



**HAL**  
open science

## Développement d'un procédé d'usinage par micro-électroérosion

Guillaume Girardin

► **To cite this version:**

Guillaume Girardin. Développement d'un procédé d'usinage par micro-électroérosion. Autre. Université Claude Bernard - Lyon I, 2012. Français. NNT : 2012LYO10315 . tel-00873543

**HAL Id: tel-00873543**

**<https://theses.hal.science/tel-00873543>**

Submitted on 15 Oct 2013

**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 : 315-2012  
Année 2012

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON  
Délivrée par  
L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

ECOLE DOCTORALE : Électronique, Électrotechnique, Automatique - EEA  
DIPLOME DE DOCTORAT  
(Arrêté du 7 août 2006)

Discipline : Micro et Nanotechnologie

Soutenue publiquement  
Par

**Guillaume GIRARDIN**

Le 20 Décembre 2012

# Développement d'un procédé d'usinage par micro-électroérosion

Directeur de thèse : M. Vincent SEMET, Maître de Conférences, Université Lyon 1.

Co-Encadrant : M. Michel CABRERA, Chargé de Recherche, CNRS.

## JURY :

Président du Jury : M. Joël RECH, Professeur des Universités, ENISE, Saint-Etienne.

Rapporteur : M. Jean-Claude GELIN, Professeur des Universités, Institut Femto-ST, Besançon.

Rapporteur : M. Thierry BELMONTE, Directeur de Recherche, Institut Jean Lamour, Nancy.

Examineur : M<sup>me</sup> Yasmina LAYOUNI, Chargé de Recherche, Lyon 1.

Invitée : M<sup>me</sup> Rose-Marie SAUVAGE, Responsable Scientifique DGA, Paris.



*Stay Hungry, Stay Foolish.*  
*S. P. Jobs*



## RESUME

### TITRE : DEVELOPPEMENT D'UN PROCEDE D'USINAGE PAR MICRO-ELECTROEROSION

L'électroérosion (EE) est une technique d'usinage sans contact de matériaux conducteurs d'électricité ; elle particulièrement bien adaptée à l'usinage de matériaux durs. Le principe consiste à créer des décharges électriques érodantes entre un outil et une pièce à usiner, toutes deux immergées dans un diélectrique. Dans cette thèse, nous avons étudié la miniaturisation de ce procédé, la microélectroérosion ( $\mu$ EE), qui se présente comme un procédé complémentaire des techniques de micro-usinage mécanique, laser, ou encore des techniques issues de la microtechnologie du silicium (RIE, DRIE, LIGA). Toutefois, la résolution de la  $\mu$ EE est limitée.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord développé un procédé original d'élaboration de micro-outils cylindriques en tungstène par gravure électrochimique. Celui-ci permet d'obtenir de manière reproductible des micro-outils de diamètre 15  $\mu$ m et de rapport hauteur sur diamètre supérieur à 50. Des micro-outils plus fins ont aussi été obtenus (jusqu'à 700 nm) mais avec des problèmes de reproductibilité. Par ailleurs, un prototype de machine de fraisage par  $\mu$ EE a été développé avec une électronique entièrement caractérisée. Des micro-canaux de 40  $\mu$ m de largeur ont été obtenus dans l'acier d'inoxydable et 25  $\mu$ m dans le titane ; une rugosité Ra de 86 nm a été atteinte dans des cavités de 600 x 600 x 30  $\mu$ m. Les limitations du dispositif expérimental ont aussi été mises en évidence. Dans la dernière partie de ce travail, nous avons procédé à l'étude des microdécharges et du micro-plasma s'établissant entre micro-outil et pièce à l'aide de caractérisations électriques. La résistance et l'inductance des décharges ont été déterminées expérimentalement puis intégrées dans un modèle permettant de prévoir la durée des impulsions de courant et leur intensité. Des pistes pour l'amélioration de la résolution d'usinage sont proposées en conclusion de ce travail.

*Mots clés* : micro usinage, électroérosion, micro-électroérosion, fraisage par micro-électroérosion, gravure électrochimique, micro-outil, micro-électrode, décharge électrique, micro-plasma.

*Discipline* : micro et nanotechnologie

*Laboratoire* : Institut des Nanotechnologies de Lyon - UMR 5270  
Bâtiment Brillouin - RdC - 43, Boulevard du 11 Novembre 1918 - 69622 Villeurbanne

## ABSTRACT

TITLE : DEVELOPPEMENT OF A MACHINING PROCESS BY EDM

Electro Discharge Machining (EDM) is a non-contact technique allowing machining of electrically conductive materials; it is well adapted for the machining of hard materials. The principle is based on the creation of eroding electrical discharges between a tool and a piece, both immersed in a dielectric. In this thesis, we have studied the miniaturization of the process, called micro electro discharge machining ( $\mu$ -EDM), which is considered as a complementary technique of mechanical or laser micro-machining techniques and silicon micro technology processes (RIE, DRIE, LIGA).. However, the resolution of  $\mu$ EDM is limited.

In this work, we have firstly developed an original method for making tungsten micro-tools with cylindrical profile by electrochemical etching. This method allows the reproducible fabrication of micro-tool with 15- $\mu$ m diameter. Thinner micro-tools were also obtained (down to 700 nm) with reproducibility problems. Furthermore, a prototype machine for milling  $\mu$ -EDM was developed with a fully characterized electronics. Micro channels were obtained respectively in stainless steel with a width of 40 $\mu$ m and in titanium with a width of 25 $\mu$ m; a surface roughness Ra of 86 nm was achieved in 600 x 600 x 30  $\mu$ m cavities. Besides, the limitations of the apparatus were highlighted. In the last part of this work, we have studied the micro-discharge and the micro-plasma between the micro-tool and the part with electrical characterization. The resistivity and the inductance of the sparks were measured and integrated in a numerical model in order to explain the duration of the micro discharges and their intensity. Solutions for improving the machining resolution are also discussed at the end of this work.

*Keywords* : micromachining, electro discharge machining, micro electro discharge machining milling  $\mu$ -EDM, electrochemical etching, micro-tool, micro-electrode, spark, micro-plasma.

## LISTE DES PUBLICATIONS

Publications :

- G. Girardin, Y. Layouni, P. Morin, and M. Cabrera, "Micro EDM with the in situ electrochemical fabrication and regeneration of the tungsten microelectrode tool," International Journal of Material Forming, vol. 3, no. Supplément, pp. 1083–1086, 2010.
- 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 and Nanosystems, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2011.

Brevet :

- M. Cabrera, G. Girardin, P. Morin, Y. Layouni, V. Semet  
Procédé et dispositif de fabrication d'un cylindre de diamètre micrométrique
  - o Brevet français FR10/01407 délivré le 6/4/2010
  - o Demande de brevet international PCT/EP2011/055370 déposée le 06/04/2011

## REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je tiens à remercier la Direction Générale de l'Armement, DGA et le CNRS pour leur contribution à ma bourse de thèse, sans qui ces travaux n'auraient pas pu être menés. Je remercie également les soutiens financiers de ce projet que sont le FUI ConProMi, le programme de maturation technologique L356 de Lyon Science Transfert, ainsi que l'ANR Emergence. J'adresse aussi mes remerciements à mes directeurs de thèse M. Morin et M. Semet pour leur encadrement et leur aide. Je remercie aussi M. Cabrera, mon encadrant de tous les jours pour sa disponibilité, ses conseils avisés et les nombreuses heures de travail et de corrections de ce manuscrit. Je n'oublie pas les autres membres de l'équipe, à commencer par Yasmina Layouni, l'électronicienne chevronnée, et Rabah Dahmani, ainsi qu'à tous les membres qui ont travaillé à un moment ou l'autre avec nous, Eric Baldino, les stagiaires Mansour, Achour, Helder, James, l'autre James et Miguel.

Un merci particulier à tous les membres du laboratoire avec, entre autres, Rosaria Ferrigno, pour son soutien et son aide. Ainsi qu'à toutes les personnes que j'ai côtoyées de près ou de loin, Louis et Pascal, Patrick, JéJé, Nicolas, Jihane, Marie-Pierre, mais aussi Sam et Stéphane de l'atelier de mécanique. A dire vrai, j'ai très certainement oublié des personnes et je m'en excuse très sincèrement. Je souhaite enfin bonne chance et beaucoup de courage à la relève du laboratoire, Kévin, Rabah, Renaud, Ruoxi et Imène.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury, à commencer par M. Joël RECH, qui a eu la gentillesse de bien vouloir présider ce jury. Aux rapporteurs, M. Jean-Claude GELIN, de l'ENSMM de Besançon et M. Thierry BELMONTE, de l'institut Jean Lamour de Nancy pour leur précieux temps passé à lire et juger ce manuscrit. Enfin merci aux autres membres de ce jury, M<sup>me</sup> Yasmina LAYOUNI et M<sup>me</sup> Rose-Marie SAUVAGE, ainsi que le membre invité M<sup>me</sup> Nelly BONIFACI d'avoir accepté d'être présents.

J'en entends certains commencer à se dire : « et nous, on est où ? ». Patience, patience... Je vais remercier très chaleureusement des personnes, qui sont devenus des amis, et sans qui ces années auraient été bien tristes.

A Mathieu (alias Bobby), notre photographe geek, pour sa sagesse et ses conseils sur la gastronomie lyonnaise. A Guillaume (alias Guinchon), son compagnon, expert en gaz, rugby, F1, bulletin de vote, un toulousain, un vrai ! A Jean-Nicolas (alias JN), l'esprit canal incarné, l'homme sans limites, enfin si, mais c'est les autres qui doivent lui mettre. A Mickael (alias Micky), notre ardéchois, roi de la danse, à qui je souhaite plein de bonnes choses pour la suite. A Kyan, notre pile 9V, qui nous a rajeuni le groupe avec son parlé « djeunz ». A Imène, pour sa touche féminine, sa gentillesse et son sang-froid de tous les jours.

Enfin une pensée pour deux personnes, ô combien importantes dans les phases de doutes, Cyrille, pour ses conseils, nos discussions, les fous rires... un grand merci. Et à Magalie pour sa générosité, sa sympathie et son aide très précieuse, un autre grand merci...

Une pensée aussi pour les compagnes et compagnons de toutes ces incroyables personnes qui nous ont suivis dans nos sorties.

Enfin, j'adresse mes plus profonds remerciements à Maman, Papa, Nico, Tim, Marine, Victoria, Françoise, Joël, les grands-parents, pour leur aide et leur soutien sans failles. Enfin, mille mercis à la personne qui partage ma vie, mon cœur, Stéphanie, pour ses encouragements, de m'avoir accompagné sur ce chemin et sans qui je n'en serai pas là aujourd'hui, merci infiniment...



## DEFINITIONS ET FORMULAIRES

Acronyme	Signification	Définition
μC		Microcontrôleur
μCP	Micro Contact Printing	
μEE		Micro-électroérosion
AEDG	Abrasive Electrical Discharge Grinding	Meulage par électroérosion abrasive
AFM	Atomic Force Microscope	Microscope à force atomique
AO		Amplificateur Opérationnel
CAO		Conception Assistée par Ordinateur
CI		Circuit Imprimé
CMOS	Complementary Metal-Oxide SC	
CNA		Convertisseur Numérique - Analogique
CNC	Computer Numerical Control	Commande numérique assistée par ordinateur
CVD	Chemical Vapor Deposition	Déposition chimique en phase vapeur
d.d.p.		Différence de potentiel
DRIE	Deep Reactive Ion Etching	Gravure profonde ionique réactive
E-beam	Electron Beam	Faisceau d'électrons
ECM	Electro Chemical Machining	Usinage par attaque électrochimique
EDG	Electrical Discharge Grinding	Meulage par électroérosion
EDM	Electro Discharge Machining	Usinage par électroérosion
EDT	Electrical Discharge Turning	Tournage par électroérosion
EE		Electro Erosion
ENH		Electrode Normale à Hydrogène
FAO		Fabrication Assistée par Ordinateur
FET	Field Effect Transistor	Transistor à effet de champ
FIB	Focused Ion Beam	Canon à ions focalisés
IHM		Interface Homme-Machine
ISP	In Situ Program	Programmation directe
KOH	Potassium Hydroxide	Hydroxyde potassium
LIGA	Lithographie Galvanik Abformung	Lithographie – Electroformage - Moulage
LMIS	Liquid Metal Ion Source	Source ionique métal/liquide
MEB		Microscope électronique à balayage
MEMS	Micro Electro Mechanical System	Microsystème électromécanique
MIPS		Millions d'instructions par seconde
MOSFET	Metal Oxide SC Field Effect Transistor	Transistor à effet de champ
MRR	Material Removal Rate	Taux d'enlèvement de matière
NI	National Instrument	National Instrument
POS		Potentiel d'Oxydation Standard

## DEFINITIONS ET FORMULAIRES

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>	<b>Définition</b>
PP		Polypropylène
PRS		Potentiel de Réduction Standard
PVD	Physical Vapor Deposition	Déposition physique en phase vapeur
RIE	Reactive Ion Etching	Gravure ionique réactive
SC		Semi-conducteur
STM	Scanning Tunneling Microscope	
TEM	Transmission Electron Microscope	
TWR	Tool Wear Rate	Taux d'usure de l'outil
UEDM	Ultrasonic Electrical Discharge Machining	Usinage par électroérosion ultrasonique
UGV		Usinage à grande vitesse
USB	Universal Serial Bus	Bus universel en transmission série
UV		Ultraviolet
VI	Virtual Instrument	Instrument Virtuel (LabView®)
WEDG	Wire Electrical Discharge Grinding	Meulage par électroérosion à fil

## TABLE DES MATIERES

<b>RESUME .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>LISTE DES PUBLICATIONS .....</b>	<b>6</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>7</b>
<b>DEFINITIONS ET FORMULAIRES .....</b>	<b>9</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>11</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS.....</b>	<b>15</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>19</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>21</b>
<b>1 Etude bibliographique sur l'électroérosion .....</b>	<b>25</b>
<b>1.1 Définition et principales variantes .....</b>	<b>25</b>
1.1.1 Introduction.....	25
1.1.2 Les variantes de l'électroérosion conventionnelle.....	27
<b>1.2 État de l'art de l'EE conventionnelle .....</b>	<b>29</b>
1.2.1 Étude du processus élémentaire de décharge électrique.....	30
1.2.2 Décomposition de la décharge.....	30
1.2.3 Typologie des décharges : décharge, arc et court-circuit .....	32
1.2.4 Générateurs de décharges .....	33
1.2.5 Régulation du procédé .....	38
1.2.6 Paramètres du procédé.....	41
1.2.7 Conclusion .....	50
<b>1.3 L'électroérosion à l'échelle microscopique.....</b>	<b>51</b>
1.3.1 La micro-électroérosion .....	51
1.3.2 Les variantes.....	51
1.3.3 Les machines commerciales .....	52
1.3.4 Ordres de grandeur .....	53
1.3.5 Aux limites de la microélectroérosion : la nano-électroérosion .....	54
<b>1.4 Conclusion et objectifs de ce travail.....</b>	<b>55</b>
1.4.1 L'avant-projet .....	55
1.4.2 Problématique.....	55
<b>2 Elaboration de micro-outils cylindriques par gravure électrochimique .....</b>	<b>57</b>
2.1.1 Généralités sur les micro-outils pour la $\mu$ EE .....	57
2.1.2 Facteur de forme et degré de cylindricité d'un micro-outil pour la $\mu$ EE.....	59
2.1.3 Quel matériau utiliser ?.....	60
2.1.4 La dissolution du tungstène par voie électrochimique .....	61
2.1.5 Obtention de pointes pour l'émission électronique (effet drop-off).....	63
2.1.6 Obtention de pointes cylindriques pour la $\mu$ EE.....	65

<b>2.2</b>	<b>Fabrication des micro-outils par gravure électrochimique .....</b>	<b>67</b>
2.2.1	Description du dispositif expérimental .....	67
2.2.2	Électronique de gravure .....	68
<b>2.3</b>	<b>Résultats expérimentaux.....</b>	<b>70</b>
2.3.1	Moyens de caractérisation .....	70
2.3.2	Observations pré-expérimentales .....	71
2.3.3	Analyses de l'influence des différents paramètres de gravure .....	75
2.3.4	Influence du paramètre $T_{OFF}$ .....	75
2.3.5	Influence des paramètres $T+/T-$ .....	76
2.3.6	Géométrie du fuseau.....	77
2.3.7	Exemple de protocole pour l'obtention de micro-outil .....	78
2.3.8	Reproductibilité .....	78
2.3.9	Autres exemples de micro-outils.....	80
<b>2.4</b>	<b>Discussion.....</b>	<b>80</b>
<b>2.5</b>	<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>83</b>
<b>3</b>	<b>Machine de micro-électroérosion .....</b>	<b>85</b>
<b>3.1</b>	<b>Objectifs du développement .....</b>	<b>85</b>
3.1.1	État de l'art antérieur .....	85
3.1.2	Résultats préliminaires .....	87
3.1.3	Réflexions .....	88
<b>3.2</b>	<b>Organisation de la machine .....</b>	<b>89</b>
3.2.1	Sous-ensemble mécanique.....	89
3.2.2	Sous-ensembles électronique et informatique .....	92
3.2.3	Commande Électronique (vue d'ensemble).....	93
<b>3.3</b>	<b>Description des modules de la commande électronique .....</b>	<b>94</b>
3.3.1	Module de pilotage des moteurs pas à pas.....	94
3.3.2	Module de génération des microdécharges. ....	95
3.3.3	Module de caractérisation des microdécharges. ....	101
3.3.4	Commande du système par microcontrôleurs.....	105
3.3.5	Conclusion .....	107
<b>3.4</b>	<b>Résultats expérimentaux.....</b>	<b>108</b>
3.4.1	Entrefer latéral lors de l'usinage d'un trou borgne.....	108
3.4.2	Rugosité d'usinage.....	109
3.4.3	Vitesse d'usinage .....	111
3.4.4	Taux d'enlèvement de matière et taux d'énergie spécifique.....	113
3.4.5	Charbonnage .....	114
3.4.6	Arasement du micro-outil .....	115
3.4.7	Impact élémentaire .....	116
<b>3.5</b>	<b>Usinage avec régénération de l'électrode-outil .....</b>	<b>117</b>
<b>3.6</b>	<b>Autres usinages.....</b>	<b>120</b>
<b>3.7</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>121</b>
<b>4</b>	<b>Etude d'une décharge élémentaire .....</b>	<b>125</b>
<b>4.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>125</b>
<b>4.2</b>	<b>Étude bibliographique .....</b>	<b>125</b>

4.2.1	Décharge en électroérosion conventionnelle (milieu liquide) .....	125
4.2.2	Décharge dans un gaz.....	129
4.2.3	Le plasma en électroérosion .....	129
<b>4.3</b>	<b>Résultats expérimentaux.....</b>	<b>132</b>
4.3.1	Dispositif expérimental avec générateur RC .....	132
4.3.2	Valeurs de l'entrefer et tension de claquage .....	133
4.3.3	Profil expérimental du couple courant/tension au cours d'une décharge .....	137
4.3.4	Énergie apportée par décharge.....	142
4.3.5	Diminution de l'énergie transmise à l'échantillon par $R_{\text{Ballast}}$ .....	152
4.3.6	Déclenchement des décharges .....	158
<b>4.4</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>163</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>165</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>167</b>
<b>6</b>	<b>Annexes .....</b>	<b>180</b>
<b>6.1</b>	<b>Logiciel de la machine .....</b>	<b>180</b>
6.1.1	Généralités.....	180
6.1.2	Définition du parcours d'usinage par CFAO.....	181
6.1.3	Définition du parcours d'usinage directement par l'opérateur .....	182
<b>6.2</b>	<b>État de surface .....</b>	<b>183</b>



## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 - Principe de l'usinage par électroérosion.....	25
Figure 2 - Électroérosion par enfonçage. ....	27
Figure 3 - Électroérosion à fil - Illustration de [11], [12] .....	28
Figure 4 - Fraisage par électroérosion.....	29
Figure 5 - Décomposition de la décharge de type "spark" selon [17].....	30
Figure 6 - Phase de construction d'après [18].....	31
Figure 7 - Phase de décharge d'après [18] .....	31
Figure 8 - Phase de rupture d'après [18].....	31
Figure 9 - Typologie des décharges rencontrées en EE d'après [19].....	32
Figure 10 - Analyse de la décharge et de l'arc selon [20].....	33
Figure 11 - Circuit à relaxation de type Lazarenko.....	34
Figure 12 - Allure des charge/décharges d'un circuit RC lors du processus d'électroérosion. ....	34
Figure 13 - Principe du circuit à transistor [19]. ....	35
Figure 14 - Allure des impulsions gérées par les circuits à transistors.....	35
Figure 15 - Décharges générées sans gestion de la durée d'amorçage [19].....	36
Figure 16 - Générateur iso-énergétique et courbes caractéristiques U(t) et I(t) (inspiré de [23]). ....	37
Figure 17 - Décharges générées avec gestion du temps d'amorçage [19].....	37
Figure 18 - Régulation sur la tension moyenne [31] .....	38
Figure 19 - Régulation sur la durée d'amorçage .....	39
Figure 20 - Schématisation du fonctionnement du contrôleur par logique floue en EE [28] .....	40
Figure 21 - Architecture d'un contrôleur basé sur la logique floue. ....	40
Figure 22 - Principe d'un contrôleur basé sur la logique floue d'après [28]. ....	40
Figure 23 - Table de la rugosité désirée en fonction de la viscosité des diélectriques d'après [18]. ....	43
Figure 24 - Entrefer latéral et entrefer frontal [18]. ....	43
Figure 25 - TEM (ici noté MRR) en fonction de $T_{ON}$ pour différents diélectriques selon [37]. ....	44
Figure 26 - Illustration de l'influence de la polarité sur le TEM d'après [18]. ....	46
Figure 27 - Définition de la résolution d'usinage. ....	47
Figure 28 - État de surface [60] .....	48
Figure 29 - Couches altérées thermiquement par érosion. ....	48
Figure 30 - Illustration de deux régimes d'usinages par enfonçage [18]. ....	50
Figure 31 - Différence d'impacts entre EE et $\mu$ EE [92]. ....	53
Figure 32 - Précisions et dimensions en $\mu$ EE d'après [12].....	54
Figure 33 - Trou obtenus dans du laiton et du silicium.....	54
Figure 34 - Réalisation de la lettre "A" sur un substrat d'or par nano- EE [109].....	55
Figure 35 - Cavité de 250 x 250 $\mu$ m avec pilier central et électrodes coniques [108]. ....	55
Figure 36 - Outil cylindrique en tungstène obtenu traditionnellement par $\mu$ EE inverse [124]. ....	57
Figure 37 - Caractéristiques géométriques d'un micro-outil .....	59
Figure 38 - Corrosion et passivation du tungstène à 25°C et diagramme de Pourbaix [137], [138]. ....	61
Figure 39 - Expérience d'obtention de pointes pour l'émission électronique par effet de champ. ....	63
Figure 40 - Schématisation de l'effet drop-off. ....	63
Figure 41 - Flux et convection durant l'affûtage électrochimique d'après [142].....	64
Figure 42 - Pointe affûtée par électrochimie. ....	64
Figure 43 - Forme d'onde en signal alternatif pulsé utilisé pour la gravure. ....	65

Figure 44 - Séquence d'affûtage pour l'obtention d'un micro-outil. ....	66
Figure 45 - Vue générale du procédé de gravure électrochimique du micro-outil.....	67
Figure 46 - Machine d'électroérosion avec poste d'affûtage électrochimique intégré.....	67
Figure 47 - Vue en coupe de la cellule électrochimique .....	68
Figure 48 - Organigramme de l'électronique de gravure .....	69
Figure 49 - Organigramme de l'électronique de gravure avec limitation du courant. ....	69
Figure 50 - Vues MEB du fil de tungstène original. ....	71
Figure 51 - Vues MEB du fil de tungstène après un affûtage.....	71
Figure 52 - Géométrie du barreau de tungstène et des ménisques. ....	72
Figure 53 - Evolution de la quantité de matière dissoute du barreau de tungstène. ....	73
Figure 54 - Mesures des volumes immergés par les ménisques.....	74
Figure 55 - Évolution de la quantité de matière dissoute avec le volume immergé des ménisques....	75
Figure 56 - Évolution du diamètre de l'outil en fonction de la durée d'affûtage.....	75
Figure 57 - Diminution de l'intensité des créneaux positifs en l'absence de créneaux négatifs. ....	76
Figure 58 - Évolution du carré du diamètre minimum en fonction de la durée effective d'affûtage...	77
Figure 59 - Influence du ménisque sur le profil du fuseau de l'outil.....	77
Figure 60 - Evolution du profil d'une électrode au cours de l'affûtage.....	78
Figure 61 - Micro-outil de 70 $\mu\text{m}$ de diamètre et de longueur 1,6 mm (Ff=23).....	80
Figure 62 - Micro-outil de 40 $\mu\text{m}$ de diamètre et de 2 mm de longueur (Ff=52).....	80
Figure 63 - Micro-outil de 4 $\mu\text{m}$ de diamètre et de 320 $\mu\text{m}$ de longueur (Ff: 80).....	80
Figure 64 - Micro-outil de 5 $\mu\text{m}$ de diamètre et de 700 $\mu\text{m}$ de longueur (Ff:140).....	81
Figure 65 - Extrémité d'un micro-outil de 4 $\mu\text{m}$ de diamètre et de longueur 80 $\mu\text{m}$ (Ff = 20). ....	81
Figure 66 - Micro-outils submicrométriques.....	81
Figure 67 - Machine de fraisage par $\mu\text{EE}$ d'après [110] .....	85
Figure 68 - Schéma simplifié de l'électronique de 1 <sup>ère</sup> génération .....	86
Figure 69 - Algorithme pour la descente de l'électrode.....	87
Figure 70 - Allures des signaux de contrôle.....	87
Figure 71 - Premiers tests de micro-usinages [110].....	87
Figure 72 - Vue et description de la machine de micro-électroérosion.....	89
Figure 73 - Reconstruction 3D par profilométrie de la surface de l'échantillon avant usinage.....	90
Figure 74 - Cuve d'érosion orientable suivant 3 axes. ....	91
Figure 75 - Palpage et orientation du substrat avant/après réglages.....	91
Figure 76 - Schématisation de l'organisation de la machine de micro-électroérosion.....	92
Figure 77 - Organigramme de la commande électronique de la machine de micro-électroérosion....	93
Figure 78 - Schéma de principe de la carte de commande d'un moteur pas à pas .....	94
Figure 79 - Principe du générateur à relaxation ou générateur Lazarenko. ....	95
Figure 80 - Schématisation de l'électronique du générateur de Lazarenko modifié.....	96
Figure 81 - Temps de descente et de montée du MOS IRF840.....	97
Figure 82 - Schéma de principe du générateur de décharges de 2 <sup>nd</sup> génération .....	98
Figure 83 - Signal $T_{\text{ON}}/T_{\text{OFF}}$ en l'absence de décharges. ....	98
Figure 84 - Observation de décharges pendant le $T_{\text{ON}}$ . ....	99
Figure 85 - Observation de décharges et de contacts électrode-pièce. ....	99
Figure 86 - Principe de la caractérisation des microdécharges électriques.....	101
Figure 87 - Comptage des décharges positives, négatives et détection de contact par le $\mu\text{C1}$ .....	102
Figure 88 - Schéma de principe de la carte caractérisation. ....	103

Figure 89 - Sortie d'U2 en fonction du seuil des décharges positives.....	104
Figure 90 - Sortie d'U3 en fonction du seuil de détection des contacts. ....	104
Figure 91 - Observation du signal de détection des décharges négatives (vert). ....	105
Figure 92 - Vue générale du cœur de la machine avec 2 microcontrôleurs. ....	106
Figure 93 - Schématisation de l'entrefer latéral.....	108
Figure 94 - Réseau de trous non-débouchant dans l'inox pour la mesure de l'entrefer latéral.....	109
Figure 95 - Evolution de l'entrefer latéral $\delta$ en fonction de la tension d'usinage.....	109
Figure 96 - Parcours d'usinage et recouvrement utilisés pour l'usinage des cavités.....	110
Figure 97 - Rugosités obtenues au fond d'une cavité en fonction des paramètres d'usinage .....	110
Figure 98 - Profil 3D d'une surface usinée (100*100 $\mu\text{m}$ ).....	111
Figure 99 - Vue optique d'un réseau de lignes gravées à différentes vitesses d'avancement.....	111
Figure 100 - Micro-outil observé après l'usinage du réseau de lignes.....	112
Figure 101 - Relevé profilométrique d'un réseau de lignes usinées à vitesses variables. ....	112
Figure 102 - Taux d'enlèvement de matière (TEM) pour U= 50 à 80 V et C = 1 à 100 nF. ....	113
Figure 103 - Taux d'enlèvement de matière de la machine de micro-électroérosion.....	114
Figure 104 - Charbonnage d'électrodes. ....	114
Figure 105 - Charbonnage et isolation électrique.....	115
Figure 106 - Arasement d'un micro-outil. ....	115
Figure 107 - Impacts élémentaires à différentes tensions de travail.....	116
Figure 108 - Vues optiques des micro-outils utilisés.....	117
Figure 109 - Motifs usinés avec les électrodes A et B. ....	118
Figure 110 - Canaux microfluidiques sur acier inoxydable et titane. ....	120
Figure 111 - Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [12]. ....	125
Figure 112 - Phase de claquage d'après [12].....	126
Figure 113 - Phase de décharge d'après [12]. ....	127
Figure 114 - Phase de fin de décharge d'après [12].....	127
Figure 115 - Phase de post-décharge d'après [12].....	128
Figure 116 - Courbes caractéristiques U/I des plasmas en milieu gazeux [156]. ....	129
Figure 117 - Montage expérimental pour l'étude des plasmas d'EE d'après [15]. ....	130
Figure 118 - Ordre de grandeur des caractéristiques du plasma selon [15]. ....	130
Figure 119 - Montage expérimental avec circuit RC. ....	133
Figure 120 - Protocole de mesure d'entrefer. ....	134
Figure 121 - Vues optiques des pointes utilisées pour la mesure de l'entrefer.....	134
Figure 122 - Tension de claquage pour une valeur d'entrefer donné dans l'air.....	135
Figure 123 - Champ de claquage en fonction du rayon de courbure de l'électrode selon [162].....	136
Figure 124 - Profil typique de la tension et du courant durant une décharge.....	137
Figure 125 - Profil typique de tension et de courant pour une tension de claquage de 40 V. ....	137
Figure 126 - Oscillations post-décharge. ....	138
Figure 127 - Allure de décharges isolées observées à l'oscilloscope. ....	138
Figure 128 - Comportement du courant et de la tension lors des décharges. ....	139
Figure 129 - Décharge dans de l'eau dé-ionisée avec un circuit RC.....	140
Figure 130 - Visualisation du temps de recharge pour $R_T=100 \Omega$ et $C_T=10 \text{ nF}$ . ....	141
Figure 131 - Influence de l'alimentation du circuit RC. ....	141
Figure 132 - Énergie transmise et chute de tension.....	142
Figure 133 - Courant crête de décharge en fonction de $\Delta U$ pour différentes capacités de travail. ...	143

Figure 134 - Décharges isolées extrêmes dans l'air. ....	143
Figure 135 - Modélisation de la phase de décharge par un circuit RLC. ....	145
Figure 136 - Simulation PSpice du courant et de la tension durant une décharge. ....	145
Figure 137 - Comparaison simulation/expérimentation de I et U durant la décharge. ....	145
Figure 138 - Durée des décharges en fonction de $\Delta U$ à l'air. ....	146
Figure 139 - Détermination de l'inductance du plasma. ....	147
Figure 140 - Comparaison de l'allure des signaux de courant. ....	148
Figure 141 - Influence de l'entrefer sur le courant crête en fonction de la tension de travail. ....	149
Figure 142 - Montage avec résistance de ballast accolée au substrat. ....	152
Figure 143 - Chute de tension aux bornes de la capacité en fonction de $R_{Ballast}$ . ....	152
Figure 144 - Modification de l'allure de la décharge par $R_{Ballast}$ . ....	153
Figure 145 - Simulation ORCAD avec intégration de $R_{Ballast}$ . ....	154
Figure 146 - Modélisation plus complexe du système RLC couplé à l'alimentation HT. ....	154
Figure 147 - Intensité du courant simulée pendant une décharge avec $R_{Ballast}$ . ....	155
Figure 148 - Intensité du courant mesurée pendant une décharge avec $R_{Ballast}$ . ....	155
Figure 149 - Circuit RL lors du court-circuit de la capacité de travail. ....	155
Figure 150 - Modèle RLC avec intégration de l'alimentation haute tension. ....	156
Figure 151 - Simulation PSpice par un modèle RLC et une source d'alimentation couplée. ....	157
Figure 152 - Générateur de décharges de 2 <sup>ème</sup> génération avec une valeur min de $T_{ON}$ de 100ns. ....	158
Figure 153 - A gauche, pointe de tungstène utilisée. A droite, capture pour la mesure de $\delta_{décharge}$ . ....	159
Figure 154 - Distribution de Weibull pour des valeurs de $T_{ON}$ de 2, 5 et 20 $\mu$ s. ....	159
Figure 155 - Porte électrode avec dispositif de chauffage par filament intégré. ....	161
Figure 156 - Influence de l'effet thermo-ionique sur la durée de pré-claquage. ....	161
Figure 157 - Usinage sans vibrations : 2 à 3 décharges par $T_{ON}$ . ....	162
Figure 158 - Usinage assisté par vibrations : plus de 10 décharges par $T_{ON}$ . ....	162
Figure 159 - IHM 2 : Paramètres d'usinage et de la SPI. ....	180
Figure 160 - Traducteur du parcours d'usinage. ....	181
Figure 161 - Vue de la fenêtre de commande directe du parcours d'usinage. ....	182
Figure 162 - Etats de surface d'électrodes pour différents courants de gravure. ....	183
Figure 163 - Etat de surface avant et après polissage à 16 mA durant 5 minutes. ....	183

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Liste de matériaux utilisables en EE. ....	26
Tableau 2 - Domaines d'utilisations de l'EE d'après GF Agie / Charmilles. ....	26
Tableau 3 - Valeurs typiques des paramètres en électroérosion conventionnelle.....	41
Tableau 4 - Propriétés des matériaux composant typiquement l'électrode-outil en EE. ....	45
Tableau 5 - TEM/TUO en fonction de la polarité des électrodes. ....	46
Tableau 6 - Comparaison des régimes d'usinages. ....	49
Tableau 7 - Vue d'ensemble des recherches en cours sur l'EE.....	50
Tableau 8 - Variantes de la micro-électroérosion. ....	51
Tableau 9 - Quelques machines commerciales de $\mu$ EE. ....	52
Tableau 10 - Comparatif des paramètres entre EE et $\mu$ EE. ....	53
Tableau 11 - Méthodes d'obtention et caractéristiques de micro-outils [125]. ....	58
Tableau 12 - Caractéristiques des matériaux composant les électrode-outils [136]. ....	60
Tableau 13 - Paramètres électroniques et fluidiques du dispositif expérimental. ....	70
Tableau 14 - Reproductibilité du procédé de gravure sur 5 micro-outils de diamètre final 160 $\mu$ m. ..	79
Tableau 15 - Reproductibilité du procédé de gravure sur 5 micro-outils de diamètre final 100 $\mu$ m. ..	79
Tableau 16 - Reproductibilité du procédé de gravure sur 3 micro-outils de diamètre final 30 $\mu$ m. ....	79
Tableau 17 - Reproductibilité du procédé de gravure à partir d'un fil de 125 $\mu$ m. ....	79
Tableau 18 - Caractéristiques des électrodes employées. ....	117
Tableau 19 - Comparaison de EE et micro-EDM (Kunieda [146] et INL). ....	122
Tableau 20 - Durée de l'impulsion de courant en fonction de la capacité de travail. ....	139
Tableau 21 - Inductance et durée de la décharge en fonction de la capacité de travail. ....	147
Tableau 22 - Simulation du courant crête à l'aide du modèle RLC. ....	148
Tableau 23 - Caractéristiques des décharges pour $U=100V$ et $C=1nF$ . ....	148
Tableau 24 - Caractéristiques des décharges pour $U=60V$ et $C=1nF$ . ....	148
Tableau 25 - Caractéristiques des décharges pour $U=40V$ et $C=1nF$ . ....	149
Tableau 26 - Valeur de la résistance plasma en fonction de l'entrefer et du diamètre plasma. ....	150
Tableau 27 - Paramètres et résultats du circuit RL. ....	156



## INTRODUCTION GENERALE

De nombreux procédés de micro-usinage permettent d'usiner la matière sur de petites dimensions. On peut les classer en deux catégories : ceux issus de la miniaturisation de procédés mécaniques conventionnels (microfraisage, usinage laser, électroérosion, usinage électrochimique...) et ceux issus de la microtechnologie (gravure RIE, DRIE, LIGA), ces derniers ayant essentiellement été mis au point pour l'usinage collectif des semiconducteurs (notamment du silicium).

Par ailleurs, les besoins en micro-usinage ont fortement progressé ces dernières décennies suite à l'adoption massive de la miniaturisation dans de nombreux domaines. Pour suivre cette évolution, les techniques d'usinages, auparavant réservées à des domaines très ciblés comme la microélectronique ou l'horlogerie, doivent faire l'objet d'améliorations constantes. Il existe notamment une demande importante pour le micro usinage de matériaux non-silicium, par exemple pour l'élaboration de micro-objets biocompatible en titane [1], [2], le perçage de trous d'injecteurs diesel pour la réduction d'émissions polluantes [3], l'élaboration de microréacteurs chimiques en acier inoxydable [4], de microturbines et paliers pour les MEMS de puissance [5], [6] ou encore de micro outillage pour la plasturgie [7].

Dans ce contexte, il apparaît que la miniaturisation du procédé d'électroérosion (EE), ou microélectroérosion ( $\mu$ EE)<sup>1</sup>, présente un potentiel important pour usiner des matériaux non conventionnels. Il s'agit d'un procédé sans contact mécanique direct entre l'outil et la pièce ; la seule condition à assurer étant la conductivité électrique du matériau ou du semi-conducteur. Nous verrons plus loin, qu'en particulier, une des variantes de la  $\mu$ EE, le fraisage par  $\mu$ EE, présente un grand intérêt pour obtenir des motifs à haut facteur de forme.

Dans le cadre de ce travail exploratoire, nous avons développé un prototype de machine de fraisage par  $\mu$ EE (par analogie avec le terme anglais « milling EDM ») dont l'une des originalités provient du processus d'obtention d'électrode-outils. Celui-ci est basé sur un procédé électrochimique qui permet d'obtenir les micro-outils à très haut facteur de forme nécessaires au fraisage.

Puis nous avons mis en place notre propre générateur de microdécharges ainsi que les moyens de caractérisation nécessaires.

Après avoir évalué les limites de ce développement instrumental, nous avons tenté de mieux appréhender les mécanismes élémentaires du processus de micro-étincelage ; l'objectif étant de préparer au mieux les développements futurs du laboratoire dans ce domaine. Les enseignements tirés devraient permettre d'améliorer l'instrument de 2<sup>ème</sup> génération en cours de mise en place par mes successeurs.

Nous avons divisé ce mémoire en quatre chapitres :

Dans le **chapitre 1**, nous passerons tout d'abord en revue le procédé d'usinage par électroérosion (EE) et sa version microscopique : la micro-électroérosion ( $\mu$ EE) ; nous verrons notamment qu'une variante, le fraisage par micro-électroérosion ( $\mu$ EDM milling), présente un grand intérêt à l'échelle micro et mésoscopique.

---

<sup>1</sup> Terme utilisée dans ce manuscrit

Le **chapitre 2** sera axé sur la fabrication par gravure électrochimique de micro-outils de faible diamètre et à haut facteur de forme. Ce procédé original, qui a fait l'objet d'un brevet, est en fait dérivé des techniques de fabrication des pointes de microscopes à effet tunnel.

Nous consacrerons le **chapitre 3** à la description du développement du premier prototype de machine d'usinage. Nous effectuerons une description des modules de la machine avant d'analyser son fonctionnement de manière globale. Nous passerons ensuite à la validation expérimentale du concept de la machine puis aux principaux résultats d'usinage à la fin de ce chapitre.

Enfin, le **chapitre 4** abordera une étude préliminaire sur la caractérisation de la décharge élémentaire qui est le cœur du processus d'électroérosion. Les expérimentations ont portées sur la génération et l'observation de microdécharges uniques créées localement. Nous mettrons en avant les simulations de tension et de courant pour la compréhension et l'amélioration de la résolution d'usinage.

Une conclusion générale résumant les principaux résultats, ainsi que les perspectives futures de ce travail, clôturera ce manuscrit.



***Chapitre 1 :***  
***Etat de l'art en électroérosion***

---

# 1 Etude bibliographique sur l'électroérosion

Dans cette section bibliographique, nous ferons le point sur l'électroérosion (EE). Puis nous nous intéresserons à la miniaturisation du procédé, sujet principal de ce travail. Etant donné le caractère interdisciplinaire du procédé, il ne s'agira ici que d'une introduction. Pour rendre la lecture de ce mémoire plus aisée, les chapitres suivants comporteront chacun une section bibliographique spécialisée.

## 1.1 Définition et principales variantes

### 1.1.1 Introduction

Le procédé d'enlèvement de matière par électroérosion a été proposé pour la première fois par les époux Lazarenko [8] en 1943. Son principe, illustré de manière schématique dans la Figure 1, consiste à créer une série de décharges électriques (« sparks » en anglais), dans l'espace entre une électrode-outil et la pièce à usiner, immergées dans un diélectrique liquide. Cet espace interélectrode est appelé entrefer ou « gap » en anglais.

La création d'un canal de plasma, entre l'outil et la pièce, parcouru par un courant électrique important entraîne la fusion de la matière aux extrémités de la pièce et de l'outil. L'extinction du plasma provoque l'éjection de la matière en fusion, le creusement de la pièce, ainsi que l'usure de l'outil. En multipliant le nombre de décharges tout en déplaçant l'outil par rapport à la pièce, on parvient à creuser celle-ci de manière importante.

Pour favoriser un rythme régulier de décharges, l'entrefer est maintenu sous un flux de liquide diélectrique, dont le renouvellement permet l'évacuation des débris de matières re-solidifiés après l'éjection. La qualité des décharges dépend en effet de la valeur de l'entrefer et de son état physique, notamment du recouvrement du caractère isolant du liquide.

Le processus décrit ci-dessus ne dure que de quelques centaines de nanosecondes à plusieurs dizaines de microsecondes. C'est pourquoi, pour entretenir les décharges, il est nécessaire d'utiliser des circuits électroniques rapides et un asservissement de position de l'outil par rapport à la pièce. Nous reviendrons sur ces questions par la suite.

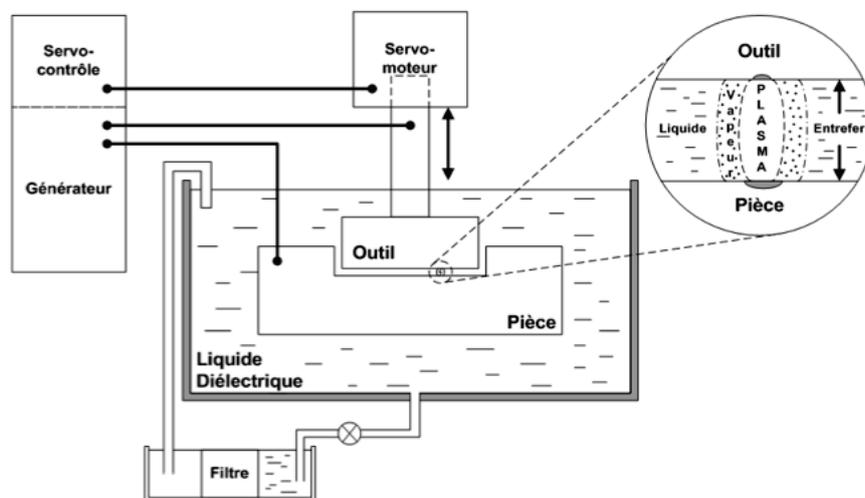


Figure 1 - Principe de l'usinage par électroérosion.

L'électroérosion est un procédé d'enlèvement de matière permettant d'usiner tous types de matériaux à condition qu'ils puissent conduire l'électricité : la seule condition à assurer étant la création d'un canal de plasma entre les électrodes. Des matériaux conducteurs, semi-conducteurs (silicium), ou peu conducteurs (céramiques telles que:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN [9]) peuvent être mis en œuvre. Le Tableau 1 ci-dessous regroupe une liste non exhaustive de matériaux, posant des difficultés en usinage traditionnel par enlèvement de copeaux mais compatibles avec l'électroérosion.

Matériaux	Masse volumique ( $\text{Kg/m}^3$ )	Module de Young (GPa)	Conductivité électrique ( $10^6 \text{ S.m}^{-1}$ )	Température de fusion ( $^{\circ}\text{C}$ )	Conductivité thermique ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
Acier inoxydable	8000	200	1,32	1510	15
Titane	5410	115	1,8	1668	21,9
Ti6Al4V	4430	114	0,58	1630	6,6
WC	14950	600	5	2800	60 / 80
TiC	4900	440	0,000125	3160	21
Hastelloy	8220	200	0,9	1320 / 1350	12 / 20
Inconel	8440	209	1	1390 / 1425	13,2
Diamant	3520	1220	$10^{-7}$	3550	2000
Molybdène	10200	329	18,7	2620	140
Silicium	2330	140*	$10^{-9}$ **	1414	150

**Tableau 1 - Liste de matériaux utilisables en EE.**  
\* Dépend de l'orientation / \*\* Dépend du dopage.

Cette capacité à usiner des matériaux est une des caractéristiques importantes du procédé. Elle a d'ailleurs constitué l'une des motivations de ce travail (cf. Introduction).

Une autre caractéristique de l'EE est qu'il s'agit d'un procédé d'usinage sans contact, puisqu'à l'entrefer, l'outil ne touche pas la pièce à usiner. Nous tenterons plus loin de tirer avantage de cette propriété pour tenter d'améliorer la résolution d'usinage en mettant en œuvre des outils ultrafins, donc fragiles. Ainsi, la dureté du matériau à usiner n'est donc pas une limitation ce qui, par rapport au fraisage par enlèvement de copeaux, est très avantageux. Par ailleurs, les contraintes mécaniques sur les pièces sont réduites avec des risques faibles de déformations et cassures. Ces problèmes ne sont toutefois pas complètement éliminés, surtout à petite échelle [10].

Une dernière caractéristique, qui sera discutée plus loin, est la capacité de l'électroérosion à procéder à des usinages profonds en enfonçant l'outil dans la pièce toujours grâce à l'absence de contact direct entre outil et pièce.

Ces avantages ont conduit de nombreux industriels (GF Agie / Charmilles, Sodick, Fanuc, Makino, Ona, etc.) à s'intéresser à l'électroérosion pour différents domaines d'utilisations (Tableau 2) :

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

**Tableau 2 - Domaines d'utilisations de l'EE d'après GF Agie / Charmilles.**

L'Automobile utilise l'électroérosion par exemple pour le perçage de buse d'injection diesel car la tolérance géométrique des trous influe sur la qualité et l'efficacité de la combustion. Dans l'Aérospatiale, il est nécessaire de réaliser des pièces résistantes à l'usure donc difficiles à usiner par enlèvement de copeaux. Dans le domaine médical, l'usinage de titane et de ses alliages biocompatible est intéressant pour réaliser des implants. Enfin, la Plasturgie et l'Horlogerie sont d'importants utilisateurs de cette technique pour réaliser des moules ou encore des micropièces.

L'intérêt du procédé a motivé très tôt des tentatives de miniaturisation, que nous désignerons ci-dessous par le terme micro-électroérosion ( $\mu$ EE). Afin d'utiliser une terminologie claire, nous réserverons le terme d'électroérosion conventionnelle (EE) à tous les développements décrits ci-dessus. Bien qu'il y ait un continuum, il est important de différencier ces deux domaines car les réalisations pratiques sont très différentes (notamment les générateurs de décharges avec les ordres de grandeurs des tensions et des courants, les dimensions des outils) ainsi que les applications.

### 1.1.2 Les variantes de l'électroérosion conventionnelle

Il existe dans l'industrie quatre principales variantes d'électroérosion (EE) que nous allons aborder ci-dessous :

#### 1.1.2.1 *Electroérosion par enfonçage ou à plongée (« Die Sinking EDM »)*

Le principe consiste à usiner l'électrode-outil (souvent une forme complexe 3D représentative d'un élément de moule) par fraisage par enlèvement de copeaux dans une matière « facile » à usiner (cuivre ou graphite) et à créer le négatif de l'outil dans la pièce par EE avec un mouvement vertical progressif dit à « plongée ». Il est possible ainsi d'usiner une pièce dans un matériau dur.

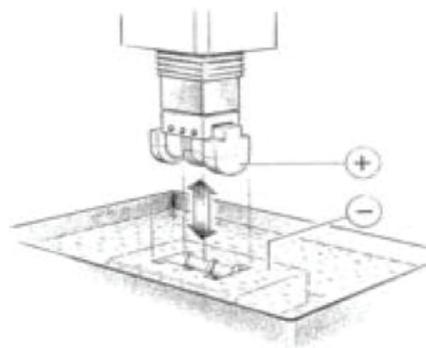


Figure 2 - Electroérosion par enfonçage.

Les principales caractéristiques du procédé sont :

- l'usinage de pièces de grandes dimensions, de cavités borgnes (10 mm à 2 000 mm),
- un état de surface de très bonne qualité ( $R_a \approx 50$  à 100 nm),
- des électrodes 3D facile à usiner (utilisation du graphite et du cuivre),
- diélectrique : hydrocarbures, eau dé-ionisée.

Applications principales : moules, outils d'extrusion, matrices de frappe...

### 1.1.2.2 *Électroérosion à fil (« Wire EDM »)*

L'électroérosion à fil est une autre variante très répandue. Elle consiste à utiliser comme électrode-outil un fil métallique en circulation continue. Un jet de liquide diélectrique (eau dé-ionisée) permet d'enlever les débris d'usinage entre le fil et le bloc de matière à usiner. Un mouvement du fil par rapport à la pièce permet de modifier l'angle d'attaque et d'usiner des formes réglées variées. La manipulation du fil se fait à l'aide d'un système multiaxial complexe permettant d'orienter le fil de découpe pour obtenir des pièces complexes 3D (Figure 3). Cette technique est très utilisée pour l'obtention de micropièces de haute précision ainsi que pour l'élaboration des micro-outils que nous retrouvons sur les machines d'EE de fraisage ou de perçage.

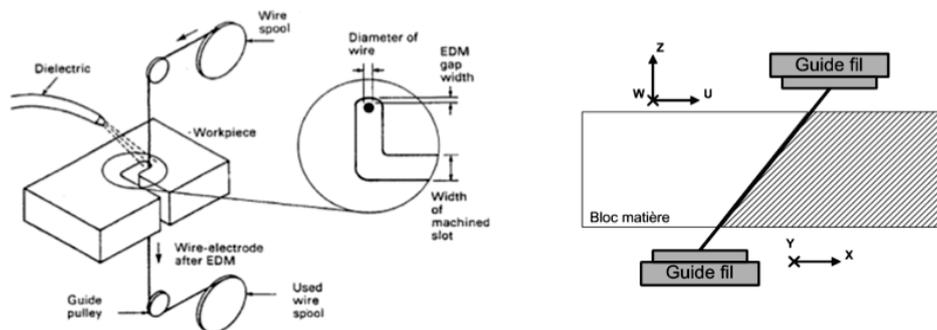


Figure 3 - Électroérosion à fil - Illustration de [11], [12]

Les principales caractéristiques du procédé WEDM sont :

- l'usinage de flancs abrupts et d'angles droits,
- la pièce doit être débouchante pour être traversée par le fil,
- le diamètre minimum des fils est de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$ ,
- diélectrique : eau dé-ionisée

Applications principales : poinçons de découpe, pièces d'horlogerie, électrodes pour l'EE par enfonçage...

### 1.1.2.3 *Perçage par électroérosion (« Drilling EDM »)*

Il s'agit d'une variante très simple mais très utilisée pour le perçage de trous profonds avec des électrodes cylindriques en mouvement vertical. Celles-ci en carbure de tungstène sont percées avec 1 à 4 canaux de façon à permettre le passage d'un liquide diélectrique sous pression<sup>2</sup>. Parmi les exemples de perçage, citons les perçages de trous dans les aubes de turbines en aéronautique, des vias dans les circuits électroniques multicouches, de têtes d'imprimante à jet d'encre, de trous de lubrifications dans les pignons de boîte de vitesse.

### 1.1.2.4 *Fraisage par électroérosion (« Milling EDM »)*

Le principe est transposé de l'usinage par fraisage mécanique : l'électrode-outil de forme cylindrique suit un parcours 3D prédéfini afin d'usiner une pièce en combinant déplacement et enfoncement. Il est possible ainsi d'usiner des formes complexes directement à partir de données numériques obtenues à l'aide de logiciel de CAO. L'utilisation d'électrodes cylindriques à haut facteur

<sup>2</sup> [www.balzer-technik.ch](http://www.balzer-technik.ch)

de forme est indispensable pour l'obtention de parois abruptes. L'usinage d'une cavité, de type moule par exemple, est fait par passages successifs pour parvenir à la profondeur désirée.

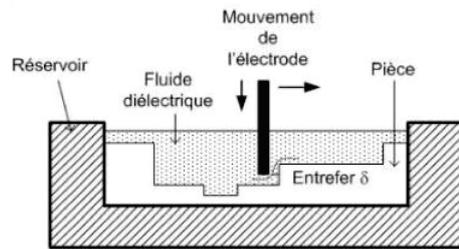


Figure 4 - Fraisage par électroérosion

Les principales caractéristiques du procédé sont :

- flexibilité grâce à l'interface numérique directe avec la CAO,
- usinage de flancs abrupts et d'angles droits,
- usinage de formes 3D,
- diélectrique : eau dé-ionisée.

Applications principales : poinçons de découpe, micropièces, électrodes pour l'EE par enfonçage.

Dans la pratique, cette variante est peu utilisée à l'échelle conventionnelle car elle est sans doute peu performante par rapport au fraisage par enlèvement de copeaux. Comme nous le verrons ci-dessous, la situation pourrait être inversée à l'échelle microscopique. En effet, les microfraises deviennent fragiles et peuvent casser au contact de la pièce à usiner.

## 1.2 État de l'art de l'EE conventionnelle

Dans cette partie, nous dresserons un tableau du procédé d'EE de manière à avoir une vue d'ensemble de ce procédé complexe et encore mal connu [13] ; **Pour une question de clarté, nous n'aborderons, dans cette partie, que la version conventionnelle du procédé en reportant les quelques éléments disponibles concernant la  $\mu$ EE à la section 1.3.**

Nous commencerons par étudier de manière élémentaire le processus de base, à savoir la formation de la décharge (une étude plus approfondie est reportée au Chapitre 4) avant d'aborder l'une des questions centrales : comment générer, non pas une décharge électrique unique, mais des trains de décharges permettant d'aboutir à un processus d'usinage ?

Cette question sera d'autant plus difficile à aborder que beaucoup d'aspects de l'EE sont du domaine du secret industriel (avec une pléthore de brevets). Il n'existe pas non plus de traité présentant le procédé de manière approfondie : la plupart des livres traitent le sujet du point de vue de l'utilisateur.

Nous verrons ensuite les principaux types de circuits électroniques développés pour la génération des décharges. Nous aborderons enfin les méthodes permettant de gérer l'entrefer, et de manière générale, le processus d'usinage dont l'une des caractéristiques est son caractère stochastique.

Nous avons conscience que cette partie bibliographique est longue mais elle nous paraît nécessaire pour comprendre comment il peut être envisagé de miniaturiser ce procédé d'usinage.

### 1.2.1 Étude du processus élémentaire de décharge électrique

Dans la suite, nous allons rappeler les grandes phases ayant lieu durant la décharge. En électroérosion, le mécanisme de décharges se déroule généralement dans les conditions de pression hydrostatique imposée par le diélectrique immergeant les deux électrodes. Cet espace étant peu accessible pour les appareils de mesures, il est difficile d'étudier le comportement des décharges dans ces milieux. La majorité des études sont donc réalisées sous gaz.

Cependant, on répertorie des études physiques sur les décharges menées par Eubank et al. [14] et par Descoedres de l'EPFL [15]. Celles-ci s'intéressent au caractère aléatoire et transitoire de la décharge en mettant en évidence les caractéristiques du plasma créé.

D'autres études, comme par exemple Beroual et al. [16], s'intéressent aux événements précédents la décharge, qui correspondent à la phase de création de précurseurs de décharges, appelés amorces ou « streamers », et à leur propagation dans différents milieux. Ces études sont souvent effectuées dans un autre contexte (tenue et vieillissement des diélectriques sous champ électriques) et il est relativement difficile de faire le lien avec l'EE.

### 1.2.2 Décomposition de la décharge

Plusieurs articles et thèses abordent le déroulement du processus de base. Tout d'abord, Schulze et al. [17] distingue trois étapes majeures dans le processus de décharge comme décrit dans le tableau ci-dessous :

- la phase d'amorce
- la phase d'échauffement
- la phase d'enlèvement

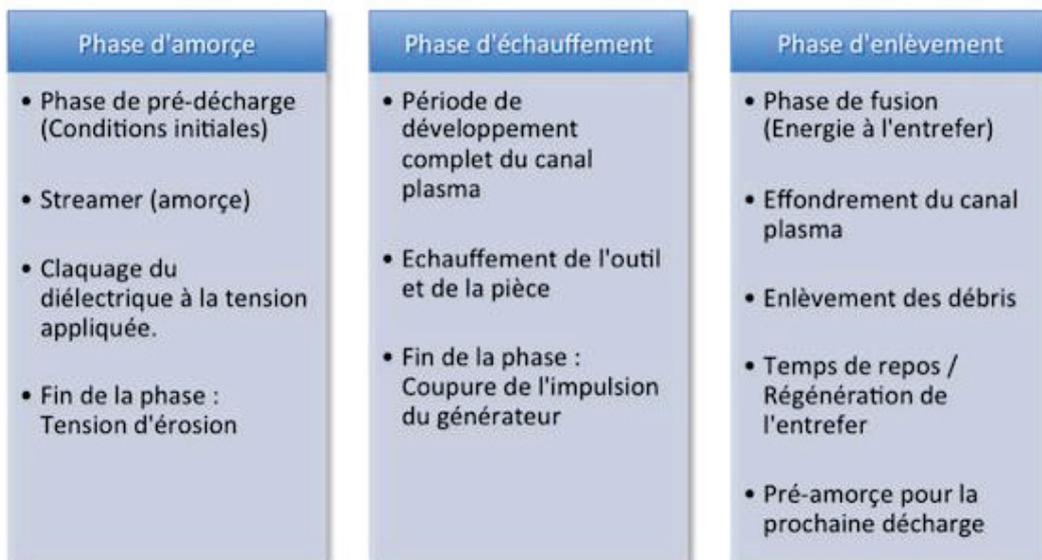


Figure 5 - Décomposition de la décharge de type "spark" selon [17]

La décomposition est sensiblement la même pour Joseph [12], où trois phases sont décrites :

- **Phase 1** : Phase de construction.

La phase d'amorce/de construction comprend la mise en place des conditions initiales qui consistent en : l'application d'une tension entre les électrodes amenant à la création d'amorces (streamers) suivie du claquage du diélectrique et enfin de l'apparition du plasma.

- **Phase 2** : Phase de décharge.

Cette phase d'échauffement/de décharge comprend le développement du plasma à l'entrefes, ainsi que l'échauffement du matériau et de l'électrode par le plasma, jusqu'à ce que le circuit électronique coupe l'alimentation du plasma, ou que le plasma se relaxe naturellement.

- **Phase 3** : Phase de rupture.

S'ensuit la troisième étape, nommée « phase d'enlèvement » ou phase de rupture.

Ces étapes sont illustrées dans les figures suivantes avec l'allure de la tension et du courant entre l'outil et la pièce :

**Phase de construction :**

- 1- Application de la tension
- 2- Création de l'amorce
- 3- Claquage du diélectrique

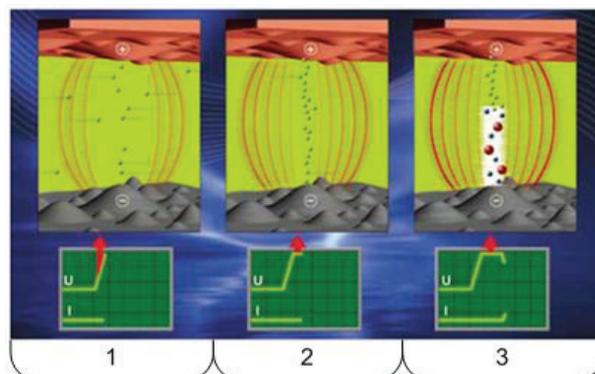


Figure 6 - Phase de construction d'après [18]

**Phase de décharge :**

- 4- Développement du plasma
- 5- Echauffement de la pièce
- 6- Désactivation de la tension

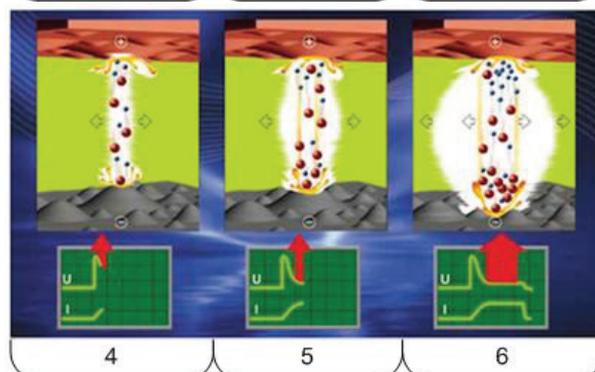


Figure 7 - Phase de décharge d'après [18]

**Phase de rupture :**

- 7- Effondrement du plasma
- 8- Ejection des débris, Temps de repos,
- 9- Retour aux conditions initiales avant l'application d'un nouveau signal de décharge

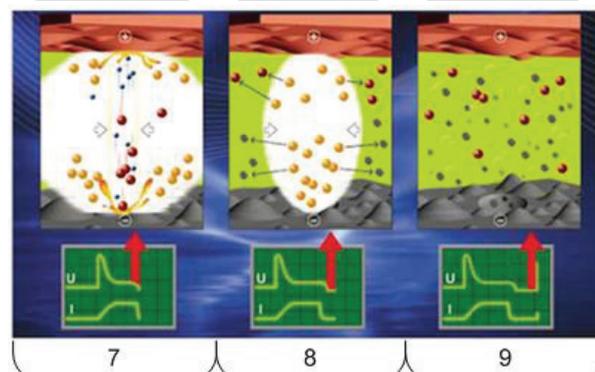


Figure 8 - Phase de rupture d'après [18]

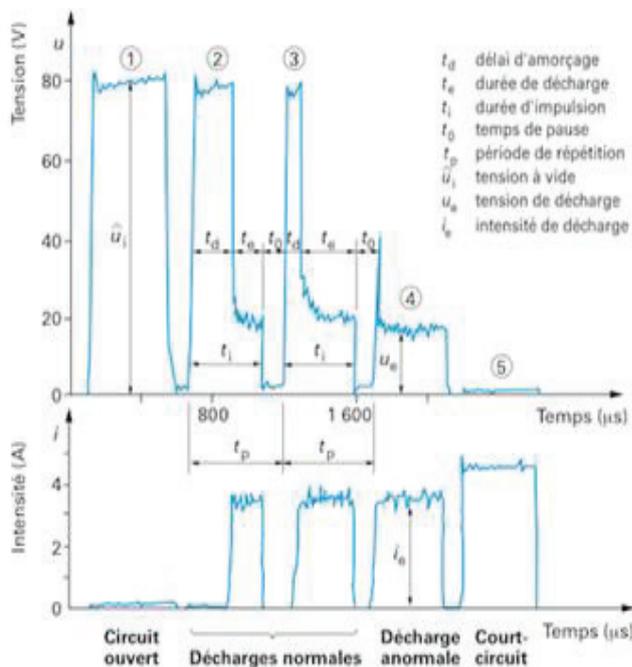
## 1.2.3 Typologie des décharges : décharge, arc et court-circuit

### 1.2.3.1 Décomposition du signal de la décharge

Le caractère aléatoire du processus de décharge est l'un des inconvénients majeurs de l'EE. Cela est d'autant plus vrai, que dans la pratique, l'allure des décharges s'écarte sensiblement du cas idéal décrit précédemment. Différentes stratégies, basées sur des régulations de plus en plus complexes seront mises en œuvre pour tenter de pallier cet inconvénient (cf. section 1.2.5). Ces stratégies reposent sur une typologie des décharges avec des signaux schématisés à la Figure 9.

Celle-ci, d'origine purement expérimentale, permet de distinguer l'état du système outil/diélectrique/pièce en fonction de la d.d.p. et du courant entre outil et pièce. On distingue donc :

- le cas du circuit ouvert correspondant à une absence de décharge ;
- les décharges correspondant à un enlèvement de matière (décharges érodantes) mais avec un point de départ aléatoire
- les décharges non érodantes correspondant à un passage de courant à travers l'entrefer lorsque le diélectrique ne joue pas son rôle d'isolant (renouvellement insuffisant) ; nous parlerons alors d'arcs et non pas de décharges érodantes.
- le cas du « court-circuit », qui intervient en cas de contact mécanique direct entre outil et pièce (la détection très rapide de ce cas est très importante pour éviter tout endommagement de l'électrode-outil).



**Cas n°1 :** la tension d'amorçage entre l'électrode et la pièce reste constante, aucune décharge n'a lieu, le courant ne fluctue pas, il n'y a pas de transfert d'énergie.

**Cas n°2 & 3 :** la tension d'amorçage reste constante durant la période d'amorçage,  $t_d$  (aléatoire), s'en suit une très rapide chute de tension, avec simultanément une brusque élévation de courant. La tension et le courant se stabilisent durant la période de décharge,  $t_e$ . La décharge est coupée, la tension devient nulle, ainsi que le courant, avant d'entamer un nouveau cycle. Le temps de pause,  $t_0$ , permet le renouvellement du milieu pour la décharge suivante.

**Cas n°4 :** La tension d'amorçage chute rapidement, l'entrefer étant pollué, un arc s'est créé entre l'électrode et la pièce, le courant  $i_e$  fuit à travers le canal ionisé de l'arc.

**Cas n°5 :** La pièce et l'électrode sont en contact, la tension est quasi nulle, mais le courant est maximum, le circuit fonctionne en générateur de courant.

Figure 9 - Typologie des décharges rencontrées en EE d'après [19].

### 1.2.3.2 Observation d'un signal typique de décharge

La Figure 10 montre deux signaux typiques de décharges observés à l'entrefer d'après [20]. La décharge « normale » de type « spark » (à gauche) affiche un temps de pré-décharge  $T_p$ , une chute

de tension de la valeur  $V_0$  (tension à circuit-ouvert) à la valeur  $V_i$  (tension 20 à 25V) correspondant au passage du courant dans le plasma. A droite est indiquée une décharge anormale de type « arc », où il n'existe pas de temps de pré-décharge : la chute de tension intervient avant que la tension n'ait atteinte la valeur  $V_0$ .

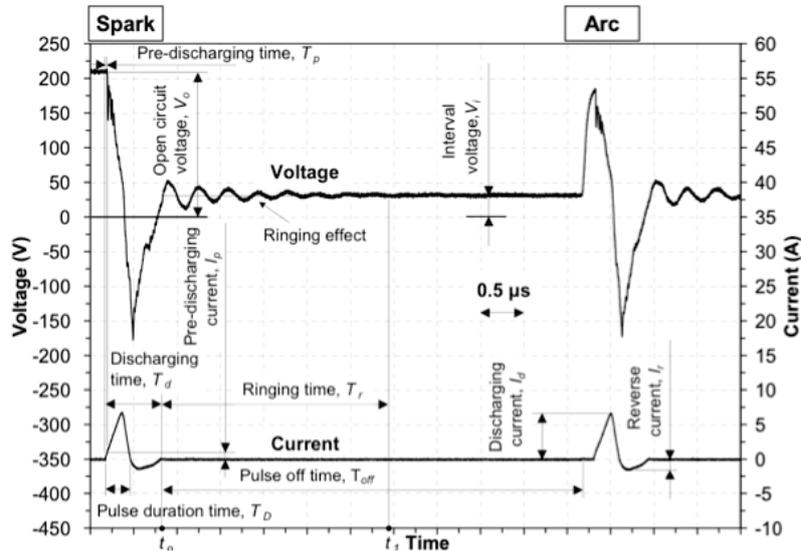


Figure 10 - Analyse de la décharge et de l'arc selon [20]

Notons que la durée de l'impulsion de courant est de l'ordre de  $0,5 \mu s$  dans de l'eau dé-ionisée, pour une machine Ann Arbor modèle 1S15. L'inversion du signe de la d.d.p pendant la décharge peut être due à différentes causes (en général mal expliquées dans les publications) : inductance parasite des câbles ou caractère potentiellement inductif d'un courant plasma. Quoiqu'il en soit notre démarche a été de développer notre propre générateur pour maîtriser les conditions expérimentales du mieux possible. C'est la raison pour laquelle, nous allons décrire les principaux types de générateur de décharges avant d'expliquer le choix qui a été fait pour notre dispositif expérimental.

#### 1.2.4 Générateurs de décharges

Chaque machine d'électroérosion possède son propre circuit électronique. Pour alimenter le couple électrode-pièce dans de bonnes conditions, il doit assurer quatre fonctions essentielles :

- L'amorçage des décharges
- Le maintien de la tension et de l'intensité pendant la décharge
- Un temps de pause entre deux décharges successives
- La répétition des décharges

Les générateurs de décharges ont fait des progrès importants depuis les origines de la technologie. Le premier circuit développé dans les années 50 reposait sur un circuit R-C (cf. section 1.2.4.1). C'est en 1964 que les premiers circuits à transistors furent utilisés dans un circuit d'électroérosion, ce qui constitua à l'époque une révolution. Le but étant de contrôler précisément la quantité d'énergie transférée par chaque décharge. Ces circuits ont évolués en circuits dits iso-fréquence puis en iso-énergétique.

### 1.2.4.1 Les circuits RC à relaxation (ou Lazarenko)

Lazarenko et al. [8] sont les inventeurs de ce circuit électronique extrêmement simple, dont ils ont eu l'idée en s'intéressant aux effets érosifs des décharges électriques sur les contacteurs électriques en 1943. Il est schématisé ci-dessous.

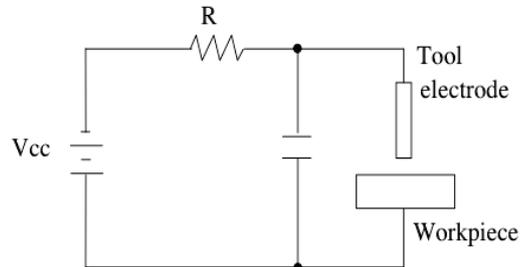


Figure 11 - Circuit à relaxation de type Lazarenko.

Ce circuit comprend une résistance de limitation de courant montée en série avec une capacité de travail assurant le stockage et la transmission de l'énergie au plasma. Une tension  $U_0$  d'amorçage est appliquée aux bornes des deux électrodes. Lorsque l'entrefer autorise le claquage, la décharge transfère l'énergie stockée dans la capacité au plasma de façon à vider très rapidement la capacité jusqu'à une valeur de tension  $U_a$ . Après l'implosion du plasma, la capacité se recharge à travers la résistance. Le régime de décharges correspondant est schématisé sur la Figure 12.

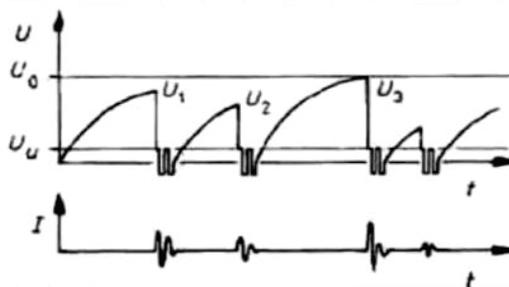


Figure 12 - Allure des charge/décharges d'un circuit RC lors du processus d'électroérosion.

Ce circuit présente des inconvénients majeurs :

- La fréquence de décharge n'est pas constante (elle est commandée par la valeur de l'entrefer et son niveau de pollution).
- L'énergie délivrée par le condensateur n'est pas constante pour toutes les décharges car la tension d'amorçage n'est pas constante, ce qui implique des cratères de dimensions différentes.
- Il apparaît des inversions de polarité, qui font jouer, aux deux électrodes, les rôles de cathode et d'anode avec comme conséquence une usure importante de l'électrode-outil.

Malgré des progrès dans la conception de ces générateurs, avec l'utilisation de diodes pour s'opposer aux inversions de polarité et de systèmes de limitation de l'énergie de charge des condensateurs [21], ces générateurs ont été surpassés par les générateurs à transistors. Néanmoins, en micro-électroérosion, le circuit à relaxation est, à notre connaissance, le seul à être utilisé car il permet d'obtenir de très faibles énergies de décharges [22].

### 1.2.4.2 Les circuits à transistors du type iso-fréquence

Pour assurer une fréquence stable de décharges, il est nécessaire de maîtriser les conditions propices au claquage du diélectrique. Pour cela, il faut appliquer une tension d'amorçage contrôlée dans le temps et d'amplitude fixe durant laquelle on autorise le déroulement du processus. Une solution à un transistor est montrée ci-dessous.

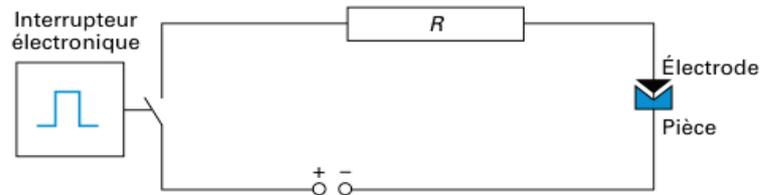


Figure 13 - Principe du circuit à transistor [19].

Le circuit iso-fréquence permet l'application d'une tension variable entre l'électrode et la pièce pendant une durée réglable ( $T_{ON}$ ) avec un rapport cyclique variable  $\tau$  :

$$\tau = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$$

La base du transistor est commandée par une base de temps permettant de faire varier de manière indépendante :

- $T_{ON}$  : durée au cours de laquelle la tension est appliquée et où la décharge est autorisée.
- $T_{OFF}$  : durée du temps de repos entre deux décharges, permettant de renouveler le diélectrique

Les impulsions gérées par ce circuit sont représentées sur la Figure 14 :

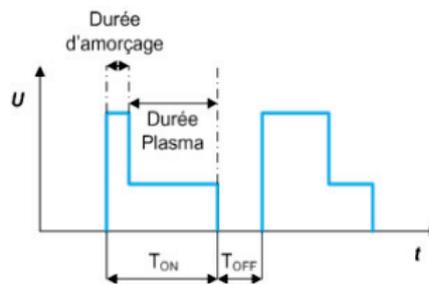


Figure 14 - Allure des impulsions gérées par les circuits à transistors.

Seules des fenêtres de « tirs » sont autorisées lorsque les conditions sont réunies : la décharge peut donc intervenir pendant une de ces fenêtres  $T_{ON}$  où une tension est appliquée entre les électrodes. Cependant l'utilisation de ces fenêtres ne permet pas un régime constant de décharges. En effet, le caractère stochastique du claquage en milieu diélectrique a comme conséquence une durée d'amorçage différente entre chaque décharge comme l'indique la Figure 15. Suivant la valeur de l'entrefer, les durées  $td_1$ ,  $td_2$  et  $td_3$  sont différentes.

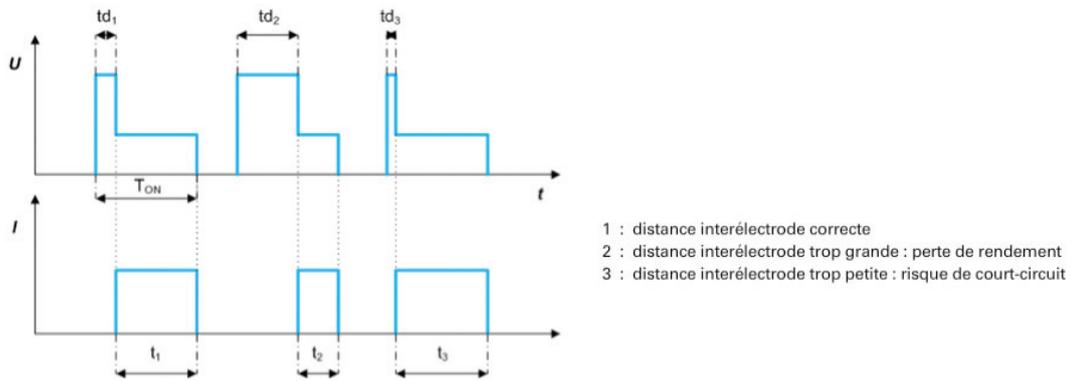


Figure 15 - Décharges générées sans gestion de la durée d'amorçage [19].

Ainsi dans la Figure 15,  $td_2$  est supérieure à  $td_1$ , qui est elle-même supérieure à  $td_3$ .

La durée  $T_{ON}$  étant fixe, on a :

$$t_1 = T_{ON} - td_1 \neq t_2 = T_{ON} - td_2 \neq t_3 = T_{ON} - td_3$$

Les durées de vie ( $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ ) des décharges sont variables. La quantité d'énergie transférée par décharge est donc incontrôlée. Ainsi, le circuit iso-fréquence permet d'obtenir des fréquences de décharges plus contrôlées que le circuit RC, mais sans contrôle sur la quantité d'énergie transférée, contrairement au circuit iso-énergétique ci-dessous.

#### 1.2.4.3 Les circuits à transistors du type iso-énergétique

Les progrès de l'électronique ont permis de proposer, dans les années 90, le circuit iso-énergétique de la Figure 17, qui montre des impulsions avec une gestion du temps de sorte que les durées  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$  soient égales. Le principe consiste à utiliser un transistor comme source de courant avec une double base de temps. Plus précisément, il consiste à :

- détecter le début de l'amorçage du plasma pendant la phase  $T_{ON}$  de mise sous tension de l'entrefer (retard étant noté  $td_1$ ),
- couper le plasma à la fin de la durée  $t_1$ , ce qui permet de contrôler l'énergie envoyée dans le plasma.
- à ajuster le rapport cyclique,  $\tau$ , de façon à aboutir à un régime permanent de décharges.

Ainsi  $T_{ON}$  correspondant à la somme de la phase d'amorçage du plasma, qui est considérée comme aléatoire, et de la phase de conduction  $t_1$  réglée par l'opérateur ( $T_{ON}=td_1+t_1$ ).

La figure ci-dessous montre qu'après application de la tension d'usage  $U_0$  entre l'électrode et la pièce au début du cycle, la décharge démarre avec un retard  $td$  qui fluctue de manière stochastique correspondant aux temps  $td_1$ ,  $td_2$ ,  $td_3$  pour les trois impulsions considérées. L'amorce de la décharge est détectée par l'électronique (augmentation brusque du courant ou chute de tension à l'entrefer) de sorte que le système coupe le courant après le temps  $t_1$  fixé par l'opérateur.

Ainsi pour chaque décharge, l'énergie échangée est (approximativement) égale à  $U_a \times I \times t_1$ . Le courant  $I$  et le temps  $t_1$  sont respectivement contrôlés par la source de courant constitué par le transistor et la base de temps. La tension  $U_a$  pendant la phase de création du plasma n'est pas

accessible, mais on la considère, expérimentalement, comme constante en première approximation (elle est, par exemple, de l'ordre de **20 V** pour une tension appliquée de **200 V** dans une machine d'EE par enfonçage [19]).

Ainsi la machine applique au 1<sup>er</sup> ordre toujours la même énergie par décharge quelles que soient les fluctuations du système d'où le nom de générateur iso-énergétique.

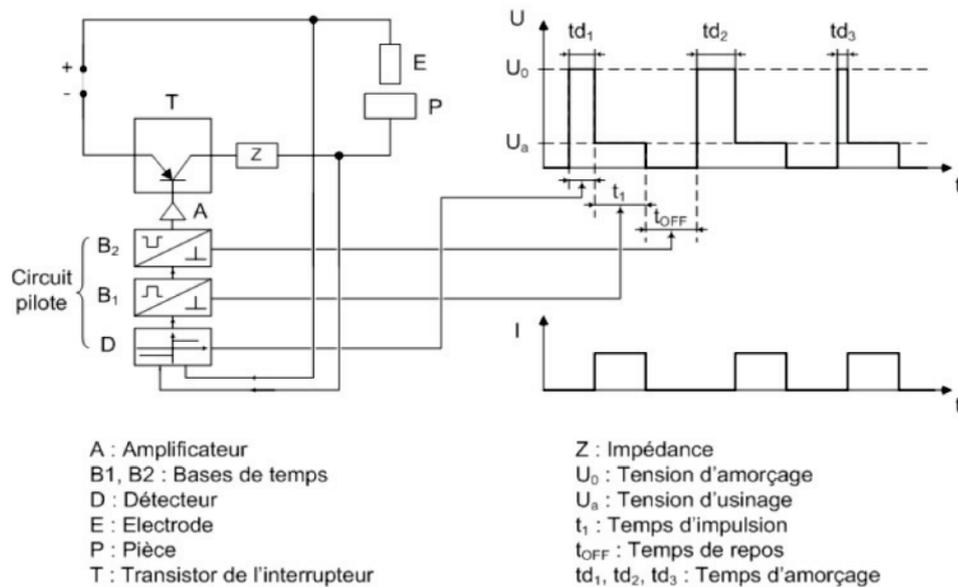


Figure 16 - Générateur iso-énergétique et courbes caractéristiques  $U(t)$  et  $I(t)$  (inspiré de [23]).

Physiquement, les fluctuations s'expliquent soit par le caractère naturellement aléatoire du claquage dans un diélectrique (cf. section 1.2.1) et/ou par un mauvais réglage de l'entrefer. Il est alors possible de se baser sur la valeur de  $t_{d1}$  pour procéder à la régulation de la valeur de l'entrefer comme le montre la Figure 17. Nous verrons dans la section suivante d'autres principes de régulation de l'entrefer.

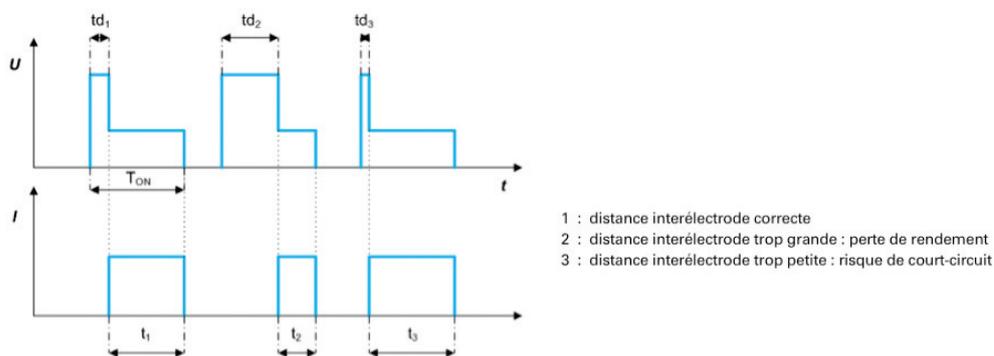


Figure 17 - Décharges générées avec gestion du temps d'amorçage [19].

Les circuits RC gardent un avantage pour générer des décharges rapides et pour améliorer la rugosité des surfaces usinées [24], [25], ainsi que dans le domaine qui nous concerne : la micro-électroérosion (cf. section 1.3). La recherche actuelle dans le domaine de l'EE se concentre majoritairement sur l'asservissement et la régulation du processus lors de l'usinage afin d'augmenter le rendement. [12], [26–28]. Nous allons traiter de cette question de manière plus détaillée dans la section suivante car cette question est encore ouverte dans le domaine de la  $\mu$ EE.

### 1.2.5 Régulation du procédé

L'avancement de l'outil est géré d'une manière spécifique à l'électroérosion. Par exemple, dans le cas de l'usinage par fraisage mécanique ou laser, le profil de vitesse associé à la trajectoire, suit une loi de mouvement prédéfinie. Dans le cas de l'EE, la boucle de rétroaction asservissant le processus de décharges est couplée à la vitesse d'avancement de l'électrode. La consigne de vitesse change de manière non-prédictible pour ajuster la valeur de l'entrefer, dégager l'électrode en cas d'éventuels court-circuit ou pour générer le renouvellement du diélectrique. Les machines actuelles se doivent d'utiliser Des méthodes de gestion indirectes de l'entrefer sont mises en œuvre sur les machines actuelles permettant de surveiller la tension, le courant, la fréquence des décharges, ou la forme des signaux [29].

Pour cela, l'algorithme de régulation doit :

- Gérer l'avancée de l'électrode-outil et éviter tout endommagement
- Éviter le phénomène d'« arcage », apparition d'un arc électrique au lieu d'une décharge
- Adopter les paramètres optimums pour générer une fréquence d'impulsions stables
- Maximiser le renouvellement du diélectrique à l'entrefer

Ces objectifs ont en commun la gestion d'un paramètre essentiel qui est la gestion de la hauteur de l'entrefer, qui fait l'objet de nombreuses études [30]. Il existe trois grands types de régulation (du plus ancien au plus récent) :

- Régulation sur la tension moyenne à l'entrefer
- Régulation sur la durée d'amorçage des décharges
- Régulation intelligente à base de logique floue, d'algorithme génétique.

#### 1.2.5.1 Régulation sur la tension moyenne

L'algorithme basé sur la régulation via la tension moyenne a pour but de stabiliser la fréquence de décharges ou la largeur de l'entrefer par l'observation de la tension moyenne  $U_{moy}$  aux bornes des électrodes. L'algorithme cherche à maintenir cette tension  $U_{moy}$  entre deux valeurs fixées par l'opérateur ( $U_{sup}$  et  $U_{inf}$ , Zone grisée, Figure 18). Ces limites permettent au système de maintenir la largeur d'entrefer à une distance quasi-constante grâce à l'asservissement du servomoteur par un signal compris dans la plage dite « optimale ». Dans la pratique, lorsque la tension moyenne détectée est trop basse ou trop haute, on commande l'avancée ou le retrait de l'électrode de manière à corriger et maintenir cette tension dans la plage de tension optimale.

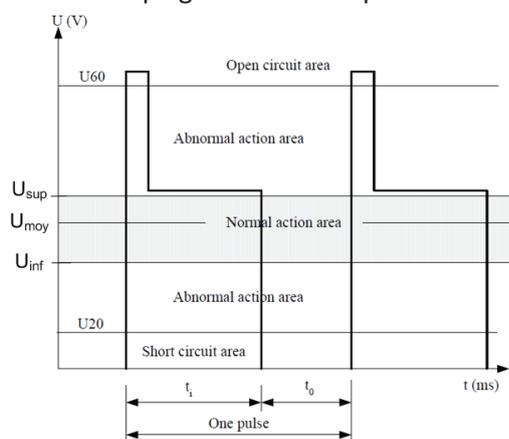


Figure 18 - Régulation sur la tension moyenne [31]

### 1.2.5.2 Régulation sur la durée d'amorçage des décharges

La seconde méthode [20], plus complexe, consiste à utiliser le temps d'amorçage des décharges comme base de régulation. L'amorçage de la décharge étant dépendante de la largeur de l'entrefer, cette largeur est indirectement mesurée par l'observation de la durée d'amorçage, i.e., le temps de retard de la décharge. Dit d'une autre manière, lorsque l'entrefer est en-dessous d'une valeur définit comme référence, la durée de claquage devient plus courte, à l'inverse, une durée d'amorçage plus longue indique un entrefer trop grand (Figure 19).

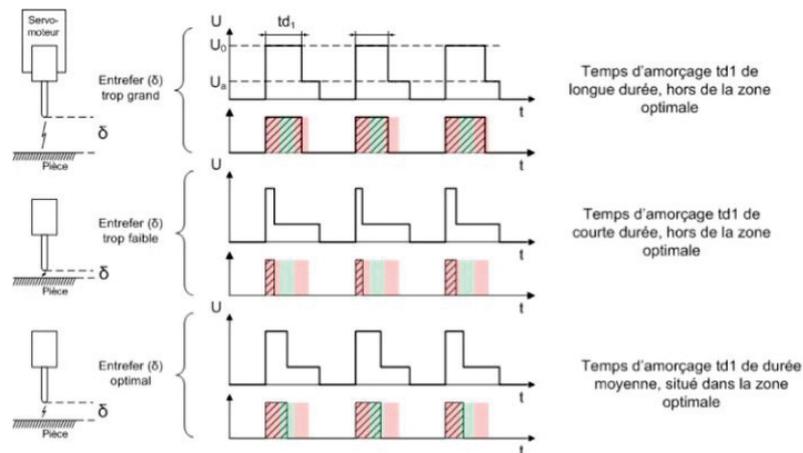


Figure 19 - Régulation sur la durée d'amorçage

Par conséquent, en filtrant numériquement cette durée, et en la comparant avec la valeur de référence, l'algorithme ordonne au servomoteur le retrait ou l'avancée de l'électrode afin de maintenir une largeur d'entrefer constante. Beaucoup de contrôleurs des machines d'électroérosion modernes utilisent la durée d'amorçage comme valeur d'entrée du contrôleur [12]. L'inconvénient de cette méthode pour les opérations de contrôle est sa variance considérable. Il en résulte parfois un mouvement de flottement de l'électrode et peut conduire à des conditions instables pour le processus d'usinage [32].

### 1.2.5.3 Régulation intelligente par logique floue [33]

Les méthodes les plus avancées que l'on retrouve dans les dernières machines commerciales font appel à des algorithmes très poussés, basés sur des réseaux de neurones, de logique floue, ou d'algorithmes génétiques que l'on retrouve à la base de l'intelligence artificielle [28], [34].

La logique floue peut être appliquée à des systèmes dont le comportement est difficilement modélisable mathématiquement, ou encore à des systèmes non-linéaires. Cette méthode utilise des règles pour définir le comportement d'un système. C'est une méthode active qui évolue en fonction des résultats d'analyse. Le comportement du système se rapproche du mode de comportement humain, avec une phase d'analyse et une action adaptée aux circonstances environnantes.

Elle est très avantageuse en électroérosion pour contrôler et adapter le comportement de la machine au caractère stochastique du processus. Le contrôleur doit ajuster la largeur de l'entrefer de manière à maximiser l'enlèvement de matière et minimiser l'usure de l'électrode-outil.

Jusqu'à présent, il était commun d'utiliser des méthodes heuristiques<sup>3</sup> pour les contrôleurs, mais la logique floue a démontré une certaine efficacité pour la gestion des processus stochastiques [35].

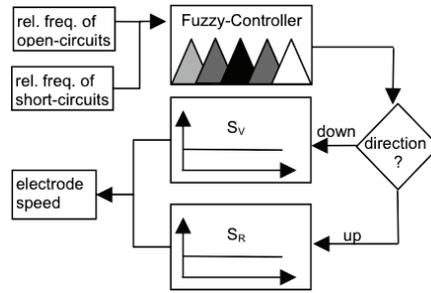


Figure 20 - Schématisation du fonctionnement du contrôleur par logique floue en EE [28]

La stratégie de la gestion de l'entrefer par le contrôleur est basée sur l'observation de la fréquence des court-circuits et des circuits-ouverts et ensuite l'analyse par logique floue. On peut expliquer cette stratégie comme suit :

- Si *peu* de court-circuits et de circuits ouverts sont observés, l'électrode n'est pas déplacée.
- Si *plus* de court-circuits sont observés, on ordonne le retrait de l'électrode.
- Si *trop* de circuit-ouverts sont observés, on avance l'électrode.

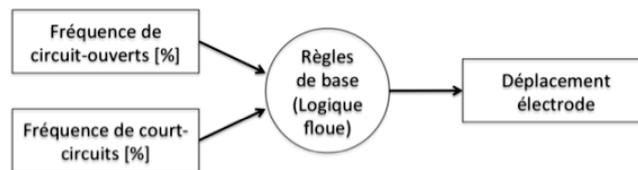


Figure 21 - Architecture d'un contrôleur basé sur la logique floue.

Les termes "*peu*", "*plus*" et "*trop*" ont été intégrés à l'algorithme pour correspondre à des seuils de tolérance pour les circuit-ouverts et les court-circuits. Avec la logique floue, le comportement peut être beaucoup plus souple et engendrer une réponse graduée. La figure ci-dessous montre la conception de principe d'un contrôleur à base de logique floue.

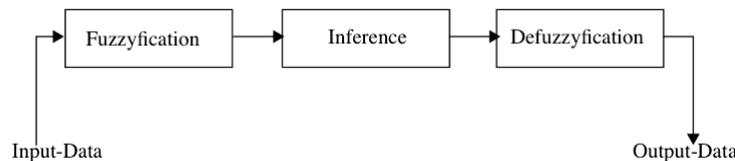


Figure 22 - Principe d'un contrôleur basé sur la logique floue d'après [28].

De manière très schématique, le fonctionnement est le suivant : Les données d'entrée doivent être mesurées avant tout autre traitement. Cela est fait à l'intérieur du module de « fuzzyfication » utilisant des fonctions d'appartenance. L'étape suivante est exécutée à l'intérieur du module d'inférence à l'aide de clause « si... alors » pour adapter au mieux la réponse. A la sortie, la « defuzzyfication » permet de convertir les données dans un format qui est envoyé à un actionneur.

<sup>3</sup> Une méthode heuristique consiste en l'utilisation d'un algorithme qui fournit rapidement une solution réalisable, mais pas nécessairement optimale, à un problème d'optimisation. C'est une méthode approximative, utilisée pour déterminer une solution approchée d'un problème.

## 1.2.6 Paramètres du procédé

En EE, les performances du procédé sont d'autant plus importantes et difficiles à maîtriser qu'elles dépendent de nombreux paramètres dont nous allons dresser la liste ci-dessous.

### 1.2.6.1 Paramètres d'usinage

Les paramètres les plus importants sont :

- **Temps de décharge ( $T_{ON}$ )** : Durée pendant laquelle le courant est autorisé à passer à travers le canal plasma. La quantité de matière enlevée est approximativement proportionnelle à la durée de décharge et l'intensité du courant de décharge.
- **Temps de repos ( $T_{OFF}$ )** : Durée pendant laquelle les décharges ne sont pas autorisées (Durée utilisée pour refroidir des électrodes, évacuer des débris, et renouveler le diélectrique).
- **Entrefer** : Distance entre l'électrode et la pièce. Cette distance doit être constamment asservie de manière à déclencher les décharges indépendamment de la pollution du milieu.
- **Courant de décharge** : Amplitude du courant s'écoulant à travers le plasma.
- **Rapport cyclique** : Rapport de la durée de décharge et la durée totale du cycle, comprenant le temps de décharge plus le temps de repos. Il est noté :  $\tau = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}}$
- **Tension d'amorçage** : Tension appliquée entre l'électrode et la pièce de manière à amorcer l'ionisation du canal plasma propice au déclenchement de la décharge.
- **Polarité** : La polarité du couple électrode/pièce revêt une importance particulière sur l'efficacité d'enlèvement de matière. Par définition, la polarité est positive quand le potentiel de l'électrode-outil est supérieur à celle de la pièce et, négative dans le cas contraire.
- **Diélectrique** : Le kérosène et ses dérivés, ainsi que l'eau dé-ionisée, composent l'essentiel des milieux utilisés comme diélectrique.
- **Capacité de travail** : Dans le cas des circuits RC, la capacité de travail représente la réserve d'énergie, source des décharges. Elle influe sur la quantité d'énergie délivrée au substrat, cette énergie se calcule par la formule :  $E \approx \frac{1}{2} CU^2$ .

Le Tableau 3 ci-dessous répertorie les valeurs usuelles en EE :

<i>Paramètres</i>	<i>Électroérosion</i>
Tension d'amorçage	30 à 250 V
Courant de décharge	10 à 50 A
Temps de décharge	10 – 400 $\mu$ s
Temps de repos	100 – 500 $\mu$ s
Entrefer	0.1- 5 mm
Rapport cyclique	0.1 à 0.9
Enlèvement de matière	1 – 3000 mm <sup>3</sup> /min
Polarité	Positive / négative
Dimensions électrodes	5 à 500 mm

Tableau 3 - Valeurs typiques des paramètres en électroérosion conventionnelle.

Nous allons maintenant passer en revue plusieurs de ces paramètres.

### 1.2.6.2 *Rôle et nature du diélectrique*

Le diélectrique utilisé en électroérosion a une influence importante sur les performances du procédé, ainsi que sur la qualité des usinages. Il assure quatre rôles :

- L'isolation « statique » à l'entrefer
- L'isolation « dynamique » à l'entrefer, qui correspond à sa capacité à retrouver ses qualités d'isolant après une décharge
- Le refroidissement de l'électrode et de la pièce.
- L'enlèvement et l'évacuation de la matière érodée.

L'isolation à l'entrefer est cruciale pour éviter les phénomènes d' « arcage » dégradant la qualité de finition des surfaces. Le claquage du diélectrique doit avoir lieu lorsque l'entrefer est faible, ainsi, on augmente l'intensité d'érosion et la précision de l'usinage.

Le deuxième point important concerne le comportement du diélectrique qui doit permettre de recréer le plasma le plus rapidement possible après une décharge. Autrement dit, à la fin de la décharge, le canal de plasma doit être dé-ionisé rapidement afin que la prochaine décharge puisse se faire.

Le troisième point est en relation avec le refroidissement conjugué, de l'électrode et de la pièce. Avec des températures de plasma dépassant les 10 000°C [36], le diélectrique doit assurer une dissipation thermique importante à la périphérie des électrodes pour éviter une usure prématurée de l'électrode-outil, mais aussi, dans le même temps, refroidir les débris engendrés par l'impact de la décharge sur la pièce.

Enfin, les particules métalliques doivent être évacuées le plus efficacement possible, afin d'éviter l'altération du processus par des phénomènes intempestifs tel que l' « arcage ». Le renouvellement du diélectrique et l'évacuation des débris sont directement impliqués dans le taux d'enlèvement de matière, comme l'ont montré [37], [38].

Il existe principalement deux types de diélectriques utilisés en EE : l'eau dé-ionisée et des diélectriques organiques [39], [40].

#### **i. Eau dé-ionisée**

L'eau non-filtrée ne peut être utilisée à cause des impuretés, mais l'utilisation de l'eau dé-ionisée est possible (et même recommandée dans le cas de la micro-électroérosion). L'eau dé-ionisée permet une réduction de l'usure de l'outil et améliore la vitesse d'usinage dans certains cas [41].

#### **ii. Diélectriques organiques**

Des diélectriques couramment utilisés sont des kérosènes ou des dérivés dont les caractéristiques principales sont la viscosité, le point de claquage, la constante diélectrique, ainsi que la dispersion des particules en suspension (grâce à l'ajout de microparticules dans le diélectrique, l'intensité d'érosion a été améliorée en début de processus [42], [43]). D'après la Figure 23, les diélectriques de viscosité comprise entre 2 à 3.5 cSt à 20°C conviennent pour les usinages de finition (polissage). Il est préférable d'utiliser un diélectrique avec une viscosité de 4 à 6.5 cSt à 20°C pour les opérations d'ébauche (enlèvement de volume important).

D'après [18], un fluide diélectrique adapté à l'usinage par électroérosion devrait avoir une constante diélectrique de 2 à 2.5 et présenter une tension de rupture<sup>4</sup> entre 40 et 60 kV.

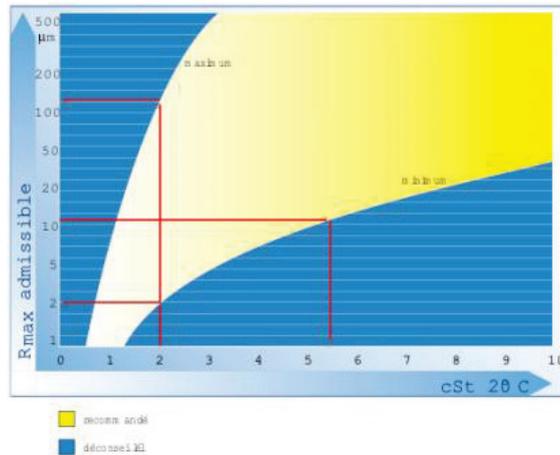


Figure 23 - Table de la rugosité désirée en fonction de la viscosité des diélectriques d'après [18].

### 1.2.6.3 *Entrefer vertical et latéral*

Dans le cas de l'électroérosion par enfonçage, on estime qu'il existe deux types d'entrefer, le frontal et le latéral. La distance outil/pièce qui est principalement dépendante de la tension d'usinage et du diélectrique utilisé (nature, pollution, caractéristiques électriques). Lors des usinages 3D, il est important et nécessaire de tenir compte des deux entrefers afin de maintenir une résolution d'usinage contrôlée

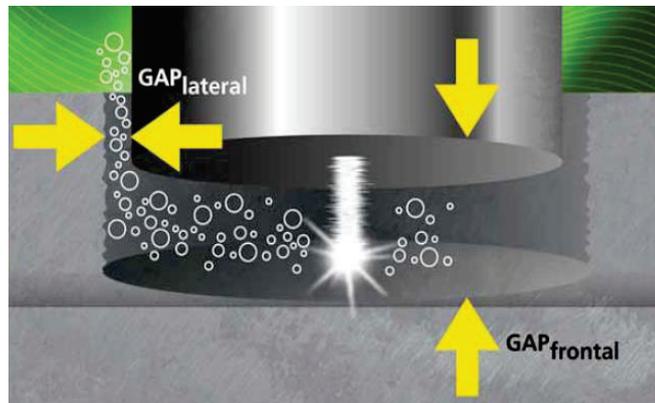


Figure 24 - Entrefer latéral et entrefer frontal [18].

<sup>4</sup> La tension de rupture (ou de claquage) est la tension à laquelle une couche de diélectrique séparant deux électrodes sphériques distantes de 2.5 mm aboutit à l'apparition d'un arc électrique et donc au claquage du diélectrique. Il faut noter que le moindre contact avec l'humidité (ex : la condensation) peut modifier cette valeur.

#### 1.2.6.4 Taux d'enlèvement de matière

Le taux d'enlèvement de matière (TEM)<sup>5</sup> est caractéristique du volume de matière éjecté au point d'impact de la décharge. Ce taux permet de caractériser le rendement et l'efficacité du processus d'électroérosion [22], [44–46] [9], [47], [48]. Le TEM est calculé selon la formule suivante :

$$TEM = \frac{\text{Volume de la pièce avant usinage} - \text{Volume de la pièce après usinage}}{\text{temps d'usinage}}$$

On exprime généralement ce taux en mm<sup>3</sup>/min en EE ; il est de l'ordre du μm<sup>3</sup>/min dans le cas de la μEE (cf. section 1.3.4). Ce taux est plutôt dépendant des propriétés thermiques du matériau composant la pièce plutôt que des caractéristiques mécaniques (dureté, résistance aux contraintes). L'enlèvement de matière n'est pas symétrique entre l'outil et la pièce. Il dépend essentiellement de la durée et de l'intensité des décharges, ainsi que de la température de fusion du matériau. Une température de fusion basse correspondra à un TEM élevé. Dans une moindre mesure, la qualité du diélectrique peut aussi influencer le TEM [37].

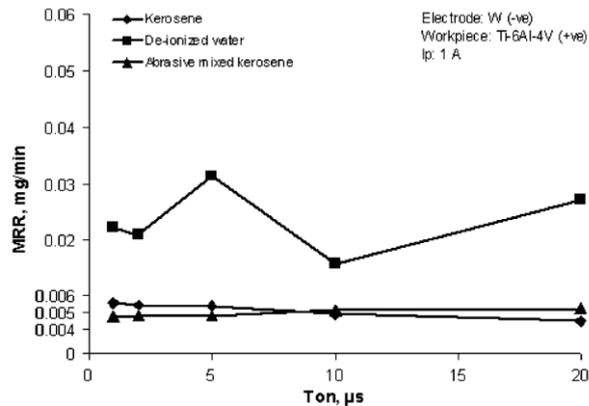


Figure 25 - TEM (ici noté MRR) en fonction de T<sub>ON</sub> pour différents diélectriques selon [37].

Plusieurs études montrent, après analyse des surfaces affectées, que la fusion est le principal phénomène responsable de l'enlèvement de matière puis, dans une moindre mesure, la vaporisation. Des simulations ont montré notamment que la proportion de matière enlevée par vaporisation directe de la matière est très faible de l'ordre de 0,2% ; pourcentage réévalué entre 1 et 4%, par Lhiaubert et Meyer en fonction de l'électrode prise en considération [49]. Il existe de nombreux modèles thermiques (Snoeys's , Van Dijck's, Beck's, Jilani's et DiBitonto's [50]) pour simuler le flux thermique des décharges sur la pièce.

#### 1.2.6.5 Usure de l'outil

##### i. Matériaux composant l'outil

Les matériaux composant l'électrode-outil doivent avoir une température de fusion élevée pour résister aux températures des décharges, ainsi qu'une excellente conductivité thermique. Les matériaux tels que le cuivre, le graphite, le tungstène sont les plus utilisés (Tableau 4).

<sup>5</sup> MRR en anglais pour Material Removal Rate.

Matériau	T° de fusion (K)	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) @293K	Dureté (Mohs)
Graphite	3925	129	1,5
Cuivre et alliages	1357	401	2,5 - 3
Tungstène	3695	174	7,5 - 8
Carbure de tungstène	2870	84	8,5 - 9

Tableau 4 - Propriétés des matériaux composant typiquement l'électrode-outil en EE.

Le cuivre et ses alliages ne présentent pas une température de fusion élevée mais leur faible coût, leur bonne conductivité thermique, ainsi que leur facilité d'usinage par enlèvement de copeaux en font des matériaux de choix pour l'ébauche et l'électroérosion par enfonçage (tout comme les électrodes en graphite). Le tungstène, grâce à sa haute température de fusion et sa bonne conductivité thermique, est le matériau idéal pour le fraisage par micro-électroérosion, mais il est difficile à usiner et son prix reste élevé. Quant au carbure de tungstène, son principal défaut est son usinage difficile mais il présente une très bonne résistance à l'usure. Il est souvent réservé à l'usinage de trous.

## ii. Taux d'Usure de l'Outil (TUO)

Le taux d'usure de l'outil (TUO)<sup>6</sup> est le rapport entre le volume de matière enlevé sur la pièce  $V_p$  et le volume de matière enlevé sur l'électrode  $V_e$  [51].

Il est noté :

$$\sigma = \frac{V_e}{V_p}$$

Afin d'éviter un renouvellement trop fréquent de l'électrode-outil, ce taux d'usure doit être faible. Les paramètres influençant fortement ce taux, sont :

- le diélectrique et l'efficacité du flux de renouvellement [52]
- la polarité [53]
- le régime d'usinage<sup>7</sup>
- le matériau de l'électrode [51], [54]

Le TUO est directement proportionnel à l'énergie transmise par le plasma. Ainsi Eubank et al., ainsi que Kunieda [55], [56], ont démontré qu'en moyenne l'énergie du plasma est répartie de la manière suivante:

- 18% de l'énergie de décharge provoque la fusion de la pièce,
- 8% provoque un enlèvement de matière sur l'outil (qu'il convient donc de minimiser),
- 74% de l'énergie est utilisée à l'expansion du plasma et en déperdition par effet joule à travers le diélectrique.

La conséquence de cette usure, est qu'il n'est pas possible d'usiner un nombre important de pièces avec la même d'électrode, et qu'il est nécessaire de compenser cette usure continue durant l'usinage. Cela implique une gestion dynamique de l'avancée de l'électrode durant le parcours [57][40][41]. Il peut être aussi nécessaire de changer l'outil en fonction de la durée et la complexité de l'usinage.

<sup>6</sup> TWR en anglais pour Tool Wear Rate.

<sup>7</sup> Le régime d'usinage affecte fortement le taux d'usure de l'outil ; cette usure volumétrique peut être limitée à 0,5 % en régime d'ébauche, mais peut atteindre jusqu'à 30 % ou plus en régime de finition [19].

### 1.2.6.6 Polarité

Comme nous l'avons abordé précédemment, la répartition de l'énergie délivrée par le plasma est aussi dépendante de la polarité électrode/pièce. L'EE conventionnelle privilégie la polarité positive car elle permet des temps de décharges sur de longues périodes ( $> 100 \mu\text{s}$ , cf. Tableau 3), ce qui augmente le taux d'enlèvement de matière et diminue l'usure de l'outil. Avec des durées de décharges plus courtes ( $< 10 \mu\text{s}$ ), comme en  $\mu\text{EE}$ , le phénomène s'inverse, la polarité à privilégier devient la polarité négative pour réduire l'usure de l'outil.

Joseph [12] fait part d'une explication tenant compte de la composition du plasma pour les deux cas de figures. Le plasma est un état de la matière dans lequel les électrons (de charge négative, masse faible, mobilité élevée) et les particules ionisées (charge positive ou négative, masse 1000x plus importante, mobilité faible) se mélangent dans une « soupe » à haute température. C'est le bombardement, en nombre et à forte énergie de ces espèces, sur le matériau qui provoque l'enlèvement de matière.

Lors des décharges très courtes, un nombre plus important de particules négatives (plus mobiles) frappent l'électrode positive que l'effet inverse (les particules positives étant moins mobiles). L'énergie délivrée sur l'électrode positive est donc plus grande et le TUO plus important.

Dans le second cas, les décharges de durée plus longue, favorise le bombardement par les charges positives. Leur masse étant supérieure à celle des électrons, cette configuration libère à vitesse égale, une énergie supérieure sur l'électrode négative. Le TUO est donc plus grand sur l'électrode négative.

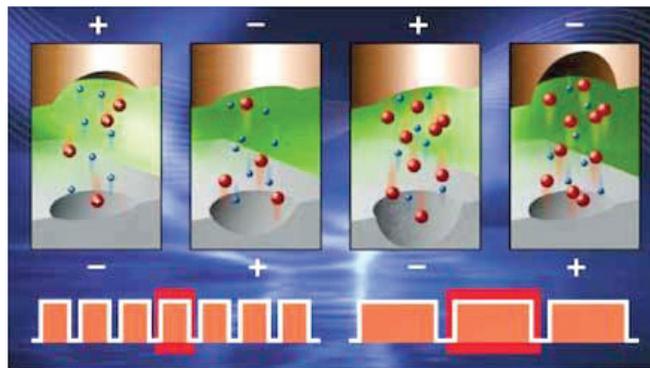


Figure 26 - Illustration de l'influence de la polarité sur le TEM d'après [18].

Le Tableau 5 résume de façon qualitative l'enlèvement de matière de la pièce et le taux d'usure constaté selon la polarité.

	Décharges courtes		Décharges longues	
	TEM	TUO	TEM	TUO
Pièce (+) / Outil (-)	+	-	-	+
Pièce (-) / Outils (+)	-	+	+	-

Tableau 5 - TEM/TUO en fonction de la polarité des électrodes.

### 1.2.6.7 *Résolution d'usinage*

Dans ce mémoire, nous considérerons que la résolution d'usinage est le détail minimum que l'on peut obtenir par le procédé. Celle-ci dépend de nombreux facteurs et doit notamment être appréciée en fonction de la géométrie de la pièce. Pour illustrer ce commentaire, considérons les deux pièces de la Figure 27, avec à gauche un motif entrant (canal ou mortaise) et à droite un motif sortant (tenon).

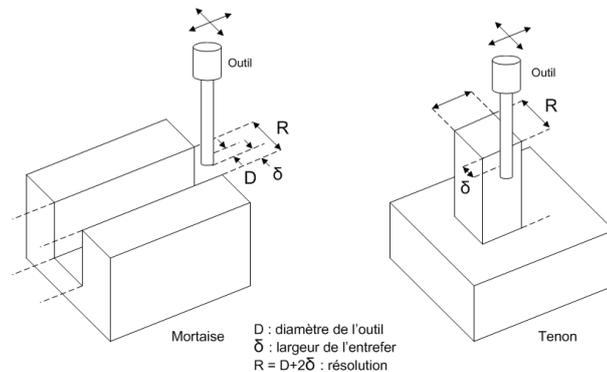


Figure 27 - Définition de la résolution d'usinage.

Dans le cas de la mortaise, la largeur minimale du canal dépendra principalement de la largeur de l'outil  $D$  et de la valeur de l'entrefer  $\delta$ . Plus l'outil sera fin, meilleure sera la résolution. Dans le cas du tenon, il sera possible d'usiner avec un outil de grand diamètre. La résolution dépendra essentiellement de la précision<sup>8</sup> des axes et de la valeur de l'entrefer  $\delta$ .

### 1.2.6.8 *État de surface*

Suite à l'usinage, la surface d'une pièce affiche des irrégularités [60], [61] qu'il convient de quantifier. Les machines d'EE sont capables d'atteindre des états de surface proche du poli miroir, avec des rugosités ( $R_a$ ) entre 100 nm et 1  $\mu\text{m}$  [62] (certains constructeurs affichent 50 nm).

En réalité, pour caractériser une pièce, on ne peut pas se limiter à une mesure d'état de surface. Celle-ci obéit aux normes ISO 4287, ISO 13565-1 et 2 et ISO 25178. Elle est effectuée à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont visualisés par un profil (mesure 2D) ou d'une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (mesure 3D).

Le relief d'une surface mesuré en 2D peut être représenté sous la forme d'une fonction  $z(x) = h$  où  $x$  est la position du point courant sur la longueur d'évaluation de la surface et  $h$  la mesure de la hauteur de la surface à cette position. Le filtrage de ce relief permet d'obtenir les profils des différents types d'irrégularités (Figure 28) :

- Premier ordre : écart de forme
- Second ordre : ondulation
- Troisième ordre : rugosité
- Quatrième ordre : microrugosité

Il existe différents types de profils et différents paramètres mis sous l'abréviation  $T_n$  avec les notations suivantes :

---

<sup>8</sup> La précision des axes est une difficulté majeure, maintenir cette précision en est une autre. Fluctuations thermiques et vibrations sont des problèmes récurrents en micro-déplacements [166].

- T : type de profil, soit R (rugosité), W (ondulation) ou P (brut).

- n : suffixe de paramètre (a, Sm, z, p, t, q...)

Il existe de nombreux indicateurs mais la pratique montre qu'un nombre restreint (Ra, Rt, Rp, Rq) d'entre eux sont utilisés. Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est Ra. Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation  $l$ . Son expression est la suivante :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx$$

Avec  $l$ , longueur d'étude de la surface et  $z$ , hauteur mesurée.

D'autres paramètres classiques sont définis comme suit :

- Rp : la hauteur maximale du pic le plus élevé observé par rapport à la ligne moyenne sur la longueur analysée.
- Rt : rugosité totale, la hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur la longueur analysée.
- Rq : écart moyen quadratique.

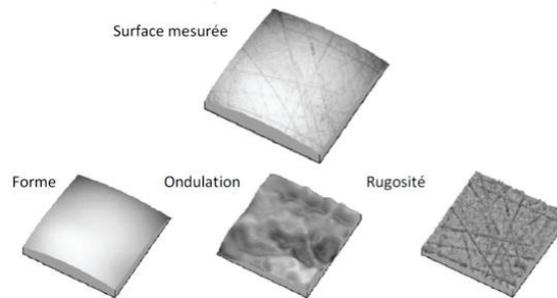


Figure 28 - État de surface [60]

En général, en micro-usinage, le Ra est le facteur déterminant la qualité d'une pièce ou de l'objet usiné. Il est d'environ  $0,1 \mu\text{m}$  dans la majorité des cas, ce qui indique un état de quasi poli-miroir.

#### 1.2.6.9 *Couche blanche et altérations cristallographiques*

L'effet érosif des décharges par électroérosion sur la structure des matériaux est abordé par de nombreuses publications [63–68]. Schulze [64] s'est intéressé à la diffusion thermique des impacts et à leur modélisation numérique, et montre que la zone affectée thermiquement par les décharges dépend de l'intensité [65], du coefficient de diffusion thermique du matériau et de la durée de la décharge. La conséquence de l'échauffement localisé de la matière, provoque une transformation du matériau, dont les couches altérées peuvent être décomposées en 3 parties (Figure 29) :

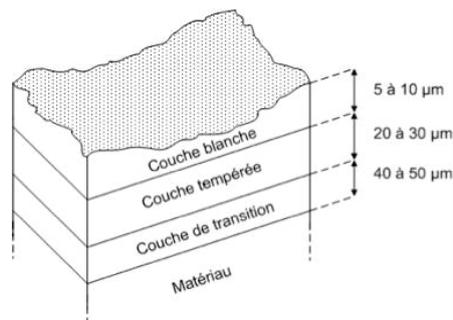


Figure 29 - Couches altérées thermiquement par érosion.

- La couche blanche (ou « Recast Layer ») est la couche supérieure qui est entrée en fusion et qui a été refroidie brutalement au contact du diélectrique lors de la post-décharge. La formation de cette couche suit un processus proche d'une trempe. La composition de cette couche est généralement affectée par les espèces présentes dans le milieu diélectrique. Dans le cas de l'utilisation du kérosène, du carbone se retrouve en quantité dans cette couche [66] [67]. L'épaisseur de cette couche est très difficile à évaluer, on l'estime entre 5 et 50 microns en fonction de l'intensité du plasma [69].
- La couche tempérée d'épaisseur de 20 à 30  $\mu\text{m}$  correspond à la couche située en-dessous de la couche blanche. Cette zone correspond au volume de matière qui n'a pas été soumise à une température suffisante pour entrer en fusion, mais qui a subi une trempe lors du refroidissement.
- La couche de transition est la dernière couche avant le matériau de base. Cette couche a généralement subi un échauffement modifiant légèrement sa structure, lui conférant une dureté plus faible.

Bien que l'altération structurelle du matériau due à l'effet thermique des décharges soit une limitation dans certains cas (fragilité accrue, tenue chimique plus faible, etc.), l'électroérosion est souvent utilisée pour implanter des défauts structuraux à la surface des matériaux afin de tester les propriétés physico-chimiques de pièces altérées [70], [71]. Ce procédé vient en complément de la validation des simulations de fragilisation des matériaux soumis à des conditions extrêmes d'utilisation.

#### 1.2.6.10 Régimes d'usinage

Les machines d'électroérosion possèdent plusieurs régimes d'usinage permettant d'obtenir différents profils allant du régime d'ébauche (enlèvement de matière important mais rugosité élevée) à un régime de finition (enlèvement moindre et une rugosité) et de super finition avec un très faible enlèvement de matière et une excellente rugosité pouvant atteindre le poli-miroir [62]. Le Tableau 6 montre des exemples de régimes types pouvant être utilisés [19].

Paramètres et performances en mode défonçage			
Paramètres	Ébauche	½ Finition	Finition
Intensité (A)	64	8	4
Durée de décharge ( $\mu\text{s}$ )	50	25	3,2
Débit de matière ( $\text{mm}^3/\text{min}$ )	400	22	2
État de surface Ra ( $\mu\text{m}$ )	11	3,6	1,6
Usure relative (%)	1	8	35

Tableau 6 - Comparaison des régimes d'usinages.

La Figure 30 illustre l'impact des régimes d'usinages sur la qualité des motifs obtenus. A gauche, avec un régime de semi-finition l'enlèvement de matière est plus faible, mais avec un Ra de meilleure qualité. A droite, en régime d'ébauche, l'enlèvement est plus important, mais le Ra est de qualité moindre.

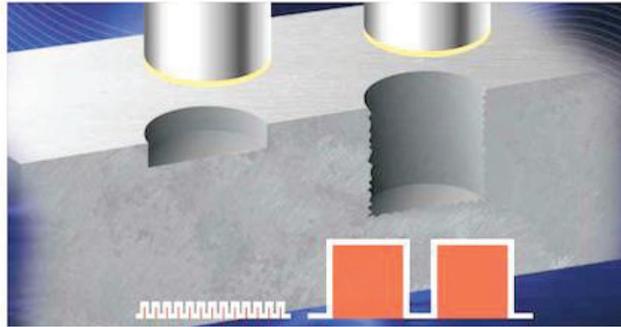


Figure 30 - Illustration de deux régimes d'usinages par enfonçage [18].

### 1.2.7 Conclusion

Nous avons tenté de dresser un tableau d'ensemble de l'électroérosion conventionnelle. A cette échelle, ce procédé fait encore l'objet d'une recherche intense dont les principaux axes sont résumés dans le tableau ci-dessous [46], [72–77]. Il convient de suivre les progrès effectués car ils pourraient être transposés à la  $\mu$ EE. Bien évidemment la miniaturisation du procédé est en soi un axe de recherche important.

<i>Axe de recherche</i>	<i>Motivation</i>	<i>Commentaire</i>	<i>Références</i>
Électroérosion en milieu gazeux (Dry-EDM)	Réduire les coûts d'usinage et rendre la machine de production plus écologique.	L'utilisation de gaz comme diélectrique à la place du liquide devrait permettre de réduire les coûts et d'améliorer l'évacuation des débris.	[78–81]
Régulation par Réseau neurologique/ Logique floue	Stabiliser et augmenter le rendement du procédé	Les travaux les plus importants se concentrent sur cette thématique qui permet d'améliorer la maîtrise du procédé par une régulation efficace des paramètres.	[28], [32], [47], [82]
Optimisation du circuit d'étincelage / Vitesses d'usinage	Optimiser le circuit d'étincelage pour améliorer le rendement énergétique du procédé et améliorer la vitesse d'usinage	Améliorer le contrôle et la gestion des décharges ainsi la précision de déplacement conduit à des usinages plus rapide et plus efficace.	[83]
Hybridation	Amélioration de la dynamique en Z Étendre la liste des matériaux compatibles	L'ajout de technologies tierces peut combler les lacunes du procédé original, comme l'utilisation de l'électrochimie, ou pour rendre les matériaux conducteurs.	[84–86]
Fabrication de micro-outils ultrafins	Abaisser la résolution minimale d'usinage	En diminuant la largeur minimale des outils tout en augmentant leur hauteur, il est possible de réaliser des structures à haut facteur de forme.	[87–90]
Diélectrique	Charger le diélectrique en nanoparticules pour améliorer l'enlèvement de matière et le refroidissement	En chargeant le diélectrique d'additifs, il est possible de le rendre plus efficace (pouvoir d'abrasion, de dissipation, et d'évacuation de débris).	[42], [43], [91]

Tableau 7 - Vue d'ensemble des recherches en cours sur l'EE.

## 1.3 L'électroérosion à l'échelle microscopique

### 1.3.1 La micro-électroérosion

La  $\mu$ EE est une déclinaison de l'électroérosion conventionnelle faisant appel à des décharges de très faibles énergies typiquement de l'ordre de quelques  $\mu$ J à quelques nJ ( $10^{-5}$  à  $10^{-9}$  joules par décharge) de façon à enlever de faibles volumes de matière ( $0,05$  à  $500 \mu\text{m}^3$ ). Ce faible taux d'enlèvement ouvre la voie à la réalisation de micropièces ou de pièces avec des détails très fins. Les échelles mises en jeu sont totalement différentes de l'EE de sorte que de nombreux problèmes qui étaient auparavant sous-estimés deviennent prépondérants. Parmi les contraintes, le micro-positionnement doit répondre à des exigences très supérieures à la résolution envisagé, pour des motifs de résolution de 5 microns, on estime que la précision de positionnement doit atteindre une valeur proche de  $0,5 \mu\text{m}$ . En outre, la dimension des électrodes est bien inférieure à l'EE traditionnelle, soit quelques micromètres. L'obtention et l'utilisation de ces électrodes est délicate (préhension, usinabilité, usure). Enfin, un circuit électronique alimentant le couple électrode/pièce, doit assurer la délivrance de décharges de très faibles énergies à une fréquence soutenue.

### 1.3.2 Les variantes

Par analogie avec l'EE, Uhlmann et al. [92] et le réseau européen 4M [93] répertorient six variantes de  $\mu$ EE résumées ci-dessous.

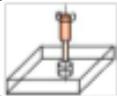
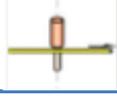
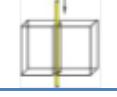
Procédés	Illustrations d'après [92]	Terme anglais	Électrode ( $\mu\text{m}$ )	Géométrie (pièce)	Détail min. ( $\mu\text{m}$ )	Facteur de forme	État de surface (pièce) Ra ( $\mu\text{m}$ )
<b>Perçage par <math>\mu</math>érosion</b>		$\mu$ EDM Drilling	$\varnothing 5$ à $10$	2D	5	$\approx 25$	0,05 - 0,3
Sources: [94], [95]							
<b><math>\mu</math>érosion par enfonçage</b>		Die-Sinking $\mu$ EDM	/	3D	$\approx 20$	$\approx 20$	0,05-0,3
Sources: [96], [97]							
<b>Fraisage par <math>\mu</math>érosion</b>		$\mu$ EDM Milling	$\varnothing 5$ à $10$	3D	$\approx 20$	$\approx 10$	0,05 – 0,5
Sources: [41], [98], [99]							
<b>Meulage par <math>\mu</math>érosion</b>		$\mu$ EDG	$\varnothing 5$ à $10$	2.5D	$\approx 50$	$\approx 15$	0,8
Sources: [87], [100]							
<b><math>\mu</math>-meulage à fil</b>		$\mu$ WEDG	$\varnothing 10$	Cylindrique	10	$\approx 30$	0,15 – 0,75
Sources: [101]							
<b><math>\mu</math>-découpe à fil</b>		$\mu$ WEDM	$\varnothing 10$	3D	15	$\approx 10$	0,05 – 0,35
Sources: [102–104]							

Tableau 8 - Variantes de la micro-électroérosion.

Nous retiendrons que le microfraisage 3D permet d'obtenir des états de surface avec un Ra de 0,1  $\mu\text{m}$  mais un détail minimum de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$  qui reste assez élevé face à de techniques concurrentes comme le LIGA. Il est communément admis que les facteurs limitants en  $\mu\text{EE}$  sont principalement la taille des électrodes employées, ainsi que l'usure importante de ces microélectrodes qu'il est difficile de compenser [105].

### 1.3.3 Les machines commerciales

Les données précédentes montrent l'état de l'art dans le domaine de la recherche. Quelques machines de fraisage par  $\mu\text{EE}$  ont été commercialisées. Les caractéristiques de ces machines sont résumées dans le Tableau 9 ci-dessous (d'après un rapport du laboratoire Sandia [83]). On notera en Europe la prédominance de la société suisse Sarix.

Machine	Circuit de génération	Déplacement	Taille d'électrode	Applications
Panasonic	RC-circuit Impulsion minimum : 10 ns	Résolution : 0,1 $\mu\text{m}$ Précision : 1 $\mu\text{m}$	Électrode obtenue par WEDG sur la machine.	Structures 3D Trou de 5 $\mu\text{m}$
Sarix	Non-divulgué Impulsion minimum : 50 ns 0,05 – 40 A.	Résolution : 1 $\mu\text{m}$ Précision : 1 $\mu\text{m}$	Électrode de 40 $\mu\text{m}$ , affinée à 35 $\mu\text{m}$ par WEDM	Trous, cavités. Usinage 3D possible.
Pacific Controls	555 multi-shot Impulsion minimum : 2,5 $\mu\text{s}$ 0,02 – 100 A	0,5 $\mu\text{m}$	Électrode jusqu'à 2,5 $\mu\text{m}$ (achetée ?)	Seulement des trous.
AgieCharmilles	Non-divulgué	Résolution : 0,1 $\mu\text{m}$ Précision : 1 $\mu\text{m}$	Fil de diamètre 20 $\mu\text{m}$	2D, angle d'attaque fixe pour du fil de 25 $\mu\text{m}$ .

Tableau 9 - Quelques machines commerciales de  $\mu\text{EE}$ .

Il convient de prendre avec prudence les données des tableaux précédents. Dans les faits, les spécifications les plus avancées sont optimistes.

Les résultats d'avancées techniques trouvés dans la littérature ne semblent pas être intégrés dans les machines commerciales. Quelles en sont les causes ? Un manque de fiabilité ou de reproductibilité, ou bien des raisons économiques menant à des machines trop chères par rapport aux marchés de niches qu'elles visent ?

### 1.3.4 Ordres de grandeur

La  $\mu$ EE implique des modifications d'échelle à différents niveaux :

- la fabrication de micro-outils miniaturisés (passage de 1 mm à 10  $\mu$ m, voire moins).
- la gestion d'un entrefer de l'ordre de 10  $\mu$ m.
- la génération de décharges de l'ordre du  $\mu$ J au lieu de 100 mJ typiquement pour l'EE

Cet enlèvement de matière avec de très faibles décharges conduit à l'enlèvement de petits volumes de matières. Physiquement, cela se traduit par des diamètres d'impacts beaucoup plus faibles pour la micro-électroérosion. L'illustration en Figure 31 compare deux impacts réalisés par électroérosion conventionnelle (à gauche,  $\varnothing$  40  $\mu$ m) et par micro-électroérosion (à droite,  $\varnothing$  5  $\mu$ m).

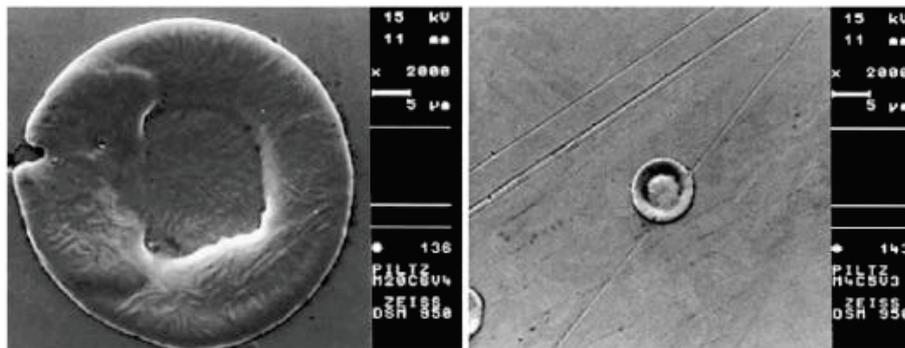


Figure 31 - Différence d'impacts entre EE et  $\mu$ EE [92].

Le Tableau 10 ci-dessous établit un comparatif des principales valeurs en EE et en  $\mu$ EE que nous avons complété sur la base de l'analyse de plusieurs publications :

Paramètres	Électroérosion	Micro-électroérosion
Tension d'amorçage	30 à 250 V	Quelques V à 150 V
Courant de décharge	10 à 50 A	0,2 à 10 A
Temps de décharge	10 - 400 $\mu$ s	0,04 - 50 $\mu$ s
Temps de repos	100 - 500 $\mu$ s	0,1 - 100 $\mu$ s
Entrefer	0,1- 5 mm	0,002 - 0,1 mm
Rapport cyclique	0,1 à 0,9	0,1 à 0,9
Enlèvement de matière	1 - 3000 mm <sup>3</sup> /min	0.01 - 5000 $\mu$ m <sup>3</sup> /min
Polarité	Positive / Négative	Essentiellement Négative
Dimensions électrodes	0,5 à 500 mm	0,005 à 0,5 mm
Grandeurs des motifs	1 à 100 mm	0,01 à 1 mm
Résolution	0,01 mm	0,001 mm

Tableau 10 - Comparatif des paramètres entre EE et  $\mu$ EE.

Le tableau ci-dessous répertorie les précisions et dimensions typiques rencontrées en  $\mu$ EE.

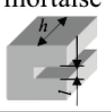
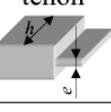
	$\mu$ EDM à fil	$\mu$ EDM à plongée
Tolérance de forme [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm 1$	$\pm 2$
Déviaton de la position [ $\mu\text{m}$ ]	$< \pm 1$	$< \pm 1$
Rugosité moyenne arithmétique $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.1 – 0.2	0.2 – 0.3
Rugosité moyenne $R_{tm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.5 – 2.5	1 - 5
 mortaise Largeur $l$ de cavité minimum [ $\mu\text{m}$ ] Rapport de forme $h/l$ maximum [%]	50-60 20-40	20-40 10-25
 tenon Épaisseur $e$ minimum [ $\mu\text{m}$ ] Rapport de forme $h/e$ maximum [%]	20-40 20-40	20-40 15-25
Diamètre de perçage minimum [ $\mu\text{m}$ ]	-	20
Rayon interne minimum [ $\mu\text{m}$ ]	20	-
Rapport de forme maximum [%]	60-80	10-25
Les plus petits diamètres d'électrode [ $\mu\text{m}$ ]	30	10

Figure 32 - Précisions et dimensions en  $\mu$ EE d'après [12]

Contrairement à l'électroérosion conventionnelle, la micro-électroérosion met en jeu des paramètres d'usinage dont les ordres de grandeurs sont bien plus faibles (jusqu'à 3 ordres de grandeur pour l'entrefer), ceci peut nécessiter l'utilisation d'une dynamique particulière à l'aide de piézoélectrique pour répondre aux exigences de l'usinage [12].

### 1.3.5 Aux limites de la microélectroérosion : la nano-électroérosion

Quelques publications commencent à mettre en avant le principe d'usinage à très haute résolution à l'aide d'électrodes ultrafines.

Ainsi, les travaux d'Egashira [106][107], en parallèle à ceux de l'INL [108], sont à la limite de la  $\mu$ EE et proche de la nano-EE. Ils prouvent la faisabilité de perçage de trous de diamètre inférieur à 2 microns sur de faibles profondeurs grâce à des pointes AFM (Egashira) et des pointes de Pt-Ir (INL) obtenues électrochimiquement. Aucune forme 3D n'a été usinée à cette échelle.

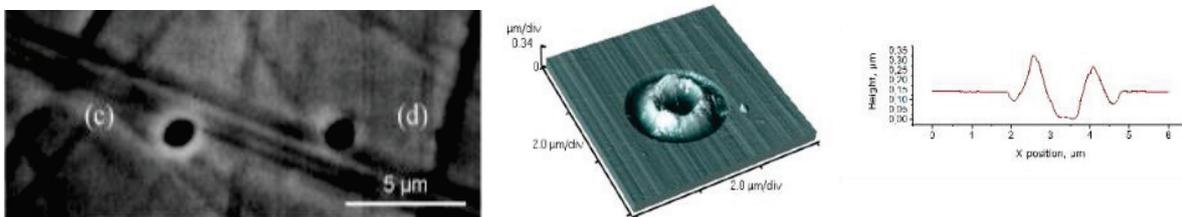


Figure 33 - Trou obtenus dans du laiton et du silicium.

A gauche, trous obtenus par Egashira à l'aide d'un microscope électronique [107]

A droite, trou à haute résolution par un prototype de  $\mu$ EE de l'INL [110].

À une échelle encore inférieure, les travaux de Malshe et al. [109] sont basés sur l'utilisation d'un microscope à effet tunnel modifié pour générer des décharges par électroérosion sur des substrats d'or. La précision de déplacement, ainsi que le contrôle de l'entrefer par courant tunnel offrent des perspectives pour la réalisation d'impacts nanométriques. Des impacts de l'ordre de 10 nm ont ainsi

été obtenus avec une électrode de platine-iridium à une tension de 2,8 V (impulsions de 500 ms) dans une huile diélectrique dont la tension de claquage est de 41,2 kV pour 2,54 mm, et un entrefer estimé à 2 nm. La Figure 34 montre la réalisation de la lettre « A » sur un substrat d'or où chaque impact a un diamètre d'environ 10 nm et une profondeur de 6 Å. L'électroérosion à l'échelle nanométrique n'est qu'une preuve de concept à l'heure actuelle.

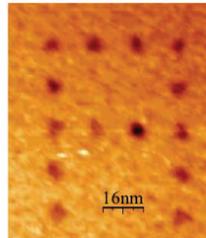


Figure 34 - Réalisation de la lettre "A" sur un substrat d'or par nano- EE [109].

## 1.4 Conclusion et objectifs de ce travail

### 1.4.1 L'avant-projet

Ce projet a débuté en 2007 lors de la thèse d'Arthur Benilov [110] au laboratoire INL à l'École Centrale de Lyon. Son travail a permis le développement d'une preuve de concept de l'électroérosion à haute résolution, avec la réalisation d'impacts érosifs élémentaires sur un wafer de silicium fortement dopé.

Ainsi, Une série d'impacts élémentaires dont les diamètres sont compris entre 1,5 et 3  $\mu\text{m}$  ont ainsi été réalisés (Figure 33) par l'intermédiaire d'un circuit hybride proche du circuit de Lazarenko (tension d'usinage 30 V, résistance de charge de 100  $\Omega$  et capacité de travail de 33 nF). L'impact élémentaire est de 2,5  $\mu\text{m}$  de diamètre pour une profondeur de 150 nm. Ces essais furent menés avec des électrodes obtenues électrochimiquement, dont la forme conique très prononcée (Figure 35) ne permettait pas l'enfoncement de l'électrode. (Figure 35).

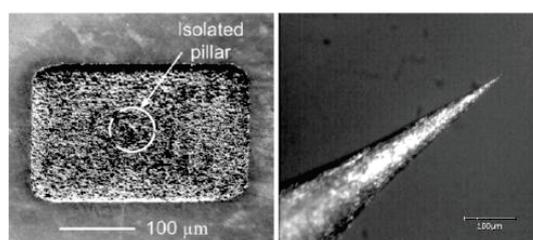


Figure 35 - Cavité de 250 x 250  $\mu\text{m}$  avec pilier central et électrodes coniques [108].

Néanmoins, ce premier prototype ne répondait pas à des exigences techniques poussées comme cela sera expliqué en section 3.1.1. C'est sur cette base que la décision de développer un instrument de fraisage par micro-électroérosion à résolution améliorée fut envisagée.

### 1.4.2 Problématique

La première problématique à laquelle nous nous sommes attaqués est l'élaboration de micro-outils ultrafins cylindriques et non plus coniques. Cette question est abordée au chapitre suivant.

***Chapitre 2 :***  
***Elaboration de micro-outils cylindrique par***  
***gravure électrochimique***

---

## 2 Elaboration de micro-outils cylindriques par gravure électrochimique

### 2.1.1 Généralités sur les micro-outils pour la $\mu$ EE

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la fabrication des micro-outils nécessaires au processus d'usinage par micro-électroérosion. Ces micro-outils sont constitués d'un fil conducteur de section variable dont le diamètre de départ est de quelques mm à quelques dizaines de microns et dont l'extrémité forme une pointe avec un rayon de courbure de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques nm.

Les **micro-outils** métalliques sont utilisés dans de multiples applications :

- les nanosciences sous forme de sonde [111] comme dans le cas des microscopes à sondes locales STM [119][120] ou AFM [121][122],
- l'électrochimie pour déclencher ou caractériser des réactions [116],
- la biologie pour la mesure d'activité de cellules biologiques [117], [118],
- la mécanique dans le domaine de la métrologie [119], pour réaliser des outillages pour le micro-poinçonnage [120], [121], l'usinage électrochimique [122] et l'usinage par étincelage [123] (Figure 36).

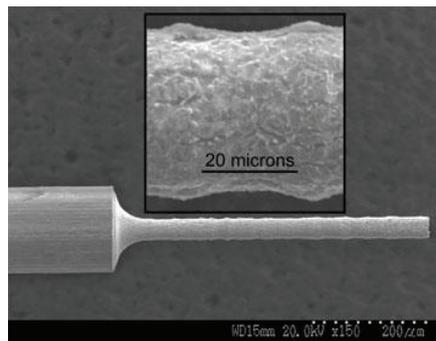


Figure 36 - Outil cylindrique en tungstène obtenu traditionnellement par  $\mu$ EE inverse [124].

Les recherches académiques [90], [125–128] restent soutenues pour l'élaboration de micro-outils avec des dimensions calibrées. Dans le cas de la micro-électroérosion, les dimensions des micro-outils (quelques dizaines de microns à plusieurs centaines de microns) deviennent cruciales car les exigences en termes de formes, de tolérance, de composition sont importantes.

Ainsi, plusieurs méthodes ont été développées pour usiner ces micro-outils pour la  $\mu$ EE, dont deux techniques disponibles dans les machines : l'électroérosion à fil et l'érosion inverse.

L'électroérosion à fil (ou à disque dans une moindre mesure) reste le moyen le plus utilisé (cf. section 1.1.2.2). Les micro-outils atteignent des diamètres de l'ordre de  $10\ \mu\text{m}$ . Ce procédé est généralement intégré dans les machines traditionnelles de manière automatique. Néanmoins, la machine d'érosion étant utilisée pour la fabrication de l'outil, elle ne peut pas servir à produire des pièces en même temps.

L'érosion inverse est une technique consistant à inverser la polarité entre le micro-outil et la pièce de manière à usiner le micro-outil grâce à un bloc sacrificiel.

Par ailleurs, les méthodes d'obtention purement mécanique, par fraisage, ne permettent pas d'atteindre de très faibles diamètres à cause des contraintes mécaniques induites durant la fabrication du micro-outil.

Le Tableau 11 résume les principales variantes décrites dans la littérature ; les plus intéressantes font ci-dessous l'objet d'un commentaire plus détaillé.

Principe	Références	Matière	Diamètre min ( $\mu\text{m}$ )	Facteur de forme	Cylindricité	Commentaire
Micro fraisage	[129]	Laiton	276	10	N/A	- $\varnothing$ minimum élevé - Contraintes mécaniques
Érosion à fil	[87], [106], [130]	Cu	10	N/A	N/A	- Processus interne - Coûteux en temps
Érosion à disque	[100]	WC:Co	10 $\mu\text{m}$	N/A	N/A	- Processus interne - Coûteux en temps
Érosion inverse	[131]	WC, Cu	10 $\mu\text{m}$	30	N/A	- Processus interne - Coûteux en temps
Électro chimie	[132], [133]	WC, W	5- 50	80	N/A	- Peu coûteux - Parallélisation
FIB	[134]	WC, Acier Diamant	15 - 100	N/A	N/A	- Coûteux - Processus externe

**Tableau 11 - Méthodes d'obtention et caractéristiques de micro-outils [125].**

*Un processus interne fait référence à un procédé d'obtention de micro-outil intégré à la machine d'électroérosion.*

*Un processus externe fait référence à un procédé nécessitant une préparation extérieure à la machine.*

L'utilisation du FIB est très marginale. Les micro-outils nécessitent des étapes de préparation extérieure à la machine et le coût de réalisation est très élevé, ce qui est incompatible avec une utilisation industrielle.

Enfin la dissolution électrochimique n'est pas une méthode classiquement utilisée en électroérosion. Ce procédé d'enlèvement de matière est précis et sans contrainte. Elle peut a priori permettre la réalisation contrôlée d'électrodes extrêmement fines, indépendamment de l'usage effectué par la machine d'électroérosion.

Il est donc naturel de se demander s'il est possible de mettre en œuvre une technique d'usinage électrochimique, s'inspirant des méthodes de taille issues des nanotechnologies, pour améliorer la résolution des procédés plus « traditionnels » d'usinage mécanique. Nous développerons donc cette méthode en gardant à l'esprit que la condition à assurer est l'obtention de micro-outils cylindriques.

Dans ce chapitre, nous commencerons par préciser les termes utilisés pour caractériser la forme des électrodes (cf. section 2.1.2). Nous présenterons les matériaux compatibles avec la  $\mu\text{EE}$  en justifiant le choix du tungstène. Le processus de taille électrochimique du tungstène pour réaliser les micro-outils sera présenté en détail et nous décrirons le dispositif expérimental utilisé (cf. section 2.2.1). La dernière partie sera consacrée aux résultats expérimentaux (cf. section 2.3) ainsi qu'à la discussion des résultats (cf. section 2.4).

## 2.1.2 Facteur de forme et degré de cylindricité d'un micro-outil pour la $\mu$ EE

La Figure 37 montre le profil typique des micro-outils auxquels nous nous intéresserons ; ils comportent quatre parties caractéristiques :

- Une partie en amont constituée par une tige cylindrique, qui sert de région de préhension pour l'opération de serrage mécanique dans la machine<sup>9</sup> ;
- Une zone de transition appelée fuseau inhérente à la méthode de fabrication<sup>10</sup> ;
- L'outil cylindrique proprement dit, qui correspond à la partie utile en  $\mu$ EE ;
- L'extrémité de l'outil avec sa surface extérieure.

Soit  $z = 0$ , l'origine des axes placée (arbitrairement) dans la tige près du fuseau :

- le fuseau est défini comme étant la zone comprise entre les plans  $z = 0$  et  $z = Z_f$
- l'outil est compris dans la zone entre les plans  $z = Z_f$  et  $z = Z_o$
- l'extrémité de l'outil est définie comme la zone au-delà de  $z = Z_o$

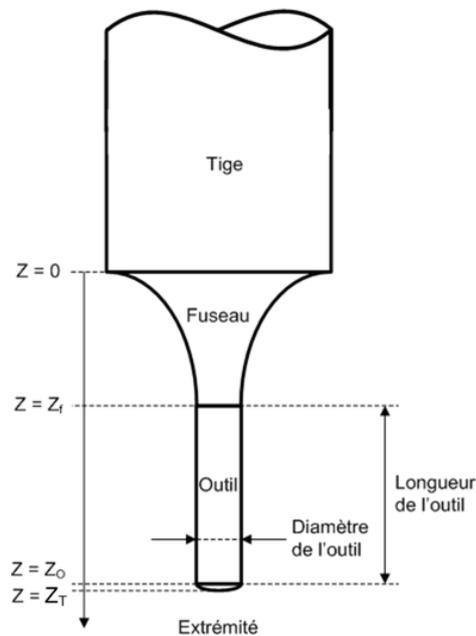
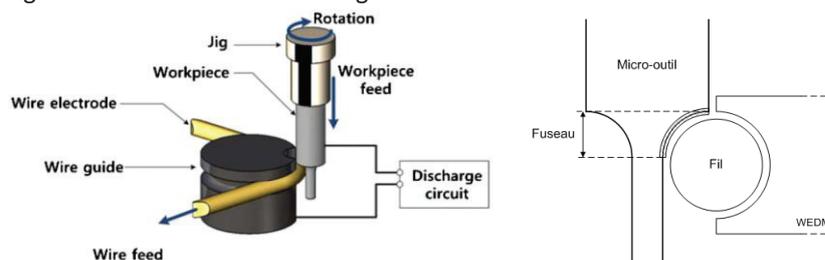


Figure 37 - Caractéristiques géométriques d'un micro-outil

Nous considérons la hauteur utile  $h$  de l'outil comme étant :  $h = Z_o - Z_f$ .

<sup>9</sup> Dans notre cas, nous utiliserons le plus souvent des barreaux de tungstène de 25 mm de hauteur et de diamètre 250  $\mu$ m dont la rigidité nous a paru suffisante.

<sup>10</sup> Par exemple, dans le cas de la fabrication par électroérosion à fil, cette partie est due à la courbure provoquée par l'usinage du fil comme le montre la figure ci-dessous.



Fabrication de micro-outil par EE à fil [42].

$D_i$  sera le diamètre de l'outil dans le plan  $z=Z_i$  avec  $Z_0 \geq Z_i \geq Z_f$

Avec notre méthode de fabrication, l'outil aura une forme simple constituée de segments de cônes. L'outil présentera un diamètre minimum  $D_{\min}$  sur l'un des segments. Nous nous intéresserons à la zone de l'outil comprise entre  $Z_0$  et  $Z_f$  dont le diamètre ne s'écartera pas de  $\pm 10\%$  de  $D_{\min}$  et nous définirons le facteur de forme de l'outil comme étant :

$$Ff = \frac{Z_0 - Z_f}{D_m}$$

Où  $D_m$  est la moyenne des diamètres  $D_i$  sur la hauteur utile  $h$ .

En fait, la notion très simplifiée de facteur de forme de l'outil  $F_f$  correspond à une réalité expérimentale. Il en est de même du caractère « arbitraire » de la définition du plan de référence  $z=Z_0$ , puisque l'opérateur de la machine aura la possibilité d'araser l'outil au-delà d'une certaine longueur et qu'il pourra aussi ne plus utiliser l'électrode lorsque, après usure, l'extrémité de celle-ci aura atteint le voisinage du fuseau.

Plus le facteur de forme sera élevé, plus il sera possible de réaliser des structures présentant des rapports géométriques importants et d'usiner des formes difficiles à réaliser par d'autres méthodes : par exemple, des trous de faible diamètre mais profonds, des trous multi-niveaux avec différents diamètres, etc.

### 2.1.3 Quel matériau utiliser ?

En EE et  $\mu$ EE, les principaux matériaux composant les micro-outils doivent présenter une bonne rigidité, une excellente conductivité électrique et une dissipation thermique importante. Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- sous forme de métaux purs : tungstène (W), graphite (C) et cuivre (Cu) [135]
- ou encore d'alliages : carbure de tungstène (WC), cuprotungstène (CuW) et tungstène d'argent (AgW)

Le tableau ci-dessous compare les caractéristiques des matériaux utilisés traditionnellement pour les micro-outils.

Matériau	Module de Young (GPa)	Conductivité thermique (W/m.K)	Conductivité électrique ( $S.m^{-1}$ )	Température de fusion ( $^{\circ}C$ )
Graphite	30	129	$61.10^3$	3652 (Evaporation)
Cuivre	124	401	$5,8.10^7$	1084
Tungstène	406	174	$8,9.10^6$	3422
CuW (25/75)	250	180 - 230	$2,22.10^7$	1084 / 3422

Tableau 12 - Caractéristiques des matériaux composant les électrode-outils [136].

Les électrodes en cuivre et en graphite sont les plus faciles et les moins chères à produire. Elles sont généralement utilisées en érosion par enfonçage, en raison de la taille importante de l'électrode pouvant dépasser plusieurs dizaines de centimètre ; un gros volume de matière étant nécessaire pour former le négatif de la pièce. L'inconvénient est que le cuivre et le graphite sont des matériaux qualifiés de « doux » : ils affichent une faible résistance à l'usure.

Le tungstène présente l'avantage d'avoir une conductivité thermique élevée, une température de fusion supérieure à  $3000^{\circ}C$  ainsi qu'un module de Young de 3 à 10 fois supérieur au graphite ou au cuivre, ce qui rend son utilisation intéressante pour des micro-outils. Le cuprotungstène serait aussi envisageable car elles allient la ductilité du cuivre (facilement usinable par d'autres procédés) avec la résistance à l'usure du tungstène, tout en étant moins chères que le tungstène pur. Toutefois, les

particules de cuivre sont insérées dans une matrice de tungstène. Il en résulte une matrice métallique composite en lieu et place d'un véritable alliage. Ce choix n'est donc pas envisageable pour des électrodes de quelques  $\mu\text{m}$  où la microstructure du matériau devient importante. En conclusion, notre choix s'est donc porté sur le tungstène qui peut être usiné par voie électrochimique. Cette méthode est présentée dans la suite de ce manuscrit.

#### 2.1.4 La dissolution du tungstène par voie électrochimique

Le domaine de stabilité du tungstène est situé entièrement en-dessous de celui de l'eau. En présence de solutions alcalines de type NaOH, il possède une légère tendance à se décomposer avec dégagement d'hydrogène et à se dissoudre sous formes d'ions tungstates  $\text{WO}_4^{2-}$  (Figure 38).

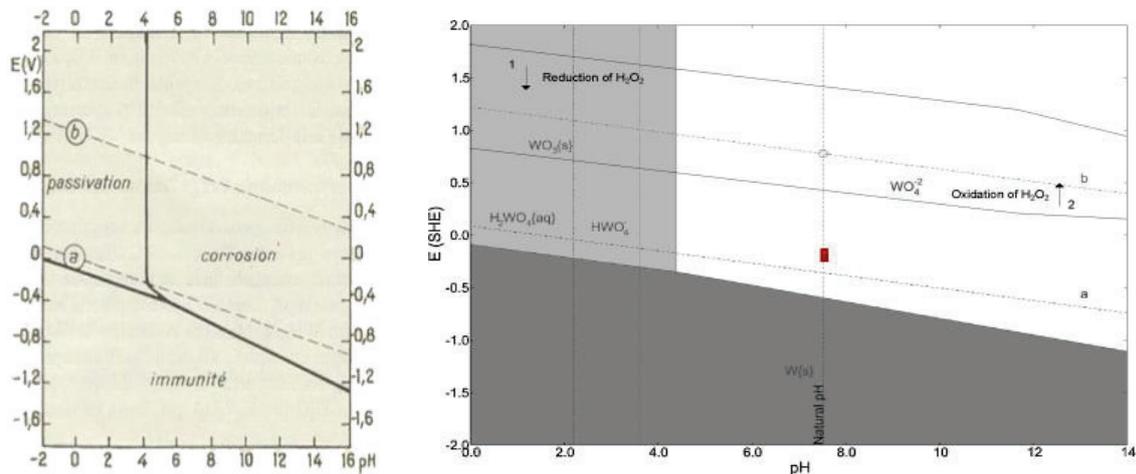
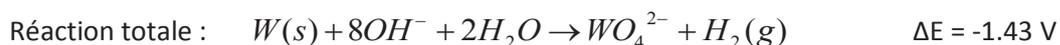
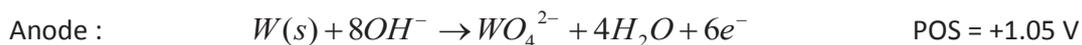
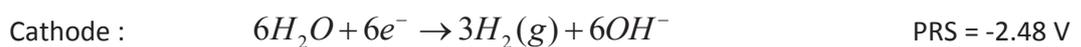


Figure 38 - Corrosion et passivation du tungstène à 25°C et diagramme de Pourbaix [137], [138]

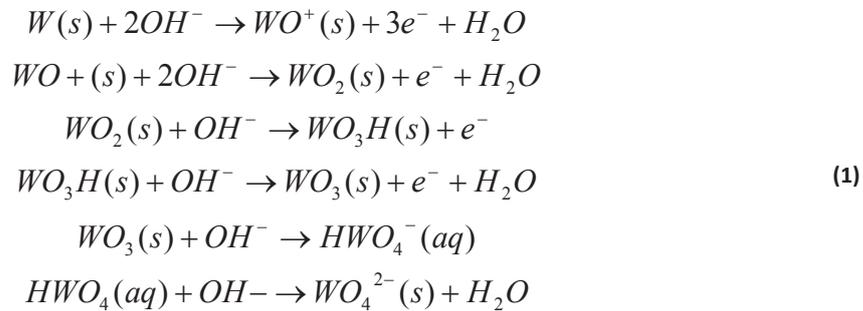
Le tungstène ne se trouve pas à l'état natif, il existe dans la nature essentiellement sous forme de tungstate. Seuls les dérivés hexavalents du tungstène (anhydride tungstique  $\text{WO}_2$  et tungstate  $\text{WO}_4^{2-}$ ) sont stables en présence d'eau à 25°C.

Par la suite nous nous intéresserons à la dissolution du tungstène en milieu alcalin. C'est un domaine étudié depuis de longues années, notamment par Armstrong [139]. Cet auteur s'est intéressé aux différents milieux alcalins où la réaction peut avoir lieu, ainsi qu'à la dissolution de l'oxyde de tungstène anodique formé à la surface du métal. Les processus de dissolution du tungstène étant complexes, nous nous contenterons d'une version simplifiée suffisante pour notre propos. La réaction globale simplifiée de dissolution du tungstène en milieu alcalin peut être décrite par :



PRS, et POS sont, respectivement, le potentiel standard de réduction et le potentiel standard d'oxydation. La tension  $\Delta E$  nécessaire pour amorcer la réduction du tungstène est de 1,43 V. Elle conduit à dissolution du tungstène en tungstates ainsi qu'à la réduction de l'eau avec dégagement gazeux de dihydrogène. Des ions  $\text{OH}^-$  sont formés à la cathode.

En réalité, la dissolution du tungstène est plus complexe car le déroulement du processus se produit par étapes successives où des atomes et ions de différentes valences se combinent en solution aqueuse suivant les équations ci-dessous d'après [140] :



On peut donc en conclure que le processus de taille électrochimique conduit à la formation d'ions tungstates  $WO_4^{2-}$  dans la solution de gravure. En réalité, des études comme celle de [141], [142] montrent que le flux d'ions tungstates est à l'origine de problèmes d'écrantage d'espèces ioniques et donc de diminution de courant de dissolution. Une inhomogénéité des espèces ioniques dans l'environnement de la pointe génère un gradient de concentrations qui est observé sous une forme de couche visqueuse, ainsi que des mouvements de convection qui provoquent une taille inhomogène du tungstène.

Dans la pratique, un fil de tungstène plongé verticalement dans un électrolyte et soumis à une gravure électrochimique s'amincit en formant deux cônes. Si l'on poursuit cet amincissement, la zone de contact finit par se rompre de sorte que le cône inférieur est perdu dans la solution, **cet effet est connu sous le nom d'effet drop-off**. Le sommet du cône présente des propriétés intéressantes en émission de champ ou encore comme sonde AFM. Comme nous allons chercher à éviter l'effet drop-off, il nous paraît utile de rassembler ci-dessous quelques éléments d'information à ce sujet.

### 2.1.5 Obtention de pointes pour l'émission électronique (effet drop-off)

La taille de pointes de tungstène pour leur utilisation en émission de champ a été décrite par de nombreux auteurs. Le lecteur intéressé pourra se reporter aux travaux de Melmed [111] pour les premières expériences de taille de pointes pour la microscopie, et de Lim et al. [143] pour leurs travaux plus récents concernant la gravure du tungstène dans des solutions de NaOH et KOH.

Le montage expérimental le plus utilisé est présenté ci-dessous (Figure 39). Une électrode de tungstène d'un diamètre de 125  $\mu\text{m}$  est plongée dans un récipient contenant une solution de soude et de glycérol. Une alimentation, associée à un relais temporisé, permet d'appliquer une différence de potentielle pulsée de quelques volts entre l'électrode de tungstène et une contre-électrode placée dans le récipient. La taille est optiquement contrôlée à tout instant avec un microscope. Cette méthode permet ainsi d'obtenir des pointes de forme conique ayant un rayon de courbure à l'apex pouvant atteindre quelque dizaine de nanomètres (Figure 39).

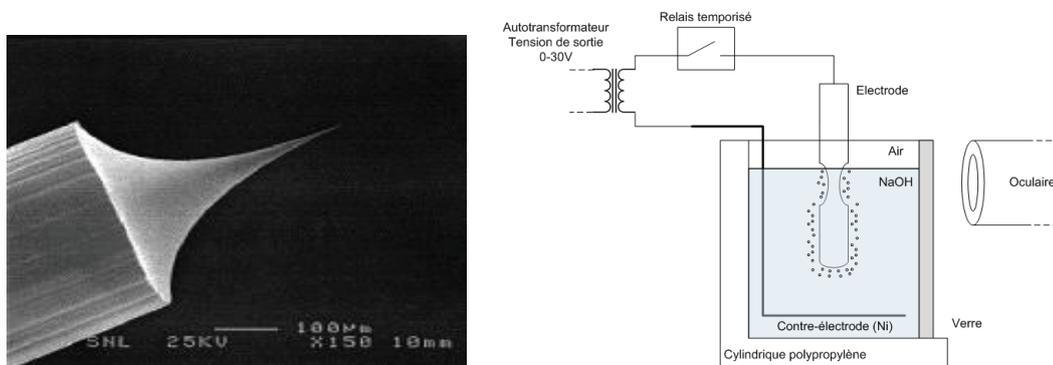


Figure 39 - Expérience d'obtention de pointes pour l'émission électronique par effet de champ.

Cette taille électrochimique s'accompagne donc de l'effet drop-off, qui conduit à la formation de pointes coniques de faible longueur, présentant un degré de cylindricité médiocre. Cet effet, schématisé en Figure 40, reste encore mal expliqué.

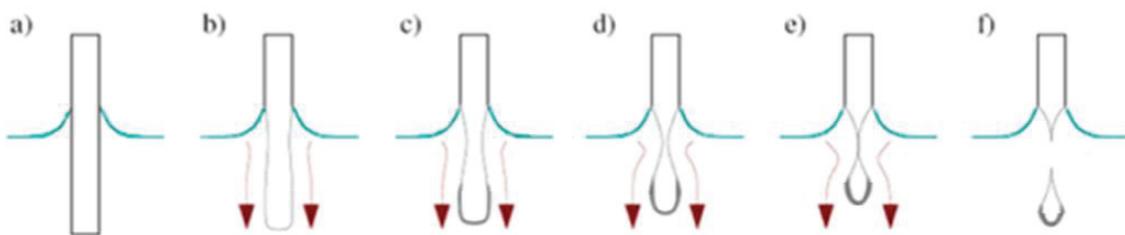


Figure 40 - Schématisation de l'effet drop-off.

- a) *En raison des tensions de surface, un ménisque se forme à la périphérie du barreau de tungstène.*
- b) à e) *La dissolution du tungstène entraîne un flux d'ions  $\text{WO}_2^-$  et forme une couche dense entourant la partie basse du barreau. Dans la partie du ménisque la réaction est exacerbée, le diamètre devient donc extrêmement fin.*
- f) *la partie basse du barreau rompt avec la partie supérieure, le drop-off a eu lieu*

L'un des principaux problèmes, constatés par Choi [132], est la dissolution inhomogène du tungstène sous forme d'ions tungstates dans l'environnement de la pointe. On peut noter que les ions tungstates, plus lourds que l'eau, ont tendance à migrer au fond de la solution au cours de la gravure. Dans le cas de la dissolution à tension alternative, une explication de cet effet [142] viendrait du fait que les forces de capillarité conduisent à la formation d'un ménisque liquide à l'interface entre la surface de la solution de gravure et l'électrode, de sorte que, les flux de convection au voisinage du fil modifient le rendement de la réaction de gravure. Il a été prouvé que la forme du ménisque joue un rôle très important dans la détermination de la forme finale de la pointe [144], la vitesse de gravure au sommet du ménisque étant beaucoup plus lente qu'à la base.

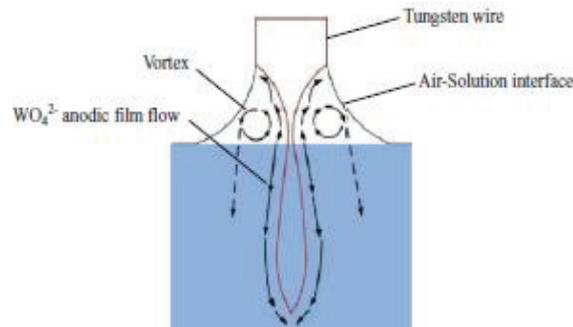


Figure 41 - Flux et convection durant l'affûtage électrochimique d'après [142].

Le différentiel de vitesse de gravure peut aussi s'expliquer par la présence d'un gradient de concentration dû à la diffusion des ions  $\text{OH}^-$  et du dégagement gazeux de dihydrogène remontant le long du fil, ce qui perturberait la concentration en espèces au niveau du ménisque. Ces tungstates génèrent une épaisse couche visqueuse qui empêche la partie basse de l'électrode d'être gravée. Ainsi, un phénomène de striction est observé dans le ménisque, où la vitesse de gravure est accrue. Cette partie du fil devient si mince que sa résistance à la traction ne peut pas supporter le poids de l'extrémité inférieure du fil; la séparation a lieu laissant apparaître une pointe effilée au niveau de la surface.

La Figure 42 ci-dessus montre une électrode taillée dans un bain électrochimique classique que nous avons obtenu. Nous remarquons que l'enlèvement de matière n'a pas été homogène. L'apparition d'un creusement au niveau du ménisque (flèche de gauche), comme expliqué précédemment, est bien visible. Quant à la dissolution accélérée de l'extrémité de l'électrode (flèche de droite), elle s'explique par une densité de courant exacerbée par effet de pointe [85].

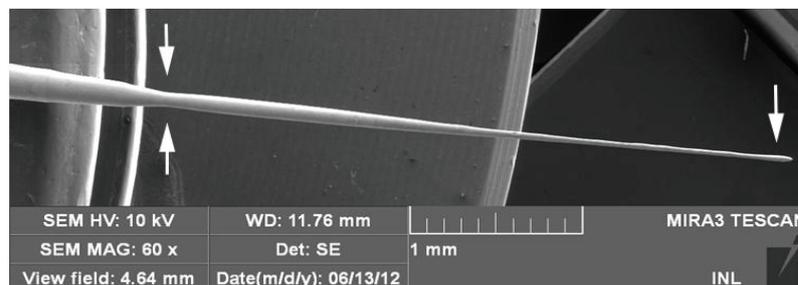


Figure 42 - Pointe affûtée par électrochimie.

(Courant continu de 80 mA dans une solution de NaOH de concentration  $C=4 \text{ mol/l}$ )

Ces dissymétries dans la gravure montrent que l'effet drop-off sera un obstacle majeur pour l'obtention d'électrodes cylindriques. Il a donc été nécessaire de mettre au point un nouveau protocole de gravure afin d'atteindre nos objectifs.

### 2.1.6 Obtention de pointes cylindriques pour la $\mu$ EE

Comme nous venons de le voir, l'effet drop-off est grandement influencé par la présence du ménisque et les ions tungstates qui rendent la taille inhomogène. La diminution incontrôlée de la longueur de l'outil de l'extrémité de la pointe est aussi contraignante lors de la taille progressive.

Dans un premier temps nous avons choisi d'atténuer l'effet d'écran dû aux tungstates. Notre stratégie a été basée sur l'application d'un signal électrique original. L'application d'un tel signal a trois objectifs :

- **Dissoudre la matière de manière homogène durant des périodes  $T_{ON}$ .**
- **Renouveler activement la solution durant des périodes  $T_{OFF}$ .**
- Le troisième point concerne **l'isolation de l'extrémité de l'électrode afin d'éviter un effet de pointe et de garder un contrôle sur la longueur de l'outil.**

Pour les deux premiers points, cette stratégie conduit à appliquer le signal de courant ou de tension de ce type :

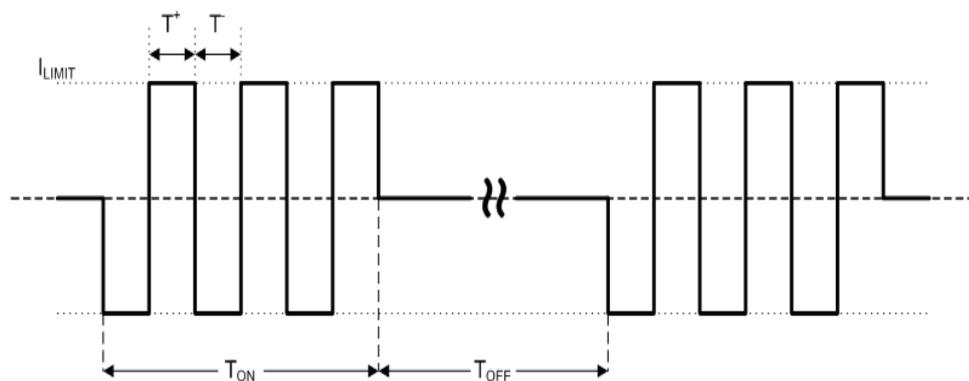


Figure 43 - Forme d'onde en signal alternatif pulsé utilisé pour la gravure.

Il s'agit d'un signal électrique alternant des créneaux en courant de durée  $T_{ON}$  avec des temps de repos de durée  $T_{OFF}$ . Les créneaux  $T_{ON}$  sont eux-mêmes subdivisés en créneaux  $T^+$  et  $T^-$  d'alternance opposée.

Durant  $T_{ON}$  et lors des créneaux  $T^+$ , le fil de tungstène est l'anode portée au potentiel haut, ce qui permet d'amorcer la dissolution du tungstène ; cette phase s'accompagnant d'un dégagement gazeux d' $H_2$  sur la contre-électrode d'après (1).

Durant  $T_{ON}$  et lors des créneaux  $T^-$ , la contre-électrode est l'anode au potentiel bas, ce qui permet d'amorcer une hydrolyse de l'eau : des bulles de dihydrogène sont émises à la périphérie du barreau de tungstène, ce qui conduit à un brassage localisé des espèces ioniques.

La durée  $T_{OFF}$ , qui correspond à l'application d'un courant nul, est une période de repos permettant de renouveler l'environnement de l'électrode par un brassage de la solution par pompage.

En jouant sur l'ensemble des valeurs  $T_{ON}$  et  $T_{OFF}$ ,  $T^+$  et  $T^-$ , nous avons tenté d'assurer une dissolution homogène en dispersant la couche visqueuse d'ions tungstates et en renouvelant les espèces au voisinage autour du fil.

Pour contrôler la longueur des micro-outils, nous avons fabriqué une cellule électrochimique en plaçant au fond de la cuve une huile isolante plus lourde que la solution de gravure. L'électrode est plongée verticalement dans la cellule de façon à conserver son extrémité immergée dans l'huile isolante. On applique le signal électrique de façon à provoquer une dissolution du tungstène dans cette étape que nous qualifions d'affûtage. Une fois cette phase écoulée, suivant les paramètres appliqués, nous obtenons une électrode en forme d'haltère présentant un diamètre plus fin dans sa partie centrale. Ensuite, la partie basse de l'haltère est coupée par dissolution électrochimique en plaçant l'extrémité de l'outil près de la surface libre de l'électrolyte.

La Figure 44 ci-dessous résume les différentes étapes du procédé.

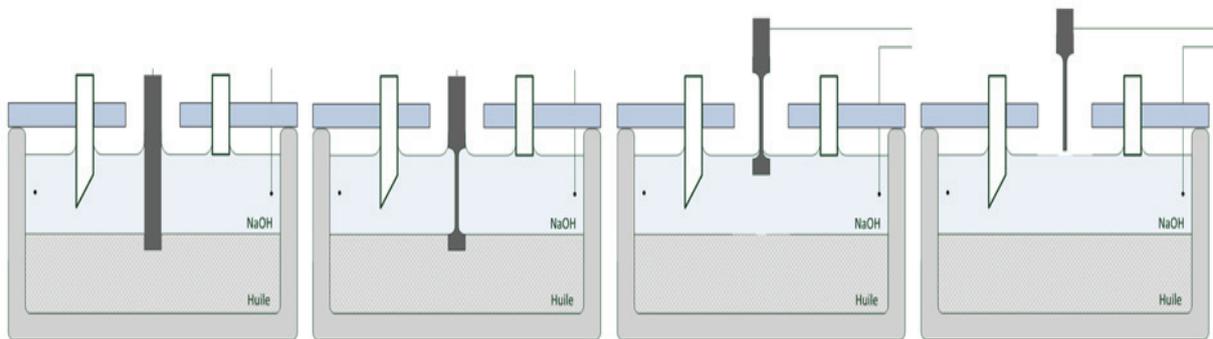


Figure 44 - Séquence d'affûtage pour l'obtention d'un micro-outil.

Dans la section suivante, nous allons décrire en détails le protocole et le montage utilisés. Nous verrons ensuite l'influence des différents paramètres sur les affûtages. Techniquement, il serait possible d'instrumenter le réacteur pour étudier le renouvellement des espèces, la variation de densité, etc. mais cela n'a pas pu être mis en œuvre par manque de temps. Il est donc important de rester prudent dans l'interprétation de nos résultats que nous verrons en section 2.3.

## 2.2 Fabrication des micro-outils par gravure électrochimique

### 2.2.1 Description du dispositif expérimental

Les différentes composantes du montage sont représentées schématiquement à la Figure 45.

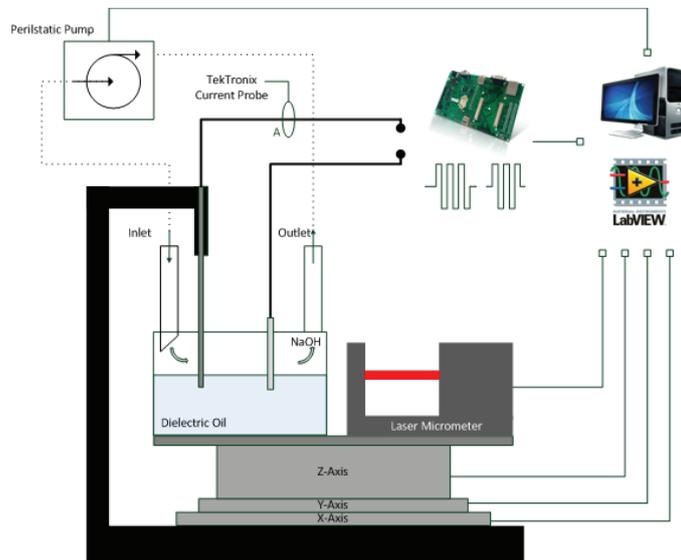


Figure 45 - Vue générale du procédé de gravure électrochimique du micro-outil

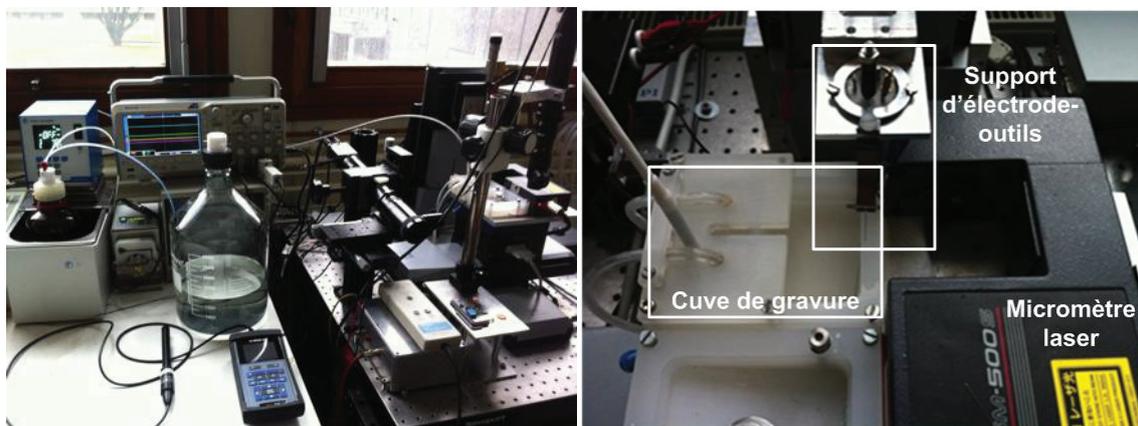


Figure 46 - Machine d'électroérosion avec poste d'affûtage électrochimique intégré.

Celui-ci repose sur une table optique anti vibrations Newport et comprend (Figure 46) :

- deux axes linéaires croisés XY (Physik Instrument M-511.HD) portant une platine de translation verticale Z (Physik Instrument M-501.1DG) de course 12 mm
- une potence verticale portant avec un actionneur piézoélectrique auquel est fixé un porte-électrode.

Les axes XYZ portent une cellule électrochimique réalisée en polypropylène, polymère thermoplastique, qui a la capacité de résister à l'attaque de l'hydroxyde de sodium à forte concentration. Pour assurer la sécurité du dispositif, un bassin de rétention constitué de la même matière entoure la cellule électrochimique, ainsi qu'un couvercle de protection servant aussi de support aux arrivées fluidiques.

La cellule électrochimique est dotée de deux électrodes :

- le micro-outil, en général un barreau de tungstène de diamètre initial 250  $\mu\text{m}$  et de quelques mm de longueur, inséré dans un porte-électrode,
- un contre-électrode en platine/iridium en forme d'anneau.

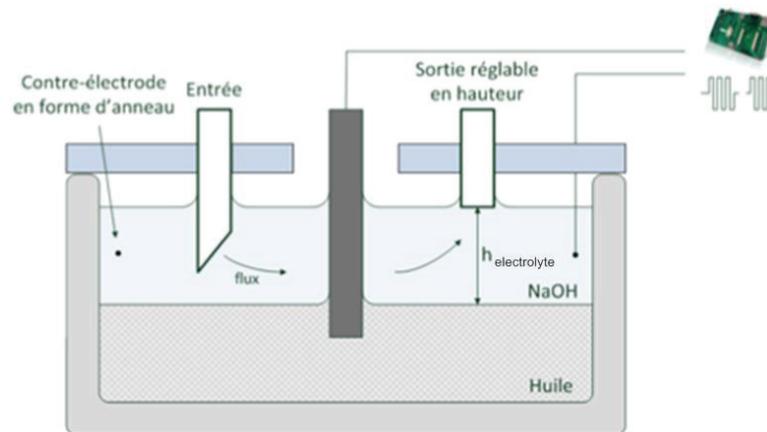


Figure 47 - Vue en coupe de la cellule électrochimique

La cellule électrochimique de dimensions 4 x 2 x 2 cm, comprend deux liquides non-miscibles (Figure 47). La phase supérieure est une solution d'hydroxyde de sodium de concentration 4 mol/L (densité 1,4 g / cm<sup>3</sup>) qui permet de procéder à la gravure électrochimique du tungstène. La phase inférieure est une huile de type perfluorée (Galden HT200 de densité 1,79 g / cm<sup>3</sup> à 25°C) inerte chimiquement et électriquement. Ce liquide permet d'isoler l'extrémité inférieure de la pointe et d'éviter son raccourcissement lors de l'attaque électrochimique. Il est à noter que la connexion électrique est effectuée sur la partie supérieure du fil de tungstène, des essais préliminaires ayant montré qu'une alimentation des deux côtés du fil ne présentait que peu d'intérêt.

La cellule électrochimique est reliée à un réservoir contenant 1 L d'électrolyte via une pompe péristaltique (Ismatec, Reglo Digital). Celle-ci assure une circulation continue avec un débit de 15 ml/min. On considère que le renouvellement de l'électrolyte de la cellule est effectif en 3 minutes. La pompe amène le flux d'électrolyte par l'entrée fluidique et l'évacue par la sortie dans un bidon de stockage. Par ce jeu de positionnement des E/S fluidiques, le renouvellement s'effectue au niveau de l'électrolyte et évite l'aspiration de l'huile isolante.

Afin d'obtenir un réglage sur la hauteur d'immersion du barreau dans l'électrolyte, l'aspiration peut être réglée verticalement à travers la protection ; cette hauteur est notée  $h_{\text{electrolyte}}$  sur la Figure 47. Elle permet d'augmenter ou de diminuer le volume d'électrolyte présent dans la cellule et surtout d'agir sur la hauteur immergée de la partie centrale de l'haltère.

### 2.2.2 Électronique de gravure

Le dispositif expérimental développé au laboratoire permet un contrôle **soit de la d.d.p soit du courant** entre les deux électrodes. En effet, deux versions de l'électronique ont été développées. La première fournissait des créneaux de tension sans contrôle de courant. Etant donné que la quantité d'électricité contrôle la quantité de matière enlevée, il a donc été jugé préférable d'adapter le circuit électronique pour délivrer des créneaux de courant d'amplitude contrôlée. Bien évidemment dans la 2<sup>nd</sup> version, il est n'est pas possible de fixer indépendamment la tension et le courant : lorsqu'un paramètre est choisi par l'opérateur, l'autre est fixé par l'impédance électrochimique de la cellule.

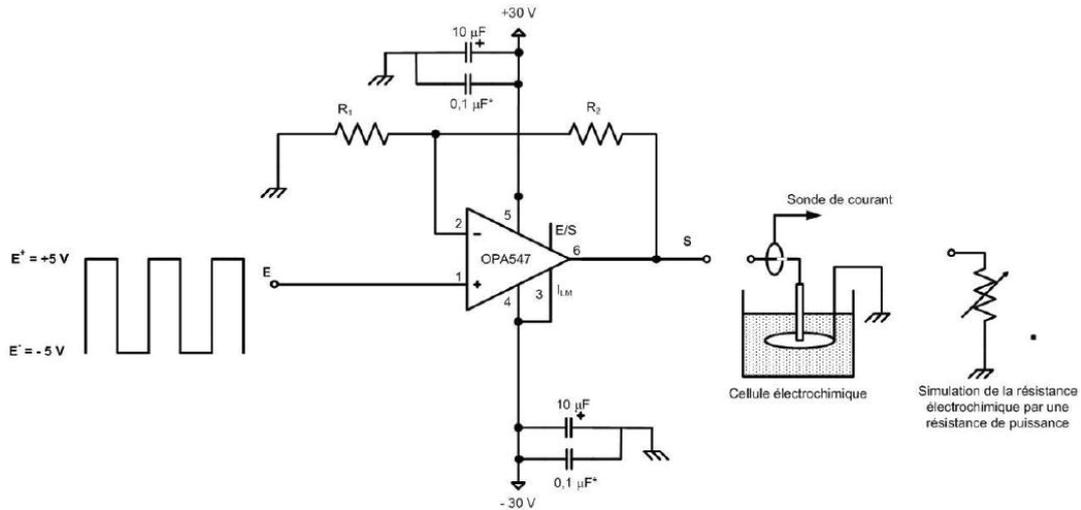


Figure 48 - Organigramme de l'électronique de gravure

Le cœur du dispositif est constitué par un amplificateur opérationnel OPA547 (Figure 48). **En mode tension**, le profil temporel du signal est généré par un premier CNA relié à LabView avec une amplitude entre -5 V et +5 V. Ce signal est transmis à l'entrée de l'OPA547 pour être ensuite amplifié avec un gain de 6 et appliqué entre les électrodes. L'amplitude maximale en tension est comprise entre -30 V et +30 V. Le courant est alors fixé par l'impédance électrochimique mais l'OPA547 est capable de fournir un courant maximum de 750 mA de sorte que le dispositif fonctionne toujours correctement.

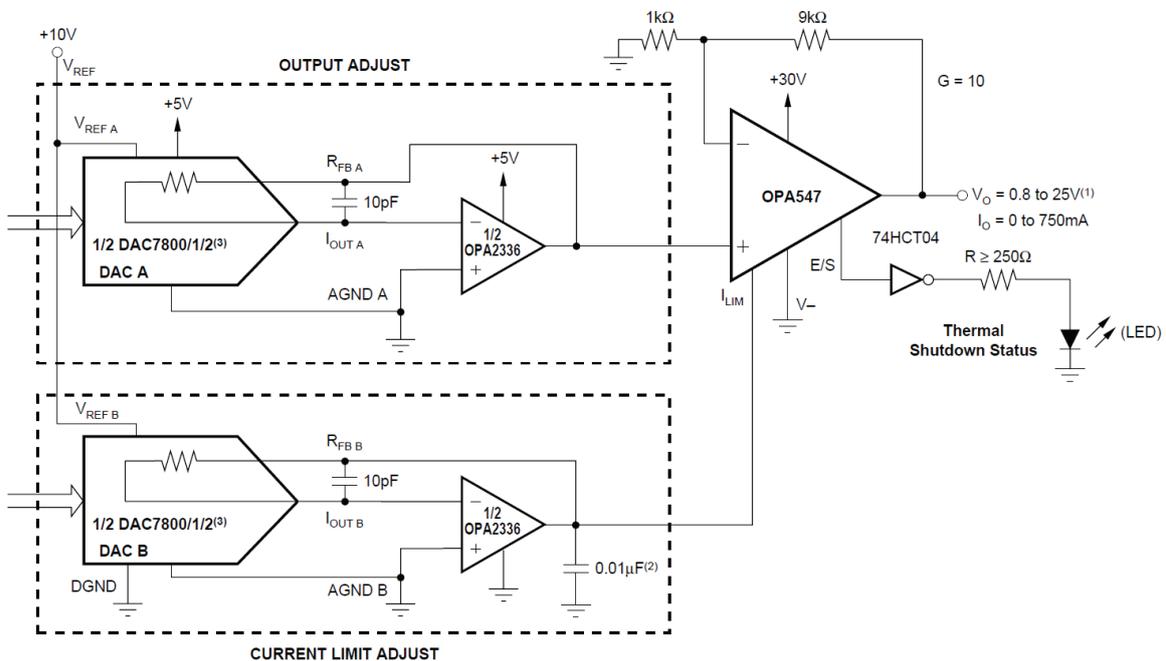


Figure 49 - Organigramme de l'électronique de gravure avec limitation du courant.

L'amplitude et l'enveloppe temporelle des créneaux peuvent être modulées via l'interface LabView. La valeur de la tension à appliquer est codée en binaire puis elle est transmise, par l'intermédiaire de la carte NI USB-6229, à un premier CNA de façon à générer une séquence d'impulsions entre -5 V et +5 V à l'entrée de l'OPA547. Le deuxième CNA permet de réguler le courant de sortie l'OPA547 via son entrée 6. La valeur du courant est aussi codée en binaire via LabView.

**En mode courant**, on utilise une entrée particulière de l'OPA547 qui permet de limiter le courant de sortie (Figure 49). Dans la pratique, l'opérateur choisit la valeur du courant via LabView et un deuxième CNA relié à cette entrée de l'OPA547. Pour que le dispositif électronique fonctionne correctement, l'opérateur doit donc demander aussi au dispositif de générer une d.d.p. supérieure à la d.d.p. fixée par l'impédance électrochimique. Lorsque les créneaux de tension sont appliqués à l'OPA547, celui se met alors directement en mode source de courant, ce qui permet de générer des créneaux de courant d'amplitude limitées et constante.

## 2.3 Résultats expérimentaux

Dans cette section, nous allons présenter les résultats expérimentaux obtenus. Le Tableau 13 répertorie les paramètres que nous pouvons gérer dans le dispositif expérimental.

<i>Paramètres</i>	<i>Maitrise</i>	<i>Plage d'utilisation</i>	<i>Précision</i>
Tension (U)	✓	0 - 15 V	100 mV
Courant (I)	✓	0 - 750 mA	5 mA
Durée (s)	✓	min 10 ms	2 ms
Débit / Renouvellement	✓	0,001 - 68 ml/min	0,001 ml
Hauteur d'immersion	✓	0 - 10 mm	100 µm

Tableau 13 - Paramètres électroniques et fluidiques du dispositif expérimental.

Nous étudierons ci-dessous l'influence des paramètres  $T_+/T_-$  et  $T_{ON}/T_{OFF}$  sur le profil des micro-outils. Enfin, des tests de reproductibilité seront menés afin de juger de l'intérêt du processus.

### 2.3.1 Moyens de caractérisation

Nous possédons des moyens de caractérisations permettant une caractérisation in situ des micro-outils sur la machine :

- un micromètre laser<sup>11</sup> Mitutoyo LSM-500S (Plage de mesure : 5 µm/2 mm, précision : 10 nm).
- un zoom de marque Navitar x6000 avec un objectif à grande distance de travail ayant une résolution optique de 0,8 µm.

Les micro-outils sont aussi caractérisés avec:

- un microscope optique Olympus BX51M.
- un microscope électronique à balayage de marque FEG Tescan Mira 3.

Pour mesurer le courant de gravure réellement délivré dans la cellule électrochimique, nous avons placé une résistance de 0,1 Ω à l'extérieur du dispositif expérimental entre la contre-électrode et la masse de manière à ce que la tension à ces bornes soit traitée par une carte d'acquisition NI USB-6229 et interfacé avec le logiciel LabView. Enfin, une sonde de courant Tektronix TCPA-300 reliée à un oscilloscope permet de visualiser directement le courant de gravure.

<sup>11</sup> Principe du micromètre : Un faisceau laser est émis par une diode laser ; ce faisceau est dirigé sur les facettes d'un miroir polygonal qui tourne à grande vitesse et qui est synchronisé par une horloge générant des impulsions. Le faisceau laser réfléchi, balaie de haut en bas une lentille de collimation. S'il ne rencontre pas d'obstacle, le faisceau est focalisé par un condenseur sur le récepteur. La tension de sortie du récepteur est proportionnelle à la quantité de lumière reçue par ce récepteur. La largeur du spot laser spécifiée est de 80 µm. Lors de la mesure du diamètre de l'outil, on obtient une moyenne arithmétique des diamètres mesurés sur une période de 0.32ms. La calibration n'est effectuée que sur le fil initial de tungstène de 250 µm, l'incertitude de mesure est donc importante pour les très faibles diamètres d'outils (< 5µm).

## 2.3.2 Observations pré-expérimentales

### 2.3.2.1 Propriétés géométriques

Le diamètre initial du fil doit être choisi pour faciliter la préhension du fil et permettre une bonne tenue mécanique de l'outil. Nous avons opté pour un fil rectiligne de tungstène pur à 99.9% de diamètre 250  $\mu\text{m}$  (GoodFellow, W005325) avec une tolérance annoncée sur le diamètre du fil de  $\pm 10\%$ . En effet, il est important de pouvoir enlever beaucoup de matière lors des étapes de dégrossissage des pièces en électroérosion. Ce n'est que lors des étapes d'usinage fin et de finition, que les électrodes de faible diamètre doivent être envisagées. Il est donc utile de partir d'un fil de diamètre important et de l'affiner au fur et à mesure des besoins.

Une analyse par micromètre laser sur le diamètre original de 6 échantillons a montré que la tige de tungstène présente un diamètre moyen de 249.48  $\mu\text{m}$  avec un écart-type de 1.34  $\mu\text{m}$  sur une longueur de 7 mm.

Il existe des fils de tungstène extrudés de diamètres plus fins (jusqu'à 50  $\mu\text{m}$ ). Ceux-ci sont malheureusement conditionnés sous forme de bobine et présentent une courbure qui est rédhibitoire lors de leur utilisation, nous ne les avons donc pas utilisé.

### 2.3.2.2 État de surface

Le fil de tungstène a été observé au microscope électronique avant utilisation (cf. Figure 50) :

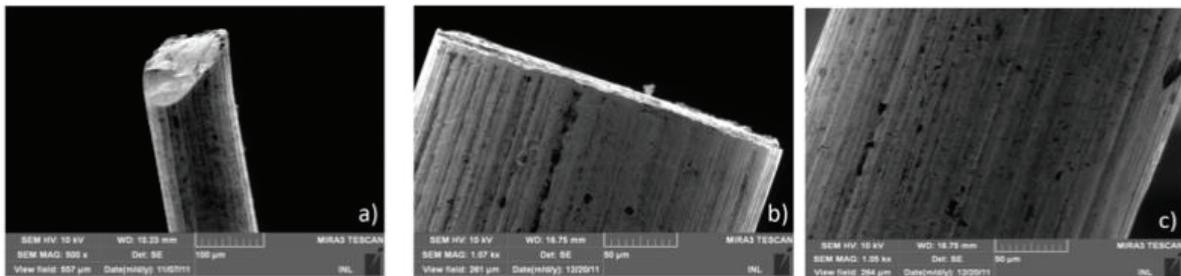


Figure 50 - Vues MEB du fil de tungstène original.

Puis après une étape de gravure électrochimique (Figure 51).

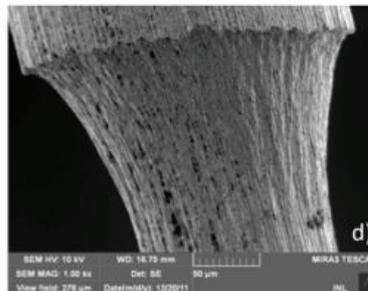


Figure 51 - Vues MEB du fil de tungstène après un affûtage.

On constate sur la Figure 50 que le fil original est strié longitudinalement. Il a été probablement marqué par la filière qui a servi à son extrusion. Ces défauts de l'ordre de 200 nm à 1  $\mu\text{m}$  n'auront des conséquences que lors de l'usinage par EE avec des outils très fins. Néanmoins, une pré-étape de polissage électrolytique pourrait permettre d'améliorer l'état de surface initial (Voir Annexe 6.2). Nous allons maintenant nous attarder sur la loi de Faraday qui gouverne la dissolution des micro-outils.

### 2.3.2.3 Loi de Faraday

La loi de Faraday permet d'exprimer la relation entre la quantité de matière enlevée durant une dissolution électrochimique et la quantité de courant parcourant la cellule de la manière suivante :

$$m = \left( \frac{Q}{F} \right) \left( \frac{M}{z} \right) \quad (2)$$

m : quantité de matière enlevée.

Q : quantité de courant appliquée

F : constante de Faraday : 96 485 C/mol.

M : masse molaire du matériau (tungstène : 0,18384 kg/mol).

z : valence de l'ion considéré dans le processus de dissolution (z = 6 dans le cas de la dissolution électrochimique du tungstène)

L'enlèvement de matière est donc proportionnel à la quantité de courant appliquée à la cellule. Celle-ci est donnée par :  $Q = I \cdot t_{eff}$  où I est le courant traversant la cellule et  $t_{eff}$ , le temps de gravure effectif. Ce temps effectif de gravure correspond au temps de gravure réel du tungstène pendant les périodes T+ de la gravure.

$$t_{eff} = \frac{T^+}{T^+ + T^-} \times \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \times \text{durée}_{gravure}$$

Considérons dans un premier temps, la partie du barreau qui est immergée dans l'électrolyte d'une longueur L comme indiqué en Figure 52 :

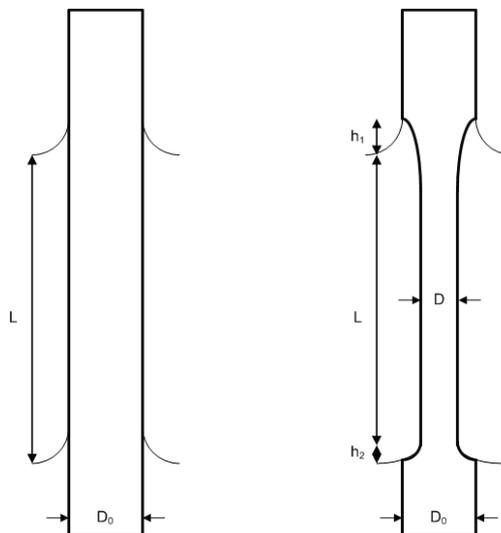


Figure 52 - Géométrie du barreau de tungstène et des ménisques.

Le volume de matière initial immergé du barreau de diamètre  $D_0$  est donc :

$$V_0 = \frac{\pi}{4} D_0^2 L \quad (3)$$

Après dissolution, l'outil a pris une forme d'haltère de diamètre moyen D. En négligeant pour l'instant le rôle des ménisques, la diminution de volume est donc :

$$\Delta V = V_0 - V = \frac{\pi L}{4} (D_0^2 - D^2) = \frac{m}{\rho} \quad (4)$$

$\rho$  : masse volumique du tungstène : 19300 kg/m<sup>3</sup>.

D'après ce qui précède, le volume de matière dissous peut être exprimé de la manière suivante :

$$\Delta V = V_{dissous} = \frac{M}{\rho \cdot F \cdot z} \cdot Q = \alpha \cdot Q$$

$$\text{avec } Q = I \cdot t_{eff} \quad (5)$$

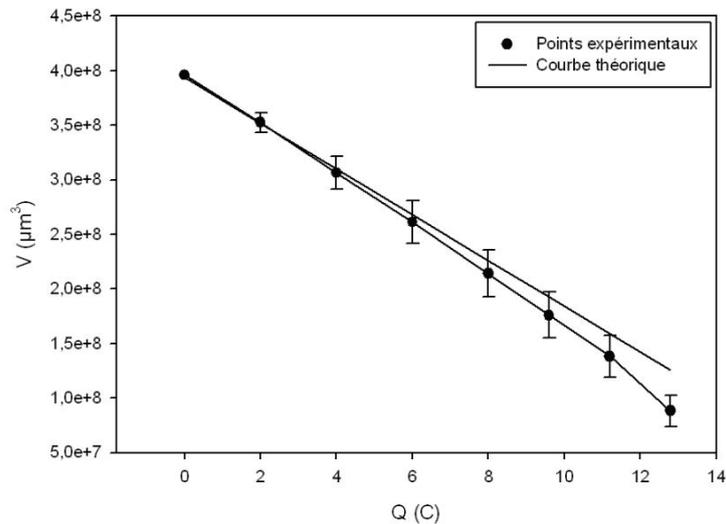
La variation du diamètre moyen de la partie immergée de l'électrode est obtenue d'après (4):

$$D^2 = D_0^2 - \alpha \cdot t_{eff} \quad \text{avec } \alpha = \frac{4 \cdot M \cdot I}{\pi \cdot L \cdot \rho \cdot z \cdot F} \quad (6)$$

Le diamètre moyen au carré D<sup>2</sup> du micro-outil est donné par :

$$D^2 = D_0^2 - \frac{4 \cdot M \cdot Q}{\pi \cdot L \cdot \rho \cdot z \cdot F} = D_0^2 - \frac{4 \cdot M \cdot I \cdot t_{eff}}{\pi \cdot L \cdot \rho \cdot z \cdot F} \quad (7)$$

Nous avons vérifié expérimentalement cette loi de Faraday en représentant l'évolution du volume de matière dissoute d'un barreau immergé sur une longueur mesurée de 6,2 mm et soumis à un courant de 80 mA ; le volume de matière étant mesuré régulièrement au micromètre laser en cours de la gravure. La courbe ci-dessous représente le volume de matière restante lorsque l'on applique une charge d'électricité Q.



**Figure 53 - Evolution de la quantité de matière dissoute du barreau de tungstène.**  
Soumis à un courant de gravure limité à 80 mA.

La Figure 53 montre que le volume de matière enlevé V (µm<sup>3</sup>) est proportionnel à la quantité Q de courant traversant le barreau de tungstène du début de processus jusqu'à 4 C. Ensuite, la courbe expérimentale s'éloigne de la courbe théorique.

L'hypothèse qui peut être formulée pour expliquer cet écart est une mauvaise appréciation du volume réellement immergé dans l'électrolyte. Nous n'avons pas tenu compte du volume entourant les ménisques. En comptabilisant les hauteurs ( $h_1$  et  $h_2$ ) des deux ménisques, la géométrie devient celle indiquée sur le troisième barreau ci-dessous :

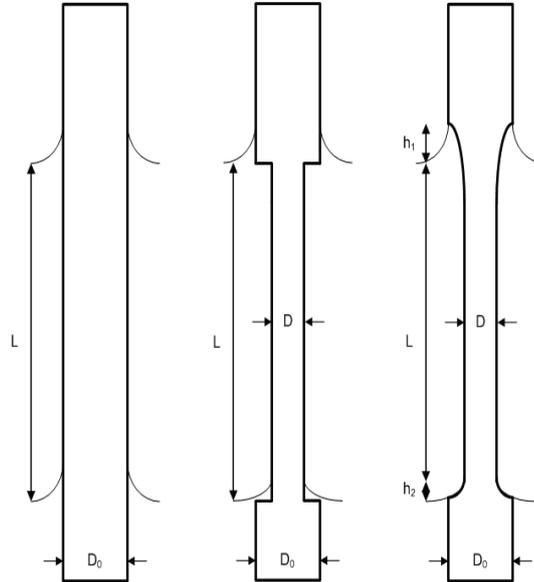


Figure 54 - Mesures des volumes immergés par les ménisques.

D'après [41] et la Figure 54, le volume immergé par les ménisques est donné par :

$$V_{mh} = \frac{4}{15} \pi h_1 \left( -2 \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 + 3 \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 \right) \text{ pour le ménisque haut}$$

$$V_{mb} = \frac{4}{15} \pi h_2 \left( -2 \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 + 3 \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 \right) \text{ pour le ménisque bas.}$$

Le volume de matière dissoute au niveau des ménisques est donc :  $V_m = V_{mh} - V_{mb}$

$$\text{Ainsi : } V_m = V_{mh} - V_{mb} = \frac{4}{15} \pi \left( -2 \left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 + 3 \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 \right) \cdot (h_1 - h_2)$$

Nous avons analysé la hauteur des ménisques à l'aide du micromètre laser. Le ménisque du haut présente une hauteur de  $h_1 = 3$  mm en moyenne alors que le ménisque du bas affiche une hauteur moindre de  $h_2 = 1,5$  mm en moyenne. La correction apportée se traduit par un abaissement de la courbe théorique :

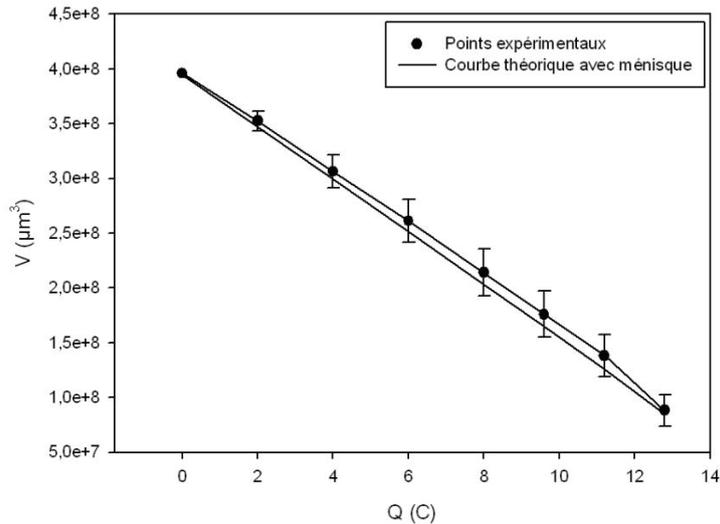


Figure 55 - Évolution de la quantité de matière dissoute avec le volume immergé des ménisques.

La correction apportée permet d'obtenir une meilleure adéquation entre courbe théorique et courbe expérimentale : l'enlèvement de matière suit la loi de Faraday à 8% près pour l'écart le plus important. Pour prédire le temps de gravure nécessaire permettant d'obtenir un outil de rayon déterminé, il est donc préférable de tenir compte des ménisques.

### 2.3.3 Analyses de l'influence des différents paramètres de gravure

Nous allons dans la suite de ce manuscrit étudier l'influence des différents paramètres afin d'évaluer leur influence dans le processus de gravure.

#### 2.3.4 Influence du paramètre $T_{OFF}$

Nous rappelons que  $T_{OFF}$  est le temps pendant lequel le potentiel appliqué à l'électrode est nul. Nous avons procédé à une série de gravures en faisant croître  $T_{OFF}$  de 0 à 1 s. Les autres paramètres sont  $T_{ON} = 0,3s$ ,  $I_{limit} = 80 \text{ mA}$  et  $(T+/T-)= 30/20 \text{ ms}$ .

La charge délivrée étant proportionnelle au temps de gravure (cf. équation (5)), il est naturel d'analyser les résultats obtenus en fonction du temps effectif de gravure.

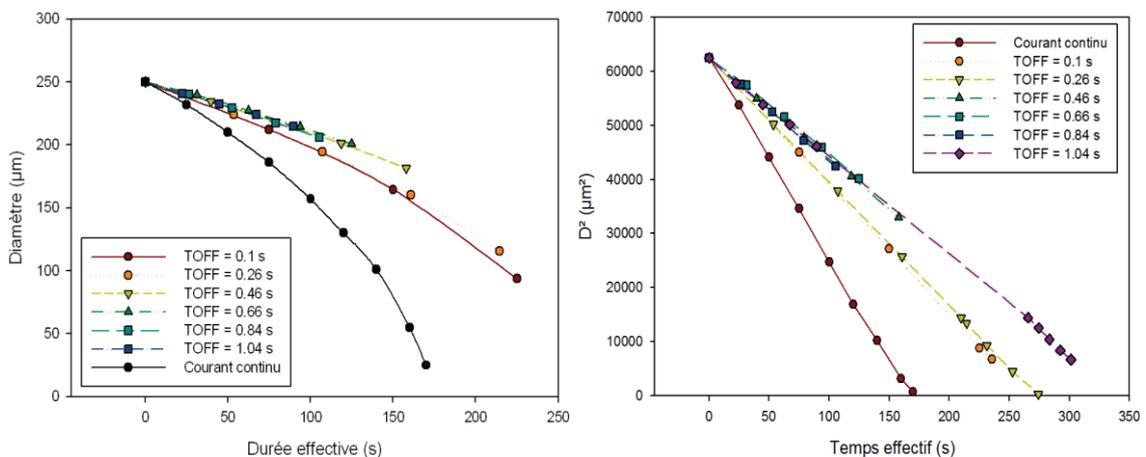


Figure 56 - Évolution du diamètre de l'outil en fonction de la durée d'affûtage. A gauche, courbes non-linéarisées et à droite, courbes linéarisées.

La Figure 56 montre l'évolution du diamètre minimum des micro-outils en fonction de la durée effective d'application du signal électrique pour différentes valeurs de  $T_{OFF}$ , autrement dit, le temps réel durant lequel la dissolution du tungstène a lieu. Ces courbes sont confirmées par les travaux de Lim [42].

Tout d'abord, nous remarquons qu'à courant continu, c'est-à-dire, sans  $T+$ ,  $T-$ , ni  $T_{OFF}$ , l'évolution du diamètre suit bien une loi en  $D^2(t)$  comme nous l'avons observé précédemment, mais le profil de l'électrode est déformé comme en Figure 42. A courant continu, une durée effective de 170 s suffit à dissoudre entièrement l'électrode, mais le contrôle en fin de gravure devient difficile car la réaction s'accélère, le volume de matière étant de plus en plus réduit.

En appliquant, une durée  $T_{OFF}$  plus importante (0,1 et 0,26 s), on ralentit progressivement le taux de dissolution.  $T_{OFF}$  permettant de renouveler les espèces chimiques autour de l'électrode à l'échelle macroscopique, on conçoit donc qu'une valeur minimale soit nécessaire. Lorsque  $T_{OFF}$  est supérieur à 0,5 s, nous ne constatons pas d'évolution majeure dans le taux de dissolution, les courbes se superposent. Cela tend à montrer qu'avec les paramètres de gravures choisis, le paramètre  $T_{OFF}$  n'a aucune influence pour des valeurs supérieures à 0,5 s et ce pour un courant de gravure de 80 mA. Pour aller plus loin il faudrait vérifier si la valeur de  $T_{OFF}$  dépend du renouvellement du fluide fixé par le débit de la pompe. Néanmoins dans la suite de ce travail, nous nous contenterons de prendre  $T_{OFF}$  égal à 0,5 s.

### 2.3.5 Influence des paramètres $T+/T-$

Une étude préliminaire effectuée avec le prototype de circuit contrôlé en tension (Section 2.2.2) a montré que l'application de créneaux de tensions positives successifs  $T+$  conduit à une diminution progressive du courant participant à la gravure (Figure 57). Nous en avons déduit que la chute de courant est provoquée par l'accumulation de tungstates, ceux-ci forment une couche visqueuse ralentissant l'échange d'espèces dans l'environnement de la pointe. Cela justifie l'application d'un créneau de tension négatif pour provoquer une électrolyse de l'eau et ainsi renouveler la solution.



Figure 57 - Diminution de l'intensité des créneaux positifs en l'absence de créneaux négatifs.

Le paramètre  $T+$  est donc la variable fondamentale dans la gestion de l'enlèvement de matière, alors que le paramètre  $T-$  est la variable permettant un brassage de l'électrolyte à la périphérie de l'électrode.

Par la suite, nous avons analysé l'évolution du diamètre au carré et observé l'influence du couple  $T+/T-$  lors de l'application d'une durée  $T+$  croissante.

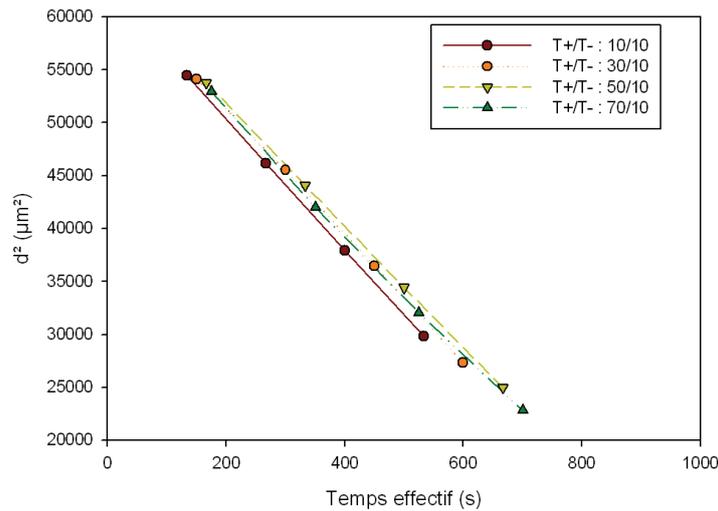


Figure 58 - Évolution du carré du diamètre minimum en fonction de la durée effective d'affûtage.

Sur la Figure 58, les quatre courbes linéarisées présentent une mesure de l'enlèvement de matière pour des rapports cycliques différents de  $T+/T-$ . Pour une variation de diamètre comprise entre  $230 \mu\text{m}$  et  $150 \mu\text{m}$ , la variation du rapport cyclique  $T+/T-$  a peu d'influence sur la quantité d'électricité transmise  $Q$ , il n'y a pas de dégradation du rendement de la réaction pour des valeurs de  $T_{ON}$  allant jusqu'à  $70 \text{ ms}$ . En conclusion, nous constatons qu'une durée  $T-$  de  $10 \text{ ms}$  est suffisante pour évacuer le produit de dissolution et que  $T+$  peut être fixé à  $70 \text{ ms}$  pour une gravure plus rapide.

### 2.3.6 Géométrie du fuseau.

Nous avons observé l'évolution du profil du barreau de tungstène pour vérifier que le phénomène de drop-off a été atténué. Dans notre cas, le fuseau correspondant à la hauteur du ménisque supérieur est un facteur limitant car il peut être à l'origine de la rupture du micro-outil par effet drop-off. Nous avons donc vérifié que le paramètre  $T_{OFF}$  n'a pas d'influence notable sur la forme de ce fuseau. Pour ce faire, nous avons gravé 5 micro-outils à différentes valeurs de  $T_{OFF}$  :  $0, 0.5, 1$  et  $2 \text{ s}$ . Puis, nous avons compilé les différentes formes de fuseau observées sur les micro-outils à l'aide du micromètre laser (Figure 59).

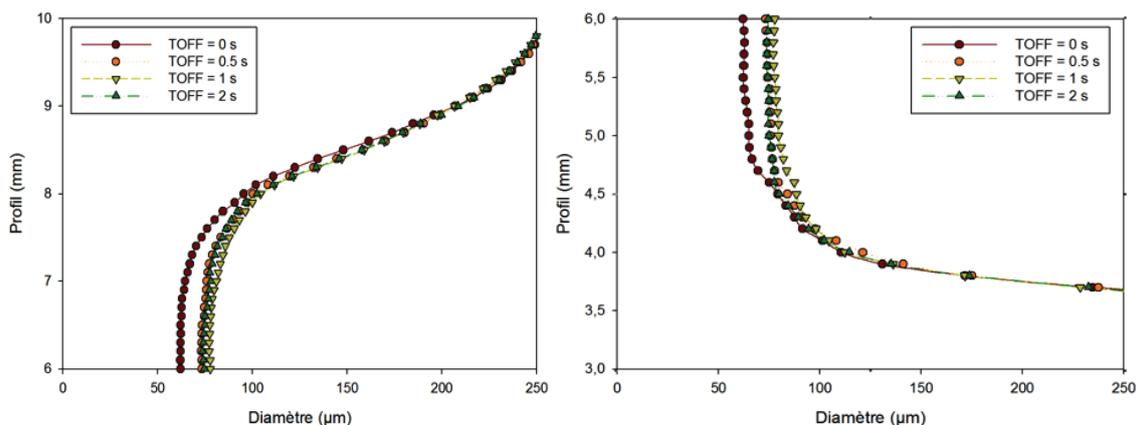


Figure 59 - Influence du ménisque sur le profil du fuseau de l'outil.

*A gauche, ménisque du haut. A droite, ménisque du bas.*

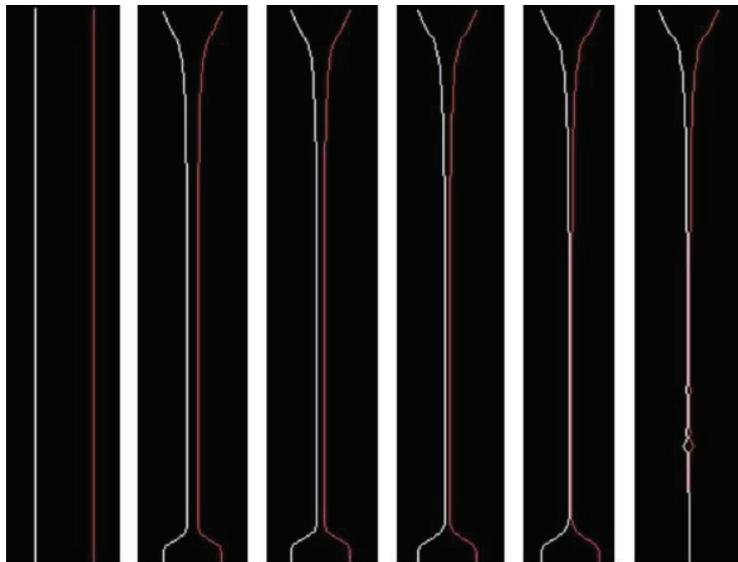
Nous constatons que la hauteur du fuseau n'est pas dépendante des paramètres électriques appliqués et semble adopter une longueur fixe de  $3 \pm 0.2 \text{ mm}$ .

### 2.3.7 Exemple de protocole pour l'obtention de micro-outil

Nous proposons ici un exemple de protocole de gravure pour réaliser un micro-outil, obtenu en plongeant un barreau de tungstène de 250  $\mu\text{m}$  sur une longueur de 6 mm durant 750 secondes avec  $T_{\text{ON}} = 0,3 \text{ s}$  /  $T_{\text{OFF}} = 0,5 \text{ s}$ ,  $I_{\text{LIMIT}} = 100 \text{ mA}$ ,  $T_{+}/T_{-} = 30/20 \text{ ms}$  avec les paramètres chimique indiqués précédemment (conductivité = 400  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  à une température de 25°C, concentration NaOH= 4 mol/l).

Le courant est légèrement supérieure à celui de l'étude précédente (+20%), néanmoins, nous considérons qu'une durée  $T_{\text{OFF}}$  de 0,5 s est suffisante (Figure 56) pour assurer l'évacuation des tungstates et contrôler l'opération de gravure. Ces paramètres résultent également de nombreux tests qui ont conduits à des résultats satisfaisants.

La figure ci-dessous illustre l'évolution du profil du micro-outil au cours de l'affûtage grâce à l'observation par micromètre laser.



**Figure 60 - Evolution du profil d'une électrode au cours de l'affûtage.**

*Sur le dernier profil à droite, il apparait des artefacts sur l'extrémité de l'électrode, il s'agit de gouttes d'eau utilisé pour le rinçage de l'électrode après la phase de coupure.*

L'outil obtenu avec ce protocole affiche un diamètre final de l'ordre de 30  $\mu\text{m}$  (Figure 60). Ce diamètre peut être retrouvé par le calcul de Faraday, qui nous prédit un diamètre final de 31  $\mu\text{m}$ . La prédiction par le calcul de Faraday est donc correcte.

La question est maintenant d'évaluer la reproductibilité du procédé.

### 2.3.8 Reproductibilité

L'idée est d'élaborer une gamme variée de micro-outils de diamètres 160, 100 et 30  $\mu\text{m}$  à partir d'un diamètre initial de 250  $\mu\text{m}$  et de vérifier que nous obtenons bien des outils aux dimensions proches lorsqu'ils sont soumis à un protocole défini.

<i>Micro-outils</i>	<i>Diamètre moyen (μm)</i>	<i>Écart-type (μm)</i>	<i>Longueur de l'outil (mm)</i>	<i>Facteur de forme (F<sub>10%</sub>)</i>
1	163	±1,05	2,3 ± 0,1	14
2	162.5	±0,97	2,6 ± 0,1	16
3	164.2	±1,54	2,6 ± 0,1	16
4	161.8	±1,27	2,4 ± 0,1	15
5	162.4	±1,36	2,5 ± 0,1	15

Tableau 14 - Reproductibilité du procédé de gravure sur 5 micro-outils de diamètre final 160 μm.

Le Tableau 14 indique que les diamètres attendus de 160 μm, ont été obtenus avec un écart-type de l'ordre de 1,5 μm sur une longueur utile moyenne de 2,5 mm. Notons la reproductibilité sur cette longueur, avec un écart maximum de 300 μm. Le facteur de forme est aussi assez constant avec un facteur de forme autour de 15.

<i>Micro-outils</i>	<i>Diamètre moyen (μm)</i>	<i>Écart-type (μm)</i>	<i>Longueur de l'outil (mm)</i>	<i>Facteur de forme (F<sub>10%</sub>)</i>
1	100.5	±1,11	2,8 ± 0,1	28
2	103.9	±1,15	2,9 ± 0,1	28
3	104.3	±1,40	2,7 ± 0,1	26
4	101.4	±1,67	2,8 ± 0,1	28
5	97.4	±1,25	2,8 ± 0,1	29

Tableau 15 - Reproductibilité du procédé de gravure sur 5 micro-outils de diamètre final 100 μm.

Le Tableau 15 regroupe le résultat des tests de reproductibilité pour un diamètre d'outil de 100 μm. Le diamètre moyen est de 101,5 μm avec un écart-type inférieur à 1 μm sur la longueur utile. Cette longueur utile est proche de 3 mm et le facteur de forme est quasiment doublé en passant de 15 à 29.

<i>Micro-outils</i>	<i>Diamètre moyen (μm)</i>	<i>Écart-type (μm)</i>	<i>Longueur de l'outil (mm)</i>	<i>Facteur de forme (F<sub>10%</sub>)</i>
1	29,27	±0,7	2,6 ± 0,2	89
2	29,65	±0,4	2,8 ± 0,2	94
3	30,06	±0,4	2,2 ± 0,2	73

Tableau 16 - Reproductibilité du procédé de gravure sur 3 micro-outils de diamètre final 30 μm.

Enfin, le Tableau 16 montre les tests de reproductibilité pour un diamètre de 30 μm avec un écart-type inférieur à 1 μm. Le facteur de forme est en moyenne de 85 (avec une dispersion élevée) pour une longueur d'outil imposante de plus de 2 mm.

Nous avons aussi effectué un test de reproductibilité de fabrication de trois micro-outils avec un fil de tungstène de diamètre initial de 125 μm. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

<i>Micro-outils</i>	<i>Diamètre moyen (μm)</i>	<i>Écart-type (μm)</i>	<i>Longueur de l'outil (mm)</i>	<i>Facteur de forme (F<sub>10%</sub>)</i>
1	31,6	0,90	2,6 ± 0,1	82
2	33,9	1,78	2,5 ± 0,1	74
3	34,9	0,53	2,7 ± 0,1	77

Tableau 17 - Reproductibilité du procédé de gravure à partir d'un fil de 125 μm.

Les facteurs de forme obtenus (autour de 80) sont aussi assez stables ce qui tend à montrer que notre protocole expérimental est plutôt bien maîtrisé.

### 2.3.9 Autres exemples de micro-outils

Voici des clichés montrant des micro-outils que nous avons obtenus et leur utilisation à titre d'exemple. La Figure 61 représente un micro-outil typique avec un diamètre de 70  $\mu\text{m}$ , utilisable en phase d'ébauche de micro-électroérosion.

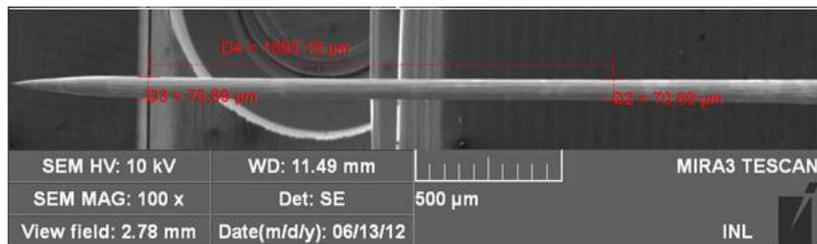


Figure 61 - Micro-outil de 70  $\mu\text{m}$  de diamètre et de longueur 1,6 mm (Ff=23).

Avec un micro-outil plus fin (diamètre de 40  $\mu\text{m}$ ), une étape de finition peut être effectuée (Figure 62). Enfin, avec le micro-outil de la Figure 65 une étape de super finition peut être envisagée par les enlèvements à haute résolution.

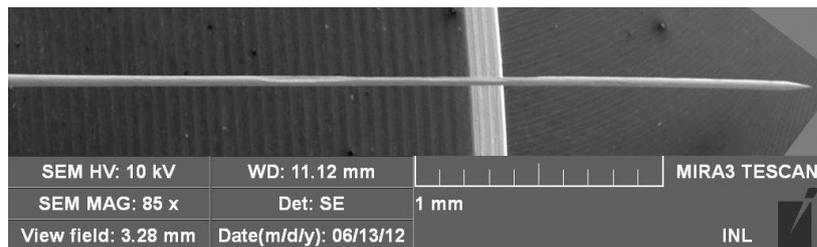


Figure 62 - Micro-outil de 40  $\mu\text{m}$  de diamètre et de 2 mm de longueur (Ff=52).

## 2.4 Discussion

L'obtention de micro-outils reproductibles jusqu'à 30  $\mu\text{m}$  se fait de manière automatique et sans surveillance. Ce protocole peut être poussé jusqu'à 15  $\mu\text{m}$ , où la reproductibilité est plus faible, mais perfectible. En-dessous de 15  $\mu\text{m}$ , il est possible d'obtenir manuellement des micro-outils où l'intervention de l'opérateur est nécessaire. C'est-à-dire, que l'opérateur doit adapter les paramètres de gravure moins violents. L'enlèvement de matière est plus fin, ce qui permet d'obtenir des micro-outils inférieurs à 15  $\mu\text{m}$ . L'image ci-dessous montre un micro-outil de diamètre 4  $\mu\text{m}$  sur une hauteur de 320  $\mu\text{m}$ .

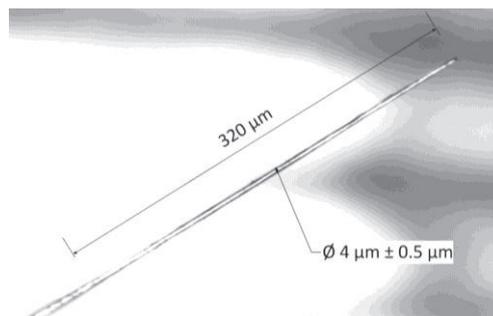


Figure 63 - Micro-outil de 4  $\mu\text{m}$  de diamètre et de 320  $\mu\text{m}$  de longueur (Ff: 80)

La figure suivante montre un exemple extrême avec un micro-outil de diamètre 5  $\mu\text{m}$  sur une longueur de 700  $\mu\text{m}$ . Avec un tel facteur de forme ( $Ff=140$ ) ce micro-outil sera probablement peu utile en  $\mu\text{EE}$  en raison de problèmes de vibrations ou de torsion, mais grâce à l'étape de coupure prévue dans le protocole, il est possible de raccourcir sa longueur pour lui conférer des dimensions plus acceptables.

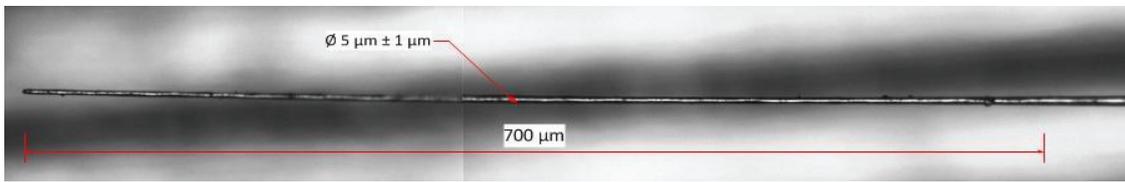


Figure 64 - Micro-outil de 5  $\mu\text{m}$  de diamètre et de 700  $\mu\text{m}$  de longueur ( $Ff=140$ ).

Pour ces micro-outils, nous devons adapter des étapes de très faibles durées (quelques secondes) et de faible ampérage (quelques dizaines de mA), car de très petites variations temporelles ou de courant peuvent être catastrophique et mener à la dissolution complète du micro-outil. Un simple calcul montre que le passage d'un outil de diamètre 250  $\mu\text{m}$  à un micro-outil de diamètre 10  $\mu\text{m}$  est caractérisé par un enlèvement de 99,84%, et même 99,998% pour atteindre un micro-outil de 1  $\mu\text{m}$  de diamètre, d'où l'importance de la réduction des incertitudes de mesure, des variations de fenêtre temporelle, des fluctuations du courant.



Figure 65 - Extrémité d'un micro-outil de 4  $\mu\text{m}$  de diamètre et de longueur 80  $\mu\text{m}$  ( $Ff = 20$ ).

Enfin, des micro-outils passant en-dessous de la limite du micromètre ont pu être obtenus. Ci-dessous, deux images de micro-outils présentant ces caractéristiques :

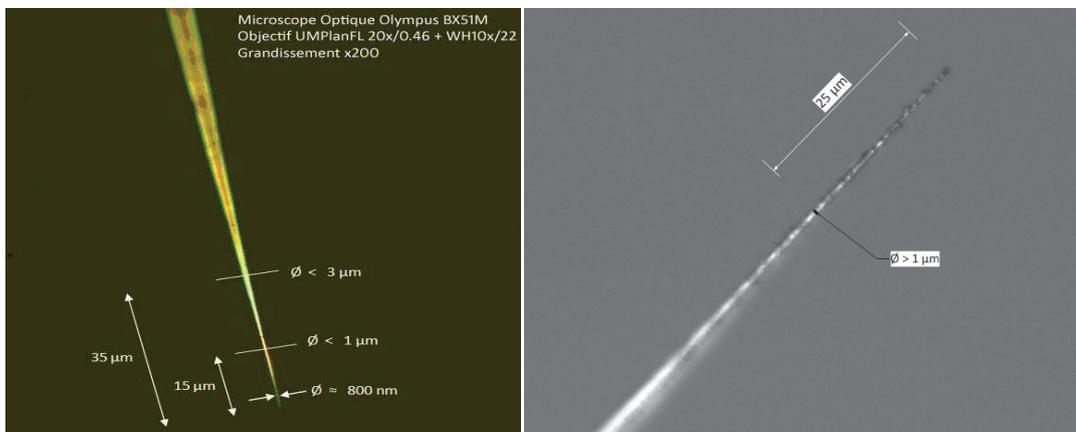


Figure 66 - Micro-outils submicrométriques.

Image de gauche : outil de  $W$  de 0,8  $\mu\text{m}$  à l'extrémité avec un diamètre de 0,8 à 1  $\mu\text{m}$  sur une hauteur de 15  $\mu\text{m}$ .  
Image de droite : autre électrode de diamètre 700 nm sur 25  $\mu\text{m}$ .  
(flou dû au manque de profondeur de champ du microscope optique).

En réalité, au fur et à mesure que le diamètre diminue, de nombreux problèmes et limitations apparaissent.

Nous en faisons la liste ci-dessous :

- La gestion de la quantité de courant  $Q$  transmise doit être extrêmement précise. En effet, par exemple, pour le passage d'un micro-outil de diamètre  $5\ \mu\text{m}$  à diamètre de  $2\ \mu\text{m}$  sur une longueur de  $5\ \text{mm}$ , la quantité  $Q$  apportée doit être de  $6\ \text{mC}$ . La maîtrise du courant au milliampère et du temps à la milliseconde près est donc nécessaire (ce qui n'était pas le cas avec l'utilisation conjointe de l'électronique de la Figure 48 et du logiciel LabView, des fluctuations assimilables à du bruit électronique d'une amplitude de  $5$  à  $10\ \text{mA}$  ont été la cause de problèmes de reproductibilité).
- Les multiples expériences passées au laboratoire ont démontrées que les vibrations du liquide (pompage ou mouvement de bulles) pouvaient suffire à endommager l'extrémité de l'électrode lorsque le diamètre atteint une centaine de nanomètres. Il sera important de veiller à isoler au maximum les vibrations dans l'environnement du micro-outil. Néanmoins, dans notre cas, nous avons obtenus au mieux des électrodes jusqu'à  $800\ \text{nm}$  (Figure 66), nous n'avons pas encore pu constater les dégâts pouvant être occasionnés pour des diamètres inférieurs à  $500\ \text{nm}$ .
- Des effets de volume seront très probablement présents car les dimensions de l'électrode étant très faibles, l'influence des tungstates dans l'environnement du micro-outil sera grandissante. Il existe une incertitude concernant la « qualité » de la solution électrolytique, toutefois, nous avons réalisé un montage fluïdique assurant une conservation des conditions expérimentales au niveau de la conductivité et de la température de l'électrolyte durant le protocole. Des mesures de conductivité de l'électrolyte ont montrées que la conductivité s'élevait à  $405\ \text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  en début de gravure dans la cellule contre  $400\ \text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$  dans la solution « poubelle » après une semaine d'utilisation. **La conductivité de la solution est donc stable sur une période d'au moins une semaine.**
- Enfin, une autre problématique concerne le diamètre des grains. Pour le tungstène utilisé, la taille des grains avoisine le micromètre. L'obtention d'électrodes de cette dimension pourra donc être sujette à des casses. Pour éviter cela, une étape de recuit thermique serait nécessaire pour améliorer la qualité métallurgique du barreau de départ. Une autre solution serait d'utiliser des monocristaux de tungstène (moyennant un prix d'achat très élevé).
- Il est important de tenir compte des entrées/sorties microfluidiques et des vibrations qu'entraîne le pompage. la densité élevée de l'huile isolante permet de limiter les fluctuations du liquide à l'interface huile/électrolyte, mais elles restent présentes à l'interface air/électrolyte. Un micromètre laser fonctionnant sur surface transparente nous a permis d'évaluer les fluctuations de l'électrolyte à l'air libre à hauteur de  $0,2\ \text{mm}$ .

Toutefois, il est tout à fait possible d'atteindre des diamètres très faibles avec la méthode proposée actuellement ainsi, il a été possible d'obtenir des micro-outils de  $2$  à  $4\ \mu\text{m}$  de diamètres avec des facteurs de formes de  $15$  à  $40$ . C'est une preuve que le procédé n'est limité que techniquement.

## 2.5 Conclusion et perspectives

Nous avons mis en place un dispositif de gravure électrochimique automatisée pour la fabrication de micro-outils ultrafins. La méthode proposée est une alternative intéressante aux méthodes traditionnelles comme la micro-électroérosion inverse ou le micro-usinage mécanique. Le procédé s'est révélé satisfaisant pour des diamètres de micro-outils jusqu'à 15  $\mu\text{m}$  avec des facteurs de formes atteignant 80. Le procédé est fonctionnel mais nécessite l'intervention de l'opérateur pour la fabrication d'outils de diamètre inférieur. La fabrication d'outil avec un diamètre proche, voire inférieur à 1  $\mu\text{m}$ , a été démontrée mais de manière non-reproductible. Nous pensons que ce procédé possède une plage de progression importante pouvant mener à la réalisation d'électrodes submicrométriques. Nous verrons au chapitre suivant, qu'il permet aussi de régénérer un micro-outil émoussé : une électrode usée pourra être réaffûtée afin de prolonger sa durée de vie.

Enfin, pour l'avenir nous proposons de travailler sur les points suivants :

- (1) Améliorer la reproductibilité du procédé en réduisant systématiquement toutes les sources d'incertitudes évoquées précédemment : mesure de la quantité d'électricité avec un très haut degré de précision, contrôle de la durée des créneaux, diminution de l'amplitude des vibrations de la surface libre de l'électrolyte, etc.
- (2) Automatiser entièrement le protocole de fabrication de sorte que l'opérateur n'ait qu'à entrer les dimensions du micro-outil souhaité : le programme gèrera automatiquement les paramètres et les durées à appliquer. Une loi en décroissance continue du courant pourrait être utilisée.
- (3) Une autre amélioration concerne l'état de surface des micro-outils. Pour des pointes de grandes dimensions (diamètre > 50  $\mu\text{m}$ ), les effets de surfaces des défauts sont moins importants que pour les pointes plus fines, où il est nécessaire de faire un polissage en fin d'étape. Il serait alors intéressant de pouvoir faire une distinction entre l'étape d'affûtage et le mode polissage en observant simultanément le courant et la tension.
- (4) Il paraît nécessaire de mener une étude afin de modéliser l'impédance électrochimique du dispositif ainsi que son évolution pendant la phase d'affûtage. Par ailleurs, une modélisation 3D sous COMSOL<sup>®</sup> de l'enlèvement de matière par voie électrochimique couplée à une modélisation du flux d'électrolyte devrait permettre d'optimiser la disposition des entrées-sorties de l'électrolyte et d'améliorer le facteur de forme des outils

En conclusion, nous sommes conscients que l'étude des paramètres de gravure est incomplète, néanmoins, la mise en place du procédé a demandé beaucoup de temps et de nombreux tests. L'analyse du procédé est complexe et demande des études plus soignées, ce travail n'étant qu'une pré-étude. Il m'a été demandé de ne pas me concentrer exclusivement sur la question de la gravure des micro-outils ; l'amélioration du procédé étant prise en charge par mes successeurs. Nous allons maintenant voir l'utilisation de ces électrodes dans leur cadre principal : à savoir l'usinage par micro-électroérosion.

**Chapitre 3 :**  
***Machine de micro-électroérosion***

---

### 3 Machine de micro-électroérosion

Nous commencerons par rappeler les travaux préliminaires d'A. Benilov à l'INL [108], [110]. Les difficultés rencontrées nous ont motivés pour développer de nouveau une machine de micro-électroérosion, qui sera décrite dans ce chapitre, fonction par fonction et de manière ascendante (du matériel au logiciel). Nous passerons ensuite aux résultats expérimentaux puis aux conclusions et perspectives.

#### 3.1 Objectifs du développement

##### 3.1.1 État de l'art antérieur

Dans le procédé développé par A. Benilov, le poste de fabrication des micro-outils était à part de la machine d'étincelage ; l'outil était obtenu par gravure électrochimique d'un fil de platine-iridium (Pt-Ir) de diamètre 250  $\mu\text{m}$  dans une cuve contenant une solution saturée de NaCl. Une différence de potentiel alternative de 30 V avec un contrôle manuel était appliquée entre le fil de platine-iridium (Pt-Ir) et une contre électrode en graphite. La Figure 67 montre une vue de la machine d'usinage par micro-électroérosion en 2007.

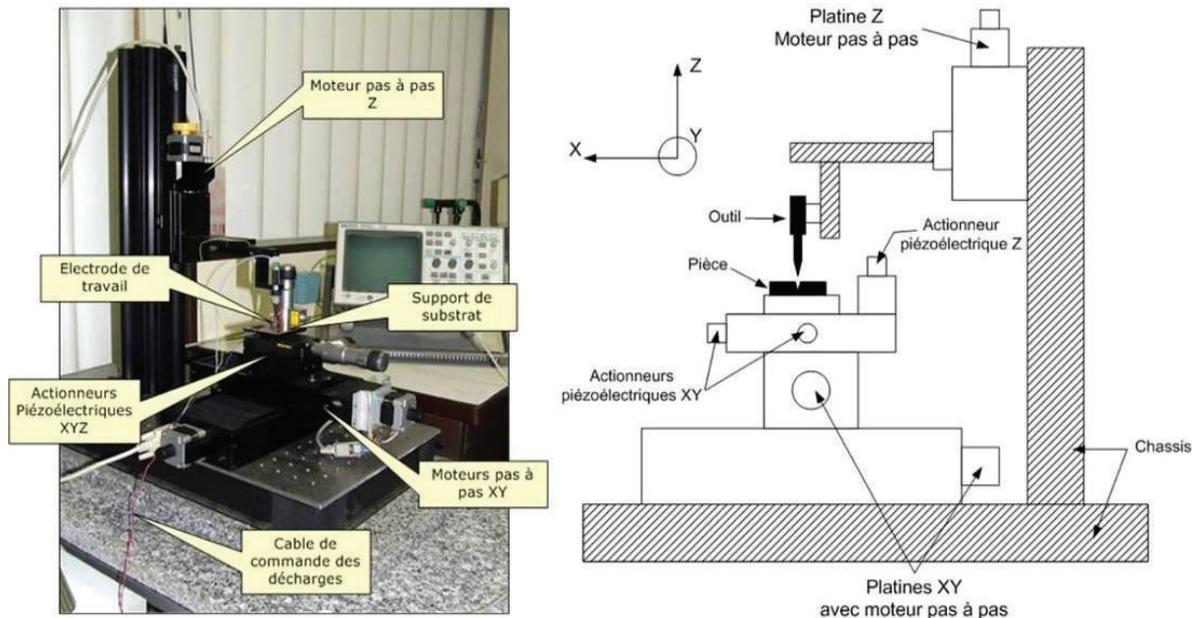


Figure 67 - Machine de fraisage par  $\mu\text{EE}$  d'après [110]

Celle-ci comportait deux systèmes de déplacement indépendants et imbriqués l'un dans l'autre :  
- Deux axes de translation X, Y avec des moteurs pas à pas (course 80 mm, résolution 2,5  $\mu\text{m}/\text{pas}$ , fréquence maximale de rotation 1,3 kHz) disposés sur une table optique.

-Trois actionneurs Melles Griot DRV120<sup>12</sup> disposés en XYZ de façon à déplacer la pièce à usiner (en général, du silicium p+ de résistivité 0,005 ohm.cm) ; l'ensemble était placé sur les platines de translation XY.

<sup>12</sup> Les DRV120 sont constitués d'une vis micrométrique manuelle prolongés par un actionneur piézoélectrique piloté par ordinateur (course 30  $\mu\text{m}$ , résolution 10 nm avec rétroaction par capteur de position).

- Un axe Z avec un moteur pas à pas disposé verticalement sur une potence permettant de déplacer l'outil en Pt-Ir.

La configuration de la machine permettait de procéder à des usinages de grande course (avec les moteurs pas à pas) et de haute résolution sur une faible distance (avec les DRV120) sans qu'il soit possible de coordonner les deux.

Notons que l'outil était emmanché dans des embouts de seringues jetables. L'apport en diélectrique consistait à immerger le substrat dans de l'eau dé-ionisée ou un mélange eau dé-ionisée/glycérol (50%/50%).

L'électronique de commande des décharges est schématisée à la Figure 68. Le principe était de charger le condensateur C (5 nF à 2,2  $\mu$ F) par une source de tension réglable (0-100 V) à travers une résistance R (100  $\Omega$ ) permettant de limiter le courant. Comme interrupteur, des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) rapides (temps de commutation 90 ns) étaient utilisés avec un pilotage par microcontrôleur ATmega 162 de marque ATMEL via des drivers IR2108/IR2117.

La charge du condensateur était déclenchée par la fermeture de l'IGBT Q1 ; les IGBT Q2 et Q3 étant ouverts. Puis Q1 était ouvert et Q3 était fermé de sorte que l'électrode de travail soit reliée au condensateur. Puis le transistor Q3 était ouvert et Q2 fermé de façon à décharger le condensateur. La re-fermeture de Q1 permettait de relancer le cycle d'usinage. Pendant les cycles, l'électrode était mise en mouvement par rapport à la pièce de façon à provoquer une érosion lorsque l'entrefer était optimal.

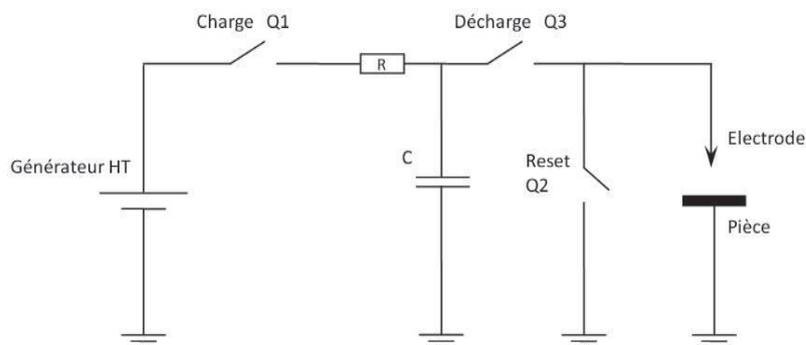


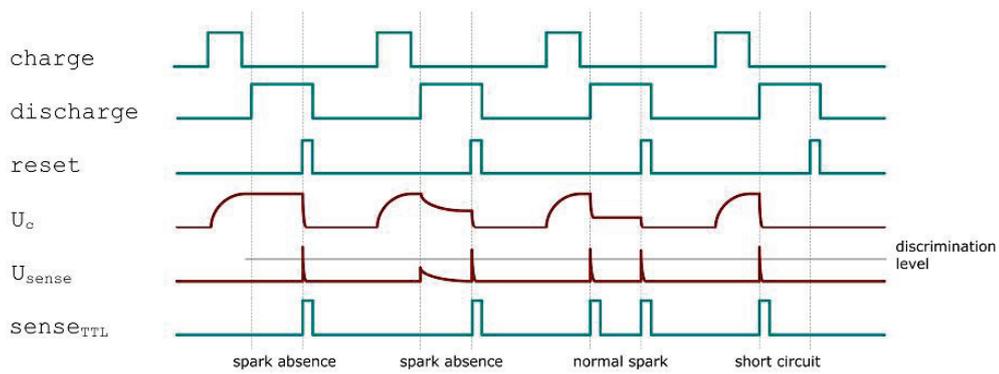
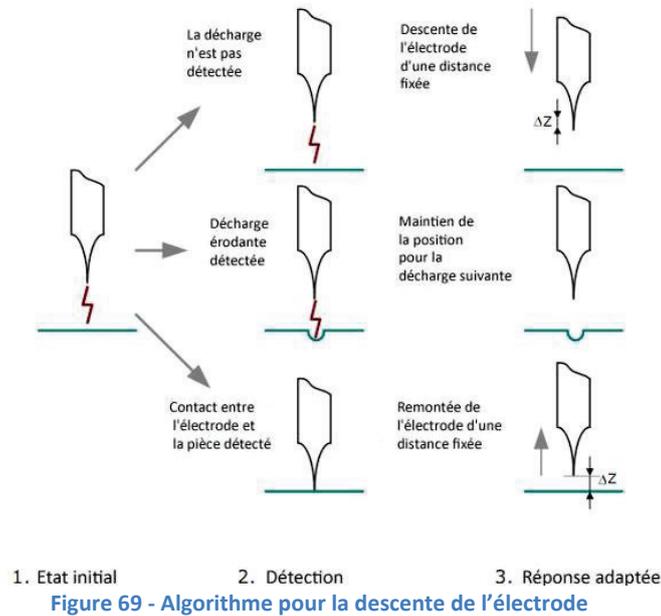
Figure 68 - Schéma simplifié de l'électronique de 1<sup>ère</sup> génération

Un circuit non représenté à la Figure 68 permettait d'analyser l'allure de la différence de potentiel outil-décharge de façon à distinguer les décharges et les contacts électrode-pièce<sup>13</sup>. La stratégie choisie pour déclencher l'usinage est détaillée à la Figure 69. Tout en gardant l'électrode reliée au condensateur chargé (avec Q3 fermé), elle consistait à faire descendre graduellement l'électrode à l'aide du moteur pas en pas Z et ce :

- Soit jusqu'à la détection de la 1<sup>ère</sup> décharge par le retour de courant vers la masse ;
- Soit, si aucune décharge n'était détectée, jusqu'au contact mécanique outil-pièce.

<sup>13</sup> Il consiste à fabriquer une dérivée « hardware » de la d.d.p. aux bornes de la capacité de travail. En cas de décharge, la variation très rapide de la d.d.p. aux bornes de la capacité entraîne la création d'une dérivée aux flancs raides. Celle-ci est comptabilisée par le  $\mu$ C à l'intérieur de la « bonne » fenêtre temporelle (Q1 et Q2 ouverts ; Q3 fermé).

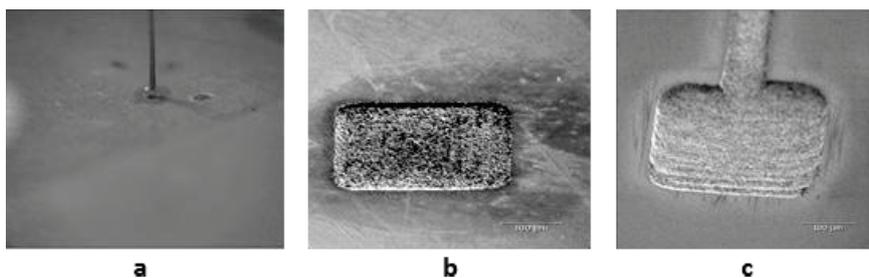
En cas de contact, l'outil était remonté d'un cran. Après la première décharge, l'électrode était soit enfoncée pour percer un trou soit décalée latéralement pour creuser un canal.



*Notez la présence d'une impulsion non significative chaque fois que « discharge » Q3 est fermé; celle-ci est « ignorée » par le  $\mu C$ .*

### 3.1.2 Résultats préliminaires

La Figure 71 montre quelques exemples d'usinage d'un wafer de silicium d'épaisseur 400  $\mu m$  : perçage de part en part du wafer (Figure 71a), ouverture d'une cavité avec dégagement d'un pilier central de diamètre 1  $\mu m$  (Figure 71b) et le creusement d'un canal micro fluidique (Figure 71c).



**Figure 71 - Premiers tests de micro-usinages [110].**

### 3.1.3 Réflexions

Malgré ces résultats très encourageants, il était nécessaire de reconcevoir la machine pour être en mesure d'étudier les questions suivantes :

#### **Fabrication des outils :**

- Disposer dans la même machine d'un poste d'affûtage des micro-outils et d'un poste d'usinage par  $\mu$ EE, conformément à la demande de brevet déposée par le laboratoire [145].
- Affûter les micro-outils de manière automatique avec des paramètres contrôlés par ordinateur.

#### **Partie matérielle de la machine de micro-électroérosion :**

- Piloter directement et de manière coordonnée par le microcontrôleur, les actionneurs piézoélectriques et les moteurs pas à pas.
- Améliorer le circuit de génération des décharges de la Figure 68, qui présentait des problèmes de reproductibilité (notamment l'IGBT Q3 était mal polarisé : cf. section 3.3.2.5).
- Développer des circuits de détection de contact mécanique outil-pièce et de caractérisation des décharges plus efficaces (la création d'une dérivée physique de la d.d.p. aux bornes de la capacité de travail posait des problèmes de reproductibilité).
- Mettre en place un actionneur piézoélectrique en Z, disposé de manière intermédiaire entre l'outil et le moteur pas à pas Z de façon à améliorer la gestion de l'entrefer (résolution, vitesse, temps de réponse, etc.).
- Maintenir la pièce dans une cuve contenant le diélectrique et assurer une évacuation des débris efficace.

#### **Logiciel de la machine de micro-électroérosion :**

- Développer une interface utilisateur conviviale pour procéder à l'affûtage et aux usinages
- Développer une interface vers un logiciel de CFAO pour définir les parcours d'usinage

#### **Caractérisation du procédé**

- Mettre en place deux caméras : l'une pour suivre l'usinage et l'autre pour suivre l'affûtage.
- Suivre l'énergie envoyée dans la pièce par les décharges de  $\mu$ EE (valeur crête, valeur moyenne)

#### **Processus d'usinage micro-électroérosion :**

- Déterminer la valeur de l'entrefer frontal et latéral et régler sa valeur
- Caractériser le taux d'enlèvement de matière, l'usure de l'électrode,...
- Déterminer la limite de la résolution d'usinage
- Étudier les facteurs influençant la précision d'usinage
- Caractériser les états de surface des pièces usinées

#### **Et de manière générale :**

- Développer les protocoles d'affûtage et de régénération des outils

Pour ce faire, il était difficile d'améliorer le dispositif mis en place. Nous avons donc décidé de reprendre le développement de la machine en partant quasiment de zéro.

## 3.2 Organisation de la machine

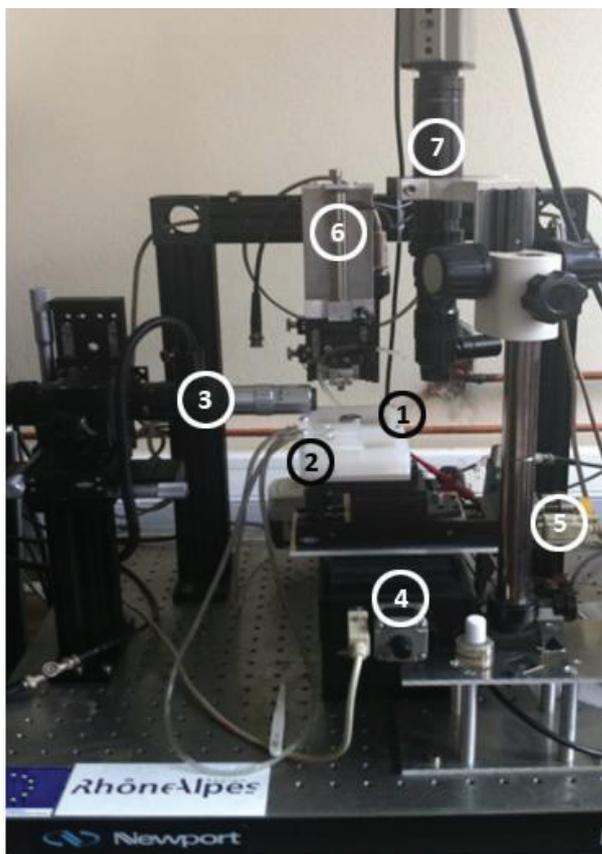
Nous décrivons dans un premier temps la construction mécanique de la machine avec l'intégration des différents postes de la machine. Nous verrons ensuite l'architecture électronique nécessaire à la commande des décharges et au contrôle de la machine

### 3.2.1 Sous-ensemble mécanique

La Figure 72 montre une vue générale de la machine de micro-électroérosion, qui a été progressivement mise en place au cours de ce travail. Nous ne décrivons ici que la version finale du dispositif. Ce prototype est disposé sur un banc optique Newport M-IG-22-2 en matériau composite et comporte :

- deux axes de translation de marque OWIS avec des moteurs pas à pas (avec les mêmes caractéristiques qu'en section 3.1.1) disposés horizontalement et orthogonalement en XY de façon à porter :

- la cuve de gravure électrochimique pour l'obtention des micro-outils
- la cuve d'érosion avec la pièce à usiner
- une arche centrale avec une structure en profilé d'aluminium portant un 3<sup>ème</sup> axe de translation avec un moteur pas à pas disposé verticalement selon l'axe Z.



- ① : Module d'érosion ;
- ② : Module de gravure électrochimique ;
- ③ : Caméra d'observation pour l'outil ;
- ④ : Axe de déplacement X ;
- ⑤ : Axe de déplacement Y ;
- ⑥ : Axe de déplacement Z + Piézoélectrique Z' ;
- ⑦ : Caméra d'observation de la pièce.

Figure 72 - Vue et description de la machine de micro-électroérosion

Le 3<sup>ème</sup> axe de translation Z permet de déplacer un ensemble mécanique constitué d'un actionneur piézoélectrique P843.60 de marque PI<sup>14</sup> qui, lui-même, met en mouvement :

- un chariot, chargé par un ressort de compression, dont le mouvement est guidé par deux glissières de précision avec des roulements à rouleaux croisés ;
- un porte-outil solidaire du chariot.

Il est possible ainsi de déplacer verticalement le micro-outil tout en maintenant l'actionneur piézoélectrique sous charge (ce qui est une condition nécessaire à son bon fonctionnement).<sup>15</sup>

Par ailleurs, du point de vue de la fluidique, la machine est dotée de :

- une première cuve pour l'usinage par  $\mu$ EE avec :
  - o un porte-pièce métallique assurant une connexion électrique avec la pièce à usiner ;
  - o une arrivée d'eau dé-ionisée sous pression (max 5 bars) avec une hydre d'arrosage ;
  - o une sortie d'eau connectée à une première pompe péristaltique, qui envoie le fluide vers une poubelle ;
- une deuxième cuve en polypropylène pour la gravure électrochimique avec des entrées/sorties fluidiques et une pompe péristaltique assurant la circulation et le renouvellement de l'électrolyte.

La pièce, le plus souvent une plaque mince en acier inoxydable (environ 15 x 15 x 0,6 mm, Radiospares, Réf. 559-206), est collée sur le porte-pièce à l'aide d'une laque conductrice d'argent.

Un point délicat à régler a été de s'assurer que la valeur de l'entrefer n'est pas modifiée par des artefacts expérimentaux. C'est-à-dire, qu'à cause des très faibles dimensions de l'entrefer, il a été nécessaire de :

- sélectionner des substrats avec une surface supérieure ayant un bon état de surface et une bonne planéité de départ. La rugosité de ces échantillons a été déterminée par profilométrie (Veeco, Dektak 150) et affiche un Ra initiale de 60 nm (Figure 73).
- s'assurer d'une orientation quasi-horizontale du substrat.

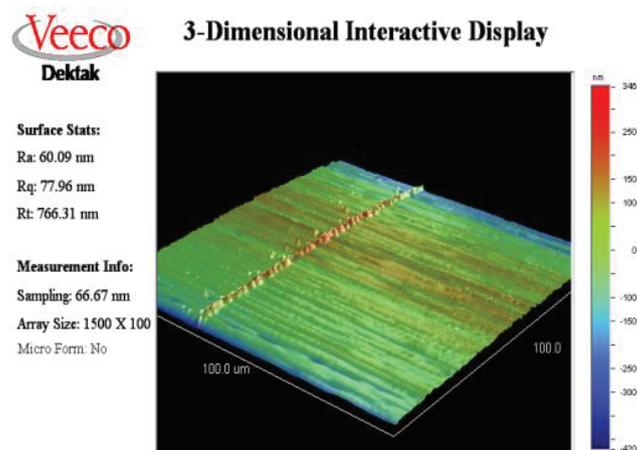


Figure 73 - Reconstruction 3D par profilométrie de la surface de l'échantillon avant usinage.

La vue 3D affichée présente un artefact formant une chaîne « montagneuse » à la surface de l'échantillon qui est due à une vibration, indésirable et redondante, lors du déplacement de la platine du profilomètre sur de longues distances.

<sup>14</sup> Course : 90  $\mu$ m; résolution de 1,8 nm en boucle ouverte et de 0,9 nm de résolution en boucle fermée avec un capteur à jauge de contrainte; la fréquence de résonance à vide est de 6 kHz.

<sup>15</sup> Notons que la fréquence de travail est modifiée, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur le comportement dynamique de la machine [12].

En effet l'orientation de l'échantillon est très importante pour maintenir un entrefer constant durant l'usinage. En usinage traditionnel, le zéro est effectué en usinant deux faces du brut original. Comme cette opération serait longue en micro-électroérosion, il est indispensable d'utiliser des substrats plans et orientés précisément à l'horizontal.

Pour cela, nous avons développé le dispositif mécanique de la Figure 74 qui permet de régler l'horizontalité des substrats à l'aide de trois butées différentielles (Newport, BD17.04<sup>16</sup>) ; le réglage de l'horizontalité étant effectué soit avec un comparateur IDC-112B-5 (Mitutoyo) de précision 1,5 µm soit avec un dispositif de palpéage intégré à la machine (utilisant l'outil en tungstène).

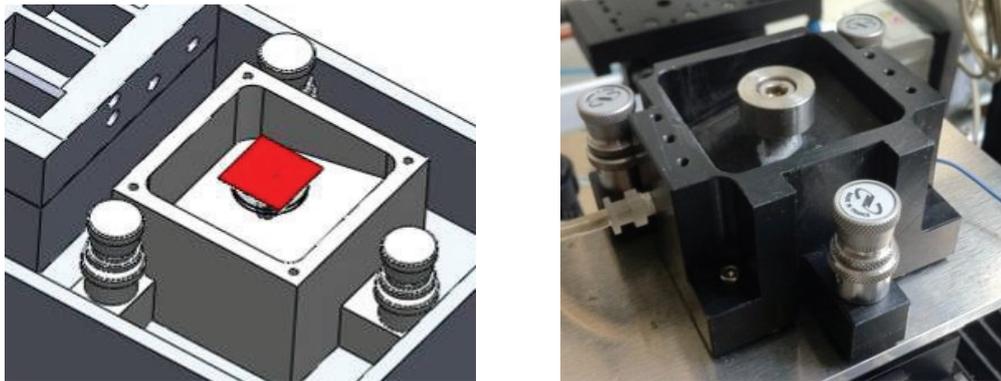


Figure 74 - Cuve d'érosion orientable suivant 3 axes.

Nous détaillons ci-dessous succinctement en quelques lignes le principe de palpéage intégré à la machine. Pour ce faire, nous effectuons un palpéage en 4 points avec une commande codée dans le programme de la machine. Grâce à la position originale de l'électrode en Z, on mesure l'orientation du substrat avec une précision de 1 µm. La Figure 75 au milieu représente l'orientation de départ du substrat : l'échantillon fait un angle de plus de 2,3° avec l'horizontale et le dénivelé atteint 230 µm sur une distance de plus de 5,5 mm. Après avoir réorienté l'échantillon, la Figure 75 (à droite) montre le profil de la surface de 1 cm x 1 cm avec une déviation maximale selon Z de 30 µm. L'angle de l'échantillon par rapport à l'horizontalité est maintenant inférieur à 0.2°.

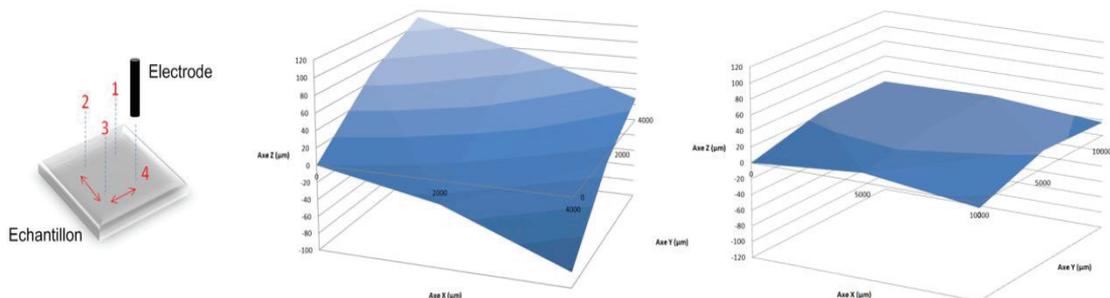


Figure 75 - Palpéage et orientation du substrat avant/après réglages.

<sup>16</sup> Course réglage rapide/fin : 4,3 mm / 300 µm – Sensibilité rapide/fine : 1 µm / 0,1 µm – Graduation : 1 µm  
Longueur totale : 47 ± 1,34 mm.

### 3.2.2 Sous-ensembles électronique et informatique

Le développement électronique de la machine a été un travail mené en collaboration avec Yasmina Layouni et Eric Baldino. Ainsi, la Figure 76 montre une vue des sous-ensembles électronique et informatique avec :

- un premier ordinateur (**Ordinateur CFAO**) doté du logiciel de Conception Assistée par Ordinateur 3D (CAO) Solidworks et du logiciel de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) Delcam ;
- un deuxième ordinateur (**Ordinateur Machine**) qui gère l'ensemble du processus de fabrication à partir des données représentatives de la pièce fournies en code G par l'Ordinateur CFAO;
- une **Commande Électronique** constituée d'une série de cartes développées au laboratoire qui sont regroupées au sein d'une armoire électrique.
- un **Ordinateur Portable** qui permet de programmer les microcontrôleurs de la Commande Électronique et qui n'est donc utilisé que pour les changements de logiciel.

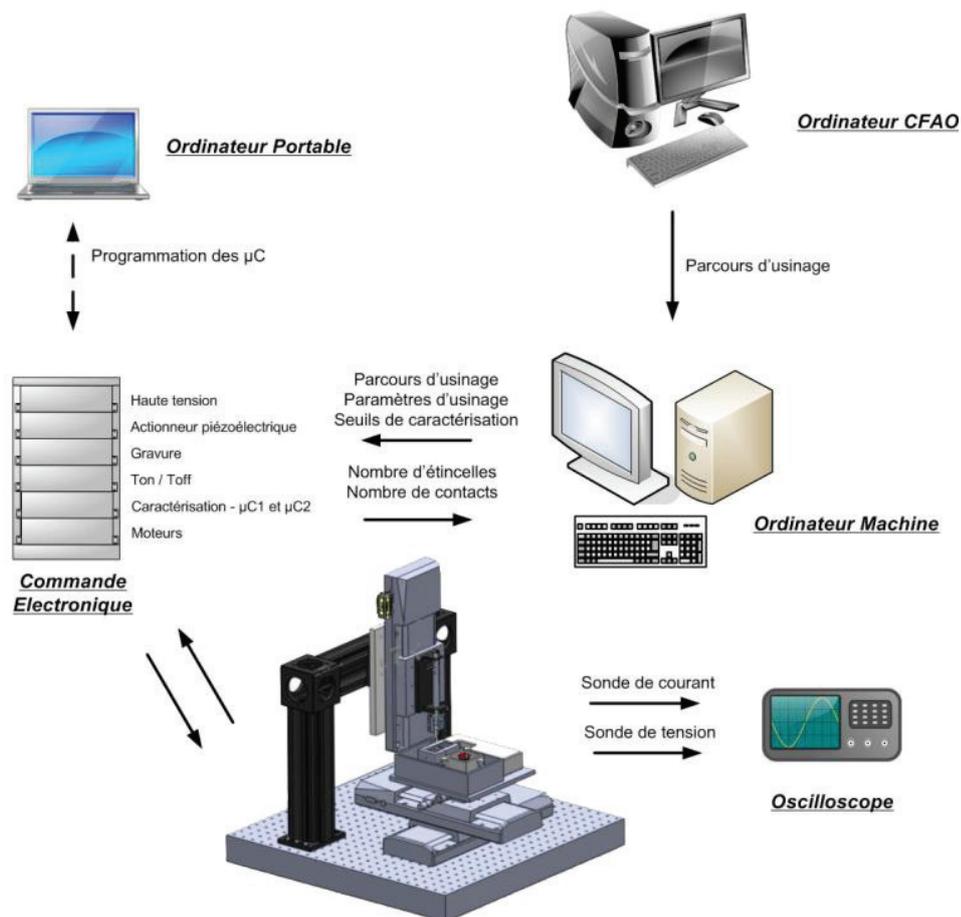


Figure 76 - Schématisation de l'organisation de la machine de micro-électroérosion

Les données sont envoyées à l'Ordinateur Machine qui procède à une traduction du code G<sup>17</sup> de façon à générer des données directement utilisables par la Commande Electronique<sup>18</sup>.

<sup>17</sup> Le Code G est un code standardisé qui détermine le type d'opération que doit effectuer l'outil (ex : direction, vitesse, retrait/descente de l'électrode, etc.) Les fichiers G-code sont produits par les programmes de CFAO

<sup>18</sup> Il est possible aussi de générer directement un parcours d'usinage via l'Ordinateur Machine et la Commande Electronique sans passer par le code G.

Pendant la phase d'électroérosion, l'Ordinateur Machine gère, via la Commande Électronique, les paramètres liés à la création des décharges et ceux liés à leur caractérisation dont la valeur dépend des choix effectués par l'opérateur (tension d'usinage,...) et de la nature du matériau à usiner et du diélectrique. Il recueille les informations générées pendant l'usinage (nombre de décharges, nombre de contacts) et procède à la régulation de la valeur de l'entrefer en fonction des événements.

L'Ordinateur Machine gère aussi une carte d'entrées/sorties NI USB-6229 qui permet de commander directement la gravure électrochimique de l'électrode-outil pendant la phase de fabrication de l'outil (cf. Chapitre 2). Comme nous l'avons précédemment expliqué, la machine est dotée de deux caméras avec des zooms à grande distance de travail. Ces caméras sont reliées à une carte LabView NI PCI-1406 installée dans l'ordinateur central. Il est possible ainsi de caractériser l'électrode-outil (géométrie, usure) et de visualiser le résultat des usinages par  $\mu$ EE.

Notons, pour être complet, que certains paramètres d'usinage sont réglés manuellement par l'opérateur, soit parce que nous n'avons pas eu le temps d'automatiser leur réglage (tension d'usinage) soit par choix de conception (capacité de travail, résistance de charge).

Pour bien comprendre le fonctionnement du dispositif, nous détaillerons ci-dessous la constitution de la Commande Électronique.

### 3.2.3 Commande Électronique (vue d'ensemble)

La Figure 77 montre l'organigramme des différents modules de la Commande Électronique, qui est organisée autour de deux microcontrôleurs ( $\mu$ C) ATmega162 notés  $\mu$ C1 et  $\mu$ C2.

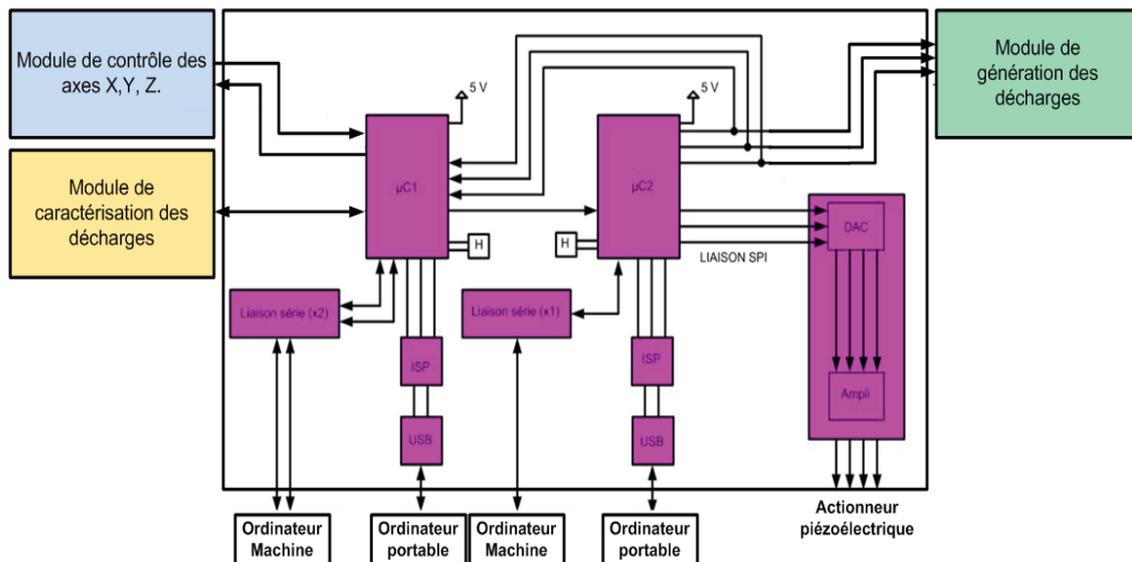


Figure 77 - Organigramme de la commande électronique de la machine de micro-électroérosion

Le  $\mu$ C1 a la charge des modules suivants :

- **Module de contrôle des axes XYZ** pour le pilotage des moteurs pas à pas ;
- **Module de caractérisation des décharges**, qui permet de détecter l'occurrence des décharges pendant la phase de  $\mu$ EE, leur nombre et leur nature ; ainsi que les contacts mécaniques entre l'outil et le substrat.

Le  $\mu$ C2 prend en charge les modules suivants :

- **Module de génération des décharges électriques** pendant la phase de  $\mu$ EE ;
- **Pilotage de l'actuateur piézoélectrique**

Trois interfaces permanentes avec l'Ordinateur Machine permettent de gérer les paramètres liés à la machine (section 3.3), les paramètres liés à la géométrie des pièces à usiner ainsi que le retour d'information pendant et après l'usinage (section 3.3.3.1). Des interfaces sont prévues pour la programmation in situ des  $\mu\text{C}$  via l'ordinateur portable qui n'est mis en place que lors des changements des logiciels des  $\mu\text{C}$ s. Notons que le logiciel de l'Ordinateur Central a été développé sous LabView tandis que le logiciel des  $\mu\text{C}$  a été développé en langage C.

Un point important est que tous les ports du  $\mu\text{C}1$  étant occupés, nous avons été obligé de procéder à des choix techniques (notamment sur l'intercommunication entre  $\mu\text{C}1$  et  $\mu\text{C}2$ ), qui induiront des limites dans le processus.

### 3.3 Description des modules de la commande électronique

Avant d'aborder en détail le fonctionnement, élément par élément, de la Commande Électronique, nous décrivons ci-dessous le fonctionnement des modules périphériques aux  $\mu\text{C}$ .

#### 3.3.1 Module de pilotage des moteurs pas à pas.

La machine comporte trois axes de translation avec des moteurs pas à pas bipolaires. Pour piloter les moteurs, nous avons développé une carte électronique sur la base du couple L297/L298 comme décrit ci-dessous. Notons qu'un interrupteur manuel permet de travailler en mode demi-pas ( $1,25 \mu\text{m}$ ) ou pas entier ( $2,5 \mu\text{m}$ ). **Le principal intérêt de ce développement est qu'en cas de contact mécanique électrode-pièce, la chaîne de commande électronique  $\mu\text{C}$ /moteur sera très courte. Il sera possible de stopper rapidement le mouvement des axes et de remonter l'électrode.** Avec le  $\mu\text{C}$  ATmega162 fonctionnant à 16 MHz, il faut 1 cycle d'instruction pour détecter un contact via une interruption, surveiller les décharges et déclencher l'arrêt du moteur, soit environ  $4 \mu\text{s}$ .

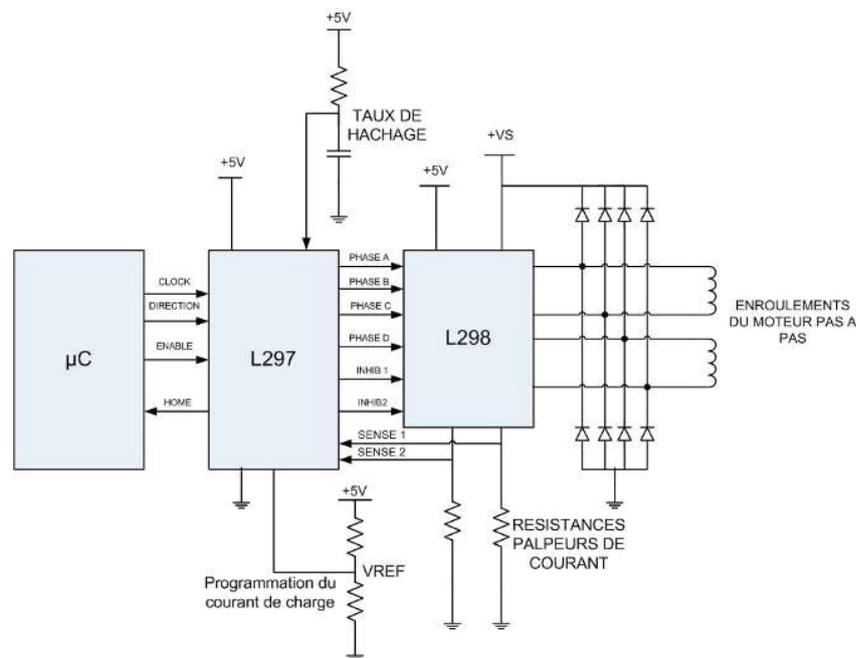


Figure 78 - Schéma de principe de la carte de commande d'un moteur pas à pas

### 3.3.2 Module de génération des microdécharges.

#### 3.3.2.1 Introduction

Il s'agit ici du cœur du système et il nous paraît nécessaire de développer cette question de manière détaillée. Le principe du générateur de Lazarenko [8] ou générateur à relaxation consiste à charger en permanence par une source de tension (**tension d'usinage**  $U_c$ ) une capacité (**capacité de travail**  $C_c$ ) à travers une résistance (**résistance de charge**  $R_c$ ) : l'électrode et la pièce sont connectées<sup>19</sup> aux bornes du condensateur de sorte que la décharge se produit quand la valeur de l'entrefer est suffisamment faible (Figure 79). La capacité est immédiatement rechargée par la source de tension de sorte qu'une deuxième décharge peut se produire si les conditions d'usinage (valeur de l'entrefer, qualité du diélectrique...) le permettent. On aboutit ainsi à un train de décharges qu'il est possible d'entretenir en fonction des circonstances expérimentales.

La Figure 79 montre à titre d'exemple une série de décharges réalisées avec la machine. Notons que la recharge de la capacité de travail est effectuée avec une constante de temps proportionnelle à  $R_c C_c$  tandis que la décharge par étincelage est beaucoup plus rapide. Celle-ci, visible à la Figure 79, illustre l'allure de la tension électrode-pièce observée.

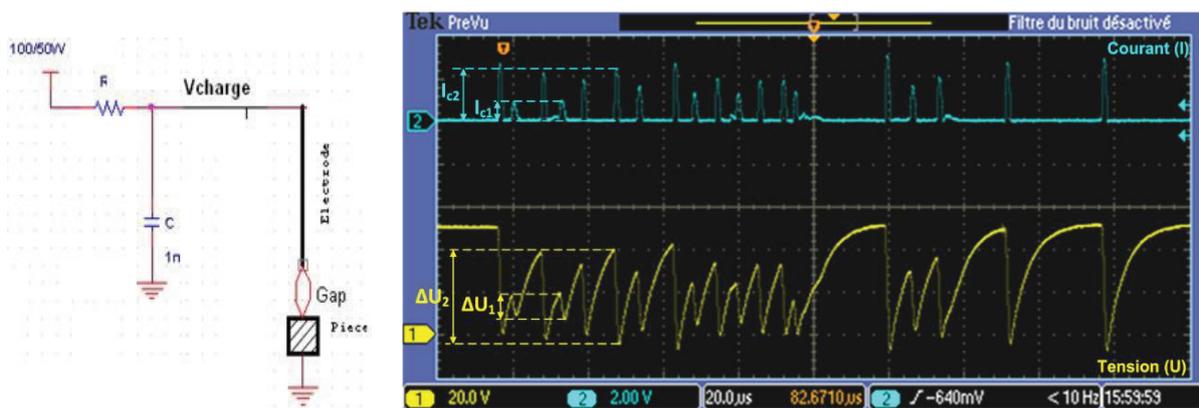


Figure 79 - Principe du générateur à relaxation ou générateur Lazarenko.

Évolution de la tension et du courant électrode/pièce pour une tension d'usinage de 50 V et une résistance de 100  $\Omega$  (électrode de tungstène de 250  $\mu\text{m}$  de diamètre).

Pour l'instant, à notre connaissance, il n'y a pas vraiment d'alternative à ce générateur dans le domaine de la micro-électroérosion. En effet, utiliser un système à transistors impliquerait la mise en œuvre des composants électroniques très rapides, à la limite de l'état de l'art en électronique, pour générer les décharges et réguler la valeur de l'entrefer. À notre connaissance, seul Han et al. a rapporté un tel développement dans le cas de la micro-électroérosion à fil [74] et non pas du fraisage.

<sup>19</sup> Nous avons prévu de changer la polarité de l'usinage par  $\mu\text{EE}$  à l'aide d'un inverseur manuel. Par convention, en **mode d'usinage direct**, l'outil est au potentiel de référence bas et la pièce est au potentiel d'usinage (positif). En **mode d'usinage inverse**, l'outil est au potentiel d'usinage haut et la pièce est au potentiel de référence bas.

### 3.3.2.2 Principe de base

Notre approche est de développer un générateur basé sur une amélioration du générateur Lazarenko. L'idée est de contrôler les décharges par microcontrôleur : le circuit RC ne sera plus alimenté en permanence. Comme le montre la Figure 80, la charge et la décharge de  $C_c$  seront commandées, respectivement, pendant les durées  $T_{ON}$  et  $T_{OFF}$  par des commutateurs de type MOS. Nous chercherons ainsi à mieux contrôler le nombre de décharges. Pendant la durée  $T_{ON}$ , plusieurs décharges pourront être créées mais le nombre maximum de décharges possibles pourra être ajusté en jouant sur le rapport de la durée  $T_{ON}$  et de la constante de temps de charge  $R_C C_c$  du condensateur. Enfin, le paramètre  $T_{OFF}$  permettra de « régler » le rythme des décharges avec la vitesse d'avancée des moteurs. Le  $\mu C$  devra gérer  $T_{ON}$ ,  $T_{OFF}$  et le rapport cyclique  $T_{ON}/(T_{ON}+T_{OFF})$ .

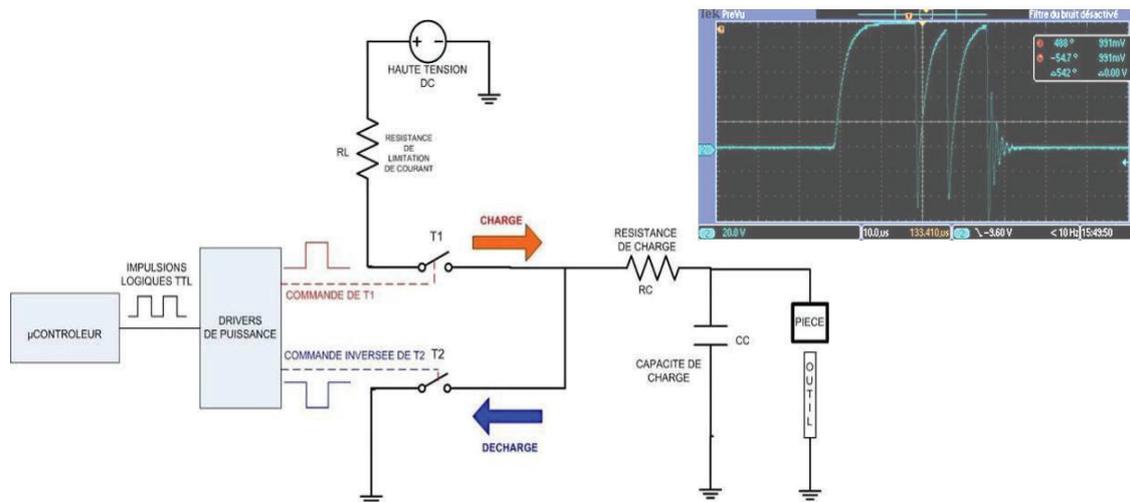


Figure 80 - Schématisation de l'électronique du générateur de Lazarenko modifié.

Pour usiner à haute résolution, a priori, il est nécessaire de travailler à la tension d'usinage la plus basse possible (quelques volts) et de réduire autant que possible la capacité de travail  $C_c$ . Par contre, pour usiner la matière rapidement en phase d'ébauche, il convient aussi de pouvoir utiliser des capacités de travail élevées ( $1\mu F$  et plus) et des tensions d'usinages importantes (jusqu'à 150 V).

Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que l'électrode est en mouvement. Ainsi, lorsqu'il y a un contact mécanique entre l'électrode et la pièce dans l'état « T1 fermé / T2 ouvert », la capacité de travail  $C_c$  est alors déchargée, ce qui peut être détecté par électronique. Le courant qui passe dans l'électrode (très fine) est alors limité par la résistance totale  $R_L+R_C$  et il est nécessaire de déclencher un ordre rapide de dégagement de l'électrode. Par contre en cas de contact dans l'état « T1 fermé / T2 ouvert », la tension de la capacité de travail est inchangée et nous verrons qu'un dispositif électronique auxiliaire sera nécessaire pour détecter le contact (cf. section 0). Ce dispositif nécessitera la mise en place d'une tension de polarisation de l'électrode, qui bien que de faible valeur (quelques volts) pourra déclencher des décharges « intempestives ».

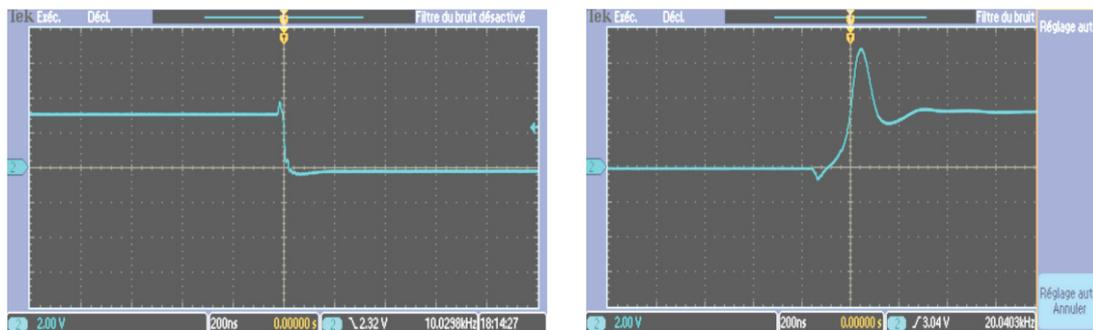
Si nous prenons comme valeurs courantes de travail pour  $C_c$  et  $U_c$ , respectivement 1 à 10 nF et 30 V, il apparaît que la somme des résistances ( $R_L+R_C$ ) doit être de l'ordre de 150  $\Omega$  pour limiter le courant de court-circuit à 0,2 A. Ainsi,  $R_C$  est de l'ordre de 100  $\Omega$  et la constante de temps de la charge de la capacité de travail est donc réglable de 150 ns à 1,5  $\mu s$ . Il est donc nécessaire que la durée de commutation des composants T1 et T2 soit nettement inférieure à 150 ns.

Par ailleurs, le courant commuté peut atteindre 3 A lorsque T1 et T2 sont passants (pour des valeurs de  $U_E$  et  $R_L$  respectivement de 150 V et 50  $\Omega$ ). En effet à chaque commutation le dispositif présente au moins brièvement l'état (théoriquement) interdit « T1 ouvert / T2 ouvert ». Comme nous le verrons plus loin, cette valeur de courant peut être beaucoup plus élevée en régime transitoire.

Nous allons maintenant décrire la solution retenue pour le couple de commutateurs de puissance (T1+T2) et leur driver associé.

### 3.3.2.3 *Choix des composants*

Pour notre application, nous avons choisi comme interrupteurs des transistors à effet de champ **MOSFET de puissance à canal N** de type **IRF840**. Ces composants présentent, en effet, des temps de montée et de descente d'environ 20 ns comme montré à la Figure 29. Ils sont capables de supporter des tensions et des courants élevés (500V - 8 A) avec des pics de courant importants (jusqu'à 32A). Ils ont été choisis aussi pour leur faible capacité d'entrée (1,2 nF) à la fréquence de travail de 1 MHz.



**Figure 81 - Temps de descente et de montée du MOS IRF840.**

Le temps de descente du MOS IRF840 est 1/10 de l'échelle (200 ns) soit 20 ns. La vitesse de commutation est donc suffisante.

Pour la commande des transistors, nous utiliserons des drivers spécialisés. On rappelle qu'un MOS est commandé en tension. En régime statique, l'impédance d'entrée est très grande ce qui implique un courant de grille quasiment nul. Par contre en régime dynamique, lors des phases de commutation, la grille possède une capacité parasite CISS qu'il faut charger et décharger rapidement. Pour piloter la grille, nous utiliserons un driver capable de générer un courant important pendant un bref instant à une charge faible. Ainsi, nous choisirons comme driver des circuits TC4429 capables de fournir un courant maximal de 6 A avec des temps de montée et de descente de 25 ns dans une gamme de tension d'alimentation de 4,5 à 18 V. Ce composant assurera ainsi l'interface entre la sortie logique du  $\mu C$  et le MOS de puissance.

Le schéma de principe finalement retenu pour le générateur de décharges est un pont de transistors (Figure 82). La commande du MOS bas T2 est assurée par un TC4429 directement relié au  $\mu C$ . Par contre la commande du MOS T1 est plus complexe car ce MOS n'est pas référencé par rapport au point de référence bas GND2 commun à tout le dispositif mais au drain de T2<sup>20</sup>. Or le potentiel du drain de T2 varie de 0 V à  $U_C$  et doit donc être considéré comme un potentiel flottant. Il

<sup>20</sup> Malencontreusement appelé GND1 sur nos schémas : l'appellation GND1 ne signifiant pas la masse !

est donc nécessaire de piloter la tension de grille de T1 par rapport à ce point. Pour ce faire, la solution retenue consiste à :

- utiliser un autre driver TC4429 relié au  $\mu\text{C}$  par un optocoupleur 6N137 de façon à assurer un isolement galvanique ;
- référencer les alimentations VCC1 et VDD1 du TC4429 et du 6N137 par rapport au point flottant GND1.

A tout moment, ces alimentations doivent pouvoir assurer la polarisation de la partie du pont et ce quelle que soit la valeur de GND1 entre 0 V et  $U_c$ . Elles doivent être capables de suivre la variation rapide de ce potentiel et « d'encaisser » les variations nécessaires. Dans le cas contraire, le dispositif ne fonctionne pas correctement.

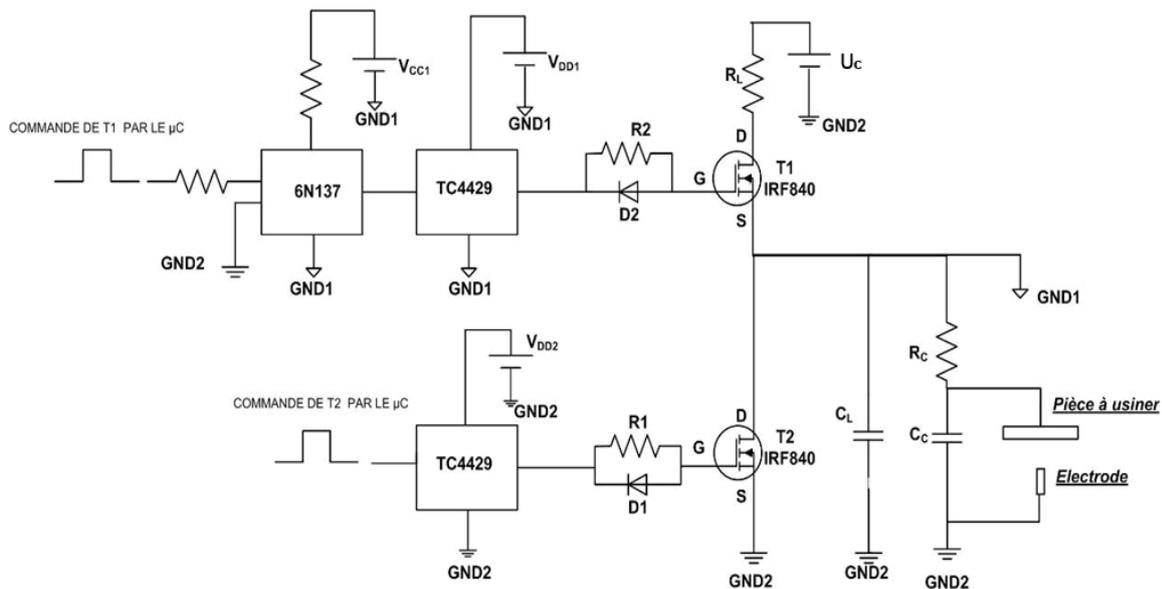


Figure 82 - Schéma de principe du générateur de décharges de 2<sup>nd</sup> génération

### 3.3.2.4 Fonctionnement lors de l'usinage

En l'absence de décharges, ce qui précède est illustré par la Figure 83 qui montre la valeur de la tension aux bornes de la capacité de travail, la valeur du potentiel « flottant » GND1 et le courant délivré.

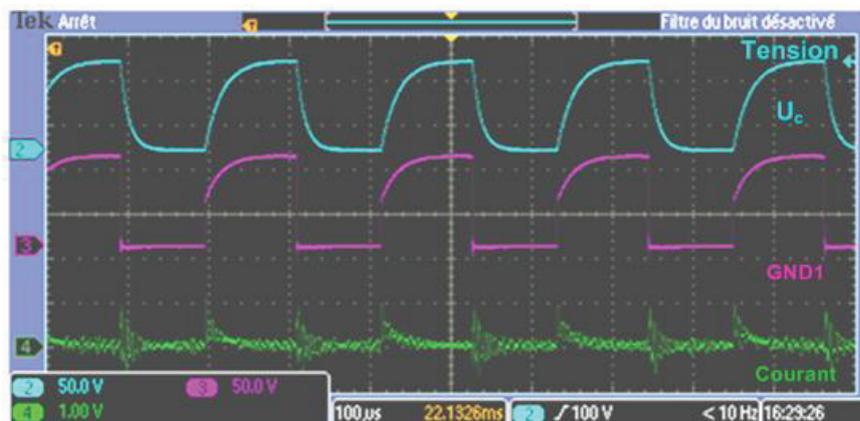


Figure 83 - Signal  $T_{ON}/T_{OFF}$  en l'absence de décharges.

Lorsqu'il y a une décharge (pendant la phase  $T_{ON}$ ) on observe sur la Figure 84, un écroulement très rapide à du potentiel flottant GND1 à 0 V et donc de la tension  $U_C$  aux bornes de la capacité de charge  $C_C$ .

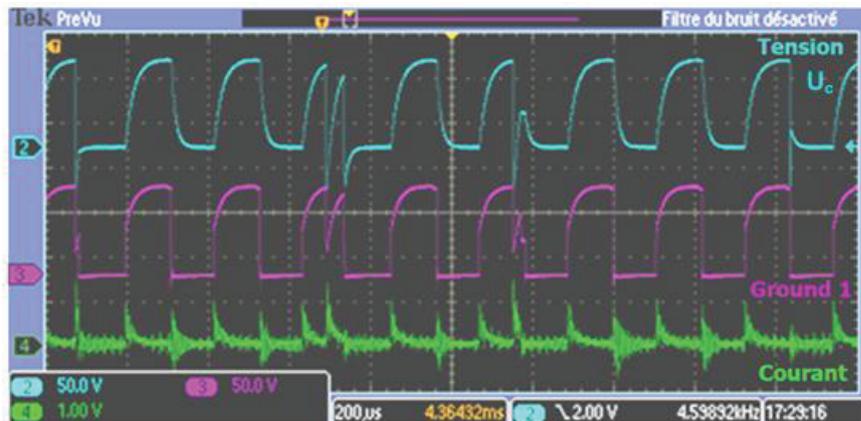


Figure 84 - Observation de décharges pendant le  $T_{ON}$ .

La Figure 85 montre une situation plus complexe avec 1, 2 ou 3 décharges par  $T_{ON}$  (fonction de la valeur de l'entrefer qui varie constamment et de la qualité du diélectrique) On remarque aussi que des contacts outil-pièce apparaissent et se manifestent par un passage à 0 V de la tension d'usage  $U_C$ . On verra ci-dessous qu'un dispositif est prévu pour détecter ce contact et faire remonter l'électrode ; la durée du contact est alors fixée par les paramètres électroniques et la motorisation.

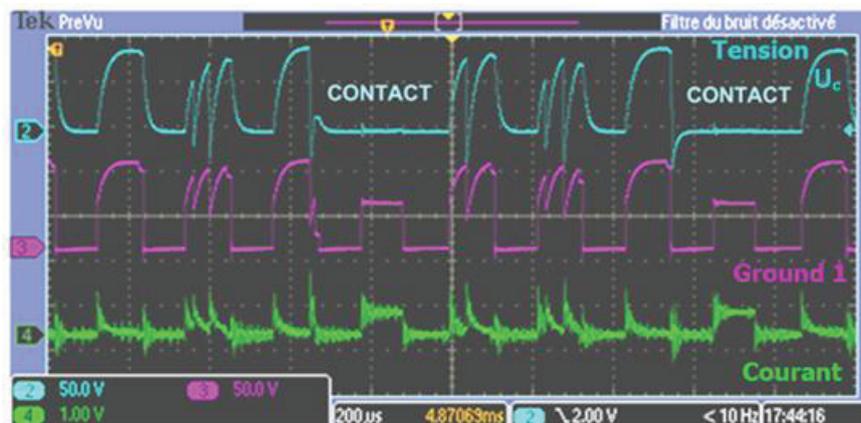


Figure 85 - Observation de décharges et de contacts électrode-pièce.

Toujours sur la Figure 85, si l'on observe de plus près la tension entre électrode et la pièce pendant une décharge, on constate que la décharge est effectuée en 400 ns et que les pics de courant sont d'environ 1 A (cf. chapitre 4).

### 3.3.2.5 Réalisation du dispositif

Concrètement l'opérateur fixe les valeurs de la capacité et de la résistance de travail à l'aide de boutons rotatifs disposés sur la face avant de l'armoire pour :

- Générer des décharges individuelles plus ou moins puissantes à fonction du matériau à usiner et de la phase d'usinage (ébauche ou finition) en faisant varier  $U_C$  et  $C_C$  ;
- Limiter le nombre de décharges par  $T_{ON}$  en jouant sur le rapport  $T_{ON} / R_C C_C$  ;

- Limiter le courant dans le générateur à l'aide  $R_L$  en fonction de la tension d'usinage ; cette résistance limite le courant quand les MOS T1 et T2 sont (brièvement) passants en même temps pendant les phases de commutation ;
- Limiter le courant du contact mécanique entre pièce et électrode à travers la résistance  $R_C$ .

$C_C$  peut ainsi être choisi entre 9 valeurs possibles : 0,1 nF ; 0,47 nF ; 1nF ; 4.7 nF ; 15 nF ; 33 nF ; 100 nF ; 330 nF et 1000 nF. Pour  $R_C$ , les valeurs sont les suivantes : 50  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 200  $\Omega$ , 500  $\Omega$  et 1 K $\Omega$ . Les valeurs de  $R_L$  possibles sont les suivantes : 50  $\Omega$ , 100  $\Omega$  et 200  $\Omega$ . Mais par sécurité, l'opérateur n'a pas le libre choix de  $R_L$  : la sélection de  $R_C$  par l'opérateur entraîne, par liaison mécanique, la mise d'une valeur de  $R_L$  suffisante pour éviter la surchauffe des composants. Pour ce faire la valeur de  $R_C$  sera toujours supérieure ou égale à la valeur de la résistance  $R_L$ .

A noter que la capacité  $C_C$  se charge à travers  $(R_L+R_C)$  d'où un temps de montée proportionnel à  $(R_L + R_C)C_C$  pour la tension aux bornes de capacité de travail ; le nombre de décharges par  $T_{ON}$  est donc en réalité limité par le rapport :

$$n_{décharge} \leq \frac{T_{ON}}{(R_C + R_L)C_C}$$

Le courant maximum qui passe dans l'électrode est donc précisément :  $I_{max} = \frac{U_C}{R_L + R_C}$ .

### 3.3.2.6 Conclusion

Un circuit de commutation piloté par microcontrôleur a donc été intégré dans le générateur de Lazarenko. Ce dispositif permet de faire varier l'énergie pendant le processus d'étincelage en jouant sur la valeur de la haute tension  $U_C$  (3 à 150 V), la valeur de la résistance de charge  $R_C$ , du condensateur de charge  $C_C$  (0,1 nF à 1  $\mu$ F) et du rapport cyclique  $T_{ON}/(T_{ON}+T_{OFF})$ .

A titre d'exemple, pour une tension d'usinage  $U_C$  de 100 V, nous avons pu ainsi obtenir des microdécharges d'une énergie théorique de 4.5  $\mu$ J (correspondant à  $\frac{1}{2} C_C U_C^2$ ) avec des impulsions de courant plasma d'une durée de 80 ns à 2500 ns dans une gamme de fréquence allant de 10 kHz à 100 kHz ( $I_{max} = 1A$ ).

### 3.3.3 Module de caractérisation des microdécharges.

#### 3.3.3.1 Principe de la caractérisation en ligne des microdécharges

Pour gérer les déplacements de l'outil et réguler la valeur de l'entrefer, il est nécessaire de :

- détecter en ligne l'occurrence des décharges et de les compter
- détecter un contact mécanique entre l'électrode (très fragile) et le substrat, ce qui permettra de stopper le mouvement de l'électrode et déclencher sa remontée.

Le principe de base de la caractérisation consiste à suivre la d.d.p aux bornes de la capacité de travail et à discriminer les différents événements à l'aide de comparateurs (Figure 86). Pour cela la sortie des comparateurs est reliée au  $\mu C1$ , qui sera chargé de traiter les événements pour action ultérieure et aussi de quantifier leur occurrence. Comme cette d.d.p varie entre 0 et 150 V, le signal est atténué avec un pont diviseur de tension<sup>21</sup> de rapport réglable par l'opérateur pour être ensuite transmis aux comparateurs via un suiveur rapide. L'apparition de décharges négatives, avec une chute de tension passant en-dessous de 0 V nous a contraints à ajouter un seuil de détection de décharges « négatives ».

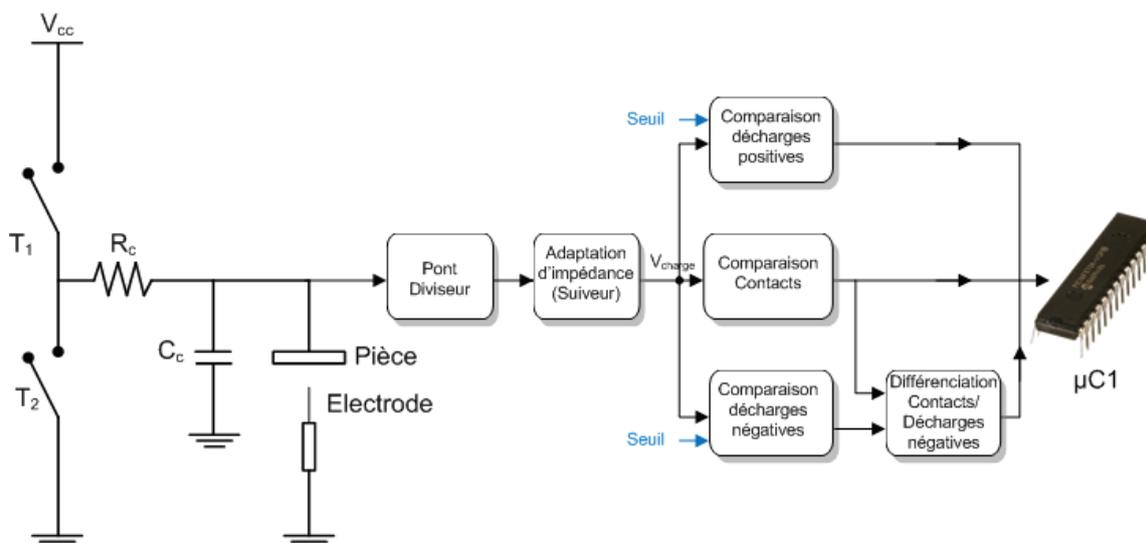


Figure 86 - Principe de la caractérisation des microdécharges électriques.

#### 3.3.3.2 Mode de réalisation

La solution retenue est montrée à la Figure 87. Le signal de sortie du suiveur ( $V_{Charge}$ ) est envoyé vers trois comparateurs rapides LM311 en parallèle à collecteur ouvert pour effectuer les caractérisations suivantes : détection d'une décharge positive (comparateur U2), détection d'une décharge négative (comparateur U4) et détection d'un contact éventuel (comparateur U3).

<sup>21</sup> Il faut tenir compte de la résistance équivalente  $R_{eq}$  du pont diviseur dans l'analyse du fonctionnement globale de la machine : dans la configuration « T1 ouvert et T2 fermé », la capacité de travail se décharge via la résistance  $R_{eq} // RC$

D'un point de vue pratique, les seuils de basculement des comparateurs sont réglés par l'opérateur, via l'Ordinateur Machine et une interface LabView, sur la base d'essais expérimentaux :

- Le seuil de comparaison pour décharge positive est réglé le plus près possible de la tension d'usinage (compte tenu du facteur d'atténuation du pont diviseur) ;
- Le seuil de contact est proche de 0 V mais à une valeur positive ;
- Le seuil de comparaison pour décharge négative est fixé en dessous de 0 V car la valeur des décharges négatives varie dans une large gamme.

Les sorties des comparateurs sont connectées à des entrées d'interruption du  $\mu C1$ , valides sur front descendant, dont la routine incrémente un compteur. Pour le comptage des décharges, avant d'incrémenter les compteurs, le  $\mu C1$  vérifie si le  $T_{ON}$  est activé. Lors d'un contact, la routine consiste à commander le moteur Z dans le sens ascendant (voir figure ci-dessous), si l'impulsion à une durée supérieure à  $4 \mu s$  et si le  $T_{ON}$  est activé. **En conséquence, pour que le  $\mu C1$  tienne compte d'un contact mécanique, il faut que la durée du contact soit supérieure à  $4 \mu s$ . Avec ce principe, le  $\mu C1$  ne peut pas « voir » les contacts pendant la période  $T_{OFF}$ .**

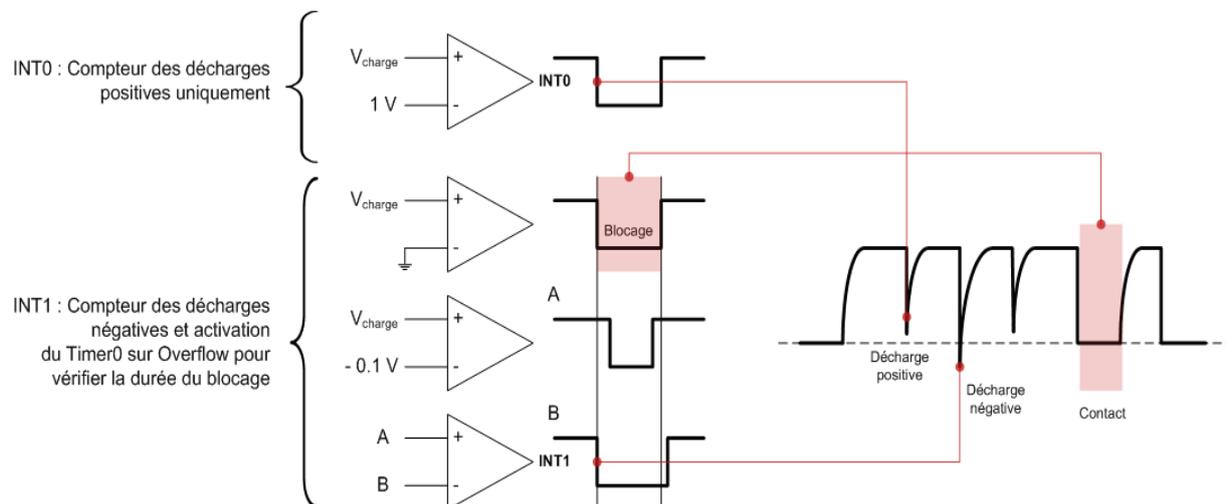


Figure 87 - Comptage des décharges positives, négatives et détection de contact par le  $\mu C1$ .

Un inconvénient de ce qui précède est que **toute décharge négative entraînera aussi le basculement du comparateur U3 chargé de détecter les contacts.**

Lors de l'occurrence d'un contact, il conviendra donc de vérifier s'il ne s'agit pas d'une décharge négative. On ajoutera donc une condition sur la durée du basculement d'U3 en partant du principe qu'une décharge négative est toujours de durée plus courte qu'un contact mécanique. Un contact mécanique sera validé par le  $\mu C1$  si U3 bascule pendant au moins  $4 \mu s$ <sup>22</sup>,

Par ailleurs le comptage des décharges négatives est complexe : une **décharge négative entraînera aussi le basculement du comparateur de détection des contacts** lorsque la d.d.p. aux bornes de la capacité de travail franchira le seuil de détection des contacts.

<sup>22</sup> Ce qui aura des conséquences pratiques importantes pour cette version de machine :  $T_{ON}$  ne pourra pas être inférieur à  $4 \mu s$  ; un contact mécanique pourra entraîner le passage d'un courant pendant au plus  $4 \mu s$  (faire le calcul de la puissance dissipée pour une électrode très fine).

Enfin, il faut noter que le comparateur U3 ne pourra pas détecter de contact pendant la période  $T_{OFF}$  puisqu'il n'y a pas de différence de potentiel entre l'électrode et la pièce. Pour résoudre ce problème, nous avons introduit :

- une diode D1 (Figure 88), qui permet de fixer un potentiel d'environ +3V sur la pièce pendant  $T_{OFF}$  ;

- un sixième comparateur (**U6**) qui permet au  $\mu C$  d'effectuer une scrutation pendant  $T_{OFF}$  : l'image de la tension d'usage ( $V_{CHARG}$  en sortie du suiveur) est comparée à un seuil (proche de 0V), U6 bascule en cas de contact ( $V_{CHARGE}=0V$ ) et ne bascule pas en l'absence de contact ( $V_{CHARGE} = 3V$ ).

La diode n'aura pas d'influence pendant  $T_{ON}$ , si l'on garde une tension d'usage supérieure à 5V car elle sera bloquée. Par contre, pendant les décharges durant  $T_{ON}$ , la tension électrode-pièce variera et ne pourra devenir inférieure à 3 V ou même être négative. Le  $\mu C$  devra donc ne pas tenir compte des sorties du comparateur U6 pendant les phases  $T_{ON}$ .

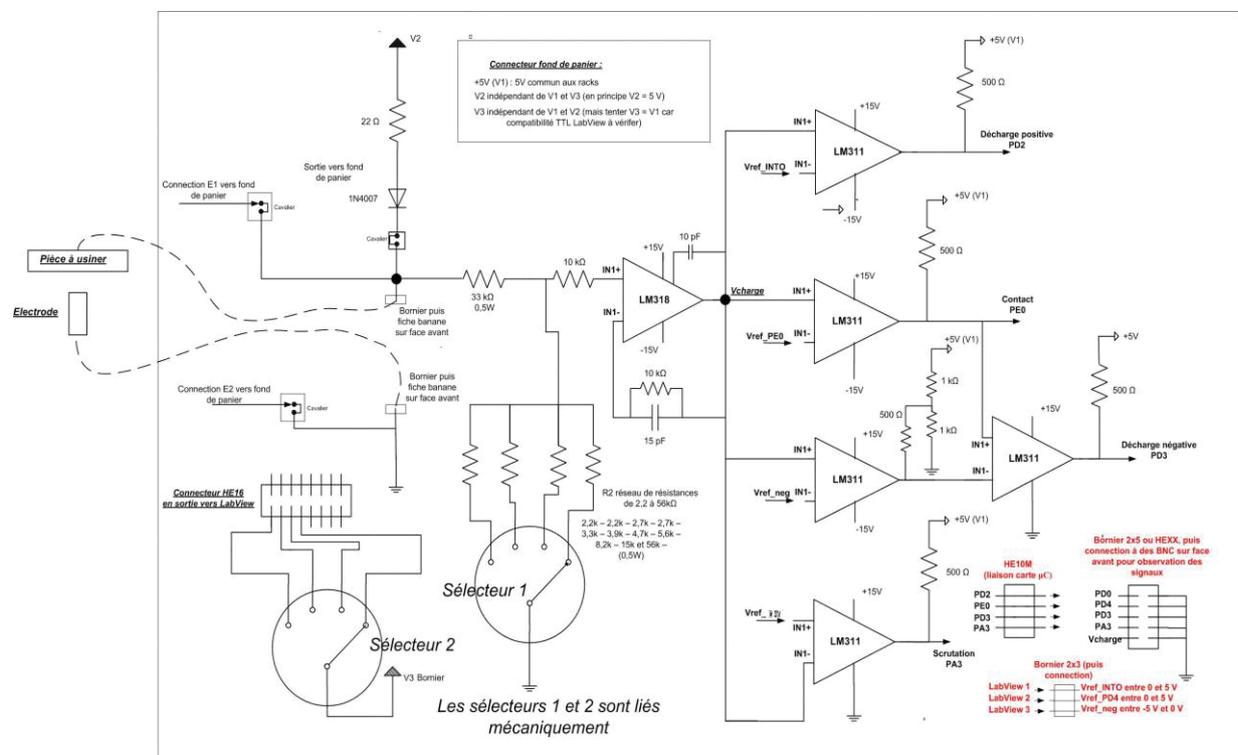


Figure 88 - Schéma de principe de la carte caractérisation.

### 3.3.3.3 Caractérisation du dispositif

#### Détection de décharges positives :

Pour valider le montage précédent, un signal sinusoïdal de fréquence 3,3 KHz et d'amplitude crête à crête 3,4 V est appliqué à l'entrée du montage de la Figure 89 pour simuler une décharge positive. On constate effectivement le basculement de U2 de +5V à 0V quand le sinus est au-dessous du seuil de 500 mV. Le point d'intersection des trois courbes correspond à la valeur du seuil et à l'instant de basculement. A chaque fois que  $V_{charge} < V_{ref\_INT0}$ , la sortie de U2 bascule de 5V à 0V et le  $\mu C$  enregistre donc le front descendant qu'il compte comme une décharge positive.

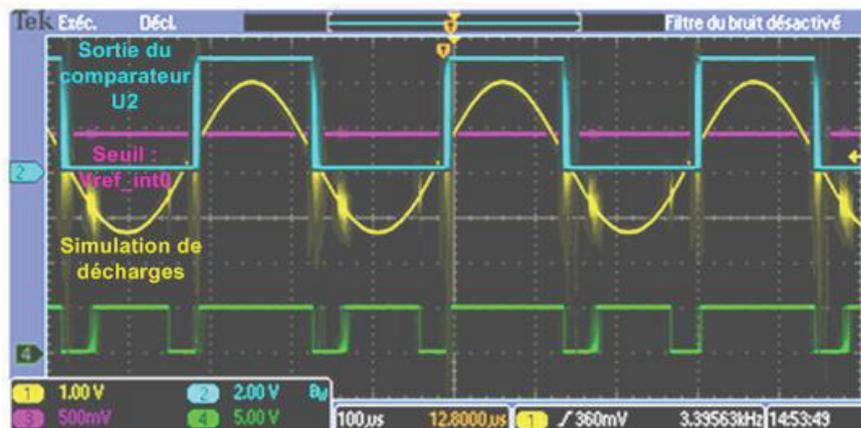


Figure 89 - Sortie d'U2 en fonction du seuil des décharges positives.

#### Détection de CONTACTS :

Un signal sinusoïdal de fréquence 3,3 KHz et d'amplitude crête à crête 3,4 V est appliqué à l'entrée du montage de la Figure 90 pour simuler une décharge positive, négative ou un contact. On a le basculement de la sortie d'U3 de 5 V à 0 V lorsque le sinus passe en dessous d'un seuil proche de 0 V (ici 100 mV). En effet, VCHARGE est comparée à un seuil proche de 0V (appelé ici Vref\_PD4 =0.4V). S'il y a passage à 0V pendant une durée supérieure à 4 µs (pendant le TON) alors le  $\mu C$ , sur son port PE0, déclenche une routine qui commande le moteur Z dans le sens ascendant. Nous verrons en fin de chapitre que ce circuit est limité pour la détection des contacts.

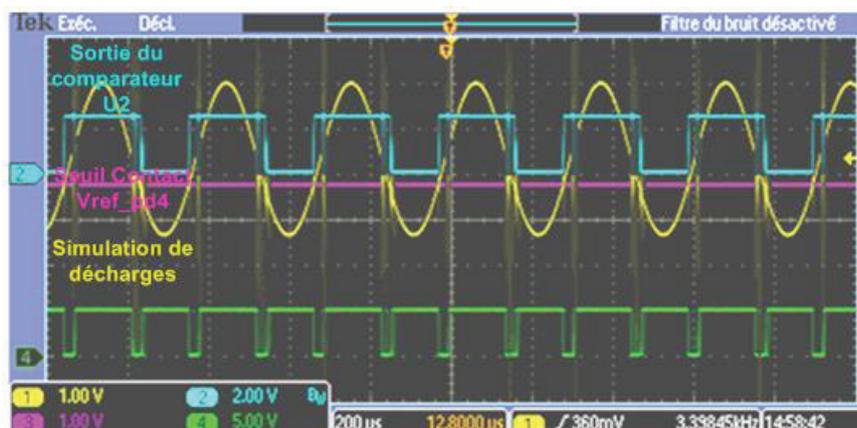


Figure 90 - Sortie d'U3 en fonction du seuil de détection des contacts.

### Détection de décharges négatives

La validation de la détection des décharges négatives est montrée ci-dessous, avec un basculement à 0V du comparateur de décharges négatives seulement lorsque l'on se trouve en dehors de la limite de détection de contact et que la détection de la décharge négative est effective.

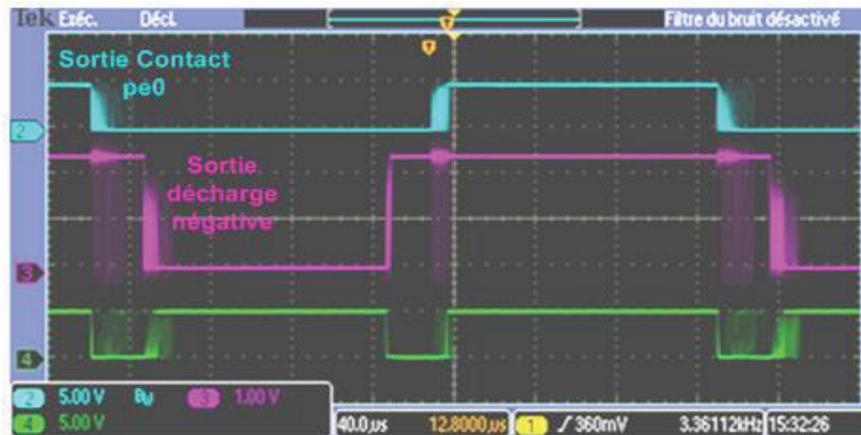


Figure 91 - Observation du signal de détection des décharges négatives (vert).

#### 3.3.3.4 Conclusion

Ainsi, nous avons mis au point un dispositif électronique qui permet de traiter le signal de décharge. Pour cela l'opérateur ajuste un pont diviseur en fonction de la tension d'usage afin de protéger les blocs électroniques en amont (ajustement qui pourra être automatisé ultérieurement). Le signal utile est ensuite adapté en impédance par un suiveur de façon à envoyer l'image de la tension d'usage  $V_{CHARGE}$  à un ensemble de comparateurs en parallèle. Il est important de remarquer aussi la présence de la diode D1 (Figure 88) qui permet la détection des contacts pendant le  $T_{OFF}$ . Les seuils de comparaison sont fixés par l'opérateur pour détecter les contacts et compter les décharges positives et négatives. Toute détection d'un contact par le  $\mu C$  entraînera le relèvement immédiat de l'électrode pour la protéger. La rapidité de la réponse du montage est donc importante et les composants ont été choisis en conséquence. A titre d'exemple, le temps de réponse du système est typiquement de l'ordre de 4  $\mu s$ , ce qui en fait un système à réaction rapide mais surtout possédant l'avantage de fournir les signaux de contrôle sous forme numérique.

#### 3.3.4 Commande du système par microcontrôleurs

##### 3.3.4.1 Vue générale

La Figure 92 montre une vue d'ensemble du dispositif autour duquel sont articulés tous les développements précédents. Le dispositif est basé sur deux  $\mu C$  AVR ATmega162 de la société ATMEL. Nous avons travaillé avec ce microcontrôleur pour des raisons « historiques » au laboratoire. Ce  $\mu C$  est doté d'une architecture de type RISC. Il peut être programmé avec le protocole SPI (SCK, MOSI, MISO) avec un programmeur ISP (In System Programmable) via une carte de programmation STK500. Contrairement aux  $\mu C$  d'autres constructeurs (PIC, INTEL 8051...), l'ATmega162 peut exécuter une instruction en un seul cycle d'horloge. Il est doté de 40 broches et embarque :

- un microprocesseur 8-bit en technologie CMOS avec une fréquence d'horloge de 16 MHz ; sa capacité est de 16 MIPS : de ce fait, s'il est cadencé à 16 MHz il sera capable d'exécuter 16 millions d'instruction par seconde ;
- 16 Kbytes de mémoire FLASH programmable en modalité ISP avec au minimum 1000 cycles d'écriture et d'effacement pour le programme ; concrètement, dans notre application, le fichier exécutable généré sera transféré dans la mémoire FLASH.

L'outil de développement AVR Studio fourni par ATMEL intègre un compilateur « Win AVR » ou « GNU AVR » qui permet de développer des applications en C ou en assembleur.

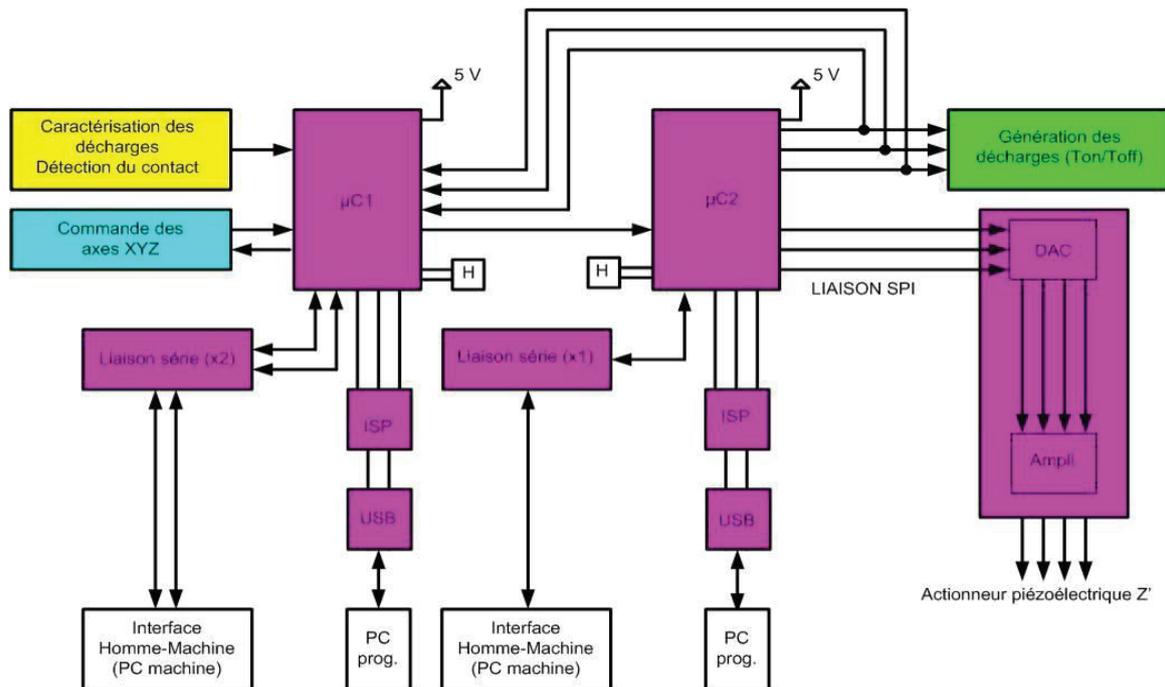


Figure 92 - Vue générale du cœur de la machine avec 2 microcontrôleurs.

Le  $\mu C1$  est chargé en permanence de :

- (1) piloter les axes de déplacement X, Y et Z à l'aide des trois cartes de commande de moteurs pas à pas décrites dans la section Module de pilotage des moteurs pas à pas.
- (2) caractériser les décharges en lien avec la carte caractérisation décrite ci-dessus, c'est-à-dire :
  - compter le nombre de décharges positives et de décharges négatives,
  - détecter et compter tout contact mécanique entre l'électrode et le substrat. A chaque contact, le  $\mu C$  commande la remontée du moteur Z pour éviter de détériorer l'électrode.

Pour piloter la machine avec un seul  $\mu C$ , en l'occurrence le  $\mu C1$ , il aurait été nécessaire que ce  $\mu C$  soit capable de générer les impulsions nécessaires en parallèle des actions (1) et (2). Toutes les sorties et les entrées d'interruptions du  $\mu C1$  ayant été utilisées, **nous avons décidé d'ajouter le  $\mu C2$  au dispositif**. Celui-ci est chargé de :

- (3) générer les signaux de commande de la carte  $T_{ON}/T_{OFF}$  décrite dans la section 0 ;
- (4) commander le mouvement de l'actionneur piézoélectrique Z'.

Le développement du logiciel est effectué en langage C et la programmation des  $\mu C$  est effectuée en mode ISP (Programmation in situ) par liaison USB à partir de l'Ordinateur Portable (avec une liaison USB par  $\mu C$  comme expliqué en Figure 92). Ces liaisons ne servent qu'une fois par variante des

programmes internes aux  $\mu\text{C}$  ; elles sont donc non permanentes. Par ailleurs, des liaisons série permanentes servent d'Interface Homme Machine (IHM) en reliant les  $\mu\text{C}$  au PC Machine. Elles transmettent à la machine :

- le parcours d'outil : déplacement et vitesse des moteurs ;
- les paramètres nécessaires pendant une opération d'usinage :
  - les valeurs de  $T_{\text{ON}}$ ,  $T_{\text{OFF}}$  ;
  - dans le futur : tension d'usinage ;
  - les paramètres de régulation :
    - position de l'actionneur piézoélectrique  $Z'$  ;
    - dans le futur, position des actionneurs piézoélectriques  $X'$ ,  $Z'$ .

En retour, des données sont transmises de la machine au PC fixe, elles concernent :

- l'usinage effectué : nombre de décharges et nombre de contacts.

Si l'on revient à la Figure 60, on dispose donc de :

- 2 liaisons série pour le  $\mu\text{C1}$  pour :
  - l'émission par le logiciel du PC du parcours d'usinage (qui sera exécuté en ligne) et la réception des données liées à la caractérisation, ce qui constituera le mode normal de travail ;
  - l'émission/réception des mêmes données avec l'HyperTerminal en mode de débogage (avec exécution en ligne des commandes).
- 1 liaison série pour le  $\mu\text{C2}$  de façon à envoyer les commandes liées à la carte  $T_{\text{ON}}/T_{\text{OFF}}$  et piloter la SPI.

#### 3.3.4.2 *Intercommunication entre $\mu\text{C1}$ et $\mu\text{C2}$*

Le  $\mu\text{C2}$  transmet les signaux de temporisation  $T_{\text{ON}}$ ,  $T_{\text{OFF}}$ ,  $T_{\text{DECHARGE}}$  à la carte  $T_{\text{ON}}/T_{\text{OFF}}$  (un connecteur HE10 permet de relier le  $\mu\text{C2}$  à la carte  $T_{\text{ON}}/T_{\text{OFF}}$ ). Ces signaux sont transmis en parallèle au  $\mu\text{C1}$ . Ils lui permettent de compter les décharges et de prendre en considération les contacts uniquement quand  $T_{\text{ON}}$  est activé. Par ailleurs, le  $\mu\text{C1}$  transmet une impulsion à  $\mu\text{C2}$  sur une double entrée (PD2 et PD3) du  $\mu\text{C2}$  où chaque entrée déclenche une interruption dont la routine consiste à commander le piézoélectrique  $Z'$  dans un sens ou dans l'autre.

#### 3.3.5 **Conclusion**

Le prototype que nous avons développé présente la particularité d'avoir été conçu avec des modules élémentaires, tels que le module de génération de microdécharges ou le module de caractérisation. L'intérêt est de pouvoir étudier plus facilement le fonctionnement du processus en évitant un développement de type « boîte noire », où l'accès à l'information est bloqué ou dissimulé.

La principale limitation de cette machine est l'absence de boucle d'asservissement, que nous n'avons pas eu le temps de mettre en place, qui permet de contrôler dynamiquement la largeur de l'entrefer.

Par ailleurs, il n'y a pas d'évaluation de l'énergie transférée au plasma, nos mesures se limitent à contrôler une fenêtre de « tir » avec un rythme d'autorisation de décharge. Il n'y a pas de contrôle actif de la décharge, ni de système de régulation permettant une fréquence de décharge constante. Le circuit n'est donc que « partiellement » satisfaisant mais les améliorations sont en cours au laboratoire.

## 3.4 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux<sup>23</sup> présentés ci-dessous ont été obtenus avec le prototype de machine de  $\mu$ EE. Nous nous intéresserons à la caractérisation des paramètres suivants : gap latéral (cf. section 3.4.1), rugosité après usinage (cf. section 3.4.20), influence de la vitesse d'usinage (cf. section 3.4.3), taux d'enlèvement de matière et aspect des impacts élémentaires (cf. section 3.4.7). Nous validerons aussi le principe de la régénération de l'électrode-outil entre deux usinages (cf. section 3.5) grâce à l'affutage électrochimique des micro-outils.

### 3.4.1 Entrefer latéral lors de l'usinage d'un trou borgne

Lors de l'usinage d'un trou, l'entrefer latéral (Figure 93) correspond à l'écart entre le diamètre du trou et celui du micro-outil (nous verrons dans la section 3.5 la valeur de l'entrefer latéral dans le cas de l'usinage d'une rainure). Le protocole expérimental est le suivant : on commande par le  $\mu$ C le mouvement du moteur Z dans le sens descendant avec une vitesse de  $2,5 \mu\text{m/s}$  (1Hz), la plus lente possible avec notre système. Lorsqu'un contact est détecté, l'électrode remonte d'une distance  $d_1$  de 4 pas, puis redescend d'une distance  $d_2$  de 2 pas, de sorte que l'électrode est surélevée de  $d_1-d_2$  (une distance de sécurité de 2 pas ( $2,5$  ou  $5 \mu\text{m}$  suivant l'utilisation du mode pas ou demi-pas), avant de reprendre l'usinage descendant normal sous un flux d'eau dé-ionisée.

Une électrode de diamètre  $250 \mu\text{m}$  a été utilisée pour réaliser des matrices de trous dans un échantillon d'inox à différentes tensions ( $80 \text{ V}$  à  $50 \text{ V}$ ) avec des capacités de  $22$  et  $100 \text{ nF}$  et un rapport cyclique de  $0,5$  ( $R_c = 100 \Omega$ ,  $T_{\text{ON}}=100 \mu\text{s}/T_{\text{OFF}}= 100 \mu\text{s}$ ).

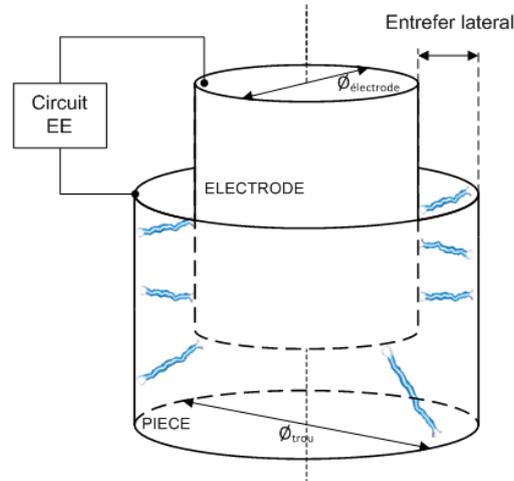


Figure 93 - Schématisation de l'entrefer latéral.

La Figure 94 montre 6 trous non-débouchants dans l'inox observés par microscope optique. La mesure de la largeur des trous est effectuée avec un logiciel de mesure maison.

<sup>23</sup> Les différents moyens de caractérisation à notre disposition sont :

- Profilomètre Veeco Dektak 150.
- Microscope Électronique à Balayage Tescan MIRA3 FEG-SEM.
- Microscope Optique Olympus, modèle BX51M, avec objectif Plan 20x/0.46 + WH10x/22 avec des grossissements de x50, x100, x200.

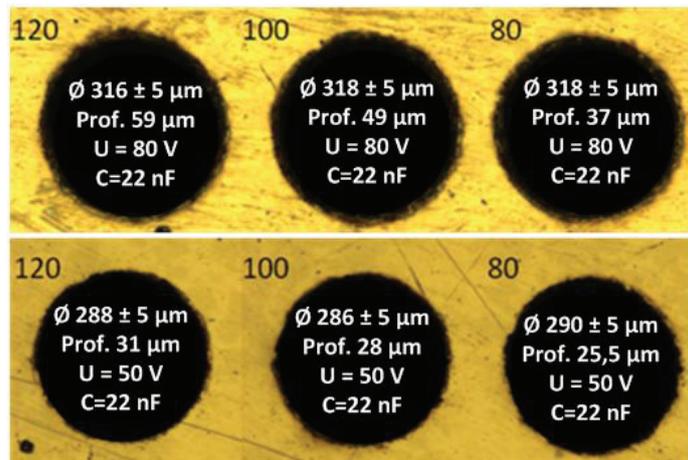


Figure 94 - Réseau de trous non-débouchant dans l'inox pour la mesure de l'entrefer latéral.

La Figure 95 montre l'évolution de l'entrefer latéral en fonction de la tension d'usinage pour les deux valeurs de capacités de travail. De manière générale, on constate que la valeur de l'entrefer diminue avec la tension. L'augmentation de la tension et de la capacité (et donc de l'énergie par décharge) accroît l'écart entre l'électrode et la pièce. La largeur de l'entrefer est comprise entre 20 et 28  $\mu\text{m}$  pour une tension de travail comprise entre 50 et 80 V. L'entrefer passe respectivement de 27 à 22,5  $\mu\text{m}$  pour 100 nF et de 26,5 à 20  $\mu\text{m}$  pour une capacité de 22 nF.

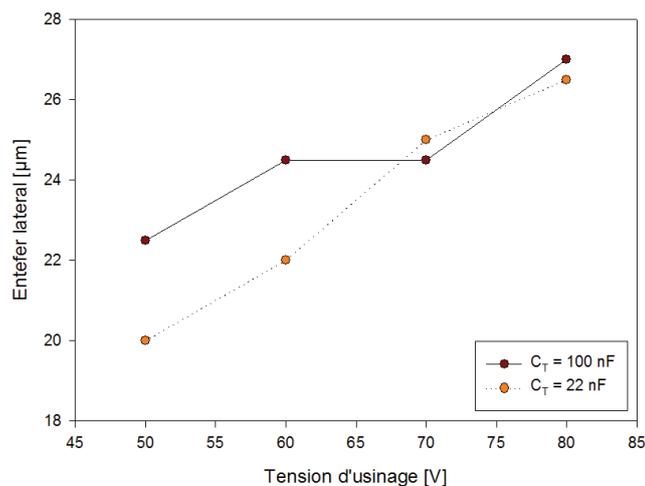


Figure 95 - Evolution de l'entrefer latéral  $\delta$  en fonction de la tension d'usinage.

### 3.4.2 Rugosité d'usinage

Nous avons usiné une série de cavités de dimensions latérales  $600 \times 600 \mu\text{m}$  et de profondeur constante  $30 \mu\text{m}$  à l'aide d'une électrode de diamètre  $125 \mu\text{m}$  sous un flux d'eau dé-ionisée. Une capacité de  $1 \text{ nF}$  est utilisée avec un rapport cyclique de  $0,5$  ( $R_c = 100 \Omega, T_{\text{ON}}=100 \mu\text{s}/T_{\text{OFF}}= 100 \mu\text{s}$ ). L'algorithme de descente n'est pas le même que dans la section précédente puisque l'électrode est amenée au-dessus du substrat **jusqu'à la détection de la première décharge**. Lorsque cette détection a lieu, **le mouvement en Z est arrêté**. On lance ensuite le déplacement du substrat suivant XY à une vitesse constante de  $10 \mu\text{m/s}$  pour un premier passage comme montré à la Figure 96 ci-dessous. Un point important à noter est le recouvrement des passes en X qui est de  $37,5 \mu\text{m}$ . A la fin du premier aller, l'axe Z descend d'une valeur de  $2,5 \mu\text{m}$  et l'outil recommence le parcours en XY, en sens inverse. Lorsque l'axe Z est descendu une dizaine de fois, on passe à la phase de finition du fond

de la cavité en procédant à des séries d'allers-retours (A/R) à vitesse constante en XY en nombre croissant (2, 6, et 10 A/R) sans enfoncement en Z.

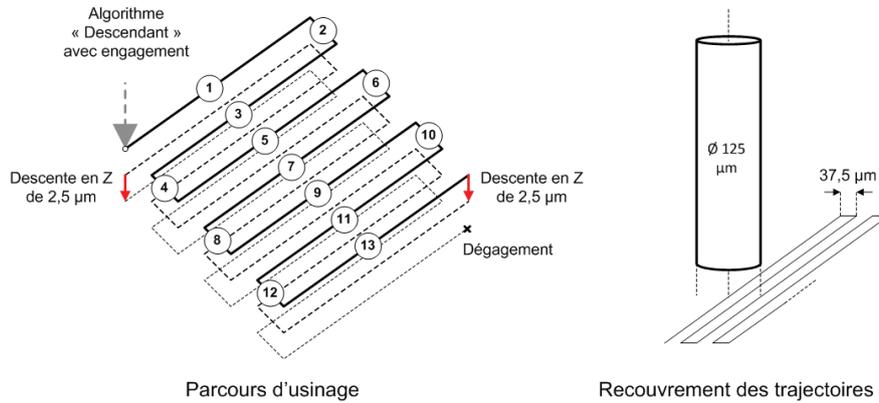


Figure 96 - Parcours d'usinage et recouvrement utilisés pour l'usinage des cavités.

La géométrie de la cavité a été prévue pour laisser passer le palpeur du profilomètre Dektak 150 dont le diamètre d'outil est une pointe pyramidale de largeur au sommet de 2,5  $\mu\text{m}$ . La rugosité  $R_a$  du fond des cavités a été mesurée sur une surface de 100 x 100  $\mu\text{m}$  à l'aide de ce profilomètre.

Le tableau ci-dessous répertorie les rugosités constatées à 80 V, 70 V et 60 V pour un nombre d'A/R de finition de 2, 6 et 10. Le point (70 V, 6 finitions) est sans doute aberrant, probablement à cause d'un défaut sur le substrat apparu lors de l'usinage. Il est important de noter, qu'il serait nécessaire d'accumuler les essais d'usinage pour réduire les sources d'erreur et confirmer les résultats. Les travaux présentés dans la section 3.4 doivent être considérés comme préliminaires.

Néanmoins, avec deux étapes de finition, une diminution de tension (80V à 60V) fait passer le  $R_a$  de 524 nm à 193.32 nm et permet donc d'améliorer nettement l'état de surface. A 80 V, en augmentant le nombre d'étapes de finition de 2 à 10, le  $R_a$  est diminué d'un facteur 4 pour atteindre 130 nm. Enfin, en associant une tension faible de 60 V avec 10 passages de finition, on obtient un **Ra de 86 nm**. Le résultat est comparable aux rugosités des machines commerciales d'EE ( $R_a=50$  nm : cf. Tableau 8). La Figure 98 montre une vue du fond de cette cavité reconstituée à partir des données du profilomètre. En employant une capacité de travail plus faible, il est sans doute possible d'améliorer ce résultat, mais la durée d'usinage sera augmentée.

Rugosité (nm)		Tension (V)		
		80	70	60
Nombre de finitions	2	524.31	353.49	193.32
	6	340.02	369.12	127.35
	10	130.68	220.89	85.99

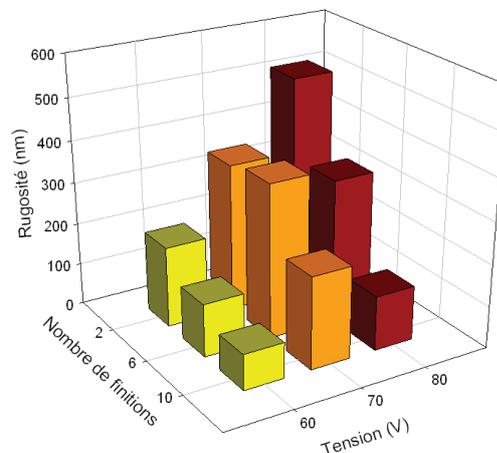


Figure 97 - Rugosités obtenues au fond d'une cavité en fonction des paramètres d'usinage

**Surface Stats:**

Ra: 85.99 nm

Rq: 106.91 nm

Rt: 785.74 nm

**Measurement Info:**

Sampling: 66.67 nm

Array Size: 1500 X 50

Micro Form: No

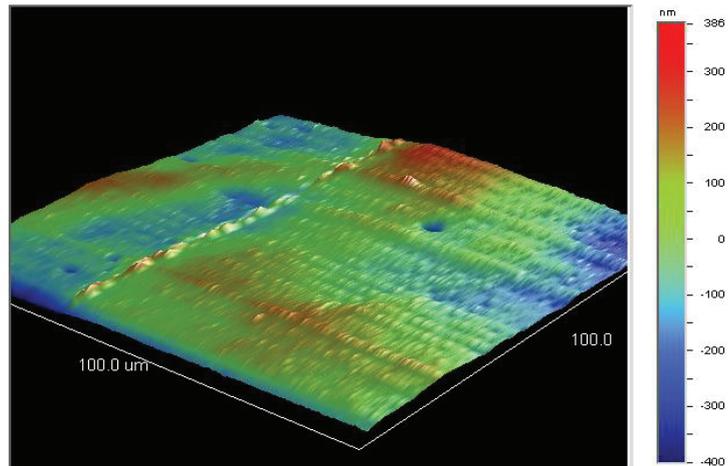


Figure 98 - Profil 3D d'une surface usinée (100\*100 μm).

### 3.4.3 Vitesse d'usinage

Nous avons observé l'influence de la vitesse de déplacement des axes XY sur la largeur des lignes usinées. Pour ce faire, un réseau de lignes a été usiné à vitesse variable avec une électrode de 50 μm de diamètre ; l'usinage a été réalisé sous un flux d'eau dé-ionisée avec une capacité de travail de 1 nF et un rapport cyclique de 0,5 ( $R_c = 100 \Omega$ ,  $T_{ON}=100 \mu s/T_{OFF}=100 \mu s$ ).

Le résultat est montré à la Figure 99. Les canaux usinés avec une vitesse lente (2,5 μm/s ou 12,5 μm/s) ont une largeur de 42 μm alors qu'une vitesse beaucoup plus rapide (250 μm/s) permet de réduire la largeur de canal à 20 μm ; dans ce cas l'état de surface est dégradé. Sur ce dernier parcours, la fréquence de décharge était inhomogène durant le parcours ; l'enlèvement de matière a été parfois très faible, voire nul, révélant des zones quasi intactes (zones claires). L'enlèvement de matière est donc été effectué de manière irrégulière.

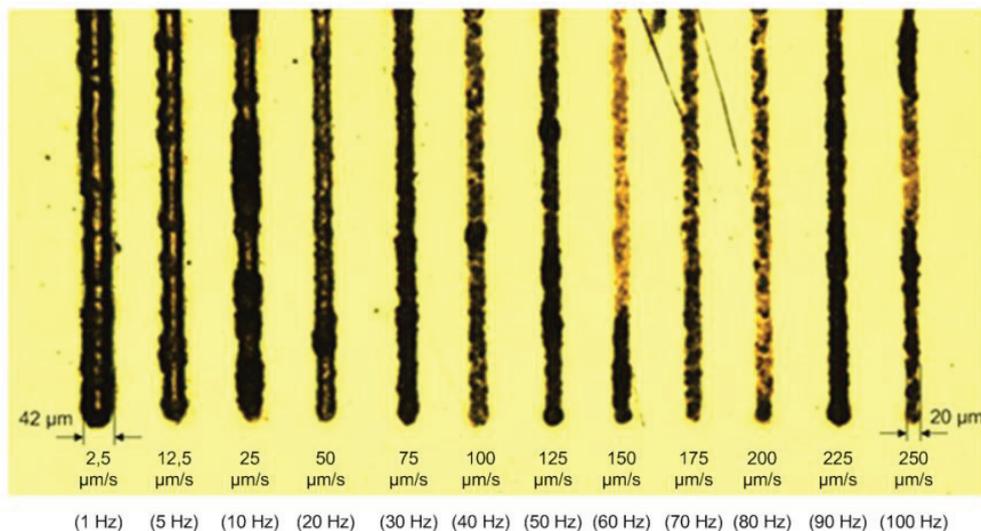


Figure 99 - Vue optique d'un réseau de lignes gravées à différentes vitesses d'avancement.

L'algorithme d'usinage utilisé est de type descendant, identique à celui utilisé pour la cavité. Le substrat d'inox a été réglé de manière à être le plus horizontal possible (écart en Z de 3 μm sur une distance de 1 mm). Le réseau usiné comprend 10 lignes avec chacune 1 aller-retour (donc deux passages par ligne) ; la vitesse de l'outil augmente d'une ligne à l'autre de 2,5 μm/s (1 Hz) à 250 μm/s (100 Hz) par incrément de 10 Hz.

Dans tous les cas, comme le montre la Figure 100, le diamètre du canal (42 à 20  $\mu\text{m}$ ) est nettement inférieur à celui de l'outil (50  $\mu\text{m}$ ).

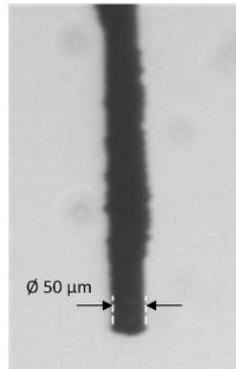


Figure 100 - Micro-outil observé après l'usinage du réseau de lignes.

On voit aussi sur la Figure 99 que la profondeur des lignes usinées est aussi dépendante de la vitesse d'usinage. Comme il est difficile de caractériser de tels canaux, un motif quasi-identique a été usiné avec une électrode de diamètre plus important (125  $\mu\text{m}$ ). Le protocole est le même que précédemment mais avec des vitesses allant de 12,5  $\mu\text{m/s}$  à 125  $\mu\text{m/s}$  (5, 10, 20 et 50 Hz). Le résultat montré à la Figure 101 indique que la profondeur d'usinage est comprise entre 0,5 et 5  $\mu\text{m}$  en moyenne.

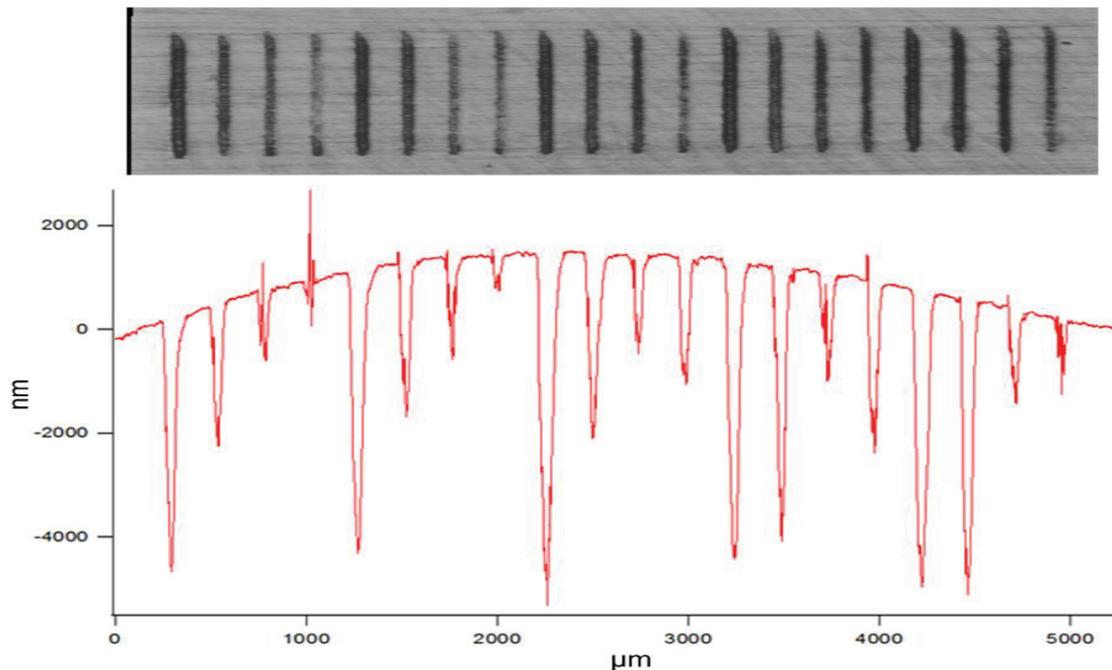


Figure 101 - Relevé profilométrique d'un réseau de lignes usinées à vitesses variables.

En réalité, il est difficile d'estimer la hauteur de l'entrefer, nous n'avons pas d'informations précise à ce sujet.

### 3.4.4 Taux d'enlèvement de matière et taux d'énergie spécifique

L'analyse du taux d'enlèvement de matière nécessite quelques précisions. Tout d'abord, nous parlerons d'un TEM exprimé en  $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  au lieu des  $\mu\text{m}^3/\text{min}$  (section 1.2.6.4). Notre procédé n'étant pas optimisé, il est difficile en lieu et place du temps d'usinage. Enfin, pour obtenir le taux d'enlèvement de matière, nous avons analysé le volume de matière enlevé lors de l'usinage du réseau de trous en section 3.4.1. Pour cela, nous avons supposé que l'énergie par décharge est :

$$E_{\text{décharge}} \approx \frac{1}{2} CU^2 \quad (\text{Section 1.2.6.1})$$

Nous avons alors calculé l'énergie envoyée au substrat en comptabilisant le nombre de décharges détectées par le circuit de caractérisation (Section 3.3.3).

Les données géométriques ont été extraites par profilométrie lors de l'usinage d'un réseau de trous obtenu par enfoncement vertical d'une électrode de  $250 \mu\text{m}$ . La courbe de la Figure 102 représente le volume de matière enlevée pour des tensions de travail différentes ( $U=50 \text{ V}$  à  $80 \text{ V}$ ) et avec plusieurs capacité de travail 1, 4,7, 22 et 100 nF (Rapport cyclique de 0,5 avec  $T_{\text{ON}}=100 \mu\text{s}/T_{\text{OFF}}=100 \mu\text{s}$ ,  $R_c = 100 \Omega$ ).

On remarque avec la capacité la plus importante de 100 nF, un TEM assez inhomogène passant de 0,3 à  $0,8 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$  alors qu'en utilisant des capacités de plus faibles valeurs (1, 4,7 et 22 nF), le TEM est plus faible et plus constant (entre 0,1 et  $0,3 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ ). Ce résultat montre que le TEM est constant pour les capacités inférieures à 22 nF et est principalement dépendant de cette capacité de travail. Au final, le **taux d'enlèvement de matière est compris entre 0,1 et  $0,6 \mu\text{m}^3/\mu\text{J}$** .

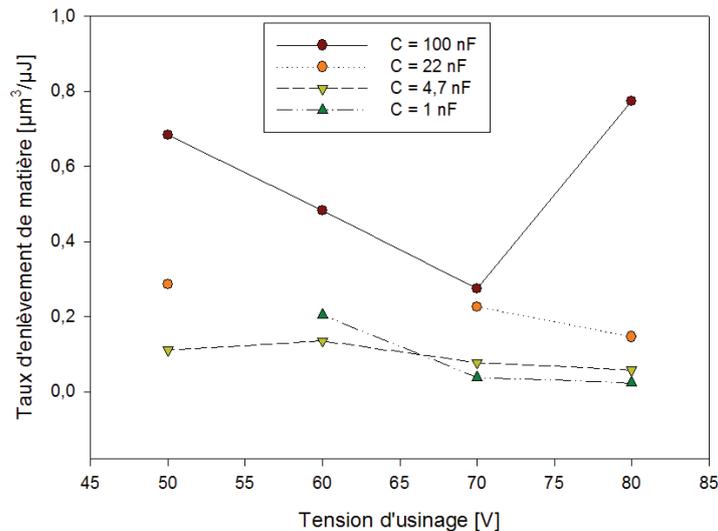
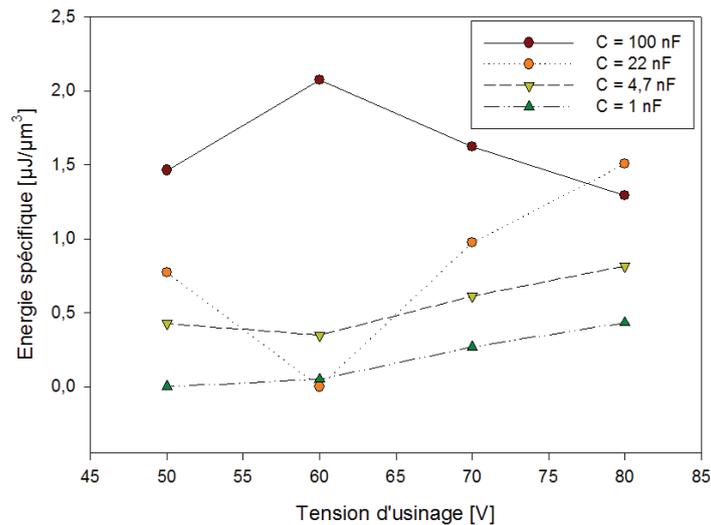


Figure 102 - Taux d'enlèvement de matière (TEM) pour  $U= 50$  à  $80 \text{ V}$  et  $C = 1$  à  $100 \text{ nF}$ .

Afin de comparer nos résultats avec la littérature, nous avons calculé le taux d'énergie spécifique sur le substrat d'inox (Figure 103). L'énergie spécifique est l'énergie requise pour enlever un volume de matière donné. Cette énergie est donc principalement dépendante du type de matériau considéré. Les matériaux réfractaires nécessitant une énergie importante. Dans la littérature, on constate une énergie spécifique sur inox de l'ordre  $0,15 \mu\text{J}/\mu\text{m}^3$  pour Wong [22]. D'après Kunieda, cette énergie spécifique est aussi de cet ordre là ( $0,15 \mu\text{J}/\mu\text{m}^3$ ) mais sur un échantillon de cuivre, ce qui est une valeur élevée pour un matériau plus tendre. Dans notre cas, nous trouvons une valeur spécifique comprise **entre 0,1 et  $2 \mu\text{J}/\mu\text{m}^3$  pour l'inox comparable à celle trouvée dans la littérature.**



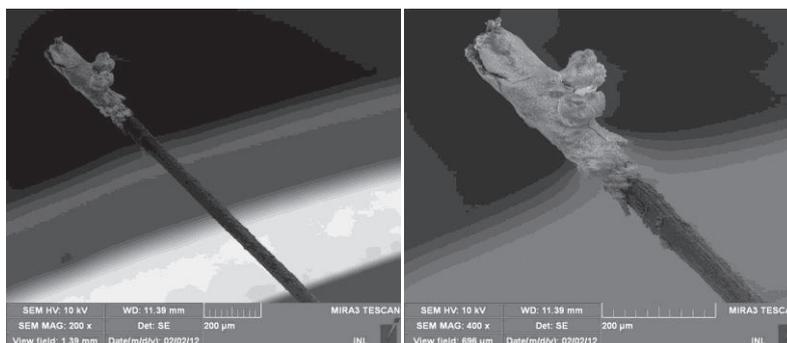
**Figure 103 - Taux d'enlèvement de matière de la machine de micro-électroérosion.**  
Tension de travail de 50 à 80 V et capacités de travail de 1 à 100 nF.

A forte capacité, l'enlèvement de matière est violent : une augmentation de la tension d'usinage a moins d'effet sur l'énergie spécifique qu'à faible capacité. A faible capacité, les résultats sont plus réguliers, l'enlèvement de matière est « plus doux » ; Il est difficile d'aller au-delà sans mettre en place un algorithme de régulation de l'entrefer qui a justement pour objectif de « régulariser » ces résultats.

### 3.4.5 Charbonnage

Lorsque la gestion des décharges n'est pas optimale et l'évacuation des débris peu efficace, des points de décharges excessifs conduisent au « charbonnage » du micro-outil. La couche est de couleur sombre d'où le terme de charbonnage. Ce phénomène est caractérisé par l'accumulation de débris issus de l'usinage formant une couche protectrice isolante à l'extrémité de l'électrode. Ces débris réduisent considérablement le débit d'usinage.

Les travaux de [41] font part de ce phénomène lors d'usinages sous un flux d'eau dé-ionisé. Ils indiquent que cet amas de matière est composé de matériaux oxydés provenant de la pièce et qu'il peut être éliminé par vibrations ultrasoniques. Nous avons effectivement constaté ce phénomène sur notre prototype avec une accumulation de débris à l'extrémité de l'électrode (Figure 104). Le caractère isolant de cette couche est mis en évidence par l'observation d'artefacts lumineux sur l'image ci-dessous observée au microscope électronique (Figure 105).



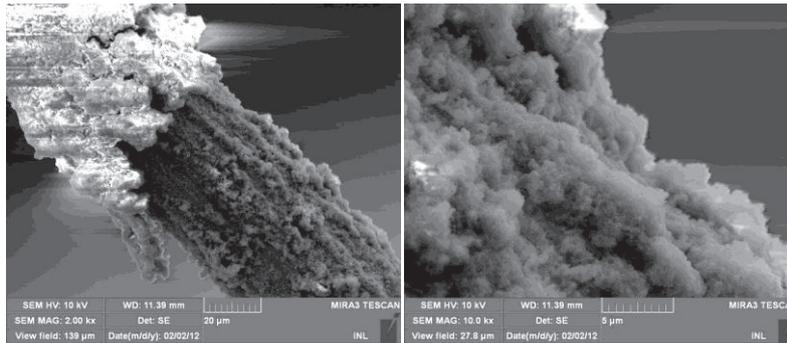


Figure 105 - Charbonnage et isolation électrique.

A l'avenir, le charbonnage pourrait être atténué en jouant sur les points suivants :

- Meilleure évacuation des débris par un arrosage actif et un renouvellement du diélectrique.
- Remontées fréquentes et régulières de l'électrode éventuellement couplées à un nettoyage avec des vibrations ultrasoniques.

### 3.4.6 Arasement du micro-outil

La surface inférieure des micro-outils a une importance toute particulière sur la qualité des usinages. Pour avoir un bon état de surface au fond d'un canal, l'utilisation de micro-outils avec une extrémité à fond « plat », que nous appellerons « micro-outil arasé », paraît indispensable. Avec la gravure électrochimique, il est difficile d'obtenir un micro-outil à fond plat à cause du ménisque (Section 2.1.5). Nous avons donc tenté d'araser les outils par électroérosion inverse à l'aide d'un inverseur de polarité : l'outil est alors au pôle positif et la pièce au pôle négative. On sait que dans ce cas l'usure de l'outil est favorisée (cf. section 1.2.6.6). Pour ne pas abimer la pièce, au besoin, on utilise un bloc sacrificiel, le plus souvent du graphite. La Figure 106 est la capture d'image d'un micro-outil ( $\varnothing$  250  $\mu$ m) soumis à deux types d'arasement.

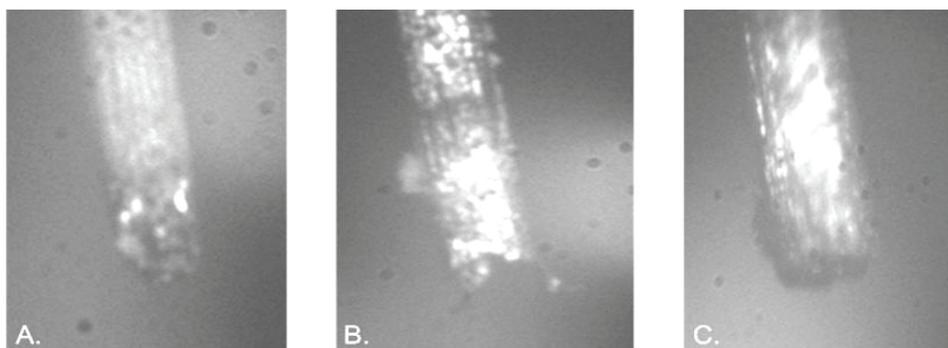


Figure 106 - Arasement d'un micro-outil.

La Figure 106A montre un micro-outil de diamètre initial 250  $\mu$ m inséré dans son poste d'érosion. La polarité est inversée et l'outil est alors arasé au-dessus du bloc sacrificiel. Pour avoir un arasement homogène à l'extrémité, il faut imposer des paramètres adéquats. La Figure 106B illustre un mauvais paramétrage de la tension et de la capacité ( $U = 60$  V,  $C = 10$  nF,  $R_C = 100$   $\Omega$ ,  $T_{ON}/T_{OFF}=100\mu$ s/ $100\mu$ s, flux d'eau dé-ionisée), ce qui entraîne des dégâts importants sur le micro-outil qui devient déformé. **Il est nécessaire d'appliquer des décharges avec de faibles énergies.** Nous avons alors ré-arasée l'outil avec une tension plus basse de 30 V et une capacité de 0,1nF. L'extrémité du micro-outil obtenue, montrée à la Figure 106C, est moins déformée et plus uniforme, ce qui est conforme à nos attentes.

### 3.4.7 Impact élémentaire

Pour caractériser l'impact laissé par une décharge unique, nous avons utilisé le mode « descendant » de la machine présenté en section 3.4.2. Toutefois, ici, lorsque la détection de la première décharge a lieu, l'électrode est immédiatement remontée. Les tensions appliquées entre l'électrode et la pièce ont été : 80, 70, 60, 50 et 40 V avec une capacité fixe de 22 nF, le rapport cyclique de 0,5 avec  $T_{ON} = 100\mu s / T_{OFF} = 100\mu s$ ,  $R_c = 100 \Omega$  et l'ensemble sous un flux d'eau dé-ionisée. Les images des impacts de la Figure 107 sont des observations par microscope électronique.

Ces impacts sont caractérisés par un cratère central de dimensions comprises entre 3  $\mu m$  (Figure 107 à 70V) et 5  $\mu m$  (Figure 107 à 50V) avec un important volume de matière redéposée autour de l'impact principal. Nos observations sont donc d'ordre qualitatif :

- Le renouvellement du diélectrique est très important pour obtenir des impacts à l'apparence propre.
- **Les résultats sont conformes à ce qui est obtenu traditionnellement en  $\mu EE$  [92], [146], avec l'obtention de diamètre d'impact de l'ordre de 5  $\mu m$ .**

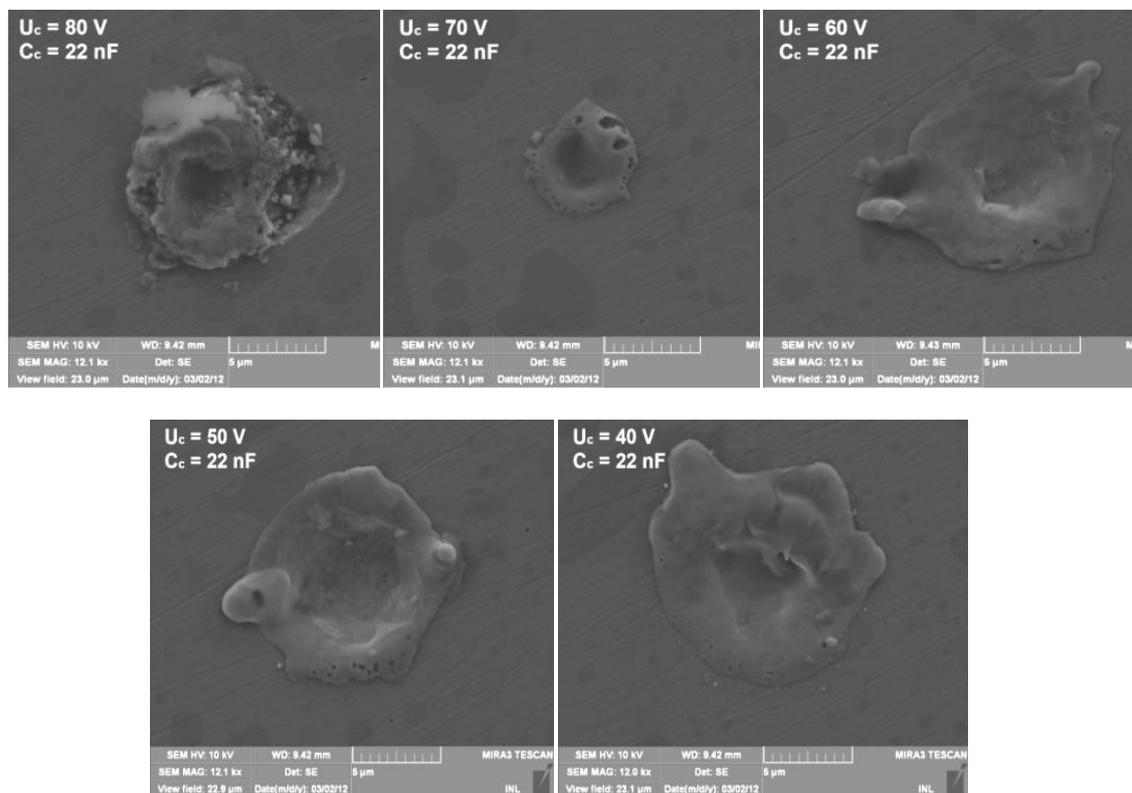


Figure 107 - Impacts élémentaires à différentes tensions de travail

Ce dernier résultat est très important dans la pratique. Bien que des impacts plus petits aient été obtenus tant par l'INL (cf. Figure 33) que par d'autres équipes [106], la plupart des publications [147] font état d'impact minimaux de diamètre de l'ordre de 5  $\mu m$ . Bien qu'il ne s'agisse pas d'une barrière physique au sens propre, on peut considérer qu'à cette échelle un ensemble de limitations apparaissent (énergie par décharge délivrée par le générateur, valeur de l'entrefer, diamètre des impacts) qu'il conviendra de contourner pour pouvoir améliorer la résolution d'usage. Nos tentatives en ce sens feront l'objet du Chapitre 4.

### 3.5 Usinage avec régénération de l'électrode-outil

Lors de tout usinage par EE, l'électrode-outil s'use sous l'impact des décharges. Dans cette partie nous allons montrer comment le système de fabrication de l'électrode-outil intégré à la machine de  $\mu$ EE permet non seulement de graver l'électrode mais aussi de la régénérer. Pour cela nous procéderons à l'usinage de trois lignes parallèles avec une électrode-outil puis nous régènerons cette électrode et diminuerons son diamètre avant de procéder à l'usinage du même motif.

Tandis que la Figure 108 montre une vue optique des micro-outils, le Tableau 18 présente leurs caractéristiques.

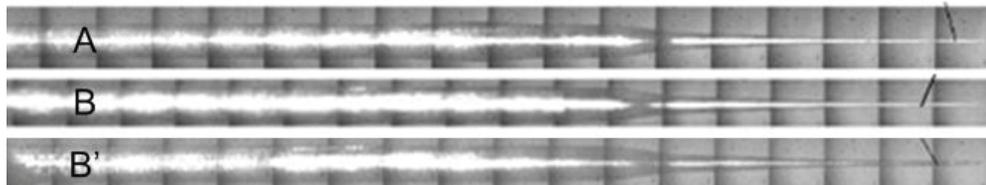


Figure 108 - Vues optiques des micro-outils utilisés

Micro-outil affûté (A) puis utilisée pour l'usinage (B) et régénérée (B') conformément au Tableau 18.

Outil	A	A'	B	B'
Etape	Affûtage	1 <sup>er</sup> usinage	Réaffûtage	2 <sup>e</sup> usinage
Diamètre initial ( $\mu\text{m}$ )	250	26	26	20
Diamètre final ( $\mu\text{m}$ )	26	26	20	20
Longueur utile ( $\mu\text{m}$ )	400	240	600	400
Facteur de forme	15	9,2	30	20

Tableau 18 - Caractéristiques des électrodes employées.

#### 1<sup>ère</sup> étape : Obtention du micro-outil

Un micro-outil en tungstène de diamètre initial  $250 \mu\text{m}$  a été affiné selon la méthode présentée au chapitre 2 de manière à atteindre un diamètre de  $26 \mu\text{m}$  sur une longueur de  $400 \mu\text{m}$  (facteur de forme 15). La Figure 108A montre une image optique de l'électrode obtenue, reconstruite par assemblage d'une vingtaine d'images avec le logiciel Photoshop. Chaque image a été réalisée à l'aide du zoom Navitar 6000. Les captures ont été faites avec une translation automatisée par moteur.

#### 2<sup>ème</sup> étape : Usinage d'un motif

Cet outil a ensuite été utilisé pour usiner 3 rainures de longueur  $1 \text{ mm}$  à l'aide du circuit RC hybride décrit en Figure 80. La tension d'usinage est de  $100 \text{ V}$  et la capacité de travail est de  $100 \text{ pF}$  (Rapport cyclique de 0,5 avec  $T_{\text{ON}} = 100 \mu\text{s}$ / $T_{\text{OFF}} = 100 \mu\text{s}$  et  $R_C = 100 \Omega$ ). Le substrat utilisé est une pièce métallique en acier inoxydable (SS 316Ti). L'électrode et le substrat sont immergés sous un flux d'eau dé-ionisée. L'électrode est approchée jusqu'à la surface du substrat pour engager la procédure d'usinage lorsque la première décharge est détectée. Ensuite, les rainures sont usinées par 10 allers-retours d'outil avec un enfoncement de 2 pas à chaque aller-retour.

La Figure 109A montre une vue des rainures prise à l'aide du microscope optique Olympus BX-51M. La Figure 109B montre une vue de l'outil après usinage avec des paramètres listés dans la 2<sup>ème</sup> colonne du Tableau 18. Le diamètre d'outil est inchangé après l'usinage mais sa longueur est réduite de  $160 \mu\text{m}$ .

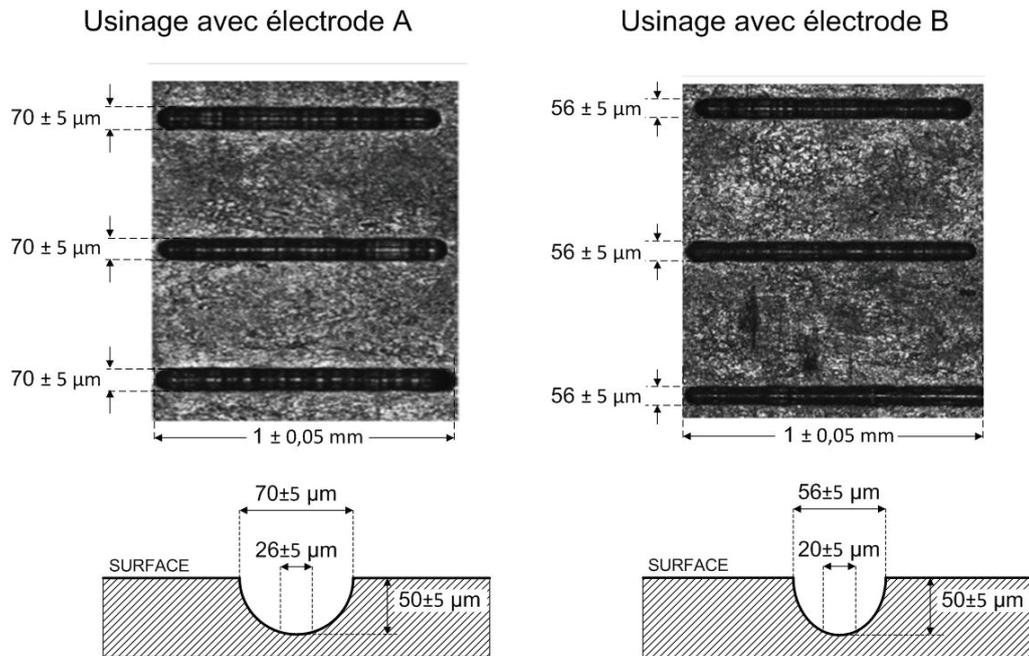


Figure 109 - Motifs usinés avec les électrodes A et B.

Une mesure au microscope et au profilomètre nous a permis de reconstituer le profil moyen de des motifs usinés qui est schématisé en Figure 109. On constate une réelle différence de dimensions entre le haut de la rainure avec une largeur de 70  $\mu\text{m}$  et le fond de la rainure dont la largeur est de seulement 26  $\mu\text{m}$  : valeur très proche de la largeur de l'électrode-outil A. Ce profil traduit la convolution de la géométrie de l'électrode sur la pièce lors de son enfoncement, ainsi que son usure sur les parties les plus externes de l'électrode. L'électrode a donc tendance à se profiler lors des usinages aboutissant à ce profil en forme de cuvette.

En haut de la rainure, l'entrefer latéral est d'environ 22  $\pm 5$   $\mu\text{m}$ , ce qui n'est pas compatible avec la valeur trouvée dans la section 3.4.1. En fait dans le cas présent, la capacité est 10 fois plus faible. Une explication de cette anomalie pourrait provenir du fait que la capacité de travail réelle de la machine est bien supérieure à la capacité de travail théorique de 100 pF. La capacité de travail réelle est difficile à estimer : elle dépend de la capacité physique de la machine (structure pointe-plan ; châssis ; cables) mais surtout des capacités des MOS du générateur de décharges (cf. Figure 82). Nous avons pu l'estimer empiriquement à quelques nF (jusqu'à 5 nF). La valeur de l'entrefer latérale en haut de la rainure est donc en accord avec celle trouvée dans la section 3.4.1.

Une analyse de l'électrode-outil A' après usinage a montré une usure de 160  $\mu\text{m}$  avec un diamètre inchangé de 26  $\mu\text{m}$ . Le volume de matière, disparue de l'électrode est donc :

$$V_{usure A'} = \frac{\pi}{4} d^4 \cdot h_{usure} = \frac{\pi}{4} 26^4 \cdot 160 = 57,4 \cdot 10^6 \mu\text{m}^3$$

Le volume de matière enlevée de la pièce, en considérant le profil de la rainure comme étant un demi-disque, est :

$$V_{usiné} = 3 \cdot \frac{\pi}{2} l_{rainure}^4 \cdot L_{rainure} = 3 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 70^4 \cdot 1000 = 113,1 \cdot 10^9 \mu\text{m}^3$$

$$\text{avec } T_{usureA'} = \frac{V_{usureA'}}{V_{usiné}} = \frac{57,4}{113,1 \cdot 10^3} \approx 0,0005$$

Le taux d'usure est donc de l'ordre de 0,05% ce qui est très faible. **Néanmoins son impact est très important car la longueur d'outil consommé est importante.** Une compensation de l'usure de l'électrode sera nécessaire pour les enlèvements importants de matière.

### 3<sup>ème</sup> étape : Régénération de l'outil

La suite de l'expérience consiste à régénérer le micro-outil par gravure électrochimique avec un courant de 50 mA appliqué pendant 30 s ( $T_{ON} : 0.3s$ ,  $T_{OFF} : 0.3s$ ). Le diamètre utile de l'outil passant de 26  $\mu m$  à 20  $\mu m$  sur une longueur de 600  $\mu m$  (caractéristiques du Tableau 18, colonne 3). La longueur utile de l'électrode a été améliorée avec un facteur de forme qui est passé de 9.2 à 30. L'électrode-outil maintenant notée B a été réutilisée pour usiner le même motif que précédemment. Une vue de l'outil est montré en Figure 108C.

### 4<sup>ème</sup> étape : Usinage du second motif

La Figure 109 présente les rainures obtenues avec l'électrode-outil B. L'usinage ressemble fortement au précédent mais avec une largeur de rainures revue à la baisse : 56  $\mu m$  contre 70  $\mu m$  (Figure 109). Le passage d'un diamètre d'électrode de 26  $\mu m$  à 20  $\mu m$  a été donc suivi d'une réduction de 14  $\mu m$  de la largeur des rainures. L'entrefer latéral est passé d'une valeur de 22  $\mu m$  à 18  $\mu m$  lors du passage de l'usinage 1 à 2.

Les volumes enlevés à l'outil et la pièce sont respectivement de :

$$V_{usureB'} = \frac{\pi}{4} d^4 \cdot h_{usure} = \frac{\pi}{4} 20^4 \cdot 200 = 25,1 \cdot 10^6 \mu m^3$$

$$V_{usiné} = 3 \cdot \frac{\pi}{2} l_{rainure}^4 \cdot L_{rainure} = 3 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 56^4 \cdot 1000 = 46,3 \cdot 10^9 \mu m^3$$

Le taux d'usure est inchangé, soit :

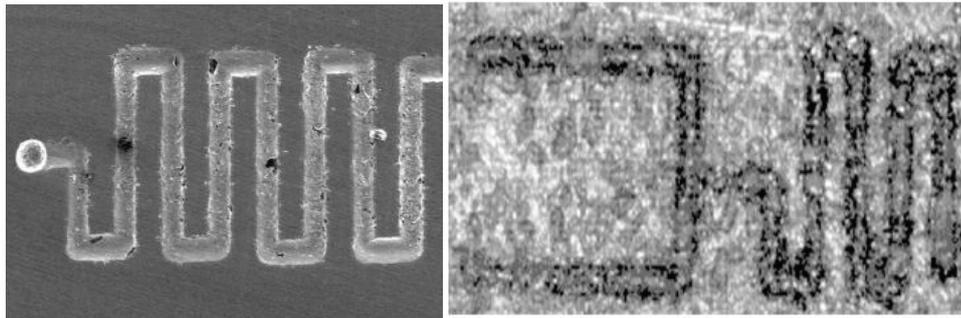
$$T_{usureB'} = \frac{V_{usureB'}}{V_{usiné}} = \frac{25,1}{46,3 \cdot 10^3} \approx 0,0005$$

Le principe de régénération a été démontré avec la réduction de la largeur de l'outil de 26 à 20  $\mu m$  qui s'est accompagnée de la réduction de la largeur du motif usinée, passant d'une largeur de motif de 70 à 56  $\mu m$ . L'entrefer latéral est resté relativement constant d'un usinage à l'autre (autour de 20  $\mu m$ ) et le taux d'usure de l'électrode est resté très faible (0,05%).

### 3.6 Autres usinages

La Figure 110 à gauche montre usinage réalisé dans les mêmes conditions que précédemment. Il s'agit d'un canal microfluidique réalisé dans un acier inoxydable poli (316L, 20 x 20 x 0,6mm) avec une largeur de canal de 40  $\mu\text{m}$  et une profondeur de 15  $\mu\text{m}$ .

La Figure 110 à droite représente le même motif réalisé sur un substrat non-poli de titane. Du fait de la conductivité thermique plus faible du titane ( $\lambda_{\text{Titane}} = 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) contre  $\lambda_{\text{Inox}} = 26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  pour l'inox, les dimensions du canal gravé sont moins importantes avec une largeur de seulement 25  $\mu\text{m}$  et une profondeur de 8  $\mu\text{m}$ .



**Figure 110 - Canaux microfluidiques sur acier inoxydable et titane.**

*A Gauche, canal microfluidique de largeur 40  $\mu\text{m}$  et de profondeur 15  $\mu\text{m}$  sur un substrat d'acier inoxydable 316Ti. A droite, canal de largeur 25  $\mu\text{m}$  et de profondeur 8  $\mu\text{m}$  sur un substrat de titane.*

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un prototype de machine de fraisage par micro-électroérosion. Celle-ci comporte un poste de préparation de micro-outils par gravure électrochimique et un poste d'usinage par micro-étincelage. L'électronique du poste d'érosion (génération et caractérisation des décharges) a été développée avec le plus de soin possible de façon à ce que nous puissions avoir accès à l'ensemble des paramètres.

Les premiers essais effectués avec notre machine ont permis d'usiner des rainures de 25  $\mu\text{m}$  de large mais il n'a pas été possible de faire mieux suite à différents problèmes qui seront analysés ci-dessous. Par ailleurs nous avons montré que l'état de surface au fond d'une cavité peut atteindre 86 nm à condition de multiplier les passes d'usinage. Un point important est que le diamètre minimum des impacts individuels observés est de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$ . Il paraît donc nécessaire de tenter de réduire l'énergie par décharge, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

L'usure de l'électrode a été quantifiée à 0,05 %, valeur faible mais qui a des conséquences importantes étant donné la quantité de matière à enlever. On sait en effet que l'usure des micro-outils est un des points bloquant le développement de la  $\mu\text{EE}$ . C'est un fait bien connu dans la littérature où différentes stratégies sont proposées pour procéder à la compensation de cette usure [51]. La méthode la plus citée repose par exemple sur une approche logicielle avec des passes d'usinage supplémentaires.

Dans notre cas, il s'agit d'une approche matérielle basée sur la régénération régulière de l'électrode. Nous avons démontré qu'il est possible d'élaborer un micro-outil, de l'utiliser pour usiner un motif et de le régénérer pour un deuxième usinage. Ce résultat est donc prometteur.

D'un point de vue technique, nous avons été limités par le faible rendement de production des micro-outils cylindriques (pour les raisons invoquées en fin de chapitre 2, l'obtention de micro-outil est délicate en-dessous de 15  $\mu\text{m}$ ). L'absence d'algorithme de gestion d'entrefer provoque une casse anormalement élevée de ces microélectrodes ultrafines.

En réalité la question de la gestion de l'entrefer est intimement liée aux développements électroniques. Un des points critiques concerne le dimensionnement des seuils de comptabilisation des décharges et de détection des contacts outil-substrat dans les circuits électroniques.

En effet, physiquement, lors de l'utilisation d'électrodes de diamètre supérieur à 20  $\mu\text{m}$ , le « touché » de l'outil avec le substrat peut être détecté grâce à un contact franc de l'outil avec la pièce. La résistance de contact est nulle. Il y a de multiples points de contacts dues aux irrégularités des pièces qui s'additionnent de sorte que courant peut facilement s'écouler.

Dans le cas des électrodes de faible diamètre, la surface de contact « apparente » est très petite et nous avons constaté que la résistance de contact est non nulle. Le courant de contact est très faible et il est difficilement détecté par les comparateurs. La différenciation des signaux provenant d'artefact électromagnétiques ou de contacts réels est donc compliquée. Les outils sont alors très difficiles à utiliser.

Nous avons donc compris que notre électronique de détection de contacts était peu sensible aux courants de contacts pour les électrodes de faibles dimensions (< 20  $\mu\text{m}$ ) et qu'il est nécessaire d'abaisser le niveau de bruit dans l'ensemble de la machine.

Il en est de même pour la caractérisation et le comptage des décharges (information nécessaire à la régulation de l'entrefer). Nous verrons dans le chapitre suivant que les décharges avec une très faible énergie peuvent être quasiment noyées dans le bruit électronique de la machine. Les solutions retenues dans ce chapitre pour les caractériser (Figure 86) nous obligent quasiment à travailler avec des décharges au mieux de moyenne énergie (0,8  $\mu\text{J}$ /décharge), ce qui explique les limitations en termes de résolution d'usinage.

Cependant, les résultats obtenus avec ce premier prototype sont encourageants pour un projet parti récemment de zéro. Dans les colonnes 2 et 3 du Tableau 19, nous avons repris une comparaison entre EE et  $\mu$ EE récemment publiée par l'équipe de Kunieda [146] et avons ajouté en dernière colonne les valeurs correspondant à la machine de l'INL.

Paramètres	EE	Micro-EE (Kunieda)	Micro-EE (Cabrera)
Courant de décharge, $i_e$ [A]	10.36	1.14	1.3
Tension de décharge, $u_e$ , [V]	17.19	24	40
Durée de décharge, $t_e$ [ $\mu$ s]	17	0.07	0.2
Matériau composant le substrat	/	Cuivre	Inox
Conductivité thermique [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]	/	390	16.3
Diamètre d'impact, $d_m$ [ $\mu$ m]	68.4	4.25	5
Volume éjecté par décharge, $V_p$ [ $\mu$ m <sup>3</sup> ]	972.5	1.9	6,7
Energie par décharge [ $\mu$ J]	/	0,28	0,8
Energie spécifique [ $\mu$ J/ $\mu$ m <sup>3</sup> ]	/	0,15	0,6

Tableau 19 - Comparaison de EE et micro-EDM (Kunieda [146] et INL).

Les valeurs correspondant aux colonnes  $\mu$ EE sont très similaires. Le courant et la tension sont équivalents, tandis que la durée des décharges est plus courte pour Kunieda (0,07  $\mu$ s contre 0,2  $\mu$ s). La comparaison diffère ensuite pour ce qui concerne les volumes de matière enlevés. La valeur indiquée par Kunieda, pour le taux d'enlèvement de matière, est exprimée en  $\mu$ m<sup>3</sup>/décharge. Dans notre cas, nous l'exprimons en  $\mu$ m<sup>3</sup>/ $\mu$ J, pour donner une certaine « universalité » à nos résultats. En se ramenant aux mêmes unités, Le taux d'enlèvement est de 6.7  $\mu$ m<sup>3</sup>/ $\mu$ J pour Kunieda, contre 0,8  $\mu$ m<sup>3</sup>/ $\mu$ J dans notre cas. Notre taux d'enlèvement est huit fois plus faible. Mais cet écart s'explique par la nature des matériaux usinés et par la différence de conductivité thermique : cuivre pour Kunieda (conductivité thermique 390  $W.m^{-1}.K^{-1}$ ) et acier inoxydable pour l'INL (conductivité thermique : 26  $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).



**Chapitre 4 :**  
***Etude d'une décharge élémentaire***

---

## 4 Etude d'une décharge élémentaire

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, notre objectif est de mieux comprendre le mécanisme d'une microdécharge élémentaire afin d'étudier les possibilités d'améliorations du procédé d'usinage par micro-électroérosion. Par décharge élémentaire, nous entendons le phénomène physique correspondant à l'appellation « spark » en anglais, qui se traduit par « étincelle ». Toutefois, par abus de langage, c'est le terme générique « décharge » qui est souvent retenu.

Nous commencerons par une étude bibliographique de la décharge en électroérosion conventionnelle. Puis nous passerons directement à une étude expérimentale. Dans la conclusion nous ferons le lien avec le chapitre précédent.

### 4.2 Étude bibliographique

Nous avons rassemblé ci-dessous les éléments disponibles sur les décharges à l'échelle de l'érosion macroscopique.

#### 4.2.1 Décharge en électroérosion conventionnelle (milieu liquide)

Comme mentionné dans le chapitre 1, le processus de décharge électrique peut être décomposé en 3 étapes. Joseph [12] décrit le processus de manière plus détaillé au travers de 5 étapes. Chaque paragraphe ci-dessous détaillera le déroulement d'une phase et sera illustré par une représentation de la tension et du courant observé aux bornes de l'électrode et de la pièce.

##### 4.2.1.1 Phase de pré-claquage

La phase de pré-claquage (Figure 111) correspond à l'application d'une différence de potentiel entre les deux électrodes avec une tension de l'ordre de 30 à 250 V [23]. Cela permet de garantir un champ électrique suffisamment puissant (1 à 10MV/m avec un gap de 10 à 100  $\mu\text{m}$ ) conduisant à la création d'amorces électriques. Ce fort champ électrique est propice à l'ionisation locale du diélectrique.

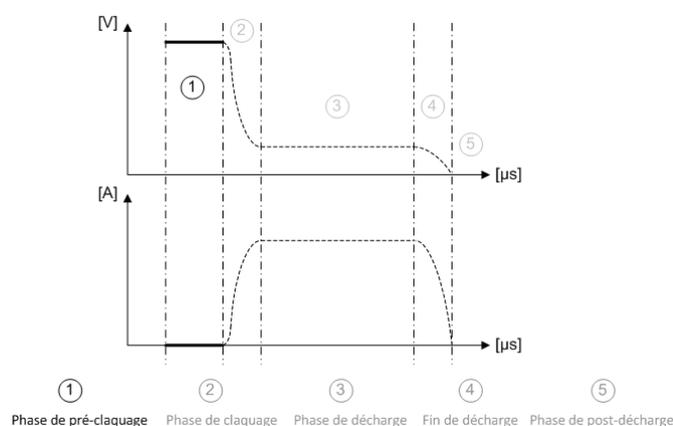


Figure 111 - Phase de pré-claquage et allure des signaux tension et courant d'après [12].

Pendant cette phase naissent et se propagent des canaux conducteurs appelés amorces (streamer) qui croissent d'une manière extrêmement rapide et désordonnée d'une électrode à une autre [16][148][149].

Schumacher [13], par exemple, 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.

Lorsque l'eau dé-ionisée sert de diélectrique, les nombreuses petites bulles d'hydrogène créées par électrolyse semblent jouer un rôle important [16], [150], [151]. 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 [152].

#### 4.2.1.2 Phase de claquage

La transition entre un canal faiblement ionisé (le pont amorce) et un canal fortement ionisé (la décharge) est un phénomène mal connu. Lorsqu'une amorce joint les deux électrodes, une autre amorce se déclenche de façon à suivre le chemin inverse à grande vitesse ( $10^7$  m/s) [148]. Cet effet, observé à plus grande échelle dans cas de la foudre, a pour effet d'accroître considérablement le degré d'ionisation du canal.

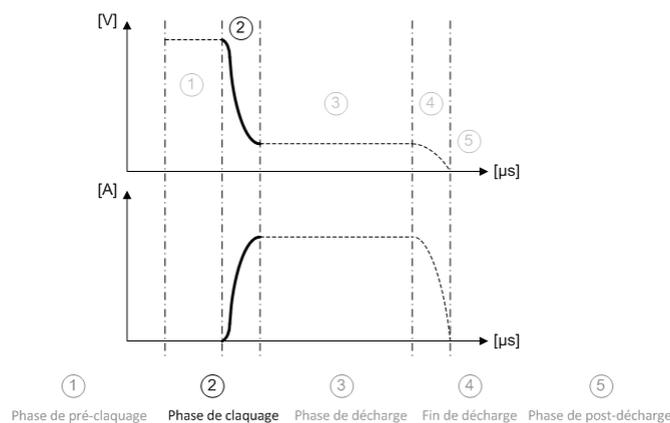


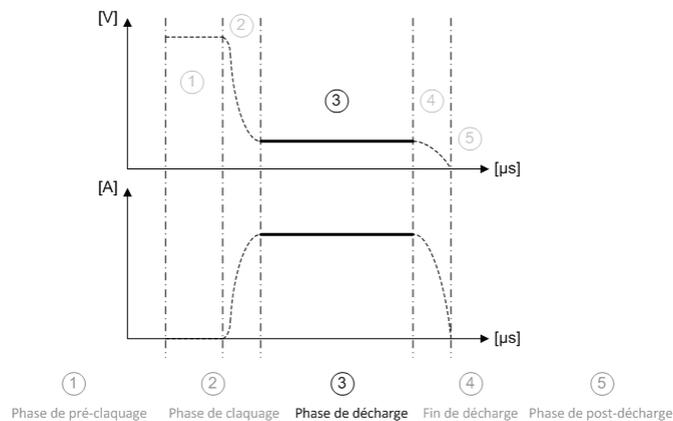
Figure 112 - Phase de claquage d'après [12].

Ainsi, d'après [15], lorsque l'amorce atteint l'électrode opposée, toute l'énergie accumulée entre les deux électrodes se décharge sur un laps de temps réduit. Une brusque chute de tension (Figure 112) se produit, pouvant atteindre une différence de potentiel de plusieurs centaines de volts sur une durée de 100 ns. Cette chute de tension s'accompagne d'une très forte augmentation du courant, qui 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 de l'élargissement du canal de décharge, ce 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<sup>-3</sup>.

#### 4.2.1.3 Phase de décharge

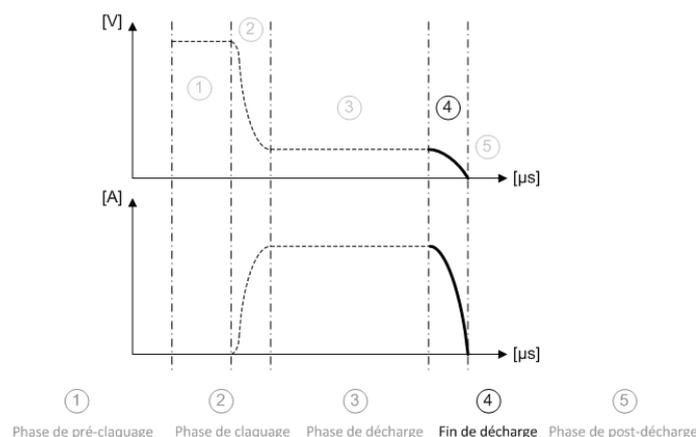
D'après [15], [36], [153], après le claquage, un plasma se développe très rapidement (50 ns) et reste ensuite stable. La lumière émise est particulièrement intense pendant les 500 ns suivant le claquage et plus faible pendant le reste de la décharge. Elle aussi dépend de l'intensité du courant.



Pour un entrefer de 10-100  $\mu\text{m}$ , la décharge stimule un large volume autour des électrodes d'un diamètre de l'ordre de 100-200  $\mu\text{m}$ , qui croît légèrement pendant la décharge. La zone de contact, avec les électrodes estimée d'après le diamètre des cratères, est de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ . La densité de courant est de l'ordre de  $10^6$  à  $10^7$   $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 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  $10^6$   $\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ . 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.

#### 4.2.1.4 Fin de décharge

A la fin de la décharge, le plasma n'est plus alimenté et le courant est coupé entre les deux électrodes : la jonction est rompue. 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 [15] est d'environ 2 200 K, ce qui démontre qu'elles sont à l'état liquide au début de la post-décharge.



#### 4.2.1.5 Phase de post-décharge

La phase de post-décharge (Figure 115) correspond à une étape où le diélectrique joue un rôle très important dans le procédé. Il permet de dissiper la température des électrodes entre plusieurs impulsions et d'évacuer les débris fondus lors de l'impact du plasma.

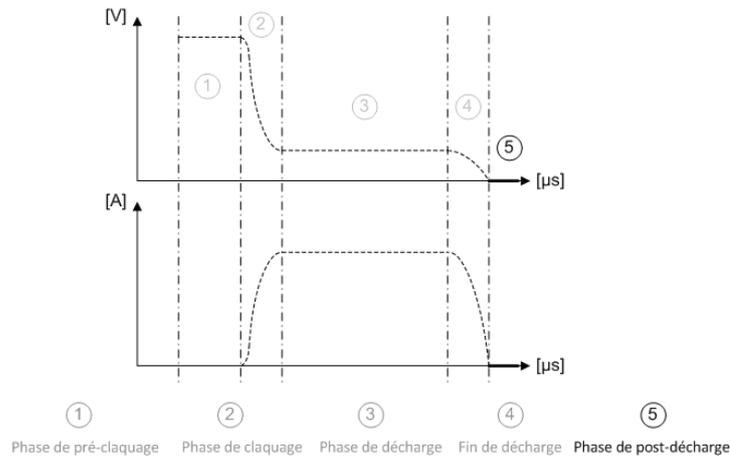


Figure 115 - Phase de post-décharge d'après [12].

Le milieu liquide confère une forme sphérique aux débris et les évacue. La taille des débris fondus varie d'une expérience à une autre et dépend des paramètres mais typiquement leur taille est d'une dizaine de  $\mu\text{m}$  [154]. La vitesse d'évacuation de ces débris est dépendante du flux de diélectrique. Cette évacuation doit être efficace car si les débris ne sont pas correctement évacués, la conductivité électrique du milieu se trouve modifiée et le claquage suivant sera perturbé. Le contrôle du processus devient alors difficile ce qui conduit 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 [155].

#### 4.2.2 Décharge dans un gaz

Nous allons revenir sur la phase de décharge et l'apparition du plasma. Leur étude, très difficile en milieu liquide, a été menée en milieu gazeux sous différentes pressions. Différents cas de figures sont rencontrés et classés dans la courbe courant/tension de la figure suivante.

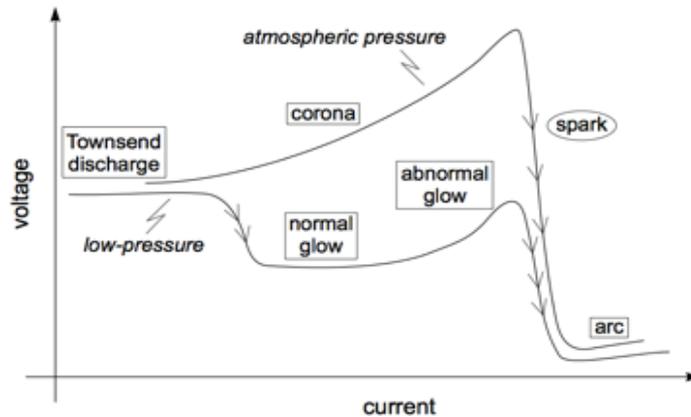


Figure 116 - Courbes caractéristiques U/I des plasmas en milieu gazeux [156].

La décharge de Townsend caractérisé par un faible courant (de l'ordre de  $10^{-8}$  A) intervient à pression atmosphérique. L'effet Corona se différencie de la décharge de Townsend par un courant plus intense (qq  $\mu$ A à qq mA).

Les décharges lumineuses (« Glow Discharge ») sont observées à basse pression ( $\approx$  mbar), à haute tension ( $\approx$  1 kV) et à faible courant ( $\approx 10^{-2}$  A). Elles sont aussi observables à pression atmosphérique et sont accompagnées d'un spectre d'émissions lumineuses avec des raies d'émission dans une gamme de longueurs d'ondes comprises entre 200 et 450 nm [157].

Contrairement aux effets Corona, de Townsend ou de luminescence, qui peuvent être entretenus en maintenant les conditions environnantes, la décharge de type « étincelle » (« spark ») est un phénomène transitoire accompagné d'une émission lumineuse intense. Sa durée est donc temporaire et son déclenchement est dit « stochastique », c'est à dire qu'il est quasi impossible de prédire le lieu et le moment où cette décharge aura lieu.

#### 4.2.3 Le plasma en électroérosion

##### Le plasma en électroérosion

Les décharges font apparaître un état particulier de la matière : le plasma, communément appelé le 4<sup>ème</sup> état de la matière. Un plasma est composé d'électrons, de photons, d'atomes, de molécules, et d'ions à l'état fondamental, ou dans un état excité.

La littérature sur les plasmas en milieu gazeux basse pression est abondante [55], [158] mais pas à pression atmosphérique [157], en milieu liquide [159] et encore moins en EE [15] ou  $\mu$ EE. Cela s'explique par les difficultés expérimentales rencontrées. Celles-ci sont dues à l'environnement liquide ou gazeux, aux faibles dimensions du plasma (quelques dizaines  $\mu$ m), à leur durée de vie très faible ainsi qu'au caractère aléatoire de leur déclenchement et de leur localisation.

Parmi ces études, nous avons retenu les travaux de thèse de Descoedres [15] qui concerne l'électroérosion conventionnelle. Dans cette expérience, le diamètre des électrodes conique est de 3 à 5 mm, l'entrefer est compris entre 10 et 100  $\mu\text{m}$  et les propriétés du plasma ont été étudiées à l'aide de mesures électriques, d'imagerie et de spectroscopie d'émission optique résolue en temps et en espace (Figure 117).

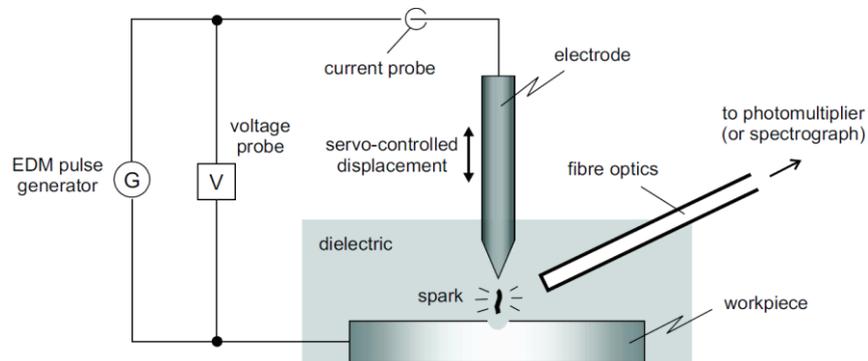


Figure 117 – Montage expérimental pour l'étude des plasmas d'EE d'après [15].

Ces caractérisations ont permis de schématiser le plasma d'EE (Figure 118 extraite de [15]). La densité électronique déterminé expérimentalement par [15] est de l'ordre de :

$$n_e \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}, \text{ avec } a = 6 \text{ nm}, \text{ et } T \approx 0.7 \text{ eV}$$

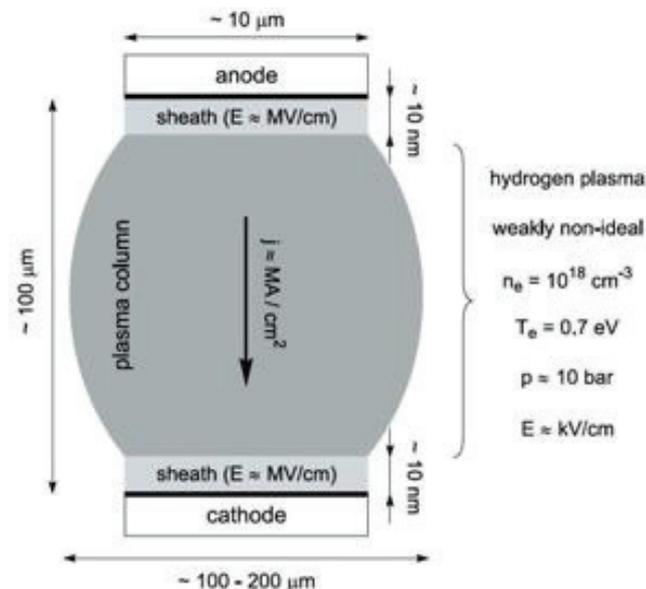


Figure 118 - Ordre de grandeur des caractéristiques du plasma selon [15].

Il a aussi été montré que ce plasma est composé principalement d'espèces provenant du diélectrique (hydrogène dans le cas de l'eau), ainsi que des matériaux des électrodes. La température des électrons dans le plasma est de l'ordre de 0,7 eV (8 100 K) ; elle est d'ailleurs légèrement plus haute au début de la décharge.

La densité électronique est très élevée car ce plasma est formé à partir d'un liquide constamment soumis à la pression exercée par le liquide environnant. Elle est plus importante au début de la décharge ( $\geq 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  durant la première microseconde) pour décroître ensuite avec le temps mais en restant au dessus de  $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  après 50  $\mu\text{s}$ .

On caractérise également le plasma par son degré d'ionisation  $\delta$ .

$$\delta = \frac{n}{n + N}$$

Avec  $n$  : densité du plasma ( $n \approx n_e \approx n_p$ )

$n_e$  : Nombre d'électrons libres par unité de volume

$n_p$  : Nombre d'ions positifs par unité de volume

$N$  : Nombre d'espèces neutres par unité de volume.

Lorsque  $\delta \ll 1$ , le degré d'ionisation est « faible », seul quelques électrons existent dans un ensemble neutre. Lorsque  $\delta \approx 1$ , le plasma est « fortement ionisé », composé essentiellement d'électrons et d'ions. Un plasma est dit « idéal » lorsque  $\delta \gg 1$ , c'est-à-dire lorsque les forces électrostatiques dominent les interactions entre particules. L'équation d'état de chaque espèce est alors semblable aux cas des gaz parfaits.

Le plasma est caractérisé par un paramètre de couplage  $\Gamma$ , qui correspond au rapport de l'énergie de Coulomb à la distance moyenne entre deux particules par l'énergie thermique moyenne des particules [158].

$$\Gamma = \frac{(Ze)^2}{4\pi\epsilon_0 k_B a T}$$

Où  $Z$  : la charge des particules

$e$  : charge de l'électron

$\epsilon_0$  : la permittivité relative du vide

$k_B$  : la constante de Boltzmann

$a$  : la distance moyenne entre espèces

$T$  : la « température » des électrons.

$\Gamma$  est en moyenne de l'ordre de 0,3 durant la phase de décharge (0,45 pendant la première microseconde). **Les interactions coulombiennes entre les particules chargées sont donc du même ordre que l'énergie moyenne thermique des particules. Ce plasma est ainsi considéré comme faiblement non idéal à cause de sa basse température et sa haute densité** (par rapport aux plasmas dans les gaz).

Les mécanismes de claquage et de décharge introduits en début de chapitre nous montrent toute la complexité du processus d'électroérosion macroscopique qui se déroule sur une très courte période (<1  $\mu$ s). L'analyse de tels phénomènes est peu répandue et les quelques travaux qui les abordent mettent en avant les difficultés d'observations. Ces problèmes sont d'autant plus importants que les dimensions du système sont réduites (environnement d'étude confiné, phénomènes aléatoires, observation non-intrusive). Toutefois, afin de tenter d'expliquer les limitations rencontrées au chapitre 3, nous avons cherché à étudier d'un point de vue expérimental les décharges élémentaires qui constituent le cœur du procédé. Nous nous appuyons principalement sur des caractérisations électriques.

## 4.3 Résultats expérimentaux

Dans la section 4.3.2, nous allons commencer par déterminer expérimentalement la valeur de l'entrefer vertical lors d'une décharge élémentaire. Ensuite nous nous intéresserons à l'allure du courant et de la tension d'une décharge. Un modèle simple sera proposé : il permettra de remonter aux propriétés électriques du plasma (résistance, inductance) et de prévoir la durée et le courant crête d'une décharge. Nous tenterons ensuite de réduire l'énergie transmise par le plasma en introduisant une résistance de ballast dans le dispositif expérimental. Ce faisant, nous verrons que l'un des problèmes spécifiques de la  $\mu$ EE par rapport à l'EE est le faible nombre de décharges. Différentes pistes seront explorées pour tenter de résoudre ce problème.

### 4.3.1 Dispositif expérimental avec générateur RC

Le dispositif expérimental, représenté à la Figure 119, est proche de celui présenté au chapitre précédent ; la différence principale étant l'utilisation d'un simple circuit RC comme générateur de décharges. Celui-ci est composé d'une résistance de puissance de type MP820 (50, 100 ou 200  $\Omega$ ) sans inductance ainsi qu'une capacité PHE448 (0,1 - 1 - 10 et 100 nF) supportant des tensions jusqu'à 2 kV à haute fréquence et en dynamique. Ce circuit est fixé au travers d'un boîtier sur la potence de la machine de façon à être connecté au plus près de l'électrode. Une alimentation (EA PS-3150), variable de 0 à 150 V avec un courant maximum de 4 ampères, alimente le circuit RC.

Un oscilloscope Tektronix DPO 2024 (bande passante 200 MHz) assure l'observation de la tension au niveau de la capacité de travail. Enfin deux sondes de courant positionnées sur l'alimentation et le substrat permettent d'observer les deux points principaux du circuit (① et ② sur la Figure 119). On notera également la présence d'un pico-ampèremètre Keithley 6485 permettant la détection de contact entre l'électrode et le substrat. Un flux de diélectrique (eau dé-ionisée) est acheminé par une buse à proximité de l'électrode.

Des platines de translation permettent le déplacement d'un échantillon selon XY tandis qu'une autre platine permet le déplacement de l'électrode selon l'axe Z. Cet axe est surmonté d'un piézoélectrique Physik Instrumente (P-864) avec une course de 90  $\mu$ m et une précision de 0,1  $\mu$ m contrôlé par le module E-502.

Les données sont collectées via les captures d'écran de l'oscilloscope sur clé USB et sont analysés, puis présentées sous des graphiques Excel et SigmaPlot.

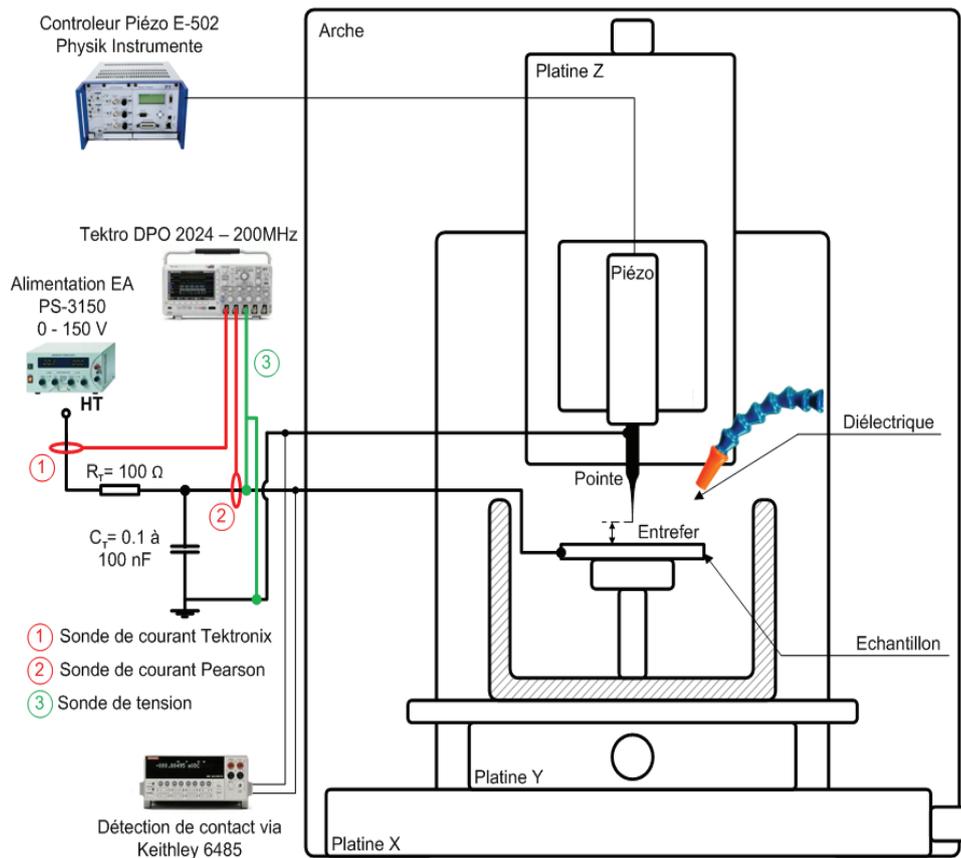


Figure 119 - Montage expérimental avec circuit RC.

#### 4.3.2 Valeurs de l'entrefer et tension de claquage

Dans une première série d'expérience, nous avons étudié la tension de claquage en fonction de la valeur de l'entrefer et de la tension appliquée à la cellule RC.

Le principe de la mesure consiste à placer l'électrode outil à une distance connue du substrat, puis à appliquer une tension d'usinage croissante (de 0 à 150 V par palier de 10 V) jusqu'à l'obtention d'une impulsion de courant observable à l'oscilloscope ; la durée de chaque palier est très longue pour tenir compte du caractère aléatoire des décharges (cette question sera étudiée en section 4.3.6.1).

Le substrat utilisé est en acier inoxydable 316L et les essais sont réalisés avec une électrode en tungstène à profil conique d'extrémité  $10 \mu\text{m}$  environ afin de localiser la décharge à l'extrémité de la pointe. L'ensemble est à l'air libre pendant la phase de placement de l'électrode à distance du substrat. Les essais de génération de décharges ont lieu soit à l'air, soit en ajoutant un goutte d'eau dé-ionisée.

Pour gérer la valeur de l'entrefer, le placement de l'électrode à distance du substrat est effectué de la manière suivante. Tout d'abord, on rappelle que le dispositif expérimental est disposé sur une table anti vibration Newport (M-VIS3030-IG2-125A) de fréquence de coupure 1,5 Hz. Une d.d.p. de valeur faible (0,5 V) est appliquée entre l'électrode et le substrat. L'actionneur piézoélectrique permet de déplacer l'outil vers la pièce tout en mesurant le courant outil - pièce à l'aide du pico-ampèremètre.

Lorsque les deux électrodes sont à distance, aucun courant n'est détecté (Etape 1, Figure 120). Lorsqu'une portion de l'électrode entre en contact avec le substrat, l'ampèremètre détecte un très faible courant (typiquement  $0,02 \mu\text{A}$ ) (Etape 2, Figure 120).

Ce point est pris comme référence pour remonter l'outil d'une distance connue  $\epsilon$  qui formera l'entrefer (Etape 3, Figure 120).

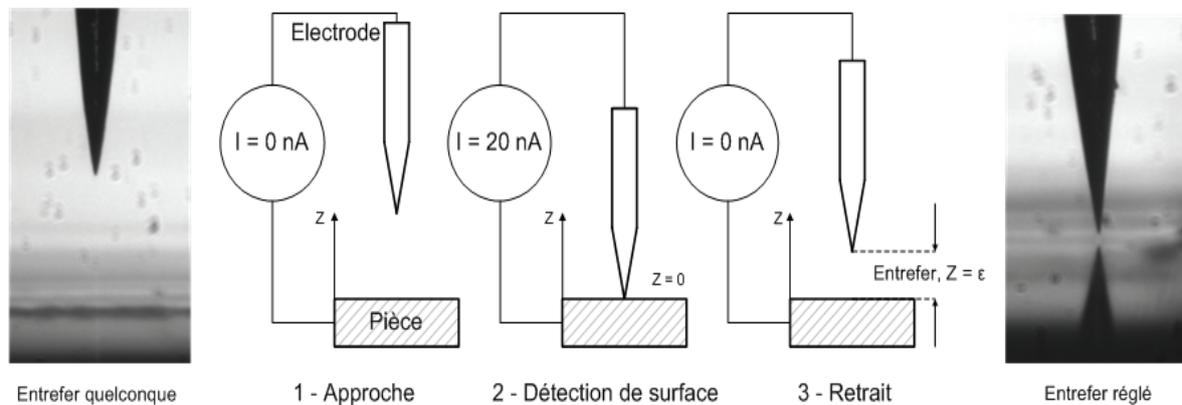


Figure 120 - Protocole de mesure d'entrefer.

Notons que le contact entre les deux électrodes à l'étape 2 n'est pas nettement défini : le courant peut être extrêmement instable, seule une faible partie de l'électrode étant en contact direct avec le substrat. Il s'agit selon nous d'un contact créé typiquement par les aspérités des électrodes [44] (en conséquence, si l'on mesure la résistance de contact, elle n'est pas de  $0 \Omega$  ; elle est d'ailleurs difficile à déterminer).

La Figure 121 illustre par des vues optiques les électrodes utilisées pour cette expérience. Une électrode de tungstène de diamètre  $250 \mu\text{m}$  comprenant des aspérités et une électrode de tungstène taillée avec notre protocole du chapitre 2 avec une extrémité très fine ( $\approx 15 \mu\text{m}$ ). Le même jeu d'électrode en graphite a été utilisé. Toutefois, l'électrode de graphite avec aspérités présente un diamètre de  $300 \mu\text{m}$ . L'électrode de graphite taillée affiche une extrémité de  $15 \mu\text{m}$ .

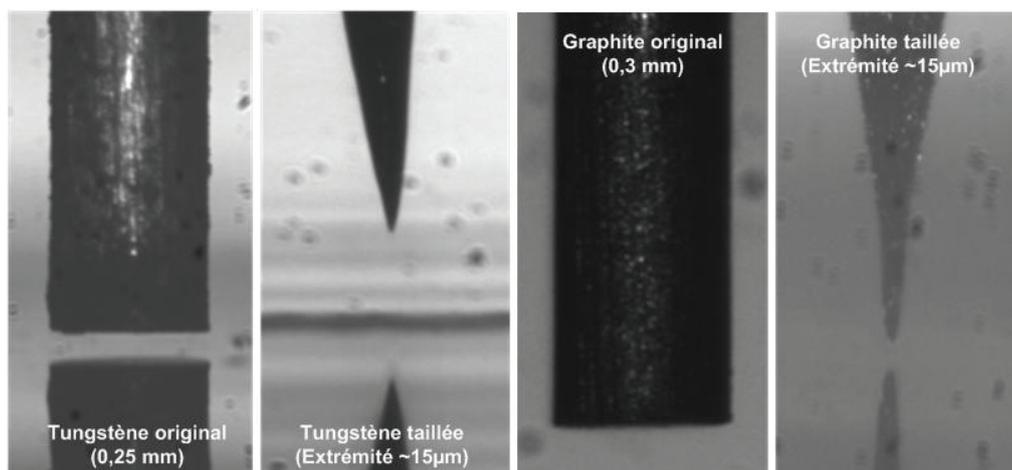


Figure 121 - Vues optiques des pointes utilisées pour la mesure de l'entrefer.

Bien évidemment après plusieurs claquages, la forme des pointes est légèrement modifiée, les résultats sont donc d'ordre qualitatif. La Figure 122 montre le relevé des tensions de claquage à l'air libre à l'entrefer en fonction de la tension appliquée pour les 4 électrodes-outil décrites ci-dessus.

L'analyse de la Figure 122 nous conduit aux remarques suivantes. Tout d'abord, malgré la disparité des résultats expérimentaux, quelle que soit la forme ou la nature de l'électrode (graphite ou tungstène), l'entrefer se situe entre 1 et 20  $\mu\text{m}$  pour une tension de claquage de 80 à 150 V. La dispersion est considérable.

Toutefois, on constate que les points expérimentaux sont de plus en plus regroupés pour des valeurs de tension supérieure à 100 V, où l'entrefer est supérieur à 6  $\mu\text{m}$ . Pour les valeurs de tensions inférieures à 100 V, la distribution est plus aléatoire, il est difficile de déterminer un entrefer correspondant.

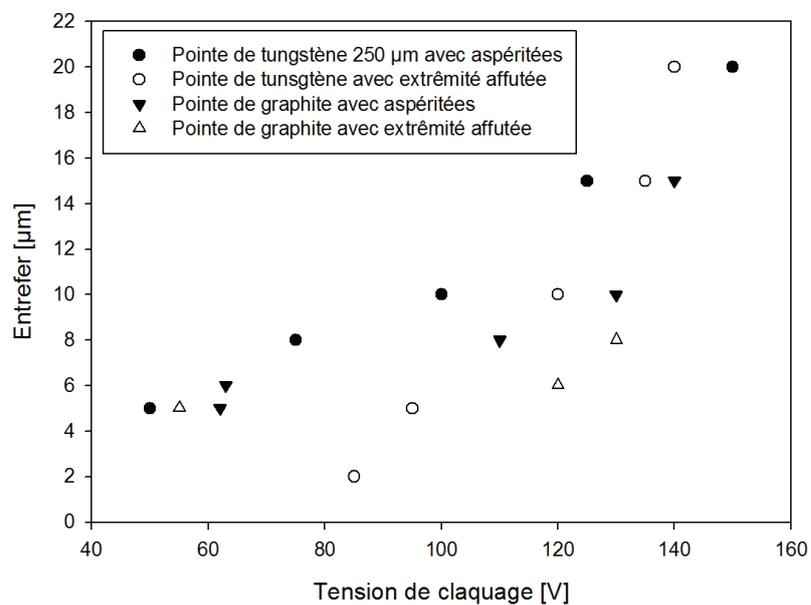


Figure 122 - Tension de claquage pour une valeur d'entrefer donné dans l'air.

On voit qu'avec des pointes taillées avec un apex affûté, que ce soit le graphite ou le tungstène, il est difficile de claquage avec une tension inférieure à 100 V avec un entrefer inférieur à 6  $\mu\text{m}$ . Avec les pointes au diamètre plus important, pouvant présenter des aspérités à l'extrémité, un comportement plus répétable a été obtenu.

Une conclusion très générale et très importante dans le cadre de ce travail est qu'il est difficile de déclencher une décharge dans l'air avec des électrodes de petites dimensions. Ce résultat expérimental est contre-intuitif puisque l'on s'attend à ce que le champ électrique soit de plus en plus important au bout d'une pointe de plus en plus fine et donc que le claquage soit de plus en plus facile.

Une recherche bibliographique a montré qu'un tel effet avait été observé dans des études liées à la création des amorces et au claquage des diélectriques [161]. Ces études sont souvent effectuées avec des électrodes en configuration pointe-plan.

Deux explications ont été avancées selon Tobazéon et Lesaint [161], [162] : la principale explication est la plus grande probabilité d'obtenir des renforcements locaux de champs dus à des aspérités sur les électrodes. Une théorie basée sur une analyse statistique conduit à une dépendance linéaire de la rigidité<sup>24</sup> en champ uniforme, en fonction du logarithme de l'aire des électrodes [71] (Figure 123).

Une alternative à cet « effet de surface » est l'« effet de volume » proposé par Wilson [72] : le claquage prend naissance au point « le plus faible » de l'isolation ; si un plus grand volume est contraint au même niveau de champ, un point encore plus faible peut être présent, déclenchant le claquage à une tension plus basse. À partir de ce concept, Wilson montre que la rigidité peut être divisée par 5 lorsque le volume croît de  $10^{-3}$  à  $10^3$  cm<sup>3</sup>.

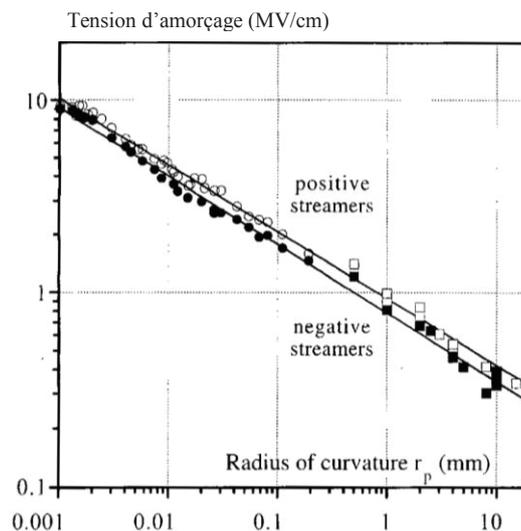


Figure 123 - Champ de claquage en fonction du rayon de courbure de l'électrode selon [162]

En résumé, il est d'autant plus difficile de « claquer » lorsque le micro-outil est de faible dimension. L'opérateur a alors tendance à accroître la tension d'usinage avec comme résultat des impacts importants. Par ailleurs nous verrons en section 4.3.6 différentes tentatives pour contrecarrer cet effet.

<sup>24</sup> La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant la création d'un arc électrique et donc d'un court-circuit.

### 4.3.3 Profil expérimental du couple courant/tension au cours d'une décharge

#### 4.3.3.1 Allure générale du courant et de la tension

Dans cette partie, nous allons étudier les décharges obtenus avec le circuit RC. Elles seront caractérisées à l'aide de l'oscilloscope : la mesure de la tension est effectuée aux bornes de la capacité de travail et celle du courant sur l'électrode (cf. Figure 119).

La Figure 124 montre l'allure typique du courant et de la tension lors d'une décharge pour une tension de 100 V et une capacité de travail de 10 nF.

Soient **U** la tension d'usage appliquée à la cellule RC,  **$\Delta U$**  la valeur de la chute de tension observée lors de la décharge et  **$I_c$**  la valeur du courant crête atteinte lors de la décharge.

Dans le cas de la Figure 124, l'allure du courant (en violet) peut être considérée comme une impulsion : le courant passe d'une valeur nulle à une valeur crête  $I_c$  égale à 4,05 A avant de redescendre jusqu'à un courant nul. La durée de cette impulsion est de 550 ns. La chute de tension correspondante (en jaune) est de  $\Delta U = 90$  V à partir de la tension de travail d'usage  $U$  de 100 V. Il est clair qu'à la fin de la décharge, l'alimentation recharge la capacité de travail de sorte que la tension aux bornes de la capacité remonte avec une constante de temps réglable par la résistance  $R_T$  (Figure 124).

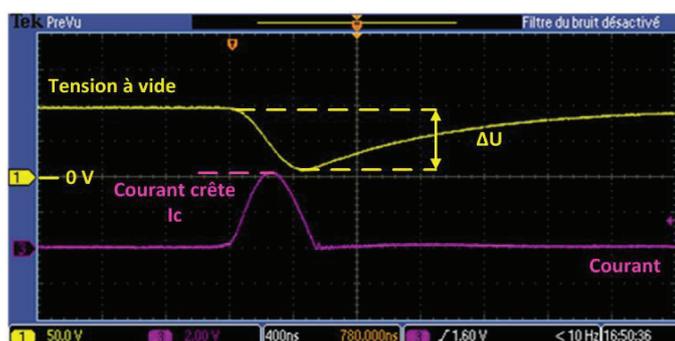


Figure 124 - Profil typique de la tension et du courant durant une décharge.

Tension de claquage de 100 V et une capacité de 10 nF (entrefer : 3  $\mu\text{m}$ , électrode de W, substrat inox, diélectrique : air).

Le plus souvent des signaux de même allure générale sont observés pour des valeurs de tension et de courant plus faibles. La Figure 125 montre un autre exemple de décharge avec une tension de claquage de 40 V : la chute de tension  $\Delta U$  est de 16 V. L'impulsion de courant dont la durée est inchangée à 550 ns passe par une valeur crête  $I_c$  de 500 mA. La chute de tension et le courant crête observés sont donc respectivement x2,5 plus faibles et x8 plus faibles que précédemment.

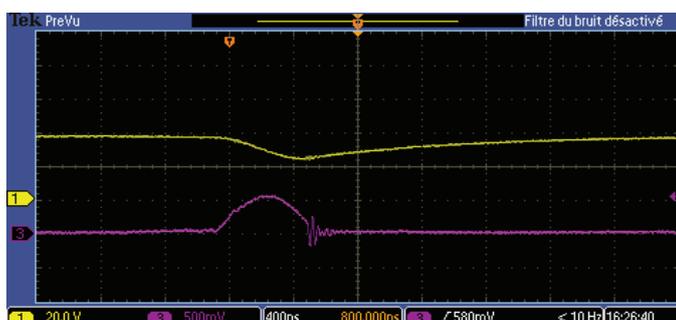
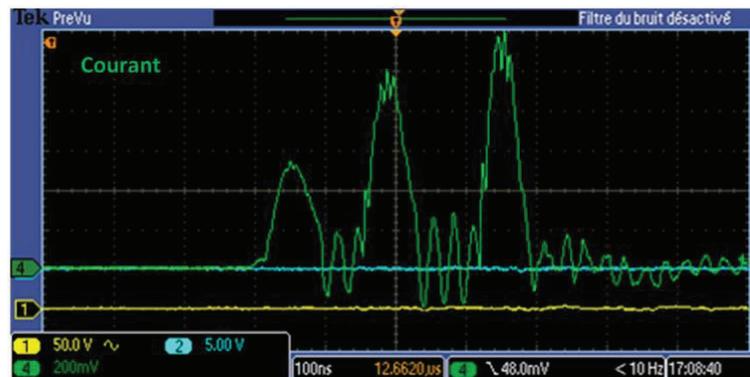


Figure 125 - Profil typique de tension et de courant pour une tension de claquage de 40 V.

Capacité de 1 nF, entrefer : 3  $\mu\text{m}$ , électrode de W, substrat inox, diélectrique : air.

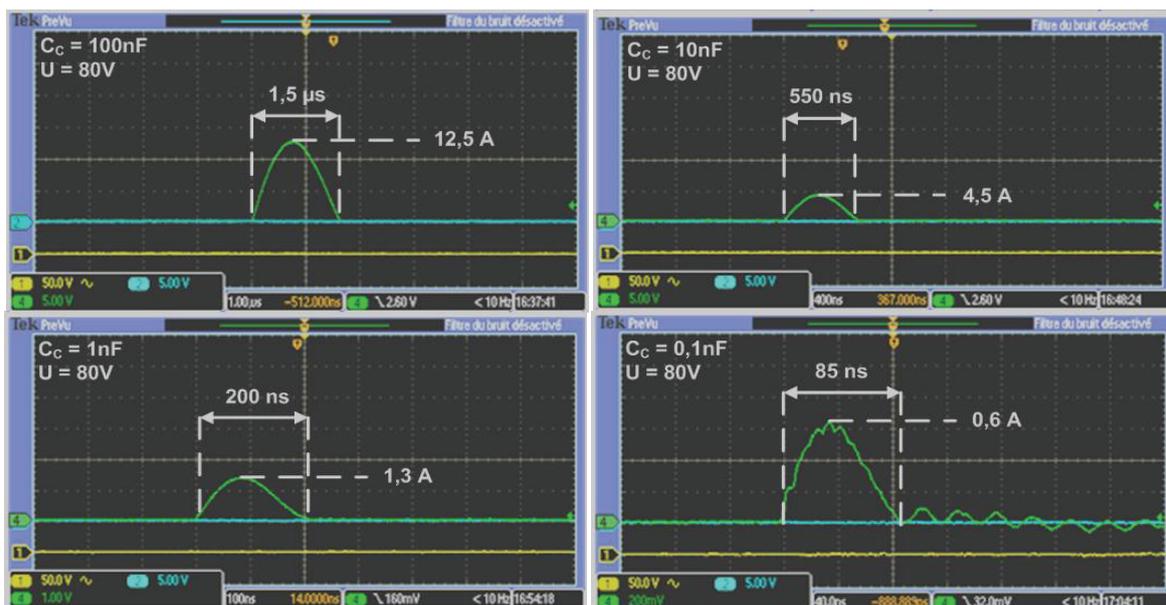
L'impulsion de courant est parfois accompagnée de plusieurs autres oscillations. Dans la Figure 126 ci-dessous, on aperçoit trois impulsions de courant correspondant (probablement) à trois décharges, avec des oscillations de courant intermédiaires. Par la suite nous négligerons ces oscillations.



**Figure 126 - Oscillations post-décharge.**  
*Capacité de 1 nF, entrefer : 3 μm, électrode de W, substrat inox, diélectrique : air.*

#### 4.3.3.2 Influence de la capacité de travail

Bien évidemment, la valeur de la capacité de travail permet de fixer l'échelle de l'énergie transmis par la décharge au matériau. La Figure 127 montre le profil temporel typique du courant d'une décharge pour les valeurs suivantes de capacités : 0,1 nF, 1 nF, 10 nF et 100 nF. La tension d'usinage a été fixée à 80 V. Le système pointe/substrat est composé d'une pointe de tungstène avec une extrémité de diamètre de 10 μm sur un substrat d'acier inoxydable sous un flux d'eau dé-ionisée. La valeur maximale des pics d'intensité observés s'étend de 40 mA pour les plus petites jusqu'à 23 A pour les décharges les plus importantes.



**Figure 127 - Allure de décharges isolées observées à l'oscilloscope.**  
*Entrefer : 3 μm, électrode de W, substrat inox, diélectrique : air.*

La Figure 128 ci-dessous montre l'allure de la tension et du courant lors de décharges. Par rapport aux Figure 124 et Figure 125, nous avons « zoomer » sur la chute de tension en déclenchant l'oscilloscope sur le courant. Pour des raisons techniques, il n'a pas été possible d'enregistrer des oscillogrammes complets sur toute l'excursion de tension pendant une décharge. En effet pour mesurer  $\Delta U$  avec une bonne précision, nous avons été contraints de nous limiter à l'observation des points bas de la tension (visibles ci-dessus sur la courbe jaune). On notera que dans les exemples considérés, les tensions résiduelles relevées sont comprises entre 5 et 15 V. Il est plutôt rare de voir la tension chuter en-dessous de 0 V.



**Figure 128 - Comportement du courant et de la tension lors des décharges.**  
*Capacité de 1 nF, Entrefefer : 3  $\mu$ m, électrode de W, substrat inox, diélectrique : air.*

Un résultat très important, validé par une accumulation de données expérimentales, est que **la durée de décharge est principalement gouvernée par la valeur de la capacité de travail ( $C_T$ ) et pas de la tension d'usage**. Cette règle a été vérifiée pour 95% des décharges observées sur un total de plus de 500 décharges avec C variant de 0,1 nF à 100 nF, U variant de 40 à 150 V, et  $R_T = 100 \Omega$ .

Le tableau ci-dessous donne la valeur moyenne de cette durée en fonction de la capacité d'usage :

C (nF)	Durée de la décharge (ns)
0,1	80 $\pm$ 5
1	200 $\pm$ 10
10	550 $\pm$ 20
100	1550 $\pm$ 50

**Tableau 20 - Durée de l'impulsion de courant en fonction de la capacité de travail.**  
*Entrefefer : 3  $\mu$ m, électrode de W, substrat inox, diélectrique : air.*

#### 4.3.3.3 *Rôle des autres conditions expérimentales*

Avant d'aller plus loin nous avons cherché à évaluer qualitativement le rôle des autres paramètres expérimentaux.

##### **Influence du diélectrique**

Les premières analyses de décharges ont été réalisées dans deux diélectriques différents : l'air ambiant et l'eau dé-ionisée. L'inconvénient majeur de l'eau dé-ionisée avec le circuit RC est la présence d'un courant d'électrolyse lorsque l'électrode et la pièce sont mises sous tension. Les signaux sont noyés dans le courant d'électrolyse, mais l'apparition de décharges est toutefois observée. La Figure 129 ci-dessous montre les signaux observés avec un courant d'électrolyse (voie 2) relativement constant d'une valeur de 100 mA, entrecoupé de brèves décharges caractérisées par des hausses de courant atteignant 200 à 300 mA.

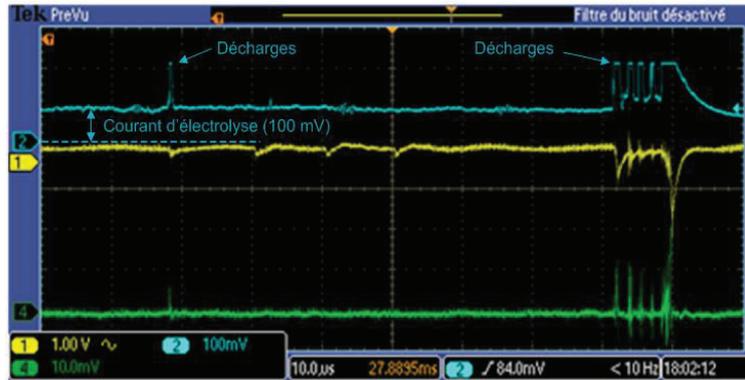


Figure 129 - Décharge dans de l'eau dé-ionisée avec un circuit RC.

*U=50V, Capacité de 1 nF, Entrefer : 3 µm, électrode de W Ø125 µm, substrat inox, diélectrique: eau dé-ionisée.*

Quelques tests ont été effectués dans un diélectrique destiné à l'électroérosion (IonoPlus 3000, Oelheld) mais nous n'avons pas constaté de différence majeure avec l'eau dé-ionisée, mis à part l'absence d'électrolyse.

En conclusion, l'eau dé-ionisée a été abandonnée dans cette étude<sup>25</sup> afin de simplifier l'analyse des décharges (pas de courant d'électrolyse). **Sauf indication contraire, par la suite, les décharges ont été effectuées à l'air ambiant.**

#### Forme de l'électrode

La forme de l'électrode est un paramètre important, comme nous l'avons vu dans la section 4.3.2. Toutefois, notre étude portant sur des décharges isolées, il était nécessaire d'avoir un profil d'électrode permettant un claquage « localisable » et une analyse aisée des signaux. **Nous avons donc opté dans la suite de ce chapitre pour des pointes taillées avec un apex conique à l'air libre. Les substrats sont en acier inoxydable avec des surfaces poli-miroir.**

#### Résistance de charge

La résistance de charge (ou de travail)  $R_T$  est la résistance située entre l'alimentation et la capacité de travail. Son rôle est de limiter le temps de recharge de la capacité et d'éviter un court-circuit en cas de contact électrode-pièce<sup>26</sup>. La Figure 130 ci-dessous montre à titre d'exemple que  $R_T = 100 \Omega$  et  $C_T = 10 \text{ nF}$ , le temps de recharge de la capacité de travail est de :

$$\tau_{RECHARGE} = R_T \cdot C_T = 100 \times 10 \cdot 10^{-9} = 1 \mu\text{s}$$

**En faisant varier la valeur de  $R_T$  de 100 à 500  $\Omega$ , nos essais ont montrés que seule la durée de recharge de la capacité de travail est influencée et pas l'allure du courant et de la tension pendant une décharge.** Dans la suite de ce travail, sa valeur a donc été fixée à 100  $\Omega$ .

<sup>25</sup> Le courant d'électrolyse pourrait permettre une régulation de la largeur de l'entrefer par un asservissement du courant d'électrolyse est envisageable.

<sup>26</sup> Dans le chapitre précédent, son rôle était aussi de limiter le nombre de décharges possibles. Mais dans celui-ci nous n'étudions que les décharges individuelles et pas les trains de décharges.

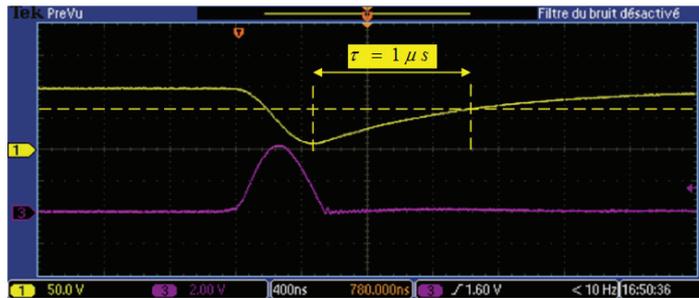


Figure 130 - Visualisation du temps de recharge pour  $R_T=100 \Omega$  et  $C_T=10 \text{ nF}$ .  
Capacité de 1 nF, Entrefer : 3  $\mu\text{m}$ , électrode de W, substrat d'inox, diélectrique : air.

### Influence de l'alimentation

Il s'agit d'un point très important. Le circuit RC est alimenté par une source de tension dont nous avons étudié le rôle durant une décharge. Ainsi, la Figure 131 montre la chute de tension (en jaune) observée aux bornes de la capacité de travail ainsi que le courant (en vert) passant par l'outil. Nous avons fait aussi apparaître l'allure du courant débité (en violet) par l'alimentation.

A  $t = 0 \text{ ns}$ , la décharge de la capacité démarre immédiatement avec une brusque chute de tension ( $\Delta U = 65 \text{ V}$ ) et une élévation de courant passant par l'outil ( $I_c = 1,3 \text{ A}$ ). Lorsque  $t = 50 \text{ ns}$ , ce courant atteint son maximum et commence à décroître. Durant ces 50 premières ns, on remarque que l'alimentation est découplée du reste du circuit : le courant mesuré par la sonde Tektronix est négligeable par rapport au courant passant par l'outil. Ensuite, l'alimentation commence à recharger la capacité.

Ainsi, nous considérerons souvent par la suite que le système « capacité de travail / électrode/pièce » est découplée de l'alimentation pendant l'impulsion du courant de décharge. Autrement dit, la décharge est si rapide qu'elle se déroule, au moins pendant la première phase, indépendamment de l'alimentation. Il s'agit bien évidemment d'une hypothèse de travail très simplificatrice mais utile.

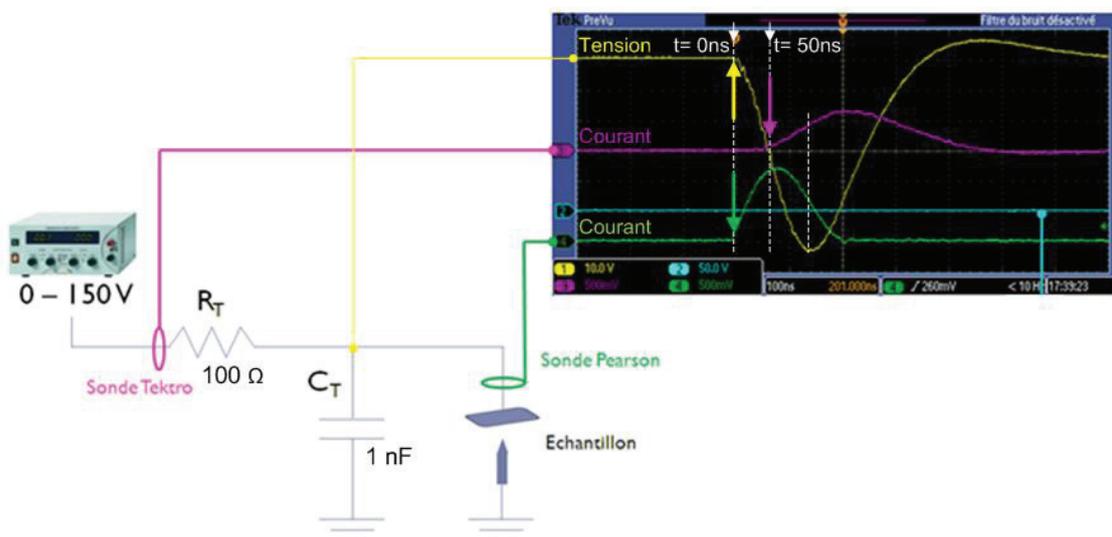


Figure 131 - Influence de l'alimentation du circuit RC.

#### 4.3.4 Énergie apportée par décharge

##### 4.3.4.1 Observations expérimentales

Nous allons maintenant étudier l'énergie transmise au dispositif par l'intermédiaire de la décharge. **L'énergie emmagasinée dans la capacité de travail est  $\frac{1}{2} CU^2$  mais notre hypothèse de base est que l'énergie transmise est déterminée par la chute de tension  $\Delta U$  observée et ce aussi bien pour de très fortes (U et C élevés) que pour de très faibles décharges (U et C faibles).**

La Figure 132 montre les caractéristiques courant/tension de trois décharges. Pour passer d'un  $\Delta U$  important (60 V dans la Figure 132A) à un  $\Delta U$  moyen (29 V dans la Figure 132B) puis très faible (1,8 V dans la Figure 132C), nous avons simplement réduit la valeur de la tension d'usage U. Le courant crête passe respectivement à 1,3 A, puis 0,55 A et 180 mA. La durée de l'impulsion de courant est de 200 ns dans les trois cas, ce qui correspond à la valeur de la capacité de travail (1 nF).

Il faut bien reconnaître qu'un observateur non attentif réglant son oscilloscope sur les valeurs de la Figure 132A pourrait très bien considérer que les signaux de la Figure 132C correspondent au bruit de fond de la machine.

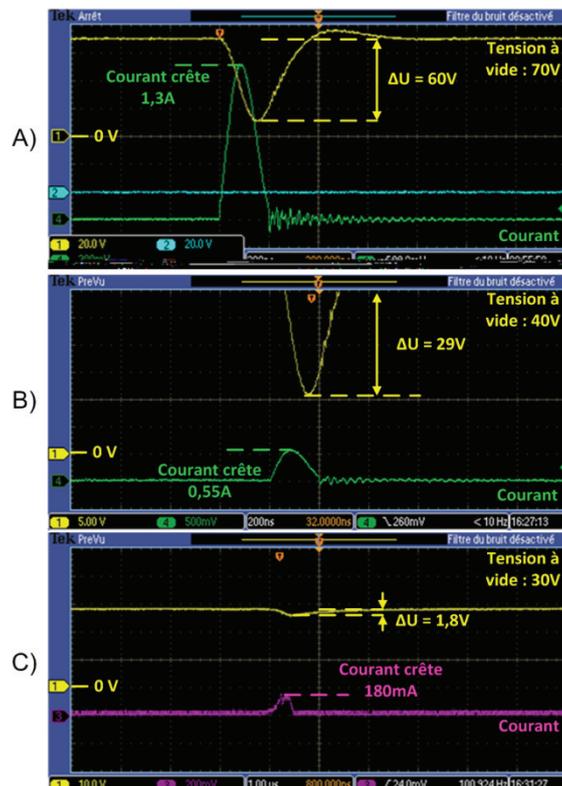


Figure 132 - Énergie transmise et chute de tension.

Résistance  $R_T = 100\Omega$ , Capacité de 1 nF, Entrefer : 3  $\mu\text{m}$ , électrode de W, substrat d'inox, diélectrique : air.

Par la suite, nous avons procédé à une étude expérimentale systématique du courant crête des décharges en faisant varier la tension de claquage à entrefer constant (3  $\mu\text{m}$ ) et ce pour différentes capacités. Puis nous avons analysé les résultats non pas en fonction de la tension de claquage mais en fonction de la chute de tension observée (Figure 133). **Un résultat important est que le courant crête varie linéairement avec la différence de potentiel observé** (à noter que pour des tensions d'usage inférieures à 30 V, l'occurrence des décharges est trop aléatoire pour obtenir des séries de mesures cohérentes).

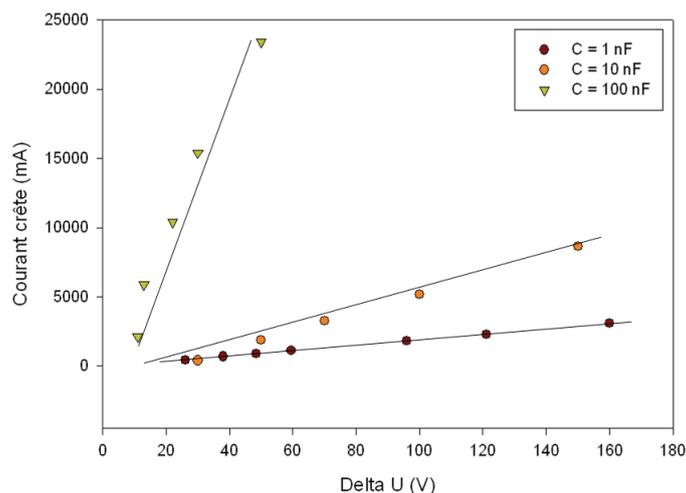
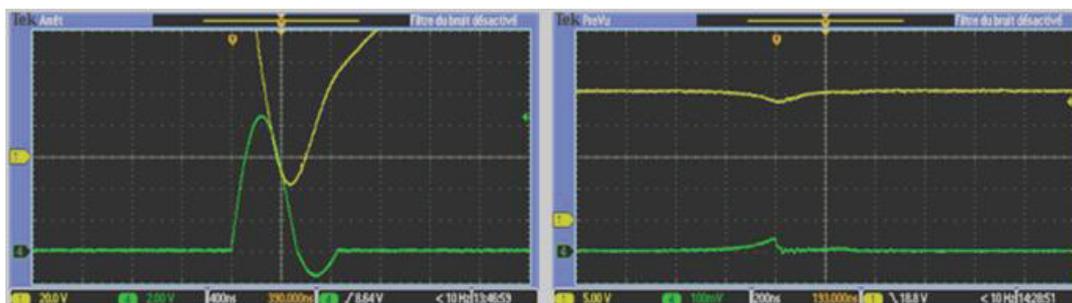


Figure 133 - Courant crête de décharge en fonction de  $\Delta U$  pour différentes capacités de travail.  
 Entrefer :  $3 \mu\text{m}$ , électrode de W, substrat inox, diélectrique : air.

#### 4.3.4.2 Décharges extrêmes

La Figure 134 montre deux cas extrêmes de signaux observés lors de décharges réalisées avec la même électrode-outil :

- une décharge à fort courant, avec un courant crête de 8,2 A, observée avec  $U = 150 \text{ V}$  et  $\Delta U = 170 \text{ V}$  ; la durée de l'impulsion de courant étant de 550 ns (valeur correspondant à  $C = 10 \text{ nF}$ ),
- une décharge à faible courant, avec un courant crête de 40 mA, observée avec  $U = 20 \text{ V}$  et  $\Delta U = 1,8 \text{ V}$  ; la durée de l'impulsion de courant étant de 180/200 ns (valeur correspondant à  $C = 1 \text{ nF}$ )<sup>27</sup>.



A)  $\Delta U = 170 \text{ V}$ ,  $I_c = 8.2 \text{ A}$ ,  $C = 10 \text{ nF}$

B)  $\Delta U = 1.8 \text{ V}$ ,  $I_c = 40 \text{ mA}$ ,  $C = 1 \text{ nF}$

Figure 134 - Décharges isolées extrêmes dans l'air.

Comme nous l'avons vu, nous pouvons considérer que le système « capacité de travail / électrode / substrat » est isolé du générateur de tension pendant les premières dizaines de nanosecondes de la décharge. Nous verrons plus loin (section 4.3.5.3) que cette hypothèse est très grossière : au bout d'un certain temps, on ne peut plus parler de système découplé car l'alimentation HT finit par prendre le relais. Néanmoins cela nous amène à proposer que l'énergie a d'abord été emmagasinée par la capacité pour être ensuite transmise à la décharge et qu'elle ne dépend pas directement de la tension d'usage mais de la chute de tension. Soit :

<sup>27</sup> Les moyens de caractérisation de la machine du chapitre 3 ne permettent pas de détecter cette décharge. Il ne sera donc pas possible de régler l'entrefer pour entretenir un régime d'étincelage à ce niveau d'énergie.

$$E_{\text{décharge}} \approx \frac{1}{2} C (\Delta U)^2$$

Si l'on revient aux deux cas extrêmes de décharge, la différence d'énergie délivrée est conséquente puisque dans le cas A, l'énergie est :

$$E_{\text{décharge1}} = \frac{1}{2} * C * \Delta U_1^2 = 144,5 \mu\text{J}$$

Alors que le cas B présente une énergie de :

$$E_{\text{décharge2}} = \frac{1}{2} * C * \Delta U_2^2 = 1,62 \text{ nJ}$$

On trouve ainsi jusqu'à 5 ordres de grandeurs de différence au niveau de l'apport d'énergie entre ces deux décharges. Le courant crête, quant à lui, varie sur trois ordres de grandeur (8,2 A vs 0,04 A).

Nos conclusions sont les suivantes : dans l'air **il est physiquement possible de créer des décharges avec des énergies de l'ordre du nJ** (ce qui a été rarement décrit dans la littérature, seul Egashira [107] fait part de décharges de l'ordre de 3 nJ dans de l'huile pour électroérosion). La chute de tension est alors de l'ordre de 1 V avec pour conséquence une valeur d'entrefer très faible de l'ordre de 1 à 3  $\mu\text{m}$ , rendant très difficile le contrôle mécanique de l'instrument. Toute la question est de trouver quelle est la tension d'usinage minimale utilisable dans la pratique.

Ces résultats ont été confirmés dans de l'eau dé-ionisée avec la machine de  $\mu\text{EE}$ .

#### 4.3.4.3 *Modélisation des décharges.*

L'observation du comportement linéaire des signaux précédents nous a conduits à tenter de modéliser le comportement du plasma par un système du 2<sup>ème</sup> ordre RLC à l'aide du logiciel PSpice. Bien évidemment nous avons conscience qu'il s'agit d'une simplification extrême d'un dispositif complexe mais notre objectif est de tenter de décrire, avec un modèle unique, une situation physique variant sur 5 ordres de grandeur en termes d'énergie fournie par décharge.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, nous considérerons que le système capacité de travail/électrode/substrat est découplé de l'alimentation HT : la résistance de charge est supposée infinie pendant la durée de la décharge. Le dispositif au cours de la décharge (Figure 135) est donc modélisé par :

- une capacité, C, (1 nF dans l'exemple ci-dessous) **avec une tension initiale à t=0 de 40 V** (on raisonne en dynamique et on suppose que la décharge fera varier la tension de la capacité de 50 à 10 V par exemple)
- une résistance R.
- une inductance L avec condition initiale imposant un courant de 0 A.

On suppose **la capacité C est égale à la capacité de travail** choisie par l'opérateur<sup>28</sup>. On raisonne en dynamique et on suppose que la décharge fera varier la tension de la capacité de 50 à 10 V par exemple. **On ne s'intéresse qu'à la première impulsion de courant.** En effet, après cette étape, le plus souvent le modèle n'est plus valable<sup>29</sup>.

<sup>28</sup> Le couple électrode/pièce forme un système capacitif mais dont la valeur peut être évaluée à quelques femtofarads [167].

<sup>29</sup> Lorsque le volume de matière impacté est évaporé par le flux thermique, l'entrefer se trouve modifié. Le champ électrique n'est plus assez intense pour maintenir le plasma stable. Celui-ci est donc interrompu dès la fin de la première impulsion, empêchant la formation des oscillations suivantes dans la majorité des cas.

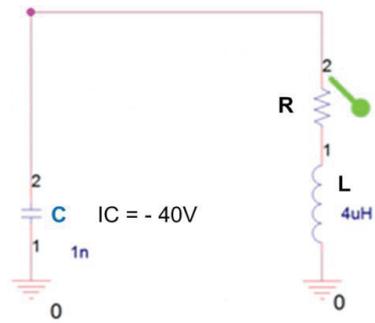


Figure 135 - Modélisation de la phase de décharge par un circuit RLC.

La Figure 136 montre les allures de la chute de tension et du courant plasma aux bornes de la capacité de travail. On retrouve le déphasage habituel entre courant et tension dans un circuit RLC;

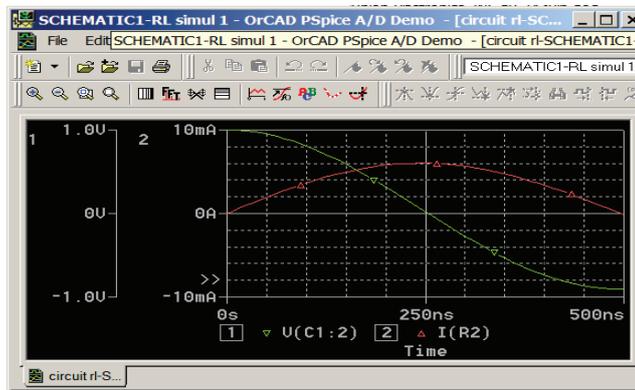


Figure 136 - Simulation PSpice du courant et de la tension durant une décharge.

Dans notre modèle, R et L correspondent à la résistance et à l'inductance moyenne du plasma. La capacité de la machine se décharge dans le plasma. Le courant initial est nul grâce à l'inductance. Celle-ci permet de « freiner » l'évolution du courant. Physiquement, on peut proposer l'explication suivante : le courant d'électrons augmente pendant la décharge, par exemple par effet d'avalanche. Puis la densité de charge devient telle que les électrons finissent par se repousser, d'où la décroissance du courant. Les allures typiques des décharges obtenues expérimentalement et reproduite par simulation sont montrées à la Figure 137 avec une bonne correspondance. En général, l'allure des courbes est conforme aux observations expérimentales (Figure 137, Figure 140, Figure 148).

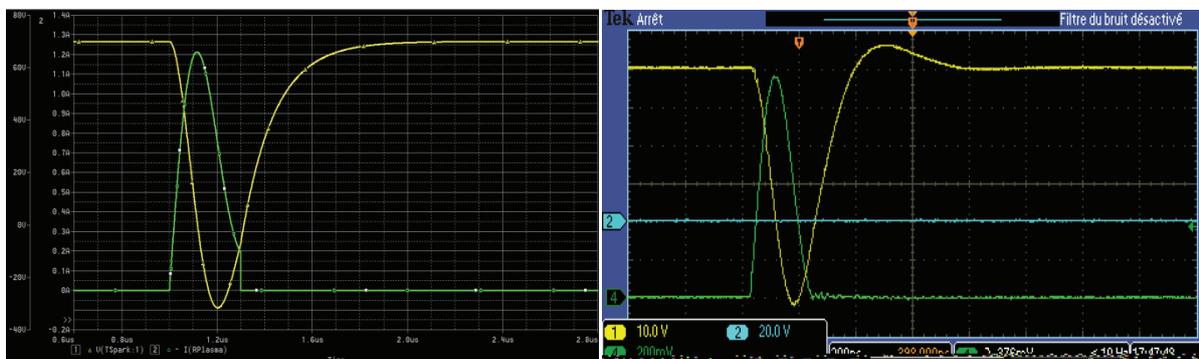


Figure 137 - Comparaison simulation/expérimentation de I et U durant la décharge.

#### 4.3.4.4 *Durée de vie et inductance du plasma*

Il est bien connu alors que dans le cas d'un système RLC faiblement amorti du 2<sup>ème</sup> ordre la période  $T_0$  vaut :

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \quad (8)$$

$T_0$  correspond au premier cycle de variation du courant avec changement signe. **Dans notre cas, nous nous intéressons qu'à la demi-période étant donné que les oscillations de courant négatives sont rares. Donc le paramètre pertinent sera  $T_0/2$  qui est donc la durée de la décharge (plus précisément de l'impulsion de courant lié à la décharge).**

Avec nos hypothèses de travail, la durée de la décharge ne devrait donc dépendre que de C et L. Ce point a été vérifié expérimentalement avec des résultats regroupés à la Figure 138. Des séries de décharges ont été observées à  $\Delta U$  décroissant pour des capacités de 1, 10 et 100 nF<sup>30</sup>. On constate bien que **la durée des décharges est constante** à partir de 30 V et ne dépend que de la valeur de la capacité. En dessous de 30 V, on sait néanmoins que les difficultés expérimentales rendent l'obtention de résultats reproductibles compliquée.

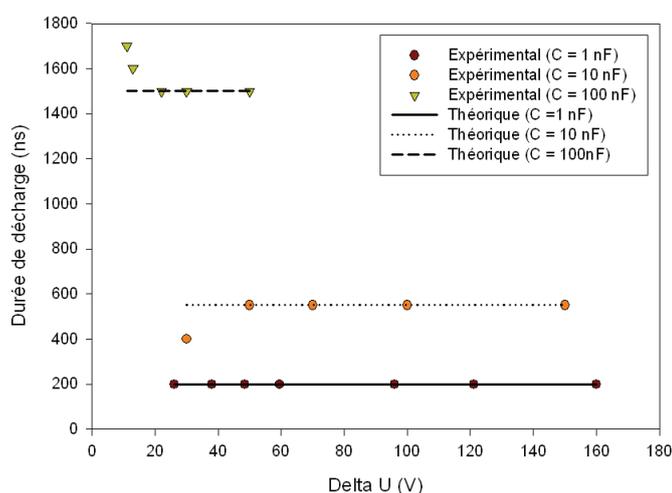


Figure 138 - Durée des décharges en fonction de  $\Delta U$  à l'air.

Connaissant  $T_0$  et C, nous pouvons estimer la valeur de l'inductance à partir de (8).

$$L = \frac{T_0^2}{4\pi^2 C}$$

Les valeurs d'inductance théoriques sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

$T_0/2$ (ns)	C fixé par l'opérateur (nF)	L ( $\mu H$ )
200	1	4
550	10	3
1550	100	2

<sup>30</sup> Une capacité de 0,1 nF a aussi été utilisée. Expérimentalement, la durée de l'impulsion de courant est alors de l'ordre de 80 ns. Les résultats expérimentaux sont en accord avec la théorie mais la série de données est insuffisante pour être traitée sur le même plan que les autres.

Un autre résultat est montré à la Figure 139. Il montre une analyse plus fine à partir du modèle PSpice. Celui-ci permet de comparer la durée des décharges mesurées expérimentalement avec la valeur théorique à L croissant. Il apparaît qu'une valeur de L dans le modèle comprise entre 2,5 et 4  $\mu\text{H}$  permet de confirmer les valeurs obtenues avec les résultats théoriques et expérimentaux. On trouve que l'inductance du plasma augmente légèrement lorsque la capacité de travail augmente (elle double si la capacité augmente de deux décades).

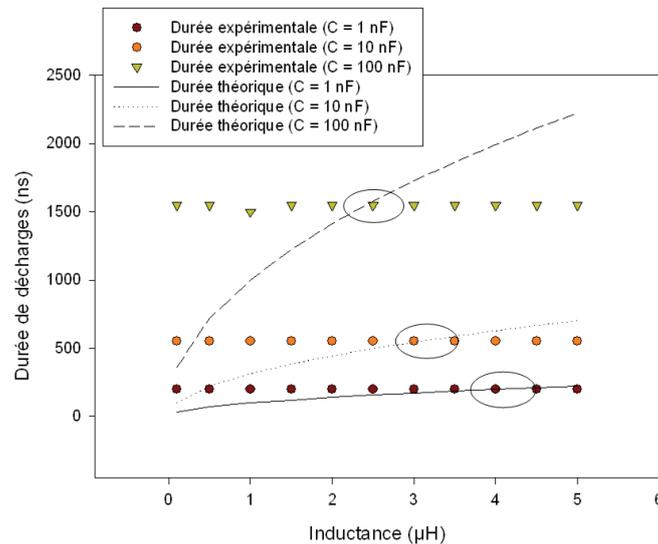


Figure 139 - Détermination de l'inductance du plasma.  
Entrefer 3  $\mu\text{m}$

Le Tableau 21 ci-dessous résume les valeurs d'inductance simulées pour chaque capacité utilisée. Avec les valeurs de R, L et C injectées dans le modèle, il est possible de comparer les durées de l'impulsion de courant théoriques et mesurées expérimentalement. **Notre modèle prédit la durée des décharges avec une précision inférieure à 5% pour des valeurs de capacité de 1, 10 et 100 nF.** Néanmoins pour l'instant, comme nous avons « fitté » les résultats expérimentaux avec trois paramètres, nous ne pouvons pas encore conclure sur l'intérêt du modèle.

Entrefer ( $\mu\text{m}$ )	Capacité (nF)	Inductance expérimentale ( $\mu\text{H}$ )	Durée de la décharge expérimentale (ns)	Durée de la décharge simulée (ns)	Écart de durée (%)
3	1	4	200	210	5
	10	3,2	550	577	4,9
	100	2,5	1550	1590	2,5

Tableau 21 - Inductance et durée de la décharge en fonction de la capacité de travail.

#### 4.3.4.5 Courant crête du plasma

Nous avons donc fixé les capacités à 1, 10 et 100 nF et l'inductance L de 2,5 à 4  $\mu\text{H}$  selon le Tableau 21, puis nous avons comparé les valeurs expérimentales et théoriques du courant crête (avec le modèle de la Figure 135 en prenant  $R = 1 \Omega$ ) et ce en faisant varier  $\Delta U$ . Le résultat est détaillé au Tableau 22. Les résultats expérimentaux montrent que plus le  $\Delta U$  est important, plus le courant crête  $I_c$  augmente, ce qui est validé par notre modèle. L'allure des signaux simulés est proche de celles des signaux observés et montre un accord entre le courant crête observé expérimentalement et le courant crête théorique.

Valeurs du modèle				Expérimental $I_c$ (A) (exp.)	Modèle $I_c$ (A) (th.)	Ecart (%)
$C_T$ (nF)	$R_{Plasma}$ ( $\Omega$ )	$L_{Plasma}$ ( $\mu H$ )	U / $\Delta U$ (V)			
1	1	4	50 / 40	688	602	12,5
			70 / 60	1110	905	18,5
			100 / 94	1820	1403	22,9
10	1	3,2	50 / 40	1900	2133	12,3
			70 / 60	3260	3189	2,2
			100 / 94	5160	5014	2,8
100	1	2,5	50 / 40	5880	6860	16,6
			70 / 60	10400	10298	1
			100 / 94	15400	16124	4,7

Tableau 22 - Simulation du courant crête à l'aide du modèle RLC.

La Figure 140 montre une comparaison du courant expérimental et de la simulation pour une décharge obtenue avec une capacité de 10 nF et une chute de tension de 100 V. D'après le modèle, le courant maximal détecté devrait être 5,02 A avec une durée de décharge de 550 ns. Le relevé expérimental indique un courant de 5,05 A avec une durée de 560 ns.

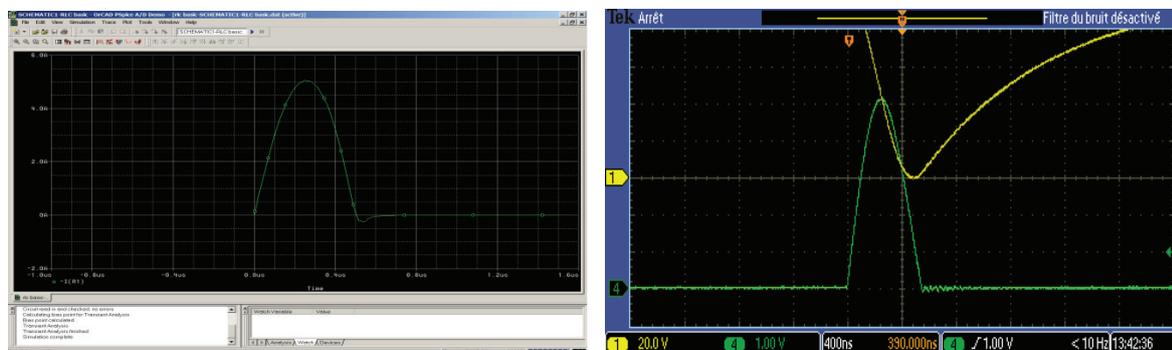


Figure 140 - Comparaison de l'allure des signaux de courant.

A gauche, par simulation. A droite, signal expérimental ( $U = 100$  V,  $C_T = 10$  nF, entrefer :  $3 \mu m$ , diélectrique : air)

#### 4.3.4.6 Influence de l'entrefer sur la résistance du plasma.

Les tableaux ci-dessous montrent les caractéristiques d'une série de décharges effectuées à tension d'usage décroissante pour trois valeurs d'entrefer : 1, 3 et 5  $\mu m$ . Nous observons l'influence de la largeur de l'entrefer sur les paramètres  $I_c$  et  $\Delta U$ . La capacité de travail étant de 1 nF, on vérifie bien que la durée de l'impulsion de courant est de 200 ns et ce quelle que soit la largeur de l'entrefer.

Entrefer ( $\mu m$ )	U (V)	$\Delta U$ (V)	Courant crête $I_c$ (mA)	Durée (ns)
1	100	103	2000	200
3	100	96	1820	200
5	100	90,5	1680	200

Tableau 23 - Caractéristiques des décharges pour  $U=100$ V et  $C=1$ nF.

Entrefer ( $\mu m$ )	U (V)	$\Delta U$ (V)	Courant crête $I_c$ (mA)	Durée (ns)
1	60	53.5	1070	200
3	60	48.5	880	200
5	60	42	750	200

Tableau 24 - Caractéristiques des décharges pour  $U=60$ V et  $C=1$ nF.

Entrefer ( $\mu\text{m}$ )	U (V)	$\Delta U$ (V)	Courant crête I <sub>c</sub> (mA)	Durée (ns)
1	40	32.5	650	200
3	40	26	450	200
5	40	18	300	200

Tableau 25 - Caractéristiques des décharges pour U=40V et C=1nF.

La Figure 141 ci-dessous représente la variation de l'intensité maximale de décharges pour une autre série de chutes de tension en fonction d'une valeur d'entrefer de 1, 3 à 5  $\mu\text{m}$ . Ici encore, la capacité de travail est de 1 nF et les résultats sont en accord avec ce qui précède. Le courant crête varie linéairement avec la tension de travail et la chute de tension comme cela a été vu précédemment. Les courbes sont décalées, ce qui traduit que l'intensité maximale décroît d'une valeur constante égale à 200 mA à mesure que l'entrefer augmente de 2  $\mu\text{m}$ .

On suppose que cette perte d'intensité est principalement due à l'augmentation de la résistance du plasma en raison de l'agrandissement de l'entrefer.

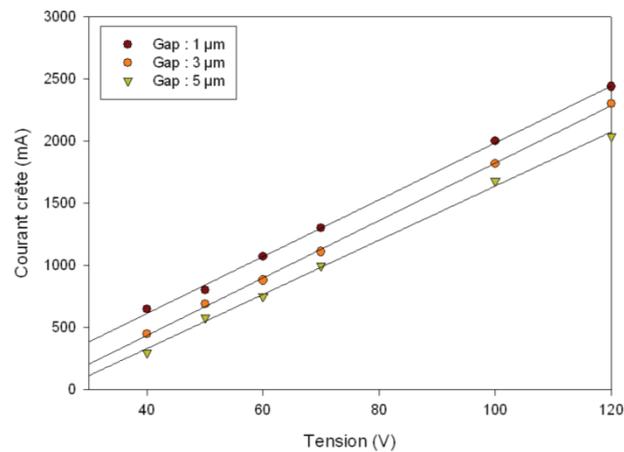


Figure 141 - Influence de l'entrefer sur le courant crête en fonction de la tension de travail.

#### 4.3.4.7 Signification physique

Par la suite, nous avons cherché à estimer la valeur de la résistance du plasma d'après les paramètres physiques de celui-ci et les données disponibles dans la littérature. Pour aboutir à des valeurs cohérentes avec les niveaux expérimentaux de courant crête, les simulations menées avec PSpice montrent que la valeur de la résistance du modèle doit être comprise entre 0 et 15  $\Omega$ . Nous aurions voulu estimer la valeur de cette résistance à partir de l'amortissement des oscillations observables dans un circuit RLC classique. Mais nous n'avons observé que rarement de telles oscillations lors des décharges. Nous devons donc estimer cette valeur par une autre méthode.

La formule de Spitzer [163] est couramment utilisée pour déterminer la conductivité  $\sigma$  d'un plasma. Cette formule est valable pour un plasma idéal mais peut être utilisée pour un plasma faiblement non-idéal (cf. section 4.2.3).  $\ln \Lambda$  est calculé avec le paramètre de couplage  $\Gamma_{Plasma}$  :

$$\sigma = 1,53 \cdot 10^{-2} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\ln \Lambda} [\Omega^{-1} m^{-1}] \text{ avec } \ln \Lambda = \frac{1}{2} \ln \left[ 1 + \left( \frac{3}{\Gamma_{plasma}} \right)^2 \right]$$

La relation liant la résistivité ( $\rho$ ) à la conductivité ( $\sigma$ ) étant :  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  avec  $\rho = R \frac{A}{l}$  et où  $A$ , est la section du plasma. On obtient la résistance  $R$  du plasma selon la formule :

$$R = \frac{l}{3,06 \cdot 10^{-2} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \pi r^2} \cdot \ln \left[ 1 + \left( \frac{3}{\Gamma_{Plasma}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

- Où  $l$  [m], représente la longueur du plasma.  
 $r$  [m], représente le diamètre du plasma.  
 $T$  [K], la température du plasma.  
 $\Gamma_{Plasma}$ , le paramètre de couplage du plasma.

D'après la section 7.1, les plasmas en électroérosion (EE) affichent un paramètre de couplage  $\Gamma_{plasma} = 0,3$  avec une température  $T$  de 7 500K. Nous formulons l'hypothèse que ce paramètre est du même ordre de grandeur en  $\mu\text{EE}$ .

Par ailleurs, nous possédons au moins une information sur les dimensions du plasma : sa longueur est fixée dans la gamme de valeur habituelle de l'entrefer, soit 1, 3 et 5  $\mu\text{m}$ .

Par contre, nous n'avons pas d'estimation directe du diamètre du plasma. Néanmoins, selon Kunieda [146], il serait de l'ordre de 15  $\mu\text{m}$ . Nous retiendrons une fourchette de diamètre autour de cette valeur, de 5 à 30  $\mu\text{m}$ , car à l'instar de Kunieda, nous avons aussi observé des impacts sur les substrats de 5  $\mu\text{m}$  (ce qui nous laisse penser que nous observons des phénomènes du même ordre de grandeur).

D'après ((9)), les valeurs de résistance de plasma estimées sont :

Longueur du plasma ( $\mu\text{m}$ )	Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Résistance Plasma ( $\Omega$ )
1	5	2,96
	15	0,33
	30	0,08
3	5	8,87
	15	0,99
	30	0,25
5	5	14,78
	15	1,64
	30	0,41

Tableau 26 - Valeur de la résistance plasma en fonction de l'entrefer et du diamètre plasma.

Une estimation à l'aide de la formule de Spitzer montre que la résistance du plasma est de l'ordre de la dizaine d'ohms, ce qui est accord avec les ordres de grandeurs obtenus par simulation avec PSpice.

En faisant quelques hypothèses, nous pouvons alors expliquer pourquoi nous observons une baisse de l'intensité lors de l'augmentation de l'entrefer. Car dans le cas, où l'on suppose un plasma de diamètre de l'ordre de 15  $\mu\text{m}$ , la résistance du plasma varie de 8.87  $\Omega$  à 14.8  $\Omega$  quand on augmente l'entrefer de 3 à 5  $\mu\text{m}$ . Cette hausse de la résistance à hauteur de 6  $\Omega$  dans le modèle PSpice engendre bien une diminution du courant crête de l'ordre de 200 mA, comme celle constatée expérimentalement.

#### 4.3.4.8 Conclusion

La modélisation du système circuit/plasma par un modèle RLC donne satisfaction pour la prédiction de la durée et de l'amplitude des décharges. A partir de la valeur de la chute de tension observée expérimentalement, ce modèle permet de prédire la valeur expérimentale du courant crête avec une précision de 10 à 20 %, et ce sur 3 ordres de grandeur de courant (20 A à 20 mA). Le modèle permet d'évaluer la durée des décharges (précision inférieure à 5%) en montrant qu'elle n'est dépendante que de la capacité de travail C.

D'autre part, nous avons été capables d'estimer la résistance, de l'ordre de quelques ohms, et de montrer qu'elle est en accord avec les données physiques disponibles sur les plasmas. La diminution du courant crête lorsque l'entrefer augmente a été expliquée par l'augmentation de la résistance du plasma avec un bon accord entre valeurs expérimentales et données théoriques.

Pour aller plus loin, il conviendrait de procéder à des études spectroscopiques pour caractériser le plasma de  $\mu\text{EE}$  dans nos conditions expérimentales et aussi mesurer la largeur effective du plasma.

Malgré nos efforts, nous n'avons pas réussi à relier la valeur de l'inductance estimée d'après nos mesures avec les données physiques disponibles sur les plasmas d'EE.

Pendant cette étude, nous avons mis en évidence les difficultés qui expliquent selon nous les problèmes rencontrés pour miniaturiser l'EE, à savoir :

- **Point 1 : il est de plus en plus difficile de déclencher des décharges lorsque le diamètre de l'électrode-outil diminue** (cf. [162]). De manière pratique, la tension d'usinage doit être très supérieure à la rigidité du diélectrique utilisé. **Il est donc souhaitable de travailler à une tension d'usinage importante** alors que nous étions dans la gamme 30-90 V avec un entrefer de 1 à 5  $\mu\text{m}$  au chapitre 3.
- **Point 2 : L'énergie par décharge ne dépend pas directement de la tension d'usinage mais de la chute de tension observée.** Comme il est nécessaire de travailler à tension élevée, la chute de tension est élevée ce qui n'est pas compatible avec la réalisation de petits impacts.
- Point 3 : Pour faire passer le moins possible d'énergie dans la décharge, une solution pourrait consister non pas à travailler à faible tension d'usinage mais à valeur d'entrefer très faible (0,5 à 3  $\mu\text{m}$ ). Il est alors difficile d'obtenir un train régulier de décharges ; dans une série de décharges, toute décharge d'énergie importante aura tendance à produire un impact important et donc à accroître brusquement la valeur de l'entrefer, rendant la régulation délicate. Par ailleurs d'un point de vue mécanique, contrôler le mouvement d'une électrode proche d'une surface avec un entrefer de 1  $\mu\text{m}$  est difficile (horizontalité du substrat, vibrations de la machine, vibrations de l'électrode, précision des axes, etc.). **Il est donc souhaitable de travailler avec une valeur d'entrefer importante, ce qui est en contradiction avec le point 1.**

**Pour tenter de résoudre ces contradictions, la démarche dans la section suivante est d'introduire une résistance de ballast dans la cellule RC.** L'idée est de travailler avec d'une tension d'usinage et un entrefer plus élevés tout en réduisant le courant injecté dans le plasma.

#### 4.3.5 Diminution de l'énergie transmise à l'échantillon par $R_{Ballast}$

L'ajout d'une résistance de ballast a pour intérêt de limiter le flux de courant à travers le canal plasma. La Figure 142 est une vue schématique de l'expérience.

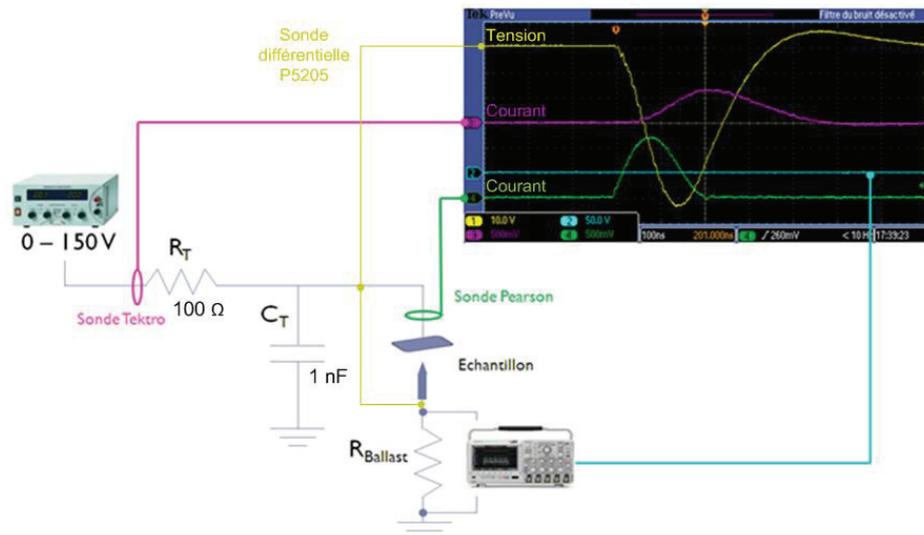


Figure 142 - Montage avec résistance de ballast accolée au substrat.  
( $R_T = 100 \Omega$ ,  $C_T = 1nF$ ,  $R_{Ballast}$  variables de 0 à 500  $\Omega$ )

Nous observons les signaux en 4 points :

- au niveau de l'alimentation (sonde de courant Tektronix TCPA300, 100MHz)
- au niveau de la capacité de travail (sonde de courant Pearson, modèle 2877, 200MHz)
- au niveau de  $R_{Ballast}$  (sonde de tension avec 50 MHz de bande passante).
- au niveau de l'outil et de la pièce (sonde de tension différentielle Tektronix P5205)

##### 4.3.5.1 Énergie et chute de tension

La Figure 143 représente les chutes de tensions mesurées aux bornes de la capacité pour différentes tensions d'usinage en fonction d'une résistance de ballast variant de 0,1  $\Omega$  (valeur quasi-nulle qui nous permet de nous comparer aux résultats précédents) et 500  $\Omega$ .

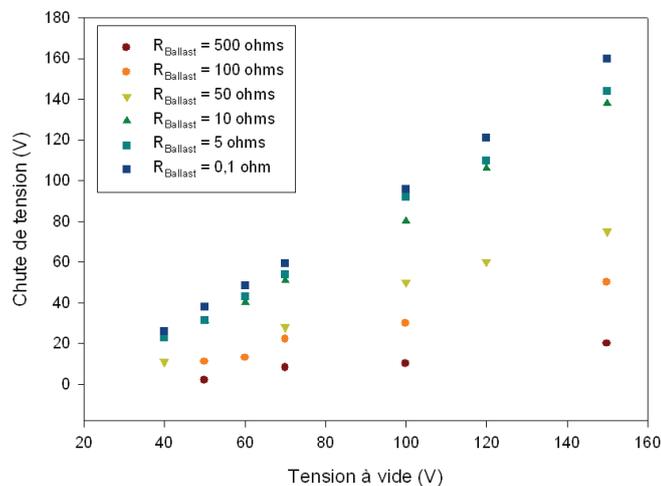


Figure 143 - Chute de tension aux bornes de la capacité en fonction de  $R_{Ballast}$ .  
 $R_T = 100\Omega$ ,  $C_T = 1nF$ , entrefer 3  $\mu m$ , diélectrique : air.

La chute de tension observée à chaque impact est d'autant plus faible que la valeur de la résistance de ballast augmente. Par exemple pour une tension de travail de 150V, la chute de tension aux bornes de la capacité passe de  $\Delta U=160V$  pour  $R_{Ballast} = 0 \Omega$  à  $\Delta U=20V$  pour  $R_{Ballast} = 500 \Omega$ .

L'apport en énergie par décharge étant aussi dépendant de la durée des décharges, il est nécessaire de vérifier si la durée des décharges n'a pas été modifiée.

#### 4.3.5.2 *Modification du courant plasma par $R_{Ballast}$*

Or, lors de l'ajout de la résistance, nous avons constaté une modification importante de l'allure du courant et de la tension des décharges, comme illustré en Figure 144.

Cette figure montre le profil de la décharge pour  $R_{Ballast} = 0 \Omega$ , c'est-à-dire, le régime normal de décharge que l'on rencontre habituellement. On constate une chute brutale de la tension de 70 V (tension de travail) à 8 V (tension résiduelle) accompagnée d'une montée du courant (pic à 1,16 A). La durée de cette décharge est de 200 ns. Une fois la capacité complètement déchargée, on amorce la recharge, avec un retour de la tension au niveau de la tension de travail suivi d'un phénomène d'overshoot. Notre résistance de ballast étant nulle et connectée à la masse, aucune tension n'est détecté par l'oscilloscope sur la voie 2.

Dans le second cas, avec  $R_{Ballast} = 100 \Omega$ , on constate de la même manière une chute brutale de la tension mais à seulement 48 V accompagnée d'une hausse du courant jusqu'à 400 mA. S'en suit une baisse progressive du courant, jusqu'à atteindre une valeur seuil de 250 mA. Le courant et la tension remontent alors légèrement pour atteindre un plateau à 300 mA pendant une durée de 400 ns avant de se couper brutalement, accompagné d'oscillations amorties.

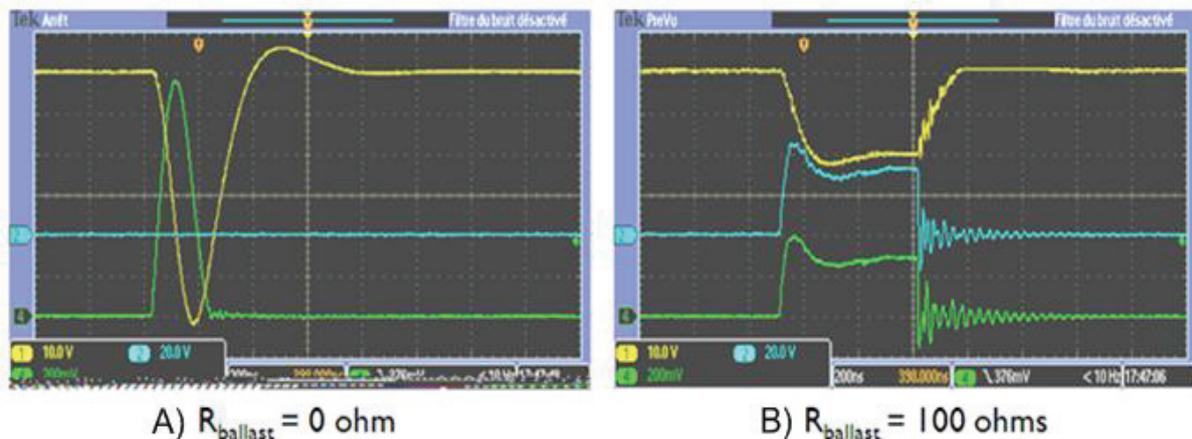


Figure 144 - Modification de l'allure de la décharge par  $R_{Ballast}$ .  
( $R_T = 100 \Omega$ ,  $C_T = 1nF$ ,  $R_{Ballast} = 0$  et  $100 \Omega$ )

#### 4.3.5.3 *Interprétation*

Dans un premier temps, nous avons considéré que le modèle RLC était découplé du reste du circuit durant les premières dizaines de nanosecondes. En analysant la Figure 144B, nous constatons que les premières 50 ns suivent effectivement ce comportement, comparable à une décharge de la Figure 144A. On retrouve le pic de courant d'intensité 400 mA qui est modélisé en Figure 145 ci-dessous.

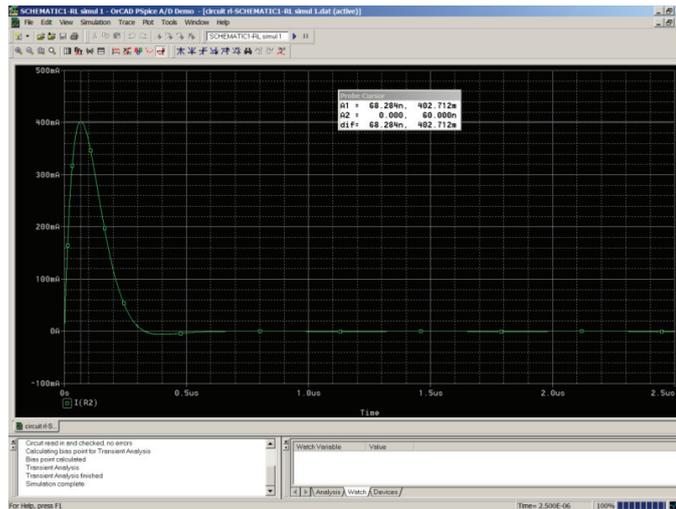


Figure 145 - Simulation ORCAD avec intégration de  $R_{Ballast}$   
 (Simulation avec  $R=1\Omega$ ,  $C_T = 1\text{ nF}$ ,  $R_{Ballast} = 0\Omega$ )

Mais après cette première phase, en réalité, l'ensemble RLC n'est plus découplé de l'alimentation de sorte que le modèle peut être complexifié de la manière suivante :

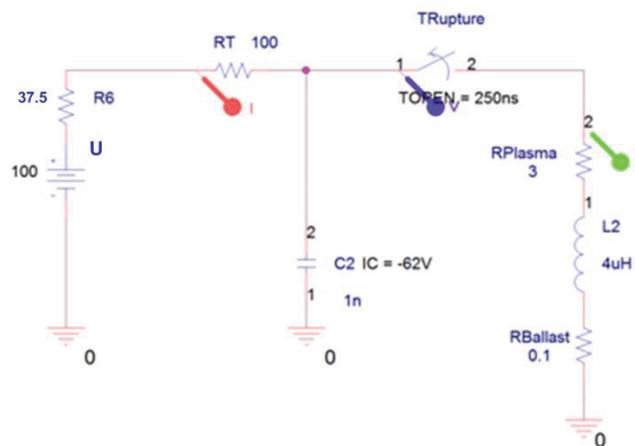


Figure 146 - Modélisation plus complexe du système RLC couplé à l'alimentation HT

La Figure 146 schématise un modèle RLC où nous avons intégré deux éléments supplémentaires. Le premier est l'interrupteur « TRupture » qui simule la coupure du plasma après une durée de 250 ns (dans le cas de la Figure 146). Le second élément est la résistance R6 représentant la résistance interne de l'alimentation haute tension. Cet interrupteur est une manière d'intégrer la rupture physique du plasma sous forme de composant électronique. On ne raisonne plus en dynamique comme précédemment (Figure 135). Nous avons aussi intégré une résistance de ballast de deux valeurs différentes 100 et 200  $\Omega$  dans le modèle ORCAD et simulé la décharge. Les résultats obtenus sont illustrés en Figure 147.

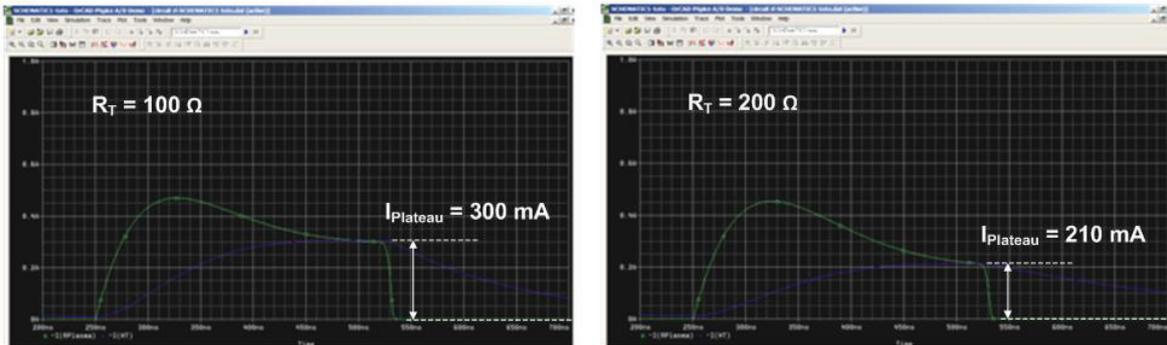


Figure 147 - Intensité du courant simulée pendant une décharge avec  $R_{Ballast}$ .

Ces résultats sont à comparer avec les oscillogrammes obtenus ci-dessous en Figure 148 :

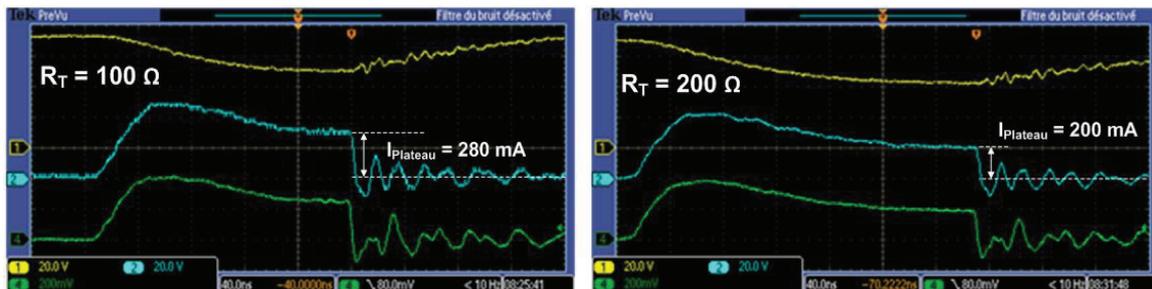


Figure 148 - Intensité du courant mesurée pendant une décharge avec  $R_{Ballast}$ .

Les signaux observés (Figure 148) et simulés (Figure 147) affichent bien en début de phase un pic de courant qui s'atténue très lentement suivi d'une phase de « plateau ». Ce plateau est caractérisé par un courant d'intensité constante (300 mA) et d'une durée de 400 ns bien supérieure à la durée habituelle de plasma pour une capacité de travail de 1 nF. Dans le cas de  $R_T = 100 \Omega$ , le courant mesuré au niveau du plateau est de 280 mA (courant simulé : 300 mA). Pour  $R_T = 200 \Omega$ , on a un courant mesuré de 200 mA (courant simulé : 210 mA).

En réalité, le premier pic de courant atténué constitue bien la décharge de la capacité de travail mais une fois vidée, puis l'alimentation haute tension prend le relais pour envoyer l'énergie à la décharge. Le circuit se résume alors au schéma de la Figure 149. Les paramètres du circuit sont :

Paramètres		
U	[V]	70
$R_{interne}$	[ $\Omega$ ]	37.5
$R_T$	[ $\Omega$ ]	100 / 200
$R_{plasma}$	[ $\Omega$ ]	5
$R_{Ballast}$	[ $\Omega$ ]	100

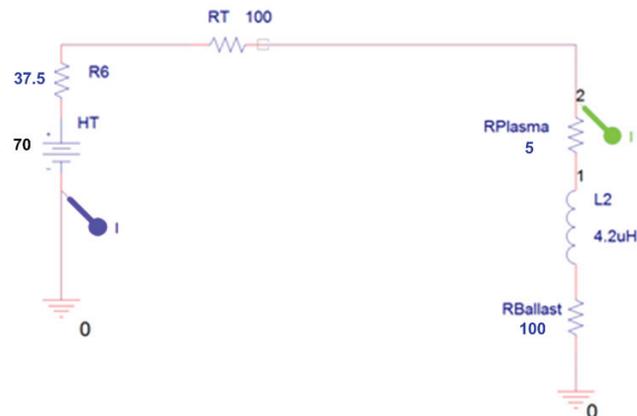


Figure 149 - Circuit RL lors du court-circuit de la capacité de travail.

En phase « plateau », ce circuit suit la loi d'Ohm, nous indiquant que :  $U = R_{TOT} \cdot I_{Plateau}$  où  $R_{TOT}$  est la résistance totale du circuit constituée de :

$$R_{TOT} = R_{interne} + R_T + R_{Plasma} + R_{Ballast}$$

Nous pouvons remonter à la résistance totale du circuit et vérifier que le courant mesuré durant la phase de plateau correspond bien à la modélisation du schéma de la Figure 149.

Le Tableau 27 ci-dessous regroupe les valeurs des différents paramètres du circuit modélisé et compare la valeur du courant calculée à celle mesurée.

$U$ [V]	$R_{interne}$ [ $\Omega$ ]	$R_T$ [ $\Omega$ ]	$R_{Plasma}$ [ $\Omega$ ]	$R_{Ballast}$ [ $\Omega$ ]	$R_{TOT}$ [ $\Omega$ ]	$I$ théorique [mA]	$I$ mesuré [mA]	Ecart $I_{th}/I_{mes}$ (%)
70	37.5	100	5	100	242.5	288	280	2.77
70	37.5	200	5	100	342.5	204	200	1.96

Tableau 27 - Paramètres et résultats du circuit RL.

Notre modèle nous indique que le courant circulant avec une résistance de travail de 100 $\Omega$  doit approcher les 288 mA, ce qui correspond assez bien au 280 mA mesuré. L'écart n'étant que de 2,77%. Avec une résistance de travail de 200  $\Omega$ , le courant simulé affiche 204 mA alors que 200 mA ont été mesurés, cette fois-ci, l'écart est encore plus faible puisqu'inférieur à 2%. Notre modèle semble, à priori, plutôt cohérent.

#### 4.3.5.4 Discussion

Précédemment, nous avons décrit la résistance totale  $R_{TOT}$  du circuit comme étant la somme de  $R_{interne}$ ,  $R_T$ ,  $R_{Plasma}$  et  $R_{ballast}$ , or nous avons omis de parler de la capacité parasite. En effet, toute machine présente une capacité et une inductance parasite en raison des circuits électroniques soumis à des fréquences de commutation importantes. Afin d'analyser cette capacité parasite, il serait judicieux d'utiliser un analyseur de réseau qui permettrait d'estimer cette valeur. Cette expérience a été envisagée mais n'a pas pu être mise en place. Toutefois, les mesures que nous avons pu relever tout au long des expériences, nous indique qu'une estimation de l'ordre de 5 nF serait une valeur acceptable et concordante avec certaines mesures.

En explorant le modèle encore plus loin, il est possible de simuler le claquage lors de la décharge et la rupture du plasma. On peut ainsi affiner le modèle RLC avec le schéma de la Figure 150:

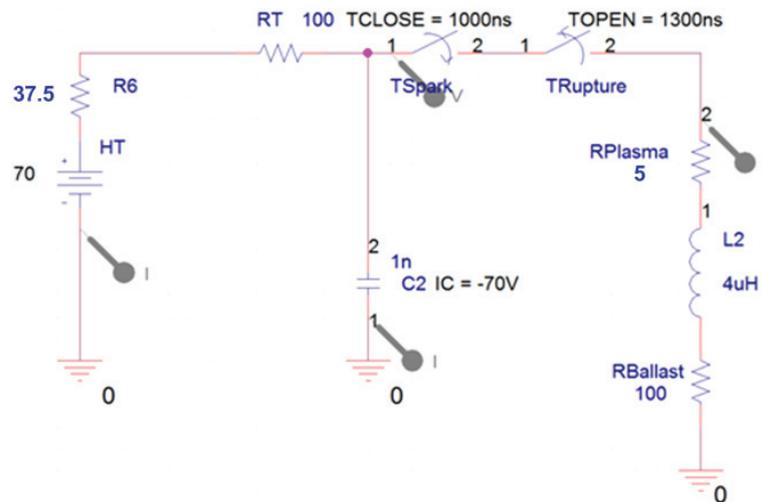


Figure 150 - Modèle RLC avec intégration de l'alimentation haute tension

On introduit le deuxième interrupteur « TOpen » qui permet de simuler le claquage du diélectrique et la mise en place du plasma. L'alimentation étant continuellement connectée à la capacité, elle la recharge continuellement. Les simulations ci-dessous obtenues avec ce modèle montrent un comportement semblable à celui observé expérimentalement en Figure 144B. D'un point de vue physique, ce modèle est plus cohérent que les précédents.

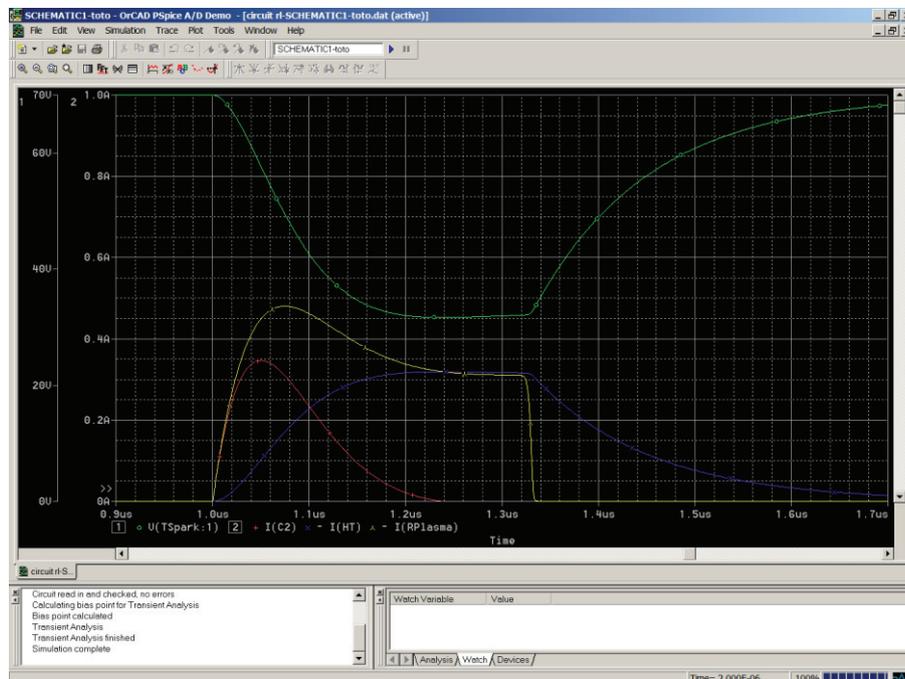


Figure 151 - Simulation PSpice par un modèle RLC et une source d'alimentation couplée.

En conclusion, la résistance de ballast permet d'allonger la durée du microplasma. Il est possible de prendre avantage de ce phénomène pour mieux réguler l'énergie par étincelle. Pour cela, il conviendrait de détecter le début du courant de décharge tout en mesurant la chute de tension induite. Un calcul effectué en ligne par un  $\mu\text{C}$  (sur la base du modèle Spice développé) permettrait de déclencher la coupure du plasma au moment où l'énergie souhaitée serait délivrée. Il serait ainsi possible de déclencher des décharges iso-énergétiques de manière analogue avec ce qui est fait dans la machines d'EE (cf. section 1.2.4.3). Ce mode de fonctionnement est envisageable avec des composants électroniques rapides.

### 4.3.6 Déclenchement des décharges

Dans cette partie nous allons explorer différentes solutions pour tenter de déclencher plus facilement les décharges. Pour ce faire, après avoir mis en place une méthode permettant de caractériser la nature aléatoire du claquage (section 4.3.6.1), nous chercherons à faciliter celui-ci par effet thermo-ionique (section 4.3.6.2) et en introduisant des vibrations (section 4.3.6.3).

#### 4.3.6.1 Caractérisation temporelle du caractère stochastique d'une décharge.

Dans l'expérience qui suit, nous avons déterminé expérimentalement le temps d'amorçage des décharges  $\delta_{\text{décharge}}$  connu pour être aléatoire (cf. section 1.2.1).

Pour ce faire, un générateur d'impulsions Agilent 33522A pilote le circuit décrit de la Figure 152 de façon à créer des créneaux de tension d'amplitude 60 V et de durée  $T_{\text{ON}}$  égale à 2, 5 et 20  $\mu\text{s}$ . La capacité de travail est de 1 nF.

Nous avons placé une électrode de tungstène de type conique avec une extrémité de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$  (Figure 153) au-dessus d'un substrat avec un entrefer de 1  $\mu\text{m}$  dans de l'eau dé-ionisée.

Les signaux enregistrés à l'oscilloscope Tektronix DPO2024 sont (Figure 153 à droite):

- le pulse de tension appliqué par le générateur d'impulsions (voie 1)
- la tension appliqué à l'électrode-outil (voie 2)
- le courant passant à travers l'électrode en voie 3.

A l'aide du seuil de l'oscilloscope, l'enregistrement des signaux est déclenché sur l'impulsion de courant liée à la décharge. Grâce à l'enregistrement numérique des données, il est possible alors de déterminer la durée  $\delta_{\text{décharge}}$  écoulée entre l'application du créneau de puissance et l'instant où le claquage a eu lieu.

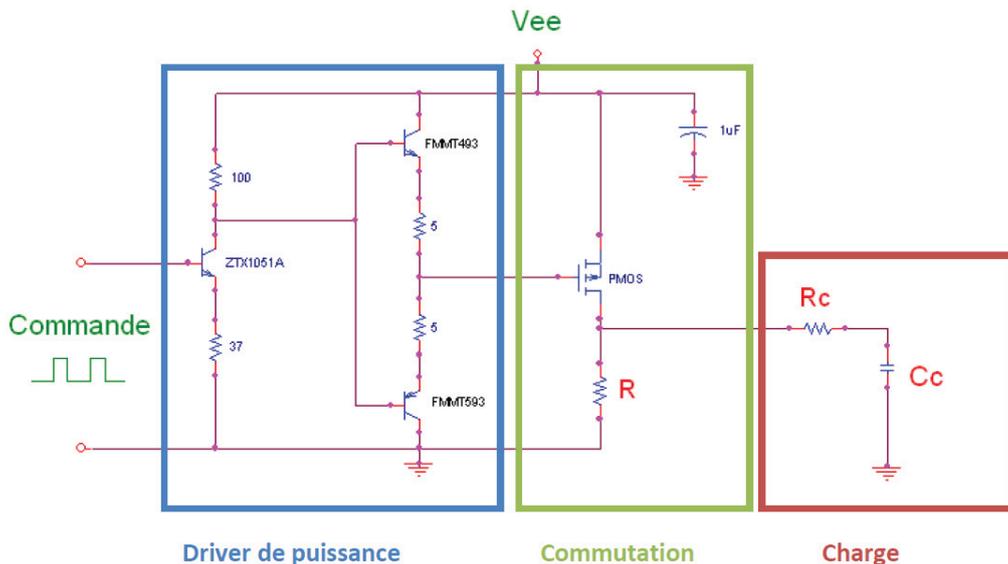


Figure 152 – Générateur de décharges de 2<sup>ème</sup> génération avec une valeur min de  $T_{\text{ON}}$  de 100ns

On procède alors à une étude statistique en renouvelant l'expérience de façon à accumuler un grand nom. La mesure et le calcul de la pré-décharge sont effectués à chaque itération sur les captures d'écran (il ne s'agit pas d'un enregistrement continu mais d'une analyse post-expérience). Chaque évènement est répertorié en fonction de la durée de retard et inséré dans un histogramme.

Les résultats obtenus sont illustrés à la Figure 154. L'historgramme répertorie en abscisse la durée de pré-décharge ( $\delta_{\text{décharge}}$ ) mesurée pour chaque évènement détecté. En ordonnée, est indiqué le

nombre d'évènements détectés dans chaque intervalle de temps d'une durée de 500 ns, et ce pour trois valeurs de  $T_{ON}$  : 2, 5 et 20  $\mu$ s.

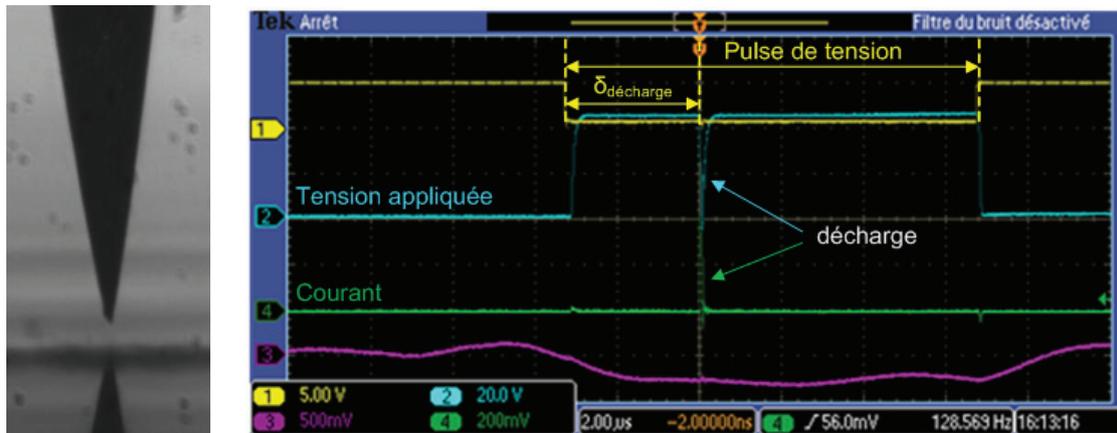


Figure 153 - A gauche, pointe de tungstène utilisée. A droite, capture pour la mesure de  $\delta_{décharge}$ .

Chaque évènement est répertorié en fonction de la durée de retard et inséré dans un histogramme. La mesure et le calcul de la pré-décharge sont effectués pour chaque itération sur les captures d'écran. Il ne s'agit pas d'un enregistrement continu mais d'une analyse post-expérience.

Les résultats obtenus sont illustrés en Figure 154. L'histogramme répertorie en abscisse la durée de pré-décharge ( $\delta_{décharge}$ ) mesurée pour chaque évènement détecté. En ordonnée, est indiqué le nombre d'évènements détectés dans chaque intervalle de temps d'une durée de 500 ns.

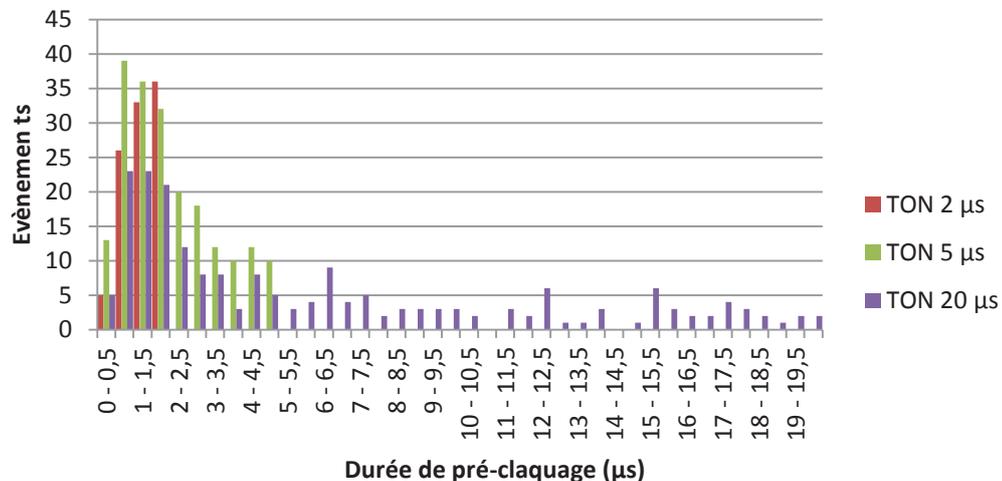


Figure 154 - Distribution de Weibull pour des valeurs de  $T_{ON}$  de 2, 5 et 20  $\mu$ s.

Pour des durées de 20 et 5  $\mu$ s, les évènements se répartissent de manière inhomogène : très peu d'évènements sont détectés durant la première  $\mu$ s. Ensuite un pic est détecté entre 1 et 2,5  $\mu$ s avec un regroupement d'évènements autour de 1,5 à 2  $\mu$ s. L'analyse de ces histogrammes par le logiciel EasyFit 5.5, nous permet de discerner une évolution des évènements suivant la loi de Weibull, distribution qui est communément adapté à l'étude des phénomènes aléatoires [164].

Nous avons utilisé les paramètres suivants :  $U = 60$  V,  $R_c = 100$   $\Omega$  et  $C = 1$  nF et nous avons capturé tous les évènements apparus. Puis la durée de pré-claquage de chaque évènement a été reportée dans l'histogramme ci-dessus et analysé par le logiciel.

Nous avons conclu que la **valeur moyenne**  $\bar{\delta}_{\text{décharge}}$  **est de l'ordre de 2  $\mu\text{s}$**  dans l'eau dé-ionisée, pour une tension de 60V et un gap de 1  $\mu\text{m}$  **quelle que soit la durée du créneau de tension appliqué.**

Il paraît donc peu utile d'allonger  $T_{\text{ON}}$  très au-delà de 2  $\mu\text{s}$ . C'est ce qui est confirmé par la distribution obtenue avec  $T_{\text{ON}}$  égale à 2  $\mu\text{s}$  puisque qu'une majorité des évènements se sont produits dans ce créneau d'une durée de 2  $\mu\text{s}$ .

La méthodologie mise en place facilitera l'étude du procédé de  $\mu\text{EE}$  (à condition de l'automatiser). Nous avons souhaité l'appliquer pour étudier l'hypothèse suivante : est-il possible de contrôler cette durée de pré-décharge,  $\bar{\delta}_{\text{décharge}}$ , en chauffant l'électrode ? Afin de stimuler le processus d'émission électronique de champ par effet de pointe, l'idée est de porter l'extrémité de l'outil à haute température pour favoriser l'apparition de streamers par effet thermo-ionique, ce qui aurait conséquence une diminution de  $\bar{\delta}_{\text{décharge}}$ .

#### 4.3.6.2 *Effet thermo-ionique*

Lorsqu'une électrode de métal ou de carbone est soumise à une haute tension et portée à haute température dans une enceinte sous vide, on constate une émission d'électron localisée à l'apex de l'électrode.

Connu aussi sous le nom d'effet Edison, l'émission thermo-ionique consiste à fournir une quantité d'énergie suffisante à des électrons pour leur permettre de franchir la barrière de potentiel imposée par le vide ou l'atmosphère environnant. Le courant de saturation par effet thermo-ionique est indépendant de la pression gazeuse, alors que la densité de courant émise ( $J$ ,  $\text{A}/\text{m}^2$ ) augmente fortement avec la température de chauffe ( $T$ ,  $\text{K}$ ) selon l'équation de Richardson-Dushman :

$$J = A_G T^2 e^{\frac{-W}{kT}}$$

$$\text{Où } A_G = \lambda_B (1 - r_{av}) A_0 \text{ et } A_0 = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} = 1.20173 \cdot 10^6 \text{ A.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$$

Les valeurs expérimentales du coefficient  $A_G$  sont généralement du même ordre de magnitude qu' $A_0$ , mais différent entre les matériaux émetteurs, ainsi que selon la face cristallographique du matériau considéré.

Pour générer cet effet thermo-ionique, nous avons conçu un dispositif (Figure 155) permettant de chauffer à haute température une électrode tout en la portant à haute tension. Cette expérience a nécessité la fabrication d'un support d'électrode, compatible avec une élévation de température importante, tout en assurant une isolation électrique par une gaine céramique. Le dispositif a pu être utilisé pour de très brèves expériences, car la céramique est soumise à d'importantes variations thermiques qui la fragilisent. Le nombre d'expériences a ont donc été limitées.

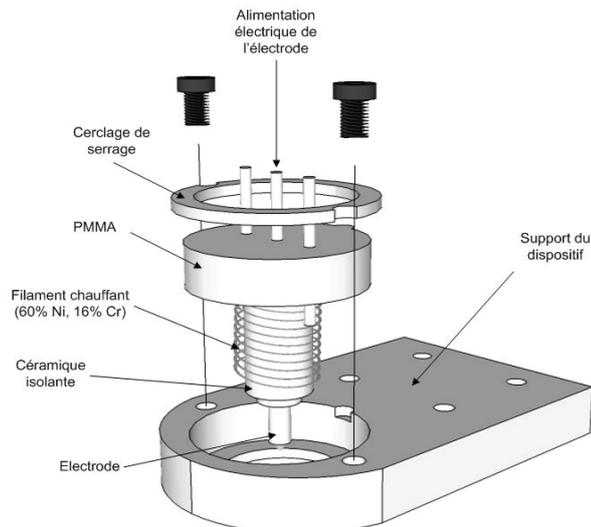


Figure 155 - Porte électrode avec dispositif de chauffage par filament intégré.

Le filament est porté à une température entre 800 et 1050°C. (Mesures effectuées avec un pyromètre optique Keller, Micro Pyrometer PV11-AF1) et nous avons effectué de nouveau les mêmes mesures que dans la série d'expérience précédente.

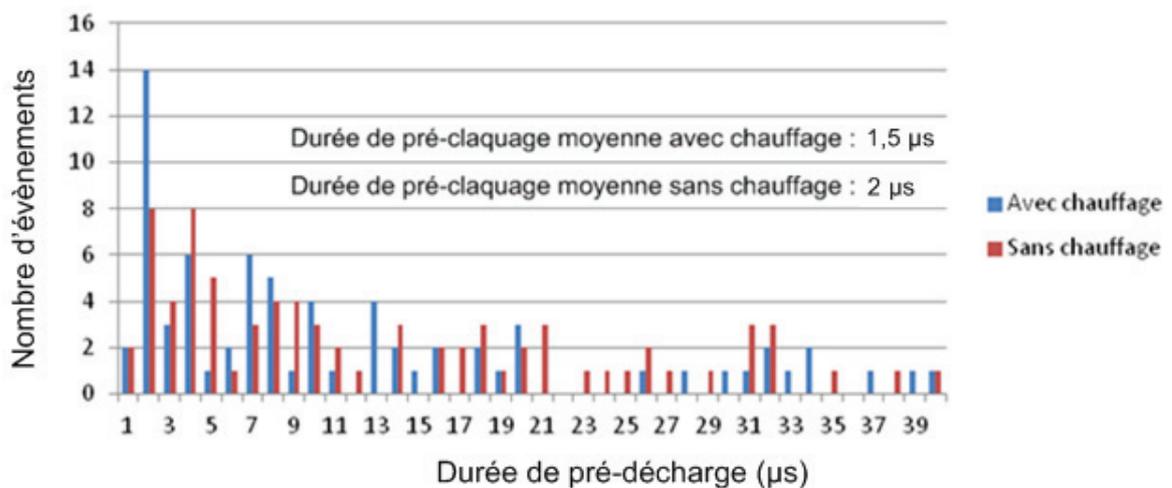


Figure 156 - Influence de l'effet thermo-ionique sur la durée de pré-claquage.

Après analyse de la distribution, nous avons constaté que lorsque le chauffage à haute température de la pointe est activé, la durée de pré-décharge est ramenée à 1.5 µs. Ce décalage et ce raccourcissement de l'ordre d'une demi-microseconde sur la durée moyenne de pré-claquage est net mais faible. Nous pensons néanmoins que l'effet pourrait mieux être mis en évidence sur des mesures plus poussées. En tout état de cause, les expériences menées ici n'ont qu'un caractère qualitatif et devront être répétées afin de confirmer la validité de cette expérience.

#### 4.3.6.3 Amélioration du procédé par introduction de vibrations

Une autre solution bien connue pour améliorer les performances du processus d'EE (stabilité et réduction du temps d'usinage) consiste à mettre l'outil en oscillation [73], [165]. L'accumulation de débris entre l'électrode et la pièce est en effet la première cause de la diminution du rendement du

procédé. L'introduction d'une vibration selon l'axe Z de l'outil permet d'évacuer efficacement les débris en périphérie de l'électrode-outil.

Nous avons donc usiné un motif constitué d'une ligne sans vibration et avec vibrations (Vibration d'amplitude verticale  $0,2 \mu\text{m}$  à  $400\text{Hz}$  avec l'actionneur PI-843). ( $U = 60 \text{ V}$ ,  $C = 1 \text{ nF}$ ,  $T_{\text{ON}} = \text{continu}$ , entrefer :  $3 \mu\text{m}$ , diélectrique : eau dé-ionisée).

En l'absence de vibrations, seules 2 décharges ont été détectées sur une durée de  $100 \mu\text{s}$  comme le montre la Figure 157. Avec les vibrations, le nombre de décharges a été multiplié par 3 comme le montre la Figure 158.

Nous avons donc usiné un motif constitué d'une ligne de deux manières différentes :

A paramètres identiques, on a procédé à un usinage sans vibration, seul 2 décharges ont été détectées sur une durée de  $100 \mu\text{s}$ .

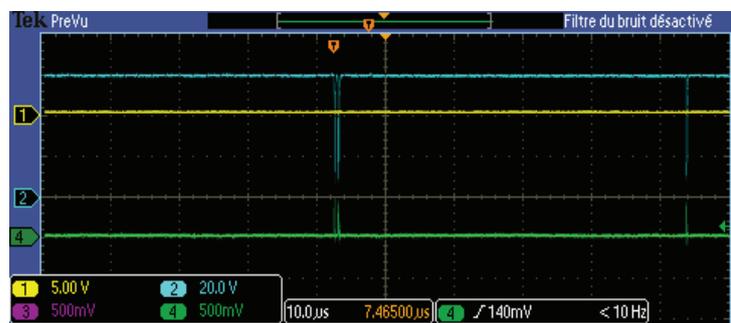


Figure 157 - Usinage sans vibrations : 2 à 3 décharges par  $T_{\text{ON}}$ .

Puis un deuxième usinage a été effectué avec une fréquence d'oscillation de  $400\text{Hz}$  et d'amplitude  $0.2 \mu\text{m}$  correspondant à l'application d'un signal électrique d'amplitude  $100\text{mV}$ .



Figure 158 - Usinage assisté par vibrations : plus de 10 décharges par  $T_{\text{ON}}$ .

En introduisant cette oscillation via l'actionneur piézoélectrique, on a multiplié par 3 le taux de décharges. L'oscillation de l'électrode-outil provoque une nette amélioration de la fréquence de décharge.

Cette expérience préliminaire montre donc qu'introduction de vibrations est un processus très efficace pour augmenter le nombre de décharges. Ce principe est plus simple à mettre en œuvre que l'effet thermo-ionique. Le fait que les vibrations soient verticales et d'amplitude faible ( $0,2 \mu\text{m}$ ) pourrait laisser penser que ce procédé est compatible avec un usinage à haute résolution. En réalité, cela n'est pas forcément le cas. Il faudrait caractériser la réponse mécanique de l'outil pour pouvoir conclure (création de vibrations latérales).

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre 4, nous avons étudié le mécanisme de la décharge en micro-électroérosion en nous basant sur des caractérisations électriques.

Tout d'abord, nous avons remarqué qu'il est difficile de déclencher une décharge avec des électrodes de petites dimensions. Ce point est confirmé par la littérature dans un autre contexte (tenue au claquage des diélectriques) qui a montré que le claquage est d'autant plus difficile que le volume de diélectrique entourant les électrodes est petit et/ou que la surface utile de l'outil est faible (effet surface). Pour résoudre ce problème, une solution éventuelle serait d'élever la tension d'usinage mais dans ce cas l'énergie transférée à la décharge deviendrait trop importante.

Pour tenter de maîtriser l'énergie délivrée au plasma, nous avons étudié expérimentalement l'amplitude et la durée des décharges obtenus avec un générateur RC. Nous avons montré que la durée de décharge est gouvernée par la valeur de la capacité de travail et non par la tension d'usinage. Lors d'une décharge, le courant crête est gouverné par la chute de tension. En conséquence, l'énergie par décharge dépend directement de la chute de tension observée aux bornes de la capacité.

La caractérisation des composantes électriques du plasma (résistance, inductance) a permis de proposer une modélisation électrique simple d'une décharge avec le logiciel PSpice. Dans nos conditions expérimentales la résistance du plasma est comprise entre 1 et 15  $\Omega$  tandis que l'inductance est comprise entre 2 et 4  $\mu\text{H}$ . Nous avons montré que la résistance du plasma augmente avec la valeur de l'entrefer. Par ailleurs, l'ordre de grandeur de cette résistance est en accord avec la formule de Spitzer, qui repose sur les paramètres physiques du plasma obtenus dans la littérature.

Les décharges les plus petites observées sont respectivement de 1,62 nJ/décharge dans l'air (Figure 132C, chute de tension 1,8 V / Capacité 1 nF / Entrefer 3  $\mu\text{m}$ ) et 80 nJ/décharge dans l'eau (chute de tension 4V / Capacité 10 nF / Entrefer 3  $\mu\text{m}$ ).

Nous avons aussi proposé d'utiliser d'une résistance de ballast afin de mieux maîtriser l'énergie transmise au plasma. Cette résistance a permis de réduire la chute de tension observée aux bornes de la capacité de travail (par exemple de 160 V à 20 V pour une capacité de 1 nF avec une résistance de ballast de 500  $\Omega$ ) mais elle a modifié aussi l'allure de la décharge. Celle-ci a été considérablement allongée (par exemple de 200 à 450 ns sur la Figure 144). Le modèle PSpice a été complété pour rendre compte de ce changement.

Nous avons montré que l'allongement de la durée de la décharge permet à l'alimentation de la machine de fournir directement de l'énergie au plasma (sans résistance de ballast, cette énergie est fournie principalement par la capacité de travail). La durée de la décharge étant plus longue, l'énergie transmise au microplasma n'est pas donc pas forcément réduite par rapport au générateur sans résistance de ballast. L'influence de cette résistance sur le diamètre des impacts doit être étudiée, néanmoins cela nous a permis de proposer une solution pour générer des décharges des décharges d'énergie plus régulière, ce qui serait une première en  $\mu\text{EE}$ . Ces décharges iso-énergétiques devraient permettre d'améliorer la qualité des usinages. Nous n'avons pas eu le temps de procéder à une démonstration de principe.

Nous avons conscience que l'étude du générateur avec résistance de ballast est incomplète. Nous n'avons pu effectuer qu'une expérience préliminaire sur la morphologie des impacts et il manque les données expérimentales sur la valeur de l'entrefer. Le point critique qui sera examiné par mes successeurs sera de déterminer si la résistance de ballast permet, à énergie transmise au plasma égale, de travailler à entrefer plus grand.

Par ailleurs, deux améliorations ont été proposées pour tenter de faciliter les décharges. La première solution, intéressante mais difficile à mettre en œuvre techniquement, est basée sur l'effet thermo-ionique avec l'idée de faciliter la création des amorces. La deuxième solution, l'usinage assisté par vibrations, est une méthode connue mais elle a le mérite de la simplicité et peut s'avérer utile pour l'asservissement de l'entrefer. Enfin, la méthodologie mise en œuvre pour caractériser le retard aléatoire entre « l'ordre de tir » et la survenue réelle de la décharge permettra à l'avenir de comprendre plus facilement le rôle des très nombreux paramètres de la  $\mu$ EE.

## 5 Conclusion générale

Après un état de l'art sur l'électroérosion conventionnelle et sur la microélectroérosion, nous avons présenté au chapitre 2, un procédé d'obtention de micro-outils ultrafins par gravure électrochimique pulsée. Ce procédé a permis d'obtenir de manière automatique et reproductible des micro-outils jusqu'à un diamètre d'environ 15  $\mu\text{m}$  et un facteur de forme pouvant atteindre 120. Nous avons été capables de réaliser des micro-outils inférieurs à 15  $\mu\text{m}$  et même jusqu'à 700 nm de manière manuelle avec des problèmes de reproductibilité.

Dans le chapitre 3, nous avons décrit de manière détaillée un prototype de machine de fraisage par micro-électroérosion entièrement développé au laboratoire. Les premières caractérisations ont montré que l'entrefer latéral dépend de la tension d'usinage et de la capacité de travail. La rugosité  $R_a$  des cavités usinées est inférieure à 0,1  $\mu\text{m}$  en utilisant une faible capacité de travail et en multipliant le nombre de passes de l'outil. L'enlèvement de matière a été estimé entre 0,1 et 0,6  $\mu\text{m}^3/\mu\text{J}$ , valeurs comparables à la littérature.

Par ailleurs, les lacunes de notre prototype ont été mises en évidence : asservissement non-dynamique de la valeur de l'entrefer, renouvellement peu efficace du diélectrique... De nos divers essais, nous avons conclu qu'il est difficile d'améliorer la résolution d'usinage pour plusieurs raisons :

- 1- Imprécision des axes trop importante ( $>10 \mu\text{m}$ ).
- 2- Obtention d'électrodes encore trop aléatoire.
- 3- Contact électrode/pièce difficile à détecter pour les micro-outils inférieur à 20  $\mu\text{m}$ .
- 4- Difficulté de claquage avec des micro-outils de faible diamètre.
- 5- Puissance de décharges et énergie dissipée à travers l'électrode trop importante.

Les points 4 et 5 ont été étudiés de plus près dans le chapitre 4. D'une part, nous avons constaté de manière qualitative que le claquage est difficile avec les micro-outils de diamètre inférieur à 20  $\mu\text{m}$ . D'autre part, nous avons analysé le comportement des décharges et tenté de le simuler par un modèle RLC. Nous avons conclu que la résistance du plasma est comprise entre 1 et 15  $\Omega$  et que son inductance est comprise entre 2,5 et 4  $\mu\text{H}$ . Nous avons montré que la durée de décharge est gouvernée par la valeur de la capacité de travail et non par la tension d'usinage. Lors d'une décharge, le courant crête est régi par la chute de tension. En conséquence, l'énergie par décharge dépend directement de la chute de tension observée et de la capacité placée aux bornes du couple micro-outil/pièce.

Des essais préliminaires ont été effectués pour mieux maîtriser l'énergie par décharge avec une résistance de ballast. Nous avons montré que la durée des décharges est allongée de manière considérable. Cela nous a permis de proposer une solution pour générer des décharges des décharges d'énergie plus régulière (iso-énergétique), ce qui permettrait d'améliorer la qualité des usinages et constituerait une première en  $\mu\text{EE}$ .

En conclusion, nous sommes tout à fait conscients que les travaux rapportés dans ce manuscrit constituent une recherche exploratoire. Nous avons étudié de nombreuses pistes dont seules les plus intéressantes ont été présentées ici. Néanmoins, ce travail devrait permettre à mes successeurs de se concentrer sur les aspects importants du procédé. Une machine de fraisage par  $\mu\text{EE}$  de 2<sup>ème</sup> génération est d'ores et déjà en cours de développement à l'INL.



## Bibliographie

- [1] T. Velten, H. H. Ruf, D. Barrow, and al., "Packaging of bio-MEMS: strategies, technologies, and applications," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 28, no. 4, pp. 533–546, 2005.
- [2] R. Receveur, F. Lindemans, and N. De Rooij, "Microsystem technologies for implantable applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, no. 5, pp. 50–80, 2007.
- [3] G. Cusanelli, M. Minello, F. Torchia, and al., "Properties of Micro-Holes for Nozzle by Micro-EDM," in *15th International Symposium on ElectroMachining (ISEM XV), Proceeding*, 2007.
- [4] O. De La Iglesia, V. Sebastián, R. Mallada, and al., "Preparation of Pt/ZSM-5 films on stainless steel microreactors," *Catalysis Today*, vol. 125, no. 1–2, pp. 2–10, 2007.
- [5] L. G. Fréchette, S. A. Jacobson, K. S. Breuer, and al., "Demonstration of a microfabricated high-speed turbine supported on gas bearings," in *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 43–47, 2000.
- [6] J. Peirs, D. Reynaerts, and F. Verplaetsen, "A microturbine for electric power generation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 113, pp. 86–93, 2004.
- [7] C. Khan 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.
- [8] B. R. Lazarenko, "About the Inversion of Metal Erosion and Methods to Fight Ravage of Electric Contacts," *WEI-Institut*, 1943.
- [9] B. Lauwers, J. P. Kruth, W. Liu, and al., "Investigation of material removal mechanisms in EDM of composite ceramic materials," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 347–352, 2004.
- [10] J. Kruth and P. Bleys, "Measuring residual stress caused by Wire EDM of tool steel," *International Journal of Electrical Machining*, 2000.
- [11] S. Kuriakose, K. Mohan, and M. S. Shunmugam, "Data mining applied to wire-EDM process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 142, pp. 182–189, 2003.
- [12] C. Joseph, "Contribution à l'accroissement des performances du processus de  $\mu$ EDM par l'utilisation d'un robot," Thèse n°3281, EPFL, 142 p., 2005.
- [13] B. M. Schumacher, "After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 376–381, 2004.
- [14] P. T. Eubank, M. R. Patela, M. A. Barrufet, and al., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model," *Journal of Applied Physics*, vol. 73, no. 11, pp. 7900–7909, 1993.

- [15] A. Descoedres, "Characterization of electrical discharge machining plasmas," Thèse n°3542, EPFL, 137 p., 2006.
- [16] T. Aka-Ngnui and A. Beroual, "Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field," *Journal of Physics D : Applied Physics*, vol. 34, pp. 1408–1412, 2001.
- [17] H.-P. Schulze, M. Läuter, and G. Wollenberg, "Investigation of the pre-ignition stage in EDM," in *Institute for Fundamental Electrical Engineering and Electromagnetic Compatibility*, 2001.
- [18] S. Oelheld technologies, "L'électroérosion par enfonçage," 2006.
- [19] D. Kremer, "Usinage par électroérosion," *Techniques de L'ingénieur*, vol. BM 7251, pp. 1–22, 2000.
- [20] C. Kao, "Monitoring and control of micro-hole electrical," Thèse, University of Michigan, 156 p., 2007.
- [21] C. F. Odulio, L. Sison, and M. Escoto, "Energy saving flyback converter for EDM Applications," in *TENCON 2005 - IEEE Region 10 Conference*, pp. 1–6, 2005.
- [22] Y. S. Wong, M. Rahman, H. S. Lim, and al., "Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, pp. 303–307, 2003.
- [23] L. Bianchi and E. Rigal, "Usinage par électroérosion," *Techniques de l'ingénieur*, no. B7310, 1987.
- [24] M. P. Jahan, Y. S. Wong, and M. Rahman, "A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 4, pp. 1706–1716, 2009.
- [25] M. Kunieda, A. Hayasaka, X. D. Yang, and al., "Study on Nano EDM Using Capacity Coupled Pulse Generator," *Annals of the CIRP*, vol. 56, no. 1, pp. 213–216, 2007.
- [26] S. S. Mahapatra and A. Patnaik, "Parametric Optimization of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) Process using Taguchi Method," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 422–429, 2006.
- [27] Y. Tzeng and F. Chen, "Multi-objective optimisation of high-speed electrical discharge machining process using a Taguchi fuzzy-based approach," *Materials & Design*, vol. 28, pp. 1159–1168, 2007.
- [28] A. Behrens and J. Ginzler, "Neuro-Fuzzy process control system for sinking EDM," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 5, no. 1, pp. 33–39, 2003.
- [29] K. P. Rajurkar, W. M. Wang, and R. P. Lindsay, "Real-Time Stochastic Model and Control of EDM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 187–190, 1990.
- [30] G. Marendaz, "Apparatus and method for monitoring the machining conditions of an EDM apparatus," U.S. Patent US45518091985.

- [31] H. V. Sinh, B. T. Long, and N. C. Hien, "A study of method to control EDMing process," in *Mechanical Engineering*, 2004, pp. 1–5.
- [32] C. Kao and A. Shih, "Design and tuning of a fuzzy logic controller for micro-hole electrical discharge machining," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 10, no. 2, pp. 61–73, 2008.
- [33] M. Boccadoro and D. F. Dauw, "About the Application of Fuzzy Controllers in High-Performance Die-Sinking EDM Machines," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 147–150, 1995.
- [34] L. Zadeh, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 3–28, 1978.
- [35] Ö. Ciftcioglu and I. Sariyildiz, "On the Efficiency of Fuzzy Logic for Stochastic Modeling," in *Fuzzy Information Processing Society*, pp. 384–391, 2006.
- [36] K. Albinski, K. Musiol, A. Miernikiewicz, and al., "The temperature of a plasma used in electrical discharge machining," *Plasma Sources Sciences Technologies*, vol. 5, pp. 736–742, 1996.
- [37] G. Kibria, B. R. Sarkar, B. B. Pradhan, and al., "Comparative study of different dielectrics for micro-EDM performance during microhole machining of Ti-6Al-4V alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 48, no. 5–8, pp. 557–570, 2009.
- [38] P. M. Lonardo and A. A. Bruzzone, "Effect of Flushing and Electrode Material on Die Sinking EDM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 123–126, 1999.
- [39] S. L. Chen, B. H. Yan, and F. Y. Huang, "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti – 6Al – 4V," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 87, pp. 107 – 111, 1999.
- [40] T. Masuzawa, K. Tanaka, Y. Nakamura, and al., "Water-Based Dielectric Solution for EDM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 119–122, 1983.
- [41] D. K. Chung, B. H. Kim, and C. N. Chu, "Micro electrical discharge milling using deionized water as a dielectric fluid," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, pp. 867–874, 2007.
- [42] F. Klocke, D. Lung, G. Antonoglou, and al., "The Effects of Powder Suspended Dielectrics on the Thermal Influenced Zone by Electrodischarge Machining with," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 191–197, 2004.
- [43] Y. F. Tzeng and C. Y. Lee, "Effects of powder characteristics on electrodischarge machining efficiency," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, pp. 586–592, 2001.
- [44] S. F. Miller, A. J. Shih, and J. Qu, "Investigation of the spark cycle on material removal rate in wire electrical discharge machining of advanced materials," *Scanning Electron Microscopy*, vol. 44, pp. 391–400, 2004.
- [45] S. Bigot, J. Valentinčič, O. Blatnik, and al., "Micro EDM parameters optimisation."

- [46] K. Liu, B. Lauwers, and D. Reynaerts, "Process capabilities of Micro-EDM and its applications," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 1–4, pp. 11–19, 2009.
- [47] D. Mandal, S. K. Pal, and P. Saha, "Modeling of electrical discharge machining process using back propagation neural network and multi-objective optimization using non-dominating sorting genetic algorithm-II," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, pp. 154–162, 2007.
- [48] W. Kurnia, P. C. Tan, S. H. Yeo, and al., "Analytical approximation of the erosion rate and electrode wear in micro electrical discharge machining," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, pp. 1–8, 2008.
- [49] C. Lhiaubet, "Method of indirect determination of the anodic and cathodic voltage drops in short high-current electric discharges in a dielectric liquid," *Journal of Applied Physics*, vol. 52, no. 6, p. 3929, 1981.
- [50] S. H. Yeo, W. Kurnia, and P. C. Tan, "Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, no. 1–3, pp. 241–251, 2008.
- [51] D. T. Pham, A. Ivanov, S. Bigot, K. Popov, and S. Dimov, "An investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, vol. 33, pp. 103–109, 2007.
- [52] K. R. Virwani, A. P. Malshe, and K. P. Rajurkar, "Understanding Dielectric Breakdown and Related Tool Wear Characteristics in Nanoscale Electro-Machining Process," *Annals of the CIRP*, vol. 56, no. 1, pp. 217–220, 2007.
- [53] S. H. Lee and X. P. Li, "Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 115, pp. 344–358, 2001.
- [54] Y. Tsai and T. Masuzawa, "An index to evaluate the wear resistance of the electrode in micro-EDM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, no. 1, pp. 304–309, 2004.
- [55] P. T. . Eubank, M. R. . Patel, M. A. . Barrufet, D. D. ; Dibitonto, and al., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model," *Journal of Applied Physics*, vol. 73, no. 11, pp. 7900–7909, 1993.
- [56] M. Kunieda, B. Lauwers, K. P. Rajurkar, and B. M. Schumacher, "Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process," *CIRP Keynote paper*, 2005.
- [57] J. Narasimhan, Z. Yu, K. Rajurkar, and al., "Tool Wear Compensation and Path Generation in Micro and Macro EDM," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 7, no. 1, pp. 75–82, 2005.
- [58] P. Bleys, J. P. Kruth, B. Lauwers, and al., "Real-time tool wear compensation in milling EDM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 157–160, 2002.

- [59] 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," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 15, pp. 2292–2303, 2010.
- [60] J. Limido, "Etude de l'effet de l'usinage à grande vitesse sur la tenue en fatigue de pièces aéronautiques," Thèse, Université Toulouse III, 242 p., 2008.
- [61] B. Raphet, "États de surface," *Techniques de l'ingénieur*, vol. R1230, pp. 1–22.
- [62] Y. S. Wong, L. C. Lim, I. Rahuman, and W. M. Tee, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 79, pp. 30–40, 1998.
- [63] G. Cusanelli, A. Hesslerwyser, F. Bobard, and al., "Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, no. 1–3, pp. 289–295, 2004.
- [64] H. Schulze, "Comparison of measured and simulated crater morphology for EDM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 316–322, 2004.
- [65] J. C. Rebelo, A. M. Diaz, D. Kremer, and al., "Influence of pulse energy on the surface integrity of martensitic steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 84, pp. 90–96, 1998.
- [66] J.-P. Kruth, L. Stevens, L. Froyen, and B. Lauwers, "Study of the White Layer of a Surface Machined by Die-Sinking Electro-Discharge Machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 169–172, 1995.
- [67] B. Ekmekci, "Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM)," *Applied Surface Science*, vol. 253, no. 23, pp. 9234–9240, 2007.
- [68] S. Kumar, R. Singh, T. P. Singh, and B. L. Sethi, "Surface modification by electrical discharge machining: A review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 8, pp. 3675–3687, 2009.
- [69] H. Ramasawmy, L. Blunt, and K. P. Rajurkar, "Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in the die sinking EDM process," *Precision Engineering*, vol. 29, pp. 479–490, 2005.
- [70] P. D. Kumar, "Study of thermal stresses induced surface damage under growing plasma channel in electro-discharge machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 202, no. 1–3, pp. 86–95, 2008.
- [71] V. Yadav, V. K. Jain, and P. M. Dixit, "Thermal stresses due to electrical discharge machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, pp. 877–888, 2002.
- [72] B. X. Jia, W. S. Zhao, Z. L. Wang, and F. Q. Hu, "Study to Enhance the Precision of Micro-EDM," *Key Engineering Materials*, vol. 339, pp. 26–31, 2007.
- [73] T. Endo, T. Tsujimoto, and K. Mitsui, "Study of vibration-assisted micro-EDM - The effect of vibration on machining time and stability of discharge," *Precision Engineering*, vol. 32, no. 4, pp. 269–277, 2008.

- [74] F. Han, S. Wachi, and M. Kunieda, "Improvement of machining characteristics of micro-EDM using transistor type isopulse generator and servo feed control," *Precision Engineering*, vol. 28, pp. 378–385, 2004.
- [75] J. Hung, J. Lin, B. Yan, H. Liu, and P. Ho, "Using a helical micro-tool in micro-EDM combined with ultrasonic vibration for micro-hole machining," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. 2705–2713, 2006.
- [76] H. S. Liu, B. H. Yan, C. L. Chen, and F. Y. Huang, "Application of micro-EDM combined with high-frequency dither grinding to micro-hole machining," *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, vol. 46, pp. 80–87, 2006.
- [77] D. T. Pham, S. S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, and K. Popov, "Micro-EDM-recent developments and research issues," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 50–57, 2004.
- [78] Q. H. Zhang, J. H. Zhang, J. X. Deng, and al., "Ultrasonic vibration electrical discharge machining in gas," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, pp. 135–138, 2002.
- [79] M. Kunieda, Y. Miyoshi, T. Takaya, and al., "High speed 3D milling by dry EDM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 147–150, 2003.
- [80] C. C. Kao, J. Tao, and A. J. Shih, "Near dry electrical discharge machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 2273–2281, 2007.
- [81] M. Kunieda, T. Takaya, and S. Nakano, "Improvement of Dry EDM Characteristics Using Piezoelectric Actuator," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 183–186, 2004.
- [82] T. Kaneko and T. Onodera, "Improvement in machining performance of die-sinking EDM by using self-adjusting fuzzy control," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 204–211, 2004.
- [83] S. P. Moylan, S. Chandrasekar, and G. L. Benavides, "High-Speed Micro-Electro-Discharge Machining," *Sandia Report*, p. 61, 2005.
- [84] C. Kuo and J. Huang, "Fabrication of 3D Metal Microstructures Using a Hybrid Process of Micro-EDM and Laser Assembly," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 796–800, 2003.
- [85] V. Fascio, "Étude de la microstructuration du verre par étincelage assisté par attaque chimique," Thèse n°2691, EPFL, 243 p., 2002.
- [86] T. Kurita and M. Hattori, "A study of EDM and ECM / ECM-lapping complex machining technology," *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, vol. 46, pp. 1804–1810, 2006.
- [87] C. J. Morgan, R. R. Vallance, and E. R. Marsh, "Micro-machining and micro-grinding with tools fabricated by micro electro-discharge machining," *International Journal of Nanomanufacturing*, vol. 1, no. 2, p. 242, 2006.

- [88] H. Ohmori, K. Katahira, T. Naruse, and al., "Microscopic Grinding Effects on Fabrication of Ultra-fine Micro Tools," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 569–572, 2007.
- [89] H. Ohmori, K. Katahira, Y. Uehara, and al., "Improvement of Mechanical Strength of Micro Tools by Controlling Surface Characteristics," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 1, pp. 467–470, 2003.
- [90] Y. M. Lim and S. H. Kim, "Diameter control of an extremely thin cylindrical microprobe by electrochemical etching," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 5, pp. 2166–2168, 2000.
- [91] S. H. Yeo, P. C. Tan, and W. Kurnia, "Effects of powder additives suspended in dielectric on crater characteristics for micro electrical discharge machining," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 17, pp. 91–98, 2007.
- [92] E. Uhlmann, S. Piltz, and U. Doll, "Machining of micro/miniature dies and moulds by electrical discharge machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 167, pp. 488–493, 2005.
- [93] "4M | Multi Material Micro Manufacture Network of Excellence." [Online]. Available: <http://www.4m-net.org/>.
- [94] D. T. Pham, S. S. Dimov, S. Bigot, A. Ivanov, K. Popov, and Al., "Micro-EDM Drilling : Accuracy Study," Cardiff, UK, 2005.
- [95] C. Diver, J. Atkinson, H. J. Helml, and L. Li, "Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, no. 1–3, pp. pp296–303, 2004.
- [96] 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," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 8, pp. 3956–3967, 2009.
- [97] O. Blatnik, J. Valentinčič, and M. Junkar, "Comparison of optimal machining parameters of sinking EDM and micro EDM processes," *Multi-Material Micro Manufacture*, pp. 1–4, 2005.
- [98] K. Y. Song, D. K. Chung, and M. S. Park, "Micro electrical discharge milling of WC-Co using a deionized water spray and a bipolar pulse," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 4, pp. 1–10, 2010.
- [99] H. Yu, J. Luan, J. Li, and al., "A new electrode wear compensation method for improving performance in 3D micro EDM milling," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, p. 7, 2010.
- [100] H. Onikura, O. Ohnishi, Y. Take, and a. Kobayashi, "Fabrication of Micro Carbide Tools by Ultrasonic Vibration Grinding," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 257–260, 2000.
- [101] T. Masuzawa, M. Fijuno, K. Kobayashi, and al., "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 431–434, 1985.

- [102] G. L. Benavides, L. F. Bieg, M. P. Saavedra, and al., "High aspect ratio meso-scale parts enabled by wire micro-EDM," *Microsystem Technologies*, vol. 8, pp. 395–401, 2002.
- [103] A. Schoth, R. Forster, and W. Menz, "Micro Wire EDM for High Aspect Ratio 3D Microstructuring of Ceramics and Metals," *Microsystem Technologies*, vol. 11, pp. 250–253, 2005.
- [104] M. T. Yan, C. W. Huang, C. C. Fang, and C. X. Chang, "Development of a prototype micro wire-EDM machine," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 1–3, 2004.
- [105] T. Kawakami and M. Kunieda, "Study on Factors Determining Limits of Minimum Machinable Size in Micro EDM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 1, pp. 167–170, 2005.
- [106] K. Egashira, A. Matsugasako, H. Tsuchiya, and M. Miyazaki, "Electrical discharge machining with ultralow discharge energy," *Precision Engineering*, vol. 30, pp. 414–420, 2006.
- [107] K. Egashira, Y. Morita, and Y. Hattori, "Electrical discharge machining of submicron holes using ultrasmall-diameter electrodes," *Precision Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 139–144, 2010.
- [108] A. Benilov, V. Skryshevsky, Y. Robach, and M. Cabrera, "Micro and nano electrical discharge machining in microfluidics and micro nanotechnology," *International Journal of Material Forming*, vol. 1, no. Supplément 1, pp. 1315 – 1318, 2008.
- [109] A. P. Malshe, K. Virwani, K. P. Rajurkar, and al., "Investigation of nanoscale electro machining (nano-EM) in dielectric oil," *Annals of the CIRPCIRP*, vol. 541, pp. 175–178, 2005.
- [110] 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 n°2007-18, Ecole Centrale de Lyon, Ecully, 170 p., 2007.
- [111] A. J. Melmed, "The art and science and others aspects of making sharp tips," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 9, no. 2, pp. 601–608, 1991.
- [112] G. Tahmasebipour, Y. Hojjat, V. Ahmadi, and A. Abdullah, "Optimization of STM/FIM nanotip aspect ratio based on the Taguchi method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 44, no. 1–2, pp. 80–90, 2008.
- [113] Y. Nakamura, Y. Mera, and K. Maeda, "A reproducible method to fabricate atomically sharp tips for scanning tunneling microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 8, p. 3373, 1999.
- [114] A. Boisen, O. Hansen, and S. Bouwstra, "AFM probes with directly fabricated tips," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, no. 1, pp. 58–62, 1996.
- [115] P. Vettiger, M. Despont, U. Drechsler, and al., "The 'Millipede'—More than thousand tips for future AFM storage," *IBM Journal of Research and Development*, vol. 44, no. 3, pp. 323–340, 2000.
- [116] L. A. Nagahara, T. Thundat, and S. M. Lindsay, "Preparation and characterization of STM tips for electrochemical studies," *Review of Scientific Instruments*, vol. 60, no. 10, p. 3128, 1989.

- [117] W. R. Levick, "Another tungsten microelectrode," *Medical & Biological Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 510–515, 1972.
- [118] C. Thomas, JR, P. Springer, G. Loeb, and al., "A miniature microelectrode array to monitor the bioelectric activity of cultured cells," *Experimental Cell Research*, vol. 74, no. 1, pp. 61–66, 1972.
- [119] J. E. Griffith and D. A. Grigg, "Dimensional metrology with scanning probe microscopes," *Journal of Applied Physics*, vol. 74, no. 9, p. R83, 1993.
- [120] H.-J. Lim, Y.-M. Lim, and S. H. Kim, "Fabrication of tungsten micro-punch for micro-nozzles," *Review of Scientific Instruments*, vol. 72, no. 8, p. 3470, 2001.
- [121] B.-Y. Joo, S.-H. Rhim, and S.-I. Oh, "Micro-hole fabrication by mechanical punching process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 170, no. 3, pp. 593–601, 2005.
- [122] M. Kock, V. Kirchner, and R. Schuster, "Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses : a versatile method with lithographical precision," *Electrochimica Acta*, vol. 48, pp. 3213–3219, 2003.
- [123] D. J. Kim, S. M. Yi, Y. S. Lee, and C. N. Chu, "Straight hole micro EDM with a cylindrical tool using a variable capacitance method accompanied by ultrasonic vibration," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 5, pp. 1092–1097, 2006.
- [124] R. R. Vallance, C. J. Morgan, S. M. Shreve, and E. R. Marsh, "Micro-tool characterization using scanning white light interferometry," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 8, pp. 1234–1243, 2004.
- [125] M. Rahman, H. S. Lim, K. S. Neo, and al., "Tool-based nanofinishing and micromachining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, pp. 2–16, 2007.
- [126] Y. M. Lim and S. H. Kim, "An electrochemical fabrication method for extremely thin cylindrical micropin," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 15, pp. 2287–2296, 2001.
- [127] Z. Fan, L. Hourng, and C. Wang, "Fabrication of tungsten microelectrodes using pulsed electrochemical machining," *Precision Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 489–496, 2010.
- [128] F. Klocke, D. Lung, D. Thomaidis, and al., "Using ultra thin electrodes to produce micro-parts with wire-EDM," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, no. 1–3, pp. 579–584, 2004.
- [129] M. A. Rahman, M. R. A. Senthil, and K. H. S. Lim, "Development of micropin fabrication process using tool based micromachining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, pp. 939–944, 2006.
- [130] K. Egashira and K. Mizutani, "Micro-drilling of monocrystalline silicon using a cutting tool," *Precision Engineering*, vol. 26, pp. 263–268, 2002.

- [131] B. H. Kim, B. J. Park, and C. N. Chu, "Fabrication of multiple electrodes by reverse EDM and their application in micro ECM," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. 843–850, 2006.
- [132] S. H. Choi, S. H. C. S. H. Ryu, D. K. Choi, C. N. Chu, and D. K. C. C. N. Chu, "Fabrication of WC micro-shaft by using electrochemical etching," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 31, no. 7–8, pp. 682–687, 2006.
- [133] Y. M. Lim and S. H. Kim, "Diameter control of an extremely thin cylindrical microprobe by electrochemical etching," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 5, p. 2166, 2000.
- [134] Y. N. Picard, D. P. Adams, M. J. Vasile, and M. B. Ritchey, "Focused ion beam-shaped microtools for ultra-precision machining of cylindrical components," *Precision Engineering*, vol. 27, pp. 59–69, 2003.
- [135] A. Muttamara, P. Janmanee, and Y. Fukuzawa, "A Study of Micro – EDM on Silicon Nitride Using Electrode Materials," *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2010.
- [136] "AMPCO." [Online]. Available: <http://www.ampcometal.com/>.
- [137] W. M. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 93rd ed. 2012, p. 2670.
- [138] E. Patrick, M. E. Orazem, J. C. Sanchez, and al., "Corrosion of tungsten microelectrodes used in neural recording applications.," *Journal of neuroscience methods*, vol. 198, no. 2, pp. 158–71, 2011.
- [139] R. D. Armstrong, K. Edmondson, and R. E. Firman, "The anodic dissolution of tungsten in alkaline solution," *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, vol. 40, no. 1, pp. 19–28, Nov. 1972.
- [140] M. Anik, "Effect of concentration gradient on the anodic behavior of tungsten," *Corrosion Science*, vol. 48, no. 12, pp. 4158–4173, 2006.
- [141] 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," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 149, no. 1, p. E6, 2002.
- [142] 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," *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, no. 1, 2011.
- [143] H.-J. Lim, Y. Lim, and S. H. Kim, "Fabrication of Arbitrarily Shaped Microelectrodes by Electrochemical Etching," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 42, no. Part 1, No. 3, pp. 1479–1485, 2003.
- [144] M. Kulakov, I. Luzinov, and K. G. Kornev, "Capillary and surface effects in the formation of nanosharp tungsten tips by electropolishing.," *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, vol. 25, no. 8, pp. 4462–8, 2009.

- [145] M. Cabrera, "Machine and method for machining a part by micro-electrical discharge machining," U.S. Patent WO20100317162011.
- [146] M. Zahiruddin and M. Kunieda, "Comparison of energy and removal efficiencies between micro and macro EDM," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 187–190, 2012.
- [147] J. Tao, J. Ni, and A. J. Shih, "Modeling of the Anode Crater Formation in Electrical Discharge Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 134, no. 1, 2012.
- [148] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, and al., "Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 14, no. 2, pp. 6–17, 1998.
- [149] J. Qian, R. P. Joshi, E. Schamiloglu, and al., "Analysis of polarity effects in the electrical breakdown of liquids," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, no. 2, pp. 359–369, 2006.
- [150] R. P. Joshi, J. Qian, G. Zhao, and et al., "Are microbubbles necessary for the breakdown of liquid water subjected to a submicrosecond pulse?," *Journal of Applied Physics*, vol. 96, no. 9, pp. 5129–5139, 2004.
- [151] J. Qian, R. P. Joshi, J. Kolb, and K. H. Schoenbach, "Microbubble-based model analysis of liquid breakdown initiation by a submicrosecond pulse," *Journal of Applied Physics*, vol. 97, pp. 1–10, 2005.
- [152] Y. S. Wong, L. C. Lim, I. Rahuman, and W. M. Tee, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 79, pp. 30 – 40, 1998.
- [153] W. Natsu, M. Shimoyamada, and M. Kunieda, "Study on Expansion Process of EDM Arc Plasma," *Japan Society Mechanical Engineering International Journal Series C*, vol. 49, no. 2, pp. 600–605, 2006.
- [154] G. Vasudevamurthy and T. W. Knight, "Effect of system parameters on size distribution of 304 stainless steel particles produced by electrical discharge mechanism," *Materials Letters*, vol. 61, pp. 4872 – 4874, 2007.
- [155] Diot and al., "Rotative tool-electrodes of simple shapes for 3D electroerosive machining," U.S. Patent 61844862001.
- [156] J. M. Meek and J. D. Craggs, *Electrical breakdown of gases*. John Wiley and Sons, Ltd., New York, NY, 1978, p. 886.
- [157] D. Staack, B. Farouk, A. Gutsol, and A. Fridman, "Characterization of a dc atmospheric pressure normal glow discharge," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 700–711, 2005.
- [158] R. Redmer, "Physical properties of dense, low-temperature plasmas," *Physics Report*, vol. 282, pp. 35–157, 1997.

- [159] B. Revaz, G. Witz, and R. Flükiger, "Properties of the plasma channel in liquid discharges inferred from cathode local temperature measurements," *Journal of Applied Physics*, vol. 98, pp. 1–6, 2005.
- [160] L. Kogut and K. Komvopoulos, "Electrical contact resistance theory for conductive rough surfaces," *Journal of Applied Physics*, vol. 94, no. 5, p. 3153, 2003.
- [161] R. Tobazéon, "Préclaquage et claquage des liquides diélectriques," *Techniques de l'ingénieur*, no. D226, 1986.
- [162] O. Lesaint and T. V. Top, "Streamer initiation in mineral oil. Part I: electrode surface effect under impulse voltage," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 1, pp. 84–91, 2002.
- [163] L. Spitzer and R. Härm, "Transport Phenomena in a Completely Ionized Gas," *Physical Review*, vol. 89, no. 5, pp. 977–981, 1953.
- [164] W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 293 – 300, 1951.
- [165] H. Tong, Y. Li, and Y. Wang, "Experimental research on vibration assisted EDM of micro-structures with non-circular cross-section," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 208, no. 1–3, pp. 289–298, 2008.
- [166] J. Bacher, "Conception de robots de très haute précision à articulations flexibles : interaction dynamique-commande," Thèse N°2907, EPFL, 150 p., 2003.
- [167] S. Liu, Y. Huang, and Y. Li, "A plate capacitor model of the EDM process based on the field emission theory," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 51, no. 7–8, pp. 653–659, 2011.

## *Annexes*

---

## 6 Annexes

### 6.1 Logiciel de la machine

#### 6.1.1 Généralités

Nous allons expliquer succinctement ci-dessous comment fonctionne la partie logicielle. Elle est constituée de l'IHM 2 (Interface Homme/Machine) développée sur l'Ordinateur Machine sous Java.

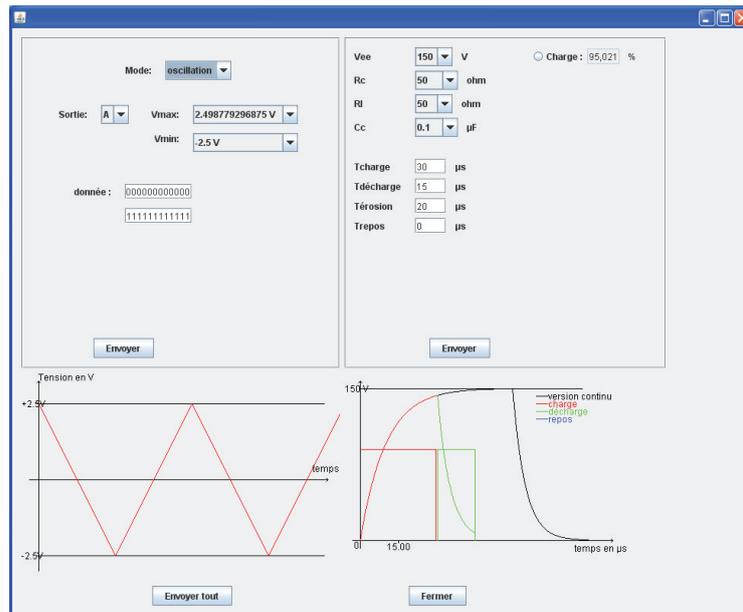


Figure 159 - IHM 2 : Paramètres d'usage et de la SPI.

A gauche : fenêtre permettant de piloter l'actionneur piézoélectrique.

A droite : fenêtre permettant de donner les paramètres d'usage.

L'interface l'IHM 2 est constituée de :

- une première partie qui permet d'envoyer au  $\mu C2$  les paramètres d'usage au générateur d'impulsions (carte  $T_{ON}/T_{OFF}$ ),
- une deuxième partie qui permet d'envoyer au  $\mu C2$  les paramètres de la SPI pour la commande de l'actionneur piézoélectrique Z' (carte  $\mu C2$ ).

Elle est aussi constituée de l'IHM 1 développée sous Java sur le même PC que l'IHM2 avec deux modes de fonctionnement :

- par utilisation d'un parcours d'usage décrit dans un fichier existant : ce fichier est généré à partir du logiciel de FAO PowerMill ;
- ou (1) par entrée en ligne des commandes de base par l'utilisateur pour définir le parcours d'outil et (2) transfert des données avec l'application Java comme le montre la figure 92 ci-dessous.

### 6.1.2 Définition du parcours d'usinage par CFAO

Le principe consiste à concevoir le modèle 3D de la pièce avec un logiciel de CAO géométrique (SolidWorks ou PowerShape dans notre cas), puis d'exporter ce modèle via une interface standardisé au logiciel de FAO PowerMill qui est chargée de générer le parcours d'outillage en fonction des paramètres définis par l'opérateur (diamètre de l'outil, description géométrique des passes, recouvrement entre les passes, etc.).

Pour cela, une première application Java (montrée à la Figure 160) permet de traduire le parcours de l'outil en un fichier « .txt » qui sera envoyé sous forme de trames avec des paramètres en code ASCII sous la **forme (u, m, f, Z, z, s)**.



Figure 160 - Traducteur du parcours d'usinage.

Ainsi, avant d'envoyer le parcours au  $\mu C1$ , l'utilisateur doit choisir le mode d'envoi :

- mode continu : générateur RC sans  $T_{OFF}$
- mode MOS : générateur RC avec  $T_{ON} / T_{OFF}$

Dans le 1<sup>er</sup> cas, chaque trame est envoyée en entier ; l'exécution de chaque trame est immédiate ; la fin d'exécution de la trame en cours est signifiée à l'application Java, qui se charge d'envoyer la suivante.

Dans le 2<sup>ème</sup> cas, chaque trame est fractionnée en pas élémentaire z ; la fin d'exécution du pas élémentaire en cours est signifiée à l'application Java, qui se charge d'envoyer le pas élémentaire suivant jusqu'à la fin de la trame de longueur Z. Cette fin est signifiée à l'application Java pour lancer l'exécution de la 2<sup>ème</sup> trame et ainsi de suite jusqu'à la fin du parcours.

Soit, par exemple la **trame (u, h, 100, 400, 2, « d »)**, le **parcours consiste à faire un déplacement de l'électrode dans le sens descendant, d'une distance de  $400 \times 1.25 \mu m$  à une fréquence de 100 Hz**. Cette trame correspond à une descente du moteur Z à 100 Hz pendant 400 pas et un intervalle d'exécution de 2 pas ; à chaque intervalle d'exécution, le  $\mu C$  fait une scrutation des ports connectés à la caractérisation et incrémente ses compteurs (en cas de décharge) en vérifiant que  $T_{ON}$  est activé (les impulsions de courant pendant  $T_{OFF}$  ne sont pas prises en considération). Ces informations sont envoyées en string à l'application Java qui se charge de les formater et de les stocker dans un fichier texte. Elles seront nécessaires pour la régulation.

Supposons que l'on ait un contact pendant la descente de l'électrode. Une routine d'interruption est exécutée de façon à remonter le moteur.

En résumé, pendant l'exécution de la trame, il y a donc 3 interruptions possibles :

- 2 interruptions matérielles qui permettent de compter les décharges positives et négatives.

- 1 interruption logicielle par « Timer Overflow » qui permet de contrôler la durée du contact, de compter le nombre de contacts et de commander le moteur Z en sens ascendant.

A la fin de l'exécution, le  $\mu C1$  se met en position d'écoute de la liaison. A la fin de l'usinage un drapeau est mis à 1, avec envoi du caractère f.

### 6.1.3 Définition du parcours d'usinage directement par l'opérateur

La Figure 161 ci-dessous montre la fenêtre de l'application Java. Les paramètres sont les mêmes que ceux définis plus haut. L'opérateur peut visualiser le parcours d'usinage pour correction. L'exécution est déclenchée au niveau logiciel quand l'opérateur active le bouton « exécution » de l'interface, puis physiquement le bouton Reset de l'armoire.

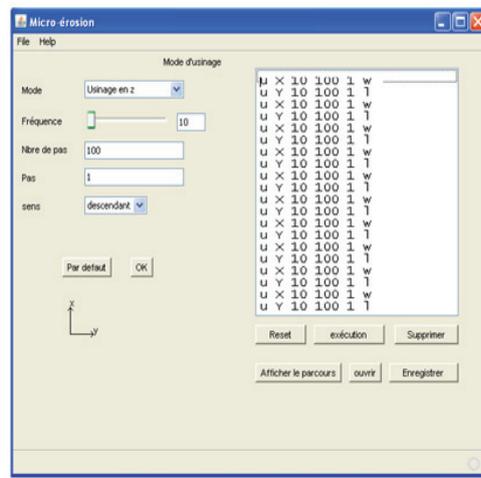


Figure 161 - Vue de la fenêtre de commande directe du parcours d'usinage.

## 6.2 État de surface

L'état de surface des micro-outils joue un rôle important dans la résolution d'usinage. Chaque imperfection du matériau devient potentiellement un site d'émission de décharge érodante, par conséquent, un outil avec un mauvais état de surface peut engendrer un mauvais rendement et une localisation spécifique des décharges, qui peut conduire à un charbonnage accru de l'électrode. A l'échelle macroscopique, ces effets sont moyennés sur la surface utile du micro-outil. A l'échelle microscopique, les défauts surfaciques de l'outil deviennent prépondérants par rapport à la surface utile, il convient donc d'obtenir un état de surface le plus poli possible.

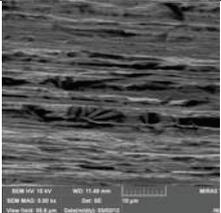
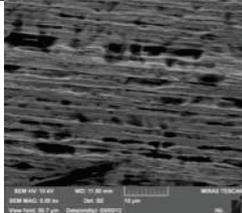
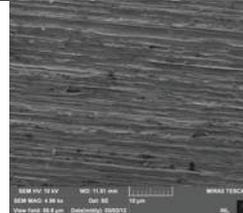
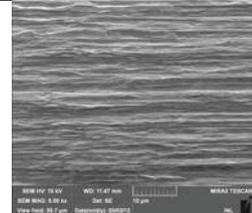
Durée de polissage (min)	2	5	10	15
Courant de gravure	250 mA	100 mA	50 mA	15 mA
Etat de surface				

Figure 162 - Etats de surface d'électrodes pour différents courants de gravure.

On a remarqué que l'état de surface s'améliore à mesure que le temps de polissage s'allonge. Ci-dessous, nous observons l'état de surface initial (à gauche) du fil de tungstène. A droite, ce même barreau après une gravure sous une tension de 15 V et un courant de 75 mA suivi d'un polissage à 16 mA durant 5 minutes.

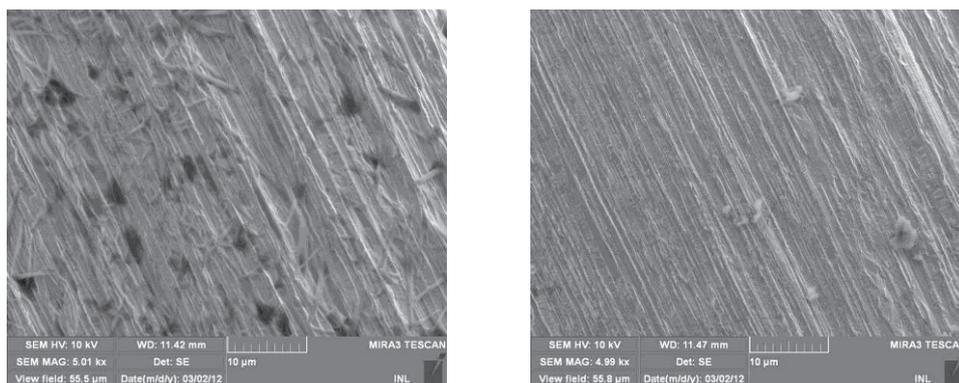


Figure 163 - Etat de surface avant et après polissage à 16 mA durant 5 minutes.

Le polissage des électrode-outils en fin de gravure semble donc une étape importante afin de garantir des outils présentant peu de défauts indispensable à la  $\mu$ EE.