, 2002.
- [159] Z.-W. Fan, L.-W. Hourng, and C.-Y. Wang, "Fabrication of tungsten microelectrodes using pulsed electrochemical machining," *Precis. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 489–496, Jul. 2010.
- [160] B.-F. Ju, Y.-L. Chen, M. Fu, Y. Chen, and Y. Yang, "Systematic study of electropolishing technique for improving the quality and production reproducibility of tungsten STM probe," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 155, no. 1, pp. 136–144, Oct. 2009.
- [161] M. Kulakov, I. Luzinov, and K. G. Kornev, "Capillary and surface effects in the formation of nanosharp tungsten tips by electropolishing," *Langmuir*, vol. 25, no. 8, pp. 4462–8, Apr. 2009.
- [162] N. J. Balmforth, N. Dubash, and A. C. Slim, "Extensional dynamics of viscoplastic filaments: I. Long-wave approximation and the Rayleigh instability," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 165, no. 19–20, pp. 1139–1146, Oct. 2010.
- [163] G. Beranger and H. Mazille, "Approche scientifique des surfaces. Caractérisation et propriétés," *Tech. l'ingénieur*, vol. M1425, pp. 2–19, 2005.
- [164] V. Srivastava and P. M. Pandey, "Effect of process parameters on the performance of EDM process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode," *J. Manuf. Process.*, vol. 14, no. 3, pp. 393–402, Aug. 2012.
- [165] B. H. Yan, F. Y. Huang, H. M. Chow, and J. Y. Tsai, "Micro-hole machining of carbide by electric discharge machining," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 87, no. 1–3, pp. 139–145.
- [166] K. Egashira, Y. Morita, and Y. Hattori, "Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes," *Precis. Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 139–144, Jan. 2010.
- [167] K. Egashira, A. Matsugasako, H. Tsuchiya, and M. Miyazaki, "Electrical discharge machining with ultralow discharge energy," *Precis. Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 414–420, Oct. 2006.
- [168] M. Kunieda and T. Kobayashi, "Clarifying mechanism of determining tool electrode wear ratio in EDM using spectroscopic measurement of vapor density," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 149, no. 1–3, pp. 284–288, Jun. 2004.

- [169] E. Aligiri, S. H. Yeo, and P. C. Tan, "A new tool wear compensation method based on real-time estimation of material removal volume in micro-EDM," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, no. 15, pp. 2292–2303, Nov. 2010.
- [170] G. Bissacco, J. Valentincic, H. N. Hansen, and B. D. Wiwe, "Towards the effective tool wear control in micro-EDM milling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 47, no. 1–4, pp. 3–9, May 2009.
- [171] C. Cogun and S. Akaslan, "The effect of machining parameters on tool electrode edge wear and machining. Performance in electric discharge machining (EDM)," *KSME Int. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 46–59, 2002.
- [172] J.-Z. Li, L. Xiao, H. Wang, H.-L. Yu, and Z.-Y. Yu, "Tool wear compensation in 3D micro EDM based on the scanned area," *Precis. Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 753–757, Jul. 2013.
- [173] Y. Yahagi, T. Koyano, M. Kunieda, and X. Yang, "Micro drilling EDM with high rotation speed of tool electrode using the electrostatic induction feeding method," *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 162–165, Jan. 2012.
- [174] Q. Yin, B. Wang, Y. Zhang, F. Ji, and G. Liu, "Research of lower tool electrode wear in simultaneous EDM and ECM," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 8, pp. 1759–1768, Aug. 2014.
- [175] Z. Y. Yu, T. Masuzawa, and M. Fujino, "Micro-EDM for three-dimensional cavities - Development of uniform wear method," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 169–172, 1998.
- [176] D. Staack, B. Farouk, A. Gutsol, and A. Fridman, "Characterization of a dc atmospheric pressure normal glow discharge," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 700–711, Nov. 2005.
- [177] J. Wang, E. Ferraris, M. Galbiati, J. Qian, and D. Reynaerts, "Combined pulse characterization and discrimination for micro-EDM milling tool wear study. Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture. San Sebastian, Spain," *4M Conf. 8-10 Oct. 2013*, pp. 978–981, 2013.
- [178] K. Egashira, A. Matsugasako, H. Tsuchiya, and M. Miyazaki, "Electrical discharge machining with ultralow discharge energy," *Precis. Eng.*, vol. 30, no. 2006, pp. 414–420, Oct. 2006.
- [179] K. Egashira and K. Mizutani, "EDM at Low Open-Circuit Voltage," *Int. J. Electr. Mach.*, vol. 10, pp. 21–26, 2004.
- [180] Y. M. Lim and S. H. Kim, "Diameter control of an extremely thin cylindrical microprobe by electrochemical etching," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, no. 5, p. 2166, 2000.

- [181] Q. Yann, S. Laurent, G. Grigore, L. Université, B. Pascal, I. Campus, and D. C. Les Cézeaux, "Aide au Choix des Stratégies d'Usinage . Etude de l ' état de surface," *X*, vol. X, pp. 1–12, 2001.
- [182] B. Raphet, "Etats de surface - Caractérisation," *Tech. l'Ingénieur*, vol. R1230, pp. 2–21, 2008.
- [183] B. Raphet, "Etat de surface - Mesure," *Tech. l'Ingénieur*, vol. R1231, pp. 2–13, 2006.
- [184] D. Kremer, "Usinage par électroérosion," *Tech. l'ingénieur*, vol. bm7251, pp. 2–22, 2000.
- [185] D. P. Adams, M. J. Vasile, G. Benavides, and A. N. Campbell, "Micromilling of metal alloys with focused ion beam–fabricated tools," *Precis. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 107–113, Apr. 2001.

RESUME

L'objet de cette thèse est d'étudier un procédé de fraisage par microélectroérosion (μ EE), qui est un procédé sans contact permettant d'usiner tous les matériaux durs conducteurs d'électricité à l'aide d'un micro-outil cylindrique ultrafin. Le principe consiste à créer des micro-décharges électriques entre le micro-outil et une pièce conductrice immergés dans un diélectrique liquide. En faisant parcourir à l'outil un parcours 3D, il est possible de creuser une forme complexe dans la pièce avec des détails à fort rapport d'aspect.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord amélioré un procédé d'élaboration de micro-outils cylindriques ultrafins par gravure électrochimique de barreaux de tungstène. Des outils de diamètre $32,6 \pm 0,3 \mu\text{m}$ sur une longueur de 3 mm ont été obtenus de manière automatique et reproductible. L'écart type a été divisé par 2 par rapport à l'état de l'art antérieur. Des outils de diamètre inférieur ont été obtenus avec une intervention de l'opérateur, et ce jusqu'à $3 \mu\text{m}$ de diamètre.

Puis ces micro-outils ont été mis en œuvre pour usiner des pièces avec le procédé de fraisage par microélectroérosion. Pour ce faire, une machine de 2ème génération a été entièrement développée sur la base de travaux antérieurs. Il a été possible d'usiner de l'acier inoxydable dans de l'eau déionisée avec des micro-outils de $3 \mu\text{m}$ de diamètre sans détérioration de l'outil. Par ailleurs, Le procédé de μ EE a été caractérisé en termes de résolution d'usinage, taux d'enlèvement de matière et usure de l'outil. Un générateur de décharges original a permis d'usiner avec des micro-décharges de 1 à 10 nJ / étincelle avec une diminution très sensible de l'usure de l'outil par rapport à l'état de l'art. Un procédé original de caractérisation en ligne des décharges et de cartographie dans l'espace a aussi été développé.

Mots clefs : micro usinage, électroérosion, microélectroérosion, fraisage par microélectroérosion, gravure électrochimique, micro-outil, microélectrode, décharge électrique, acier inoxydable, tungstène.

ABSTRACT

This work aims at studying Micro Electrical Discharge Milling (μ EDM milling), which is a non-contact process allowing machining all hard and electrically conductive materials with a cylindrical ultrathin tool. The principle is based on the creation of electrical micro discharges between the tool and an electrically conductive part immersed in a liquid dielectric. By means of a 3D path, the tool machines a complex shape in the part with high aspect ratio details.

In this work, we have firstly improved a process for making cylindrical ultrathin micro-tools by electrochemical etching of tungsten rods. Tools with a diameter of $32.6 \pm 0.3 \mu\text{m}$ and a length of 3 mm have been obtained with an automated and reproducible process. Standard deviation has been divided by 2 by comparison with the previous state of the art. Tools with diameter as low as $3 \mu\text{m}$ have been fabricated with the help of the machine operator

Then these micro-tools have been used for machining parts with the μ EDM milling process. To do so, a second generation machine has been entirely developed on the basis of previous work. It has been possible to machine stainless steel in deionized water with $3 \mu\text{m}$ micro-tools without damaging the tools. In other respects, the μ EDM milling process has been characterized in terms of machining resolution, material removal rate and tool wear. An innovative generator of discharges allow machining with 1 to 10 nJ / spark with a reduced tool wear by comparison to the state of the art. An innovative process for the on line characterization of discharges with spatial distribution capability has been developed.

Key words : micromachining, electro discharge machining, micro electro discharge machining milling μ -EDM, electrochemical etching, micro-tool, micro-electrode, spark, stainless steel, tungsten.