

CONTRIBUTION À L'ACCROISSEMENT DES PERFORMANCES DU PROCESSUS DE μ EDM PAR L'UTILISATION D'UN ROBOT À DYNAMIQUE ÉLEVÉE ET DE HAUTE PRÉCISION

THÈSE N° 3281 (2005)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Institut de production et de robotique

SECTION DE MICROTECHNIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Cédric JOSEPH

ingénieur en microtechnique diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Sainte-Croix (VD)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. R. Clavel, directeur de thèse
Dr I. Beltrami, rapporteur
Prof. J. Jacot, rapporteur
Dr H. Langen, rapporteur

Lausanne, EPFL
2005

*« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.
La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait
pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique: rien ne
fonctionne... et personne ne sait pourquoi ! »*

Albert Einstein (1879-1955)

Version Abrégée

L'électroérosion (EDM) est une méthode de fabrication adaptée à l'usinage des formes 3D dans des matériaux très durs conducteurs ou semi-conducteurs. L'usinabilité ne dépend pas de la dureté du matériau, mais de sa conductibilité électrique et de son point de fusion. L'absence d'interaction mécanique entre l'outil (l'électrode) et la pièce à usiner, en fait un procédé particulièrement bien adapté à la micro-fabrication. Le passage de la macro à la micro-électroérosion (μ EDM) requiert toutefois une adaptation des éléments de la machine, tant pour améliorer les performances du processus que pour obtenir des hautes précisions. Le but visé est d'usiner des formes de quelques millimètres avec une précision d'une centaine de nanomètres.

Cette thèse traite du problème de la μ EDM avec une petite machine 3 degrés de liberté (ddl) à cinématique parallèle et articulations flexibles (le robot Delta³). En plus de sa haute précision (5 nm) et de sa bande passante élevée (500 Hz), le robot Delta³ est exempt d'erreur d'inversion et de frottement. Ces performances ont permis de vérifier l'importance des constantes de temps dans la boucle d'asservissement du processus, par le biais de nombreuses expériences de micro-perçage.

Des simulations démontrent l'intérêt de la dynamique pour améliorer le processus de μ EDM. Les mauvaises conditions de lavage et les gaps très petits ($<10 \mu\text{m}$) engendrent des gradients de contamination élevés, auxquels la réponse en fréquence de la machine doit être adaptée. Pour améliorer l'équilibre entre l'enlèvement de matière et son évacuation, les simulations montrent que la distance électrode-pièce doit être ajustée à une fréquence de quelques centaines de hertz. Ces mouvements de va-et-vient doivent être rapides et précis; d'une part pour ajuster rapidement et précisément la distance de claquage et d'autre part pour garantir une bonne précision d'usinage.

Une version industrielle du prototype mis au point durant cette thèse est en cours de préparation chez AGIE (entreprise qui a soutenu ce travail).

Mots clés: μ EDM, micro-EDM, micro-électroérosion, micro-érosion, micro-usinage, micro-perçage, nanotechnologie

Abstract

Electro Discharge Machining (EDM) is an attractive subtractive method for complex 3d structurization of hard and very hard conductive and semi-conductive materials. The machining capabilities of a material do not depend on its hardness but on its electric conductivity and its melting point. The absence of any mechanical interaction between tool (the electrode) and machined part makes the electroerosion a well-adapted process for micro-structurization. In the passage from the macro to the micro-electroerosion (μ EDM), some of the elements of the machine have to be adapted in order to improve the performances and to obtain accurate movements. The goal is to manufacture millimeters-sized shapes with an accuracy of a hundred of nanometers.

This thesis deals the problem of the μ EDM with a three degrees of freedom (DOF) mechanism, based on a parallel kinematics and flexure joints (the Delta³ robot). In addition to its high accuracy (5 nm) and high bandwidth (500 Hz), the Delta³ robot has the particularity of being free of backlash, wear and stick-slip phenomena. These performances have allowed to verify the importance of the time constants in the servo loop of the process, by many experiences of micro-drilling.

Simulations have demonstrated the advantages brought by the dynamic, in the improvement of the μ EDM process. Bad flushing conditions and very small gaps ($<10 \mu\text{m}$), generate elevated gradients of contamination, to which the frequency response of the machine must be adapted. Simulations have shown that the balance between the material removal rate and the evacuation rate can be improved by adjusting the electrode-part distance at a frequency of a few hundreds of hertz. These back and forth movements have to be fast and accurate: first, to adjust quickly and precisely the breaking voltage distance and second, to guarantee a good machining accuracy.

An industrial version of the prototype finalized during this thesis will be commercialized soon by AGIE (the company that supported this work).

Keywords: micro-EDM, Electro Discharge Machining, 3D micro-structurization, microfactory, nanofactory, rapid prototyping, nanotechnology

Remerciements

Mes plus vifs et sincères remerciements à mon directeur de thèse le professeur Reymond Clavel. Son ouverture, sa rigueur et sa volonté d'excellence sont pour moi des modèles de discipline de recherche. J'ai apprécié ses conseils avisés, son soutien et sa disponibilité. Intransigeant et sans concession sur la qualité des travaux exécutés au sein de son laboratoire, il prêche par l'exemple la 'devise du canard' illustrée par la figure ci-contre. Cette maxime affichée dans son bureau, n'est pas étrangère au climat de travail très agréable régnant au LSRO.

Merci à tout le personnel administratif et scientifique pour leur disponibilité, leur gentillesse et tous les services rendus. La qualité de l'ambiance du laboratoire a contribué à atténuer les moments de doutes profonds inhérents à la rédaction d'une thèse de doctorat.

'Grazie di cuore' à Rosario Lombardo et Marco Baechtold, mes collègues d'AGIE qui n'ont pas hésité à consacrer leurs week-ends pour m'aider à mettre en service l'électronique du générateur et de la commande.

Merci à Marco Boccadoro, mon supérieur hiérarchique de chez AGIE. Au-delà de ses compétences professionnelles et de ses conseils avisés, je lui suis gré de sa loyauté et de son soutien durant les moments d'incertitudes.

Merci également à Ernst Buehler, le concepteur (avec Marco Boccadoro) de la CNC utilisée dans ce travail. Son goût pour l'innovation autant que sa passion pour l'électroérosion sont contagieux et stimulants.

Merci à Maurice Fracheboud à l'origine de tous les systèmes d'avance fils conçus dans le cadre de cette thèse. L'originalité et la fiabilité des petits mécanismes qu'il a conçu, sont sans conteste des éléments clé pour le succès industriel d'une petite machine μ EDM.

Merci aux étudiants qui se sont engagés avec passion dans leurs travaux de diplômes et qui ont contribué à l'avancement de cette thèse: Niklaus Schultz, Matteo Calzascia, Manuel Saglini de l'EPFL et Alessio Faretta du 'Politecnico di Milano'.

Merci à Stefano Bottinelli, fondateur de Mecartex, qui a réalisé tous les robots à guidages élastiques utilisés pour nos recherches. Toujours chez Mecartex, merci à Yann Mabillard pour avoir contribué au développement des routines *Labview* de la commande.

Un clin d'oeil à mes camarades de thèse Nuno Fazenda et Patrick Helmer. Merci pour votre disponibilité, votre aide et vos compétences. Je vous souhaite tous mes vœux de réussite.

Merci à mon collègue de bureau le Dr Mohamed Bouri pour m'avoir supporté pendant trois ans. Nos discussions animées furent un exutoire stimulant. Merci de l'aide concrète et spontanée pour la partie simulation.

Merci aux rapporteurs de mon jury de thèse pour la lecture approfondie de mon manuscrit et la pertinence de leurs remarques: Dr Ivano Beltrami, Prof. Jacques Jacot et Dr Hans Langen.

POUR TRAVAILLER ICI
IL FAUT FAIRE COMME LES CANARDS

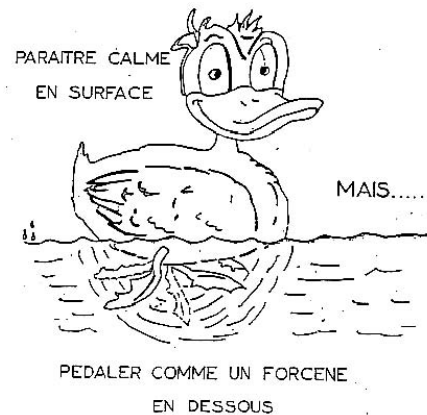


Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Motivations	1
1.2	Objectifs	2
1.3	Originalités	3
1.4	Contributions	3
1.5	Historique: de l'arc électrique à la μ EDM	4
2	Mécanismes de base de l'électroérosion	7
2.1	Introduction	7
2.2	Qu'est-ce que l'électroérosion (EDM) ?	7
2.3	Qu'est-ce que la micro-électroérosion (μ EDM) ?	7
2.4	Principes physiques d'une étincelle érosive	7
2.5	Les différents procédés d'EDM	10
3	La μEDM et les techniques de micro-fabrication concurrentes	17
3.1	Introduction	17
3.2	Focussed ion beam (FIB)	18
3.3	La photolithographie	19
3.4	Le micro-usinage par enlèvement de copeaux	23
3.5	L'usinage laser (ou ablation laser)	23
3.6	Le micro-sablage (micro-powder blasting)	25
3.7	La microstéréolithographie	26
3.8	Conclusion	27
4	L'état de l'art	29
4.1	Introduction	29
4.2	Quelques machines μ EDM à plongée	29
4.3	Les dimensions et les précisions type en μ EDM	30
4.4	La dynamique au service du processus	30
4.5	La rotation de l'électrode (usinage de forme cylindriques)	32
4.6	Mesure de la 'force d'érosion' et de la dimension des cratères	34
4.7	Formage de l'électrode 'in situ' (<i>dressing</i>)	35
4.8	Conclusion	36
5	Description et analyse du prototype	37
5.1	Introduction	37
5.2	Particularités d'une commande pour machine EDM	37
5.3	Concepts mécaniques pour un robot dynamique et précis	39
5.4	Les moteurs	42
5.5	La commande AGIE SIT-B	47
5.6	Asservissement de position	48
5.7	Le servo (la boucle d'asservissement du gap)	53
5.8	Le pousse-fil (dispositif d'avance d'électrode)	54
5.9	La fonction 'touch'	55
5.10	Génération d'un bruit aléatoire (vibrations)	56
5.11	Timer de lavage et timer de compensation	57
5.12	Conclusion	58
6	Modélisation & simulations	61
6.1	Introduction	61
6.2	Description du modèle	61

6.3	Simulations	66
6.4	Conclusion	71
7	Dynamique & processus: expériences.....	73
7.1	Introduction.....	73
7.2	Vibrations.....	74
7.3	Rotation de l'électrode à haute vitesse.....	75
7.4	Avantage d'un actionneur dynamique	82
7.5	Influence du gain.....	86
7.6	Bande passante du servo	88
7.7	Conclusion	95
8	Quelques usinages et observations	99
8.1	Introduction.....	99
8.2	Mesure de la 'force d'érosion'.....	99
8.3	Réduction du diamètre de l'électrode	101
8.4	Le découpage avec une machine μ EDM à plongée	103
9	Conclusion générale.....	105
9.1	Note finale.....	107
	Définitions & formulaires	109
	Les acronymes.....	109
	Lexique anglais - français.....	110
	Lexique français.....	111
	Unités, symboles, notations.....	112
	Annexes.....	113
	Annexe I : Moving magnet ETEL MMA3008-025-10A	114
	Annexe II : Mesures du courant associées à la position des axes XYZ	115
	Annexe III : Machines AGIE utilisées pour la μ EDM en 2005	116
	Annexe IV : Les 3 prototypes du robot Delta ³	117
	Annexe V : Cinématiques parallèles et articulations élastiques	118
	Annexe VI : Schémas blocs de l'algorithme d'asservissement de position.....	119
	Annexe VII : Technologie de perçage.....	120
	Annexe VIII : Technologie pour la réduction de l'électrode par planétaire	121
	Bibliographie.....	123
	L'électroérosion	123
	Les techniques de micro-usinage	126
	Robotique, réglage et commande.....	127
	Curriculum Vitae.....	129

1 Introduction

L'électroérosion est une technologie intéressante pour usiner des formes complexes dans des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs. Ce procédé connu depuis une soixantaine d'années [laz44a], est principalement utilisé pour fabriquer des outils: moules d'injection, matrices de frappe (étampage), matrices de découpage, outils d'extrusion, etc.

Le concept de micro-électroérosion (μ EDM) est apparu il y a bientôt quarante ans [ose65a] [kur67a]. Depuis, l'intérêt pour cette technologie est resté confiné dans le monde de la recherche. Les professionnels de la branche, jugeant le marché du 'petit' peu porteur, ont modérément investi dans ce domaine. Ils se sont contentés d'adapter de 'grosses machines', pour répondre à la demande de quelques clients ayant des applications 'micros'. Cette approche top-down, a donné naissance à des machines μ EDM hybrides, chères et d'une ergonomie peu adaptée pour usiner des pièces millimétriques.

La demande croissante dans le micro-perçage (trous de diamètre d'une centaine de micromètres), ou l'usinage de petites formes de précision sub-micrométrique, a donné un nouvel élan à la μ EDM. Par la conception d'une machine innovante de haute précision, dynamique et extrêmement compacte, nous voulons répondre à ce regain d'intérêt.

Ce travail porte un regard neuf sur la micro-électroérosion; il propose des solutions novatrices et compatibles avec la réalité industrielle, en prenant comme objectif de faire passer la μ EDM de la recherche à l'industrie. Le but est de mettre au service de la microtechnique et des nanotechnologies, un procédé d'usinage de haute précision concurrentiel.

1.1 Motivations

Il y a des années que la micro-électroérosion montre des perspectives intéressantes. Les premières publications datent de plus de quarante ans; c'est au milieu des années soixante que des pionniers, comme le hollandais Osenbruggen du laboratoire de recherche de Philips [ose65a] et les japonais Kurafuji et Masuzawa [kur67a], relatent des résultats qu'ils ont obtenus dans le micro-perçage par électroérosion. Depuis, la μ EDM est traitée par beaucoup de travaux de recherche, qui proposent des concepts pour l'exploiter au mieux. Cependant, la concrétisation d'idées nouvelles comme la dynamique élevée, la haute précision, les cinématiques parallèles ou encore les articulations élastiques n'apparaît toujours pas sur les machines EDM actuellement disponibles sur le marché.

L'usinage par électroérosion est un procédé basé sur un principe physique, faisant intervenir un large spectre des techniques de l'ingénieur: l'électronique, la mécanique, l'informatique et le réglage automatique, sont autant de domaines présents dans une machine EDM. Les performances de cette dernière ne sont pas liées à une technique spécifique, mais dépendent de la synthèse de toutes ces disciplines; elles interagissent et sont étroitement liées. Disposer de compétences simultanément dans tous ces domaines n'est pas usuel, aussi les travaux de recherche ont tendance à se focaliser sur un seul aspect.

- Des travaux se concentrent sur l'**aspect étincelle** [mas89b] [yam04a]; ils montrent que les impulsions de l'ordre du micro-joule, sont la base de la μ EDM. Les générateurs utilisés pour produire les étincelles à faible énergie, sont généralement de type à relaxationsⁱ et leur principe est connu depuis le début de l'électroérosion.

ⁱ Les générateurs à relaxation sont également dénommés 'à décharge de condensateurs', 'Lazarenko-Kreis' en allemand ou 'circuit Lazarenko', du nom des inventeurs du principe d'usinage par électroérosion. Ils permettent de produire des étincelles de faible énergie à des fréquences très élevées.

- D'autres travaux se sont occupés de la **dynamique passive**ⁱⁱ. Ils utilisent en général un actionneur haute fréquence de faible course (quelques dizaines de micromètres), monté sur des axes permettant de grands déplacements [zha97a]. Ces recherches soulignent l'intérêt de la dynamique dans certaines conditions d'érosion.
- La **dynamique active**ⁱⁱⁱ est un domaine moins étudié [ima96a]. Il demande des connaissances plus vastes et beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre. Non seulement il faut une mécanique avec une bonne réponse en fréquence, mais en plus il est nécessaire de disposer d'une électronique et des algorithmes de réglage adaptés. Lorsqu'on touche au cœur des machines EDM, les secrets sont bien gardés; les constructeurs préservent jalousement leur savoir faire. Les chercheurs du monde académique, sont souvent enclins à développer et à redécouvrir avec peu de moyen, ce que les constructeurs de machines EDM établis connaissent depuis longtemps.
- La **précision** est un aspect rarement traité de manière directe. Les publications présentent des résultats 'challenge', comme le formage d'électrodes de 5 micromètres de diamètre [yam04a]. Sur la précision de l'entraxe entre deux trous réalisés avec de telles électrodes, aucun article n'est disponible.

Notre approche de la μ EDM est globale; nous proposons un dispositif intégrant tous les aspects cités plus haut et permettant d'usiner des motifs d'une dizaine de millimètres avec des précisions de quelques centaines de nanomètres. Au-delà des perspectives, nous exposons des résultats probants, montrant les avantages d'une machine à enfonçage dédiée au 'petit'.

1.2 Objectifs

L'objectif principal de ce travail de thèse, est de démontrer l'intérêt de disposer d'une mécanique dynamique. Nous différencions la **dynamique passive**ⁱⁱ et la **dynamique active**ⁱⁱⁱ. Nous montrons l'utilité de disposer d'une boucle d'asservissement de la position du gap^{iv}, avec des temps de latences^v minimaux. Nos résultats sont comparés avec ceux obtenus avec des machines μ EDM existantes, de manière à souligner les avantages et le réalisme de nos concepts.

La précision est abordée sous deux aspects:

- Nous vérifions par de nombreux usinages, que le processus de μ EDM associé au robot Delta³ III (cf. Annexe IV), permet d'usiner avec des précisions de quelques centaines de nanomètres sur des courses de plusieurs millimètres dans un milieu industriel (ambiance climatisée à $\pm 1^\circ\text{C}$ avec un gradient de température maximum de 0.2°C/h).^{vi}
- Nous étudions et soulignons l'intérêt d'un positionnement précis et dynamique au niveau du processus. En ajustant le gap avec une précision micrométrique et des temps de réponse de l'ordre de la milliseconde, le taux d'enlèvement de matière est amélioré et il devient possible d'éroder, malgré des conditions de lavage peu favorables.

Nous justifions un nouveau concept de machine μ EDM et mettons en valeur des solutions innovantes, dédiées à la micro-électroérosion. Dans ce but, nous proposons de repenser la conception même de la machine à électroérosion; nous présentons une approche 'bottom-up', en

ⁱⁱ Par dynamique passive, il faut comprendre des mouvements de la pièce ou de l'électrode, indépendants du contrôle du processus. Ce peut être des mouvements pulsés (vibrations) ou à vitesse constante (rotation).

ⁱⁱⁱ La dynamique active est la réponse en fréquence de l'asservissement du gap. Elle tient compte de tous les éléments générant un retard dans la boucle de réglage du servo.

^{iv} Le gap est l'espace situé entre l'électrode et la pièce à usiner.

^v Nous définissons le temps de latence de la boucle d'asservissement du processus, comme le temps écoulé entre un ordre de mouvement donné par le servo et un déplacement de l'électrode $0.1 \mu\text{m}$.

^{vi} Le calibrage et la précision du robot Delta³ sont étudiés par M. Nuno Fazenda dans une thèse parallèle.

définissant clairement un champ d'applications englobant les usinages jusqu'à une dimension maximale d'une dizaine de millimètres. Nous mettons en évidence, les avantages en termes de précision, cadences d'usinage et coûts, découlant de ce choix.

1.3 Originalités

L'approche globale de la μ EDM est originale; nous vérifions des nouveaux concepts, en proposant une machine μ EDM dynamique, de haute précision et compatible avec la réalité industrielle. En particulier:

- Nous montrons qu'en diminuant les constantes de temps mécaniques, pour les rapprocher de celles électriques, nous améliorons l'asservissement du processus de μ EDM. Le robot Delta³ associé à la commande AGIE SIT-B, a permis d'abaisser la somme des temps de latence dans la boucle de réglage du servo^{vii} à une milliseconde^{viii} et de générer des accélérations de 2 g, tout en obtenant des précisions d'usinage sub-micrométriques.
- L'utilisation d'un robot à cinématique parallèle avec des liaisons à articulations élastiques, est une approche originale encore jamais utilisée pour l'usinage par électroérosion. Elle est l'objet d'un brevet [bot99a] déposé par AGIE, entreprise qui a soutenu ce travail de thèse.
- Nous utilisons un générateur et une commande à vocation industrielle (AGIE SIT-B). Ce choix permet d'une part, de valider nos résultats en les comparant avec une machine μ EDM disponible sur le marché et d'autre part, de proposer des concepts proches d'une réalisation commerciale.

1.4 Contributions

Les contributions principales de ce travail peuvent être résumées en 5 points:

- 1) Mise en oeuvre d'un système pour contrôler le processus d'électroérosion avec une dynamique dix fois meilleure des machines μ EDM communément utilisées (300 Hz au lieu d'une trentaine de hertz), en garantissant une précision sub-micrométrique.
- 2) Mise au point des moyens de mesure nécessaires à l'analyse du processus de μ EDM.
- 3) Méthodologie et règles de conception d'une machine μ EDM de très haute précision.
- 4) Tests et caractérisations des résultats obtenus.
- 5) Mise en évidence des limites.

Durant tout ce travail, un accent particulier est axé sur la vérification des prédictions théoriques. Nous avons validé nos mesures par une bonne répétitivité de nos expériences, de manière à obtenir des résultats utilisables industriellement. Ceci a demandé un énorme effort d'implémentation de logiciels, tant en algorithmes temps réel qu'en interfaces homme-machine.

Beaucoup de travaux présentés dans la littérature, utilisent des prototypes de laboratoires dédiés à une expérience particulière. Nous nous sommes efforcés de mettre à disposition une machine μ EDM, permettant de réaliser un grand spectre d'expériences, de manière à comparer les résultats obtenus avec la même configuration. Typiquement, pour vérifier le lavage induit par la dynamique passive, une comparaison de la rotation de l'électrode, des vibrations et des mouvements de *timer* dans des conditions strictement identiques, permet de pondérer l'intérêt de chacune des méthodes.

^{vii} Le servo est le coeur d'une machine EDM asservie (§5.7). C'est une unité de calcul temps réel contrôlant la position de l'électrode en fonction des paramètres électriques mesurés par le générateur. Dans notre cas, le servo est un microcontrôleur.

^{viii} Le temps de latence de la Quadratron II, qui est une machine à enfonçage 'conventionnelle' dédiée à la μ EDM, est de 9 millisecondes (cf. Tableau 7.17 et Annexe III)

1.5 Historique: de l'arc électrique à la μ EDM

L'arc électrique

Depuis ses origines, l'humanité connaît bien le phénomène de l'arc électrique. Il se manifeste naturellement sous la forme d'éclairs pendant les orages. Son explication - *phénomène thermique et lumineux très intense, lié au passage d'un courant électrique dans un gaz non raréfié, rendu conducteur par ionisation* - ne sera comprise que tardivement.

1750: L'Américain Benjamin Franklin (1706-1790) découvre la nature électrique des éclairs.

1770: Le chimiste britannique Josef Priestley (1733-1804) découvre l'effet érodant des décharges électriques. Il observe la lumière produite par les décharges électriques, de même que les traces laissées sur les électrodes. Ces mêmes observations sont confirmées vers 1777 par un autre scientifique: Georg Christian Lichtenberg (1742-1799).

1811: Le Britannique sir Humphry Davy (1778-1829) produit le premier arc électrique artificiel stable. Il met en contact deux électrodes métalliques reliées à un générateur et fait circuler un courant d'une dizaine d'ampères. Les extrémités de l'anode et de la cathode dégagent alors une grande quantité de chaleur. En écartant légèrement les contacts l'un de l'autre, une surtension de rupture apparaît. Elle est suffisante pour amorcer un arc sur une distance faible; l'air s'y transforme en plasma conducteur et stabilise l'arc. En éloignant davantage les électrodes, sir Davy constata l'amplification du pouvoir éclairant du phénomène.

La découverte de l'arc électrique a transformé l'histoire de la lumière artificielle.

1850: Le Français Léon Foucault (1819-1868) perfectionne le dispositif de sir Humphry Davy en remplaçant les électrodes métalliques, qui se détruisent très rapidement, par des électrodes en charbon de cornue (coke de pétrole). La lampe à arc est née.

1881: La soudure est la première application technique concrète des décharges électriques. Cette invention due au Français Auguste de Meritens (1834-1898), marque la première utilisation de l'énergie électrique sur un poste de travail.

L'électroérosion

1943: Découverte du principe d'usinage par électroérosion.

La démocratisation de l'électricité a entraîné un effort de recherche dans le domaine des interrupteurs de distribution. En particulier dans la compréhension de la grande usure due aux arcs électriques. Pendant la réalisation de travaux de recherche pour l'élimination de l'effet érodant aux contacts électriques, les scientifiques soviétiques Boris et Natalya Lazarenko ont eu l'idée de rendre l'effet destructif des décharges électriques utilisables. Ils ont alors mis au point une méthode pour l'usinage des métaux par l'électroérosion.

1950: Les premiers balbutiements de l'industrie EDM souffrent de maladies infantiles. Les premiers générateurs (générateurs à relaxation) construits avec les composants électroniques disponibles dans les années cinquante (tubes amplificateurs, redresseurs, thyratrons, résistances, condensateurs) sont peu fiables. Les machines sont imprécises. Il est dès lors difficile d'obtenir des résultats satisfaisants.

Malgré ces limites, l'intérêt pour cette nouvelle technologie reste d'actualité. Le besoin montant de matériaux avec peu d'usure et de grande valeur, oriente l'électroérosion vers l'usinage de l'acier, de l'acier trempé et des alliages d'aciers. Les applications types sont: les réacteurs de l'industrie nucléaire, la construction d'avions, l'outillage en général et le moulage en particulier.

1960: Grâce à la découverte des semi-conducteurs et l'apparition des transistors, thyristors, etc.. (éléments fiables et de dimensions réduites), l'électronique industrielle fait des progrès

considérables. Des transistors de puissance rapides pour courants forts sont à disposition. Ces nouveaux composants électroniques permettent de réaliser des amplificateurs, sans les dérives gênantes des tubes électroniques. Il est dès lors possible de développer des générateurs d'impulsions unipolaires.

Les machines à enfonçage sont le premier enjeu commercial de l'électroérosion. Le développement des machines à découpage (ou machine à fil) commence avant tout pour des essais de matériaux.

1965: Les premières expériences de μ EDM sont réalisées au 'PHILIPS RESEARCH LAB' en Hollande. Pour le diaphragme d'un microscope électronique, Osenbruggen [ose65a] érode des micro-trous de $\text{\O}20 \mu\text{m}$ avec des tolérances de l'ordre du micromètre sur des feuilles métalliques d'une épaisseur de $20 \mu\text{m}$. Peu après, les japonais Kurafuji et Masuzawa publient des résultats similaires pour le micro-perçage d'alliages d'acier [kur67a].

1969: Première commande numérique (CNC) sur une machine à électroérosion.

L'entreprise AGIE présente à la foire des machines-outils de Milan, la première machine à fil à commande numérique. Les coûts élevés des premières CNC mettent un frein à leur développement. Il faut attendre le milieu des années 70 pour voir l'essor des commandes numériques.

1985: Redécouverte de la μ EDM après les premières expériences du milieu des années soixante. Des micro-trous de $\text{\O}300$ à $\text{\O}15\mu\text{m}$ sont érodés dans des feuilles métalliques avec une tolérance de forme circulaire de $0.5\mu\text{m}$ et une rugosité maximale R_{max} de $0.1\mu\text{m}$ [sat85a]. Cette technologie est utilisée pour produire les buses destinées aux têtes des imprimantes à jet d'encre.

2000: Début du projet '*Nanofactory: Ultra high precision electrodischarge machine (EDM) of small size*'. Ce projet, source du financement de ce travail de thèse, s'inscrit dans le cadre du programme TOP NANO 21^{ix}. Il fait partie du concept de nano-fabrique intégrant une installation d'EDM miniature.

2005: Aujourd'hui, la majorité des machines μ EDM commercialisées sont le fruit d'une adaptation de 'grosses machines' à la demande de quelques clients ayant des applications 'micros'. C'est une des raisons pour laquelle, le parc des machines dédiées à la μ EDM est composé principalement de machines chères et d'une ergonomie peu adaptée pour usiner des pièces de la grandeur du millimètre. En outre, cette approche Top-Down empêche de profiter des avantages du petit. Les masses en mouvement de ces mécaniques conventionnelles (guidages, moteurs, ...) sont de quelques kilos, alors que la masse des électrodes utilisées en μ EDM est d'une centaine de milligrammes. Un facteur 10^4 sépare la masse utile des masses en mouvement !

Les deux concepts antagonistes que sont les grandes accélérations (dynamique) et la précision, sont à considérer à une autre échelle en μ EDM. Asservir un gap de quelques micromètres avec des temps de réponse inférieurs à la milliseconde rendrait la boucle de réglage plus robuste et les algorithmes du servo plus efficaces. Ajoutons que des mouvements de lavage actifs et passifs à haute fréquence, permettraient d'améliorer l'évacuation des particules érodées, ce qui est un des problèmes majeurs en μ EDM.

^{ix} Le programme TOP NANO 21 est un programme de technologie (2000-2003) soutenu par la Confédération Suisse pour créer un pôle d'encouragement dans les nanotechnologies et les techniques de micro-systèmes. Un des buts est le renforcement de l'économie suisse par le développement et la mise en valeur de nouvelles technologies nanométriques.

2 Mécanismes de base de l'électroérosion

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement les principes de bases de l'usinage par électroérosion. Nous définissons la μ EDM et présentons différents procédés utilisant l'enlèvement de matière par étincelage.

2.2 Qu'est-ce que l'électroérosion (EDM) ?

L'électroérosion est un processus d'usinage basé sur des décharges électriques contrôlées (étincelles). L'enlèvement de matière a lieu sans aucune interaction mécanique entre l'électrode (l'outil) et la pièce à usiner. Chaque étincelle fond et évapore une petite quantité de matière de la pièce à usiner (mais aussi de l'électrode). Un diélectrique liquide refroidit et nettoie la zone de travail. Lorsque l'énergie des étincelles décroît, le volume de matériel évacué diminue; l'état de surface et la géométrie s'améliorent en conséquence.

Si l'influence des paramètres de l'étincelle (tension, durée, polarité,...) est prépondérante pour la qualité de l'usinage, les conditions de lavage conditionnent grandement la stabilité du processus, donc la précision et la rugosité. Le lavage consiste à évacuer les débris fondus et évaporés de la zone située entre l'électrode et la pièce à usiner. Cette zone est appelée le gap.

Pour obtenir une rupture du diélectrique et par conséquent l'étincelage, le gap doit correspondre à la distance de claquage. Cette distance est fonction de la tension d'amorçage, mais également de la rigidité du diélectrique elle-même étroitement liée à sa contamination par les particules conductrices érodées. De fait, pour maintenir un gap constant, il est important d'évacuer régulièrement le diélectrique sale présent entre la pièce et l'électrode et de le remplacer par du diélectrique propre pour les prochaines décharges.

2.3 Qu'est-ce que la micro-électroérosion (μ EDM) ?

Dans la littérature, le concept de micro-électroérosion n'est pas déterminé clairement. Nous pouvons le définir par les quatre caractéristiques suivantes:

1. Energie des impulsions de l'ordre de quelques micro-joulesⁱ.
2. Gap (distance électrode-pièce) inférieur à 10 micromètresⁱⁱ.
3. Grandeur des motifs à usiner de l'ordre du millimètre.
4. Précision des motifs usinés meilleure que 0.5 micromètre.

En réalité ce concept est beaucoup plus large. Il suffit qu'une de ces conditions soit respectée pour que l'on commence à parler de μ EDM.

2.4 Principes physiques d'une étincelle érosive

Dans ce paragraphe, nous décrivons brièvement les 3 phases successives d'une étincelle érosive et l'influence de la polarité électrode-pièce.

ⁱ En EDM à plongée 'classique', l'énergie varie de quelques milli-joules par impulsions en régime de finition, à quelques joules par impulsions en régime d'ébauche.

ⁱⁱ En EDM à plongée 'classique', les gaps sont de quelques dizaines de micromètres en finition et de quelques centaines de micromètres en régime d'ébauche.

2.4.1 Phase 1: la construction

Cette phase préparatoire consiste en l'accroissement de l'ionisation du diélectrique initialement très faible, voire pratiquement nulle puisqu'il s'agit d'un milieu isolant. Il est admis, que le phénomène a lieu à l'endroit où le champ électrique provenant de l'application d'une tension entre les électrodes, a une intensité maximale. Le plus souvent entre les points les plus proches de l'électrode et de la pièce; de petites irrégularités de surface suffisent pour déclencher la construction d'une étincelle.

Durant cette première phase qui comprend toutes les réactions conduisant à la formation du canal de décharge, on note une forte variation du courant et de la tension. Cette caractéristique, après la perforation du diélectrique, provoque un flux de courant presque exclusivement à la superficie du canal de décharge qui s'est formé (effet pelliculaire).

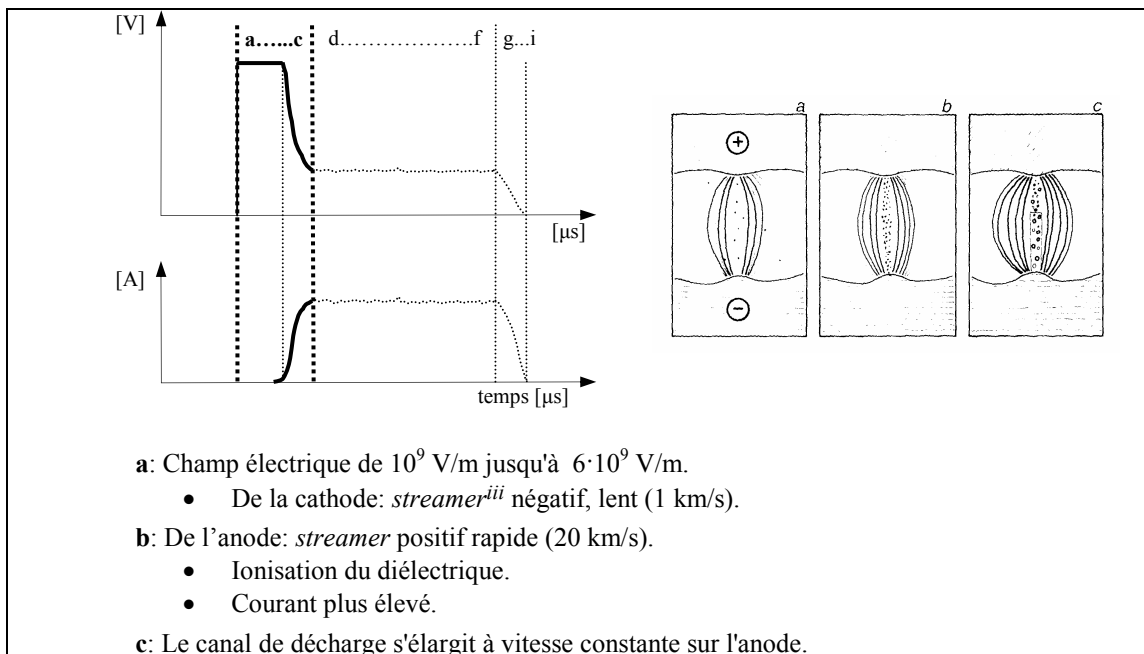


Fig. 2.1: Phase de construction d'une étincelle

2.4.2 Phase 2: la décharge

Le diélectrique étant ionisé, un courant s'établit entre les électrodes à travers le gap. La décharge est fortement concentrée dans un canal de très petite section. Les particules à charge négative sont attirées vers l'électrode positive, dont elles bombardent la surface et inversement, les particules chargées positivement se dirigent vers l'électrode négative.

C'est le choc de ces différentes particules possédant une grande énergie cinétique avec la surface des électrodes correspondantes, qui provoque l'échauffement de ces dernières. Dans le canal de décharge ou canal de plasma, la température est de 8'000 à 12'000 K et la densité de courant est très élevée: de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers d'ampères par centimètre carré. Cela signifie, que le nombre de particules chargées en mouvement est grand dans un volume réduit et que la vitesse qu'elles atteignent, est très élevée. Les températures engendrées sur la surface de la pièce et de l'électrode entraînent la fusion et la vaporisation des matériaux constituant ces dernières. Ces conditions conjuguées avec la dégradation du diélectrique, conduisent à la formation de gaz et de résidus carbonneux.

ⁱⁱⁱ Un streamer apparaît lors du claquage du gaz entre deux électrodes, caractérisé par la propagation locale de fronts d'ionisation. La traduction littérale d'un streamer est un serpent. Un streamer est communément appelé un éclair lors d'un orage.

Une bulle de gaz se forme autour du canal de plasma, à l'intérieur de laquelle la pression est très élevée^{iv}; le volume de cette bulle croît durant le passage du courant, comme d'ailleurs la section du canal de plasma.

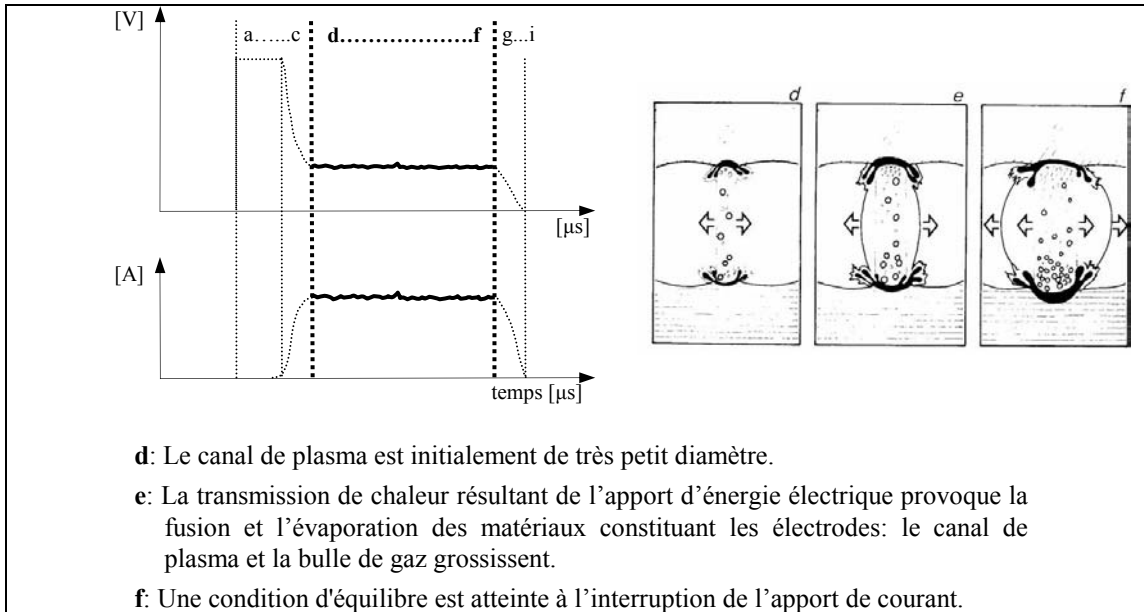


Fig. 2.2: Phase de décharge

2.4.3 Phase 3: la rupture

A la fin de la décharge, lorsque le courant est coupé, la pression tombe à l'intérieur de la bulle et simultanément le canal de plasma s'effondre. Aux surfaces de la pièce et de l'électrode, on assiste à une vaporisation explosive du matériau fondu. Les débris érodés sont éjectés à grande vitesse dans le diélectrique, pour former en se refroidissant de petites particules sphériques.

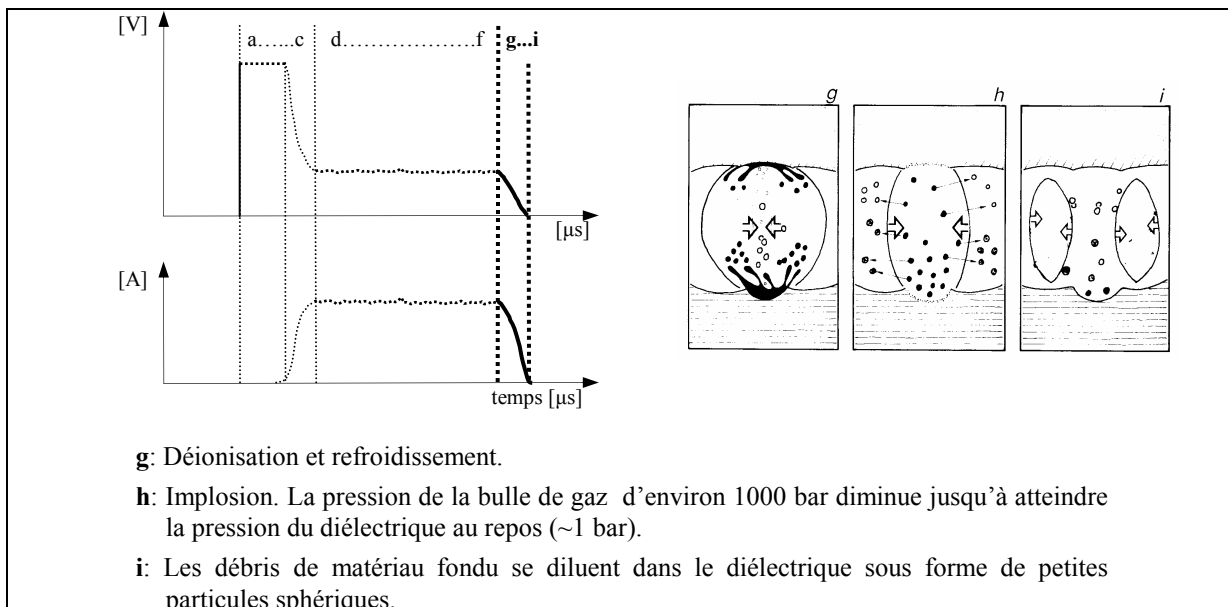


Fig. 2.3: Phase de rupture

^{iv} La pression engendrée par une étincelle peut être considérée de différentes manières:

- La pression de la bulle de gaz est estimée à ~1000 bar [kar97a].
- Au début de la décharge la pression du plasma est maximum, elle est estimée à ~2 bar [des03a].
- Nous avons mesuré une pression agissant sur la pointe de l'électrode d'environ 300 bar (§8.2)

2.4.4 Influence de la polarité

En général, les matériaux constituant l'électrode pièce à usiner et l'électrode outil^v sont de natures différentes. L'enlèvement de matière inégal sur l'électrode (usure) et sur la pièce (usinage) recherché par l'électroérosion, résulte à la fois des propriétés différentes des matériaux constituant la pièce et l'électrode et de la polarité à laquelle l'une et l'autre sont portées. Si l'on utilise le même matériau pour la pièce et l'électrode (ce qui est rarement le cas), la polarité et la durée des impulsions font que l'enlèvement de matière sera plus important sur la pièce que sur l'électrode.

L'influence de la polarité peut être expliquée qualitativement en s'appuyant sur le mécanisme d'initiation à la décharge et sur le mode d'action de l'étincelle. L'enlèvement résulte en partie de la fusion et de l'évaporation des matériaux sous l'effet de l'apport de chaleur dû à l'étincelle; cet échauffement provient du bombardement de la surface de l'électrode et de la pièce, par des particules dont l'énergie cinétique, qui dépend de leur masse et de leur vitesse, est convertie en chaleur. Cet apport de chaleur dépend également du nombre de particules en cause.

Ces dernières sont d'une part des particules négatives ou électrons, qui relativement légères^{vi} se déplacent à vitesse très élevée vers l'électrode positive; d'autre part des particules positives^{vii} provenant de l'ionisation des atomes du diélectrique avec une masse supérieure d'un facteur mille à celle des électrons et donc d'une mobilité inférieure.

Au début de la décharge ou lorsque la décharge a une durée très courte (quelques microsecondes au maximum), il y a d'avantage de particules négatives qui bombardent la surface de l'électrode positive que l'inverse; la mobilité des particules positives est inférieure à celle des électrons. L'élévation de température et par conséquent l'enlèvement de matière consécutif, est plus grand sur l'électrode positive. Pour des décharges de plus longue durée, non seulement le nombre relatif de charges positives augmente, mais leur masse étant supérieure à celle des électrons, ces particules libèrent à vitesse égale, une énergie supérieure sur l'électrode négative qu'elles frappent. L'enlèvement de matière est donc plus grand sur l'électrode négative.

En μ EDM nous travaillons avec de faibles énergies, la durée des décharges est donc très courte. Par conséquent, c'est principalement la polarité négative^{viii} qui est utilisée de manière à minimiser l'usure de l'électrode outil. La polarité positive est appliquée pour le formage de l'électrode (ou dressing).

2.5 Les différents procédés d'EDM

(EDM: Electrical Discharge Machining)

Il existe beaucoup de types de machines et d'applications qui utilisent le principe de l'électroérosion. Ci-dessous, nous passons en revue les procédés EDM les plus connus. Ce tour d'horizon a pour but de mettre en évidence des manières de faire transposables au procédé étudié dans ce travail: **la micro-électroérosion à plongée (ou μ EDM)**.

^v Dans la suite du texte, l'électrode pièce à usiner sera dénommée **la pièce** et l'électrode outil **l'électrode**.

^{vi} Masse au repos de l'électron: $m_e = 0.911 \cdot 10^{-30}$ kg

^{vii} Masse au repos du proton: $m_p = 1.672 \cdot 10^{-27}$ kg

^{viii} Convention AGIE pour la polarité négative: électrode outil à polarité négative et pièce à usiner à polarité positive

2.5.1 L'électroérosion à plongée (DSEDM)

(DSEDM: Die Sinking Electrical Discharge Machining)

Type original ou conventionnel de système EDM nommé également die-sinking ou érosion par enfonçage. Les machines à plongée sont appelées sinker, ram-type, conventional, plonge ou encore vertical EDM.

L'électroérosion par enfonçage dans sa forme la plus simple, reproduit la forme de l'outil électrode dans la pièce à usiner. Les machines standards actuelles sont dotées de 4 axes X,Y,Z et C interpolés, ce qui permet d'usiner des formes plus complexes que la simple reproduction de l'électrode outil. Les électrodes sont le plus souvent en cuivre ou en graphite.

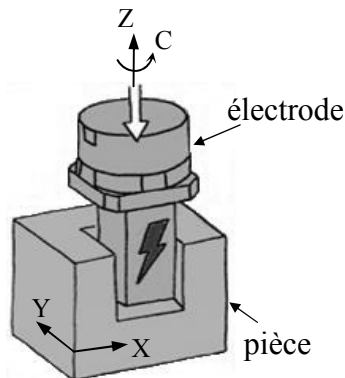


Fig. 2.4: Electroérosion par enfonçage

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

2.5.2 L'électroérosion à découpage (WEDM)

(WEDM: Wire Electrical Discharge Machining)

Ce procédé d'EDM très répandu, utilise une électrode fil ($\text{Ø}30 \mu\text{m}$ à $\text{Ø}350 \mu\text{m}$) qui se déplace à travers la pièce à usiner (fig. 2.5). Le mouvement relatif entre l'électrode fil et la pièce, est contrôlé par une CNC programmée pour découper la géométrie désirée. La découpe est toujours traversante. Un flux de diélectrique (de l'eau déionisée) circule le long du fil entre les deux guides pour évacuer les déchets érodés. Pour commencer un usinage, il faut soit entrer dans la pièce depuis le bord, soit percer un trou d'enfilage. Les machines actuelles sont dotées de 5 axes X,Y,U,V et Z interpolés, permettant d'usiner des pièces coniques en inclinant le fil.

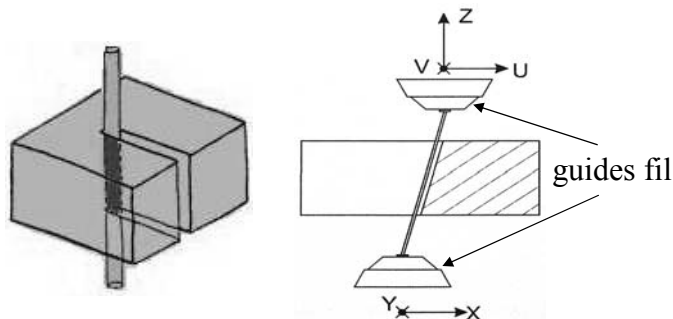


Fig. 2.5 Electroérosion à fil

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

2.5.3 La micro-électroérosion à découpage (μ WEDM)

(μ WEDM: Micro Wire Electrical Discharge Machining)

Ce processus est similaire au WEDM présenté au §2.5.2; la différence réside dans la miniaturisation. Le μ WEDM utilise des électrodes fil en tungstène jusqu'à 10 μ m de diamètre. Ce processus se concentre en principe sur des pièces de dimensions de 0.1 à 1 mm, dont l'épaisseur et le matériau sont impossibles à usiner par les procédés conventionnels de l'industrie des semi-conducteurs. Ces machines utilisent un système de transport du fil, spécialement développé pour des fils de diamètre d'une dizaine de micromètres, avec un générateur capable de contrôler de très faibles énergies.

2.5.4 L'électroérosion avec aide ultrasonique (UEDM)

(UEDM: Ultrasonic aided EDM)

Dans ce procédé, soit la pièce à usiner, soit l'électrode outil est montée sur un élément générant des vibrations. Typiquement ces mouvements sont générés par des actionneurs piézo-électriques, à une fréquence de 20 kHz avec des amplitudes maximums de 20 μ m. Les vibrations ultrasoniques améliorent la stabilité de l'usinage et augmentent substantiellement la vitesse d'usinage dans des conditions d'érosion difficiles; par exemple lors de la finition ou lors du perçage de micro-trous.

L'augmentation de la vitesse d'usinage observée en présence de vibrations, peut être expliquée par deux phénomènes [kre91a]:

- L'évacuation des particules érodées est améliorée par l'effet de pompage dû aux mouvements de va-et-vient de l'électrode sur le front d'érosion.
- Les ondes ultrasoniques génèrent de grandes variations de pression hydrodynamique dans le gap. La vitesse et l'accélération des particules présentes étant plus élevées, moins de matière en fusion se re-solidifie à l'intérieur des cratères et plus de matière peut être extraite.

2.5.5 L'électroérosion dans un milieu gazeux avec aide ultrasonique (Dry UEDM)

(Dry UEDM: Ultrasonic aided Dry EDM)

Dans ce procédé expérimental, un gaz (de l'air) est introduit à haute pression à l'intérieur de l'électrode outil et une vibration ultrasonique est appliquée à la pièce à usiner.

L'intérêt de l'électroérosion utilisant du gaz comme diélectrique, réside dans l'élimination de la pollution et des vapeurs toxiques engendrées par les diélectriques à base d'hydrocarbure. Cette méthode a par contre le désavantage de générer une instabilité (des courts-circuits), à cause des petits gaps (10 μ m) et des tensions de claquage plus élevées, inhérentes à l'utilisation d'un gaz en lieu et place d'un diélectrique liquide. En milieu gazeux, les mouvements de planétaire et de rotation de l'électrode améliorent légèrement la qualité de l'érosion; mais ce sont les vibrations ultrasoniques qui améliorent la vitesse d'usinage de manière significative (d'un facteur 2).

Pour l'électroérosion en milieu gazeux, deux théories expliquent l'augmentation du taux d'enlèvement de matière en présence de vibrations ultrasoniques [zha04a] :

- La force d'adhésion entre les gouttes de métal liquide et la pièce à usiner, est inférieure à la force induite par l'accélération due à la vibration. De ce fait, les gouttes ne se re-solidifient pas sur la pièce, mais sont éjectées loin de sa surface.
- La variation de la distance pièce-électrode induite par les vibrations, augmente la probabilité que cet intervalle corresponde à la distance de claquage. Le nombre de décharges efficaces est donc accru.

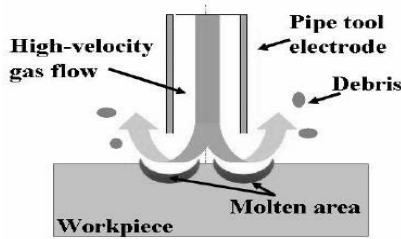


Fig. 2.6:
Principe de l'EDM dans un milieu gazeux
(Dry EDM)

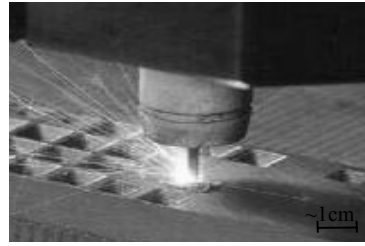


Fig. 2.7:
Photo d'érosion dans un milieu gazeux
(Dry EDM)

2.5.6 Le fraisage par électroérosion (Milling EDM)

(Milling EDM: Milling Electrical Discharge Machining ou electrical discharge milling)

Dans le fraisage par électroérosion, une électrode outil cylindrique rotative se déplace comme une fraise traditionnelle, selon une géométrie préprogrammée. L'utilisation d'électrodes tubulaires (fig. 2.9) à travers lesquels circule du diélectrique, permet de générer un flux de lavage pour évacuer les déchets érodés.

Par rapport à l'EDM à plongée traditionnelle, ce procédé a l'avantage d'utiliser des électrodes cylindriques standards; pas besoin d'électrodes de formes complexes donc coûteuses. Le désavantage se trouve dans la nécessité de compenser l'usure de l'électrode (fig. 2.8). L'usinage d'une cavité de type moule par exemple, est fait par passages successifs, pour arriver à la profondeur désirée. La géométrie à programmer pour compenser l'usure, est déterminée en fonction d'essais préliminaires. La compensation d'usure en temps réel est un thème de recherche actuel [ble02a].

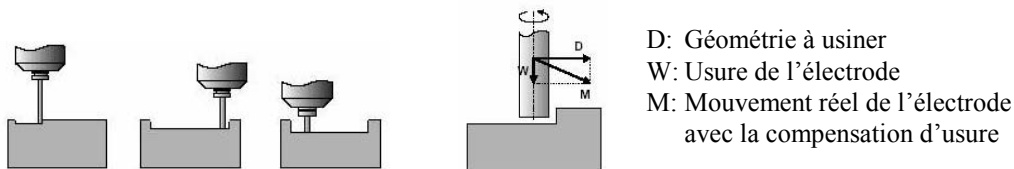


Fig. 2.8: Milling EDM (compensation de l'usure de l'électrode)

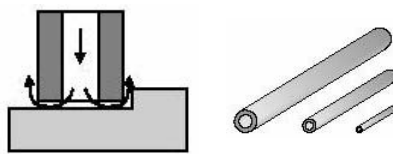


Fig. 2.9: Lavage central à travers des électrodes tubulaires standards.

Applications: moules, matrices.

2.5.7 Electrical Discharge Turning (EDT ou μ EDT)

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

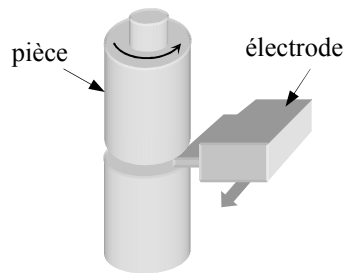


Fig. 2.10: *Electrical Discharge Turning (EDT)*

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

2.5.8 Le meulage par électroérosion (EDG ou μ EDG)

(EDG: Electrical Discharge Grinding)

Ce processus est également appelé Rotary EDM ou EDM Grinding. Il utilise une électrode cylindrique tournante à la manière d'une meule (fig. 2.11). L'utilisation d'une électrode rotative en graphite, permet de réduire les coûts élevés dus à l'usage de meules en diamant (corindon) et l'absence de contact mécanique inhérent à l'électroérosion, évite de déformer les pièces délicates.

Pour l'érosion de pièces cylindriques, la rotation de ces dernières, combinée avec une électrode tournante permet d'obtenir une grande vitesse relative entre les deux (fig. 2.12). Cette particularité influence le processus et en particulier augmente la vitesse d'usinage [uhl04a].

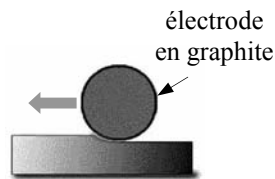


Fig. 2.11:
Electrical Discharge Grinding (EDG)

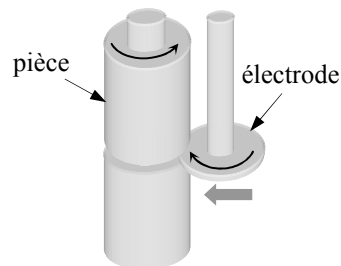


Fig. 2.12:
EDG avec pièce tournante

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

2.5.9 Le meulage par électroérosion à fil (WEDG)

(WEDG: Wire Electrical Discharge Grinding)

Cette technique pour usiner les électrodes, fut développée dans les années 80 au Japon par Masuzawa [mas85a]. C'est une variante de l'électroérosion à fil conventionnel. L'originalité réside dans le système de guidage du fil qui est proche de la zone d'érosion. Cette particularité permet d'améliorer la précision de l'usinage en réduisant les oscillations et les courbures du fil. Les avantages par rapport à l'EDG, sont une plus grande flexibilité pour la géométrie désirée, sans besoin de gérer l'usure de l'électrode. Le WEDG utilise une électrode constamment renouvelée, puisque c'est un fil avançant à vitesse constante (typiquement 15 mm/min).

En incorporant un système WEDG à une machine EDM à plongée traditionnelle, il est possible d'usiner des électrodes 'in situ'. L'électrode est mise en forme et utilisée sur la même machine, ce qui permet d'éviter des manipulations et élimine les erreurs de positionnement dues au serrage lors de sa fixation.

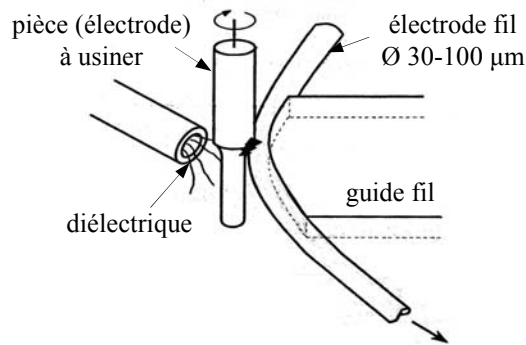


Fig. 2.13: Wire Electrical Discharge Grinding (WEDG)

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

2.5.10 Le meulage abrasif par électroérosion (AEDG)

(AEDG: Abrasive Electrical Discharge Grinding)

C'est un processus hybride, dans lequel la matière est enlevée par la combinaison d'une décharge électrique érosive et une érosion mécanique. Il est utilisé pour usiner des matières extrêmement dures, comme le diamant polycristallin (PCD). Les décharges électriques aident à augmenter le taux d'enlèvement de matière et l'érosion mécanique génère une finition de surface fine.

2.5.11 Le rectifiage par électroérosion (EDD)

(EDD: Electrical Discharge Dressing)

Ce processus d'EDM utilise l'électroérosion pour rectifier des meules en temps réel, lorsque le meulage mécanique est difficile en raison de la dureté des matériaux. Dans ce processus, la meule doit être électriquement conductrice. Une tension électrique pulsée est appliquée entre l'électrode et la meule, sur laquelle les décharges électriques enlèvent les bavures qui se sont développées. Ce procédé est également utilisé pour usiner des meules à géométrie spéciale.

2.5.12 Mole EDM

Ce procédé d'EDM hautement spécialisé, donne la possibilité d'usiner une trajectoire courbe, ou de percer une cavité au travers de la pièce à usiner. Il a été baptisé par ses concepteurs [fuk89a] "taupe EDM", parce qu'il se comporte comme une taupe qui creuse ses galeries dans la terre.

La forme de la "mole EDM machine" est ajustée par une mémoire de forme.

3 La μ EDM et les techniques de micro-fabrication concurrentes

3.1 Introduction

Le monde de la micro-fabrication abonde de techniques d'usinage et de formage, dédiées à des applications particulières. Dans ce chapitre nous présentons les techniques principales, de manière à situer la μ EDM dans ce monde en mutation rapide.

L'arbre de décision de la figure 3.1, conduit le lecteur au choix d'une technologie en fonction de la géométrie et la précision de la pièce qu'il désire fabriquer. Ce schéma n'est pas exhaustif. Il ne prend pas en considération toutes les méthodes de fabrication disponibles, mais propose les techniques éprouvées les plus courantes. Aucune indication concernant les coûts ou la compatibilité 'matériau-technique' n'est fournie; il ne tient compte que des paramètres géométriques.

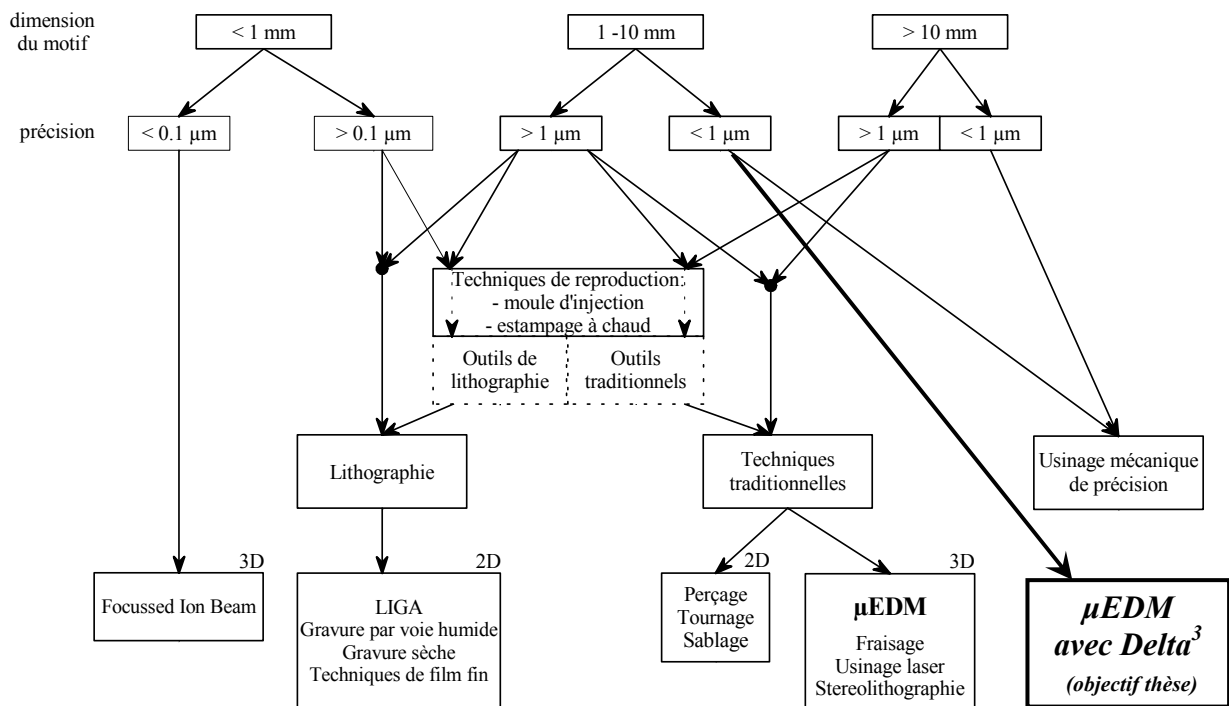


Fig. 3.1: Techniques de micro-fabrication en fonction de la grandeur et de la précision du motif désiré [mee03a]

Une première analyse de ce graphe, met en évidence qu'aucune technique traditionnelle ne permet d'usiner des motifs de dimension 1-10 mm avec une précision inférieure au micromètre. Toujours pour la même précision, mais pour des motifs de dimension inférieure au millimètre, aucune méthode d'usinage directeⁱ n'est disponible.

Le domaine d'applications que nous visons avec notre petite machine μ EDM, comprend les usinages de dimensions inférieures au millimètre jusqu'à dix millimètres, avec des précisions sub-micrométriques. Aujourd'hui la μ EDM est classée au même titre que l'EDM, avec des précisions

ⁱ Une méthode d'usinage directe (*direct write method*) est une technique de fabrication usinant un point ou une petite surface à la fois, alors qu'une méthode basée sur des masques (*mask-based method*) usine toute la surface simultanément.

supérieures au micromètre. Notre objectif est de faire passer la μ EDM dans le camp de l'usinage de précision en atteignant des précisions meilleures que 200 nm.

Les sections suivantes de ce chapitre décrivent les procédés concurrents à la μ EDM et les comparent.

3.2 Focussed ion beam (FIB)

3.2.1.1 Synthèse

Matériaux: tous les matériaux peuvent être usinés, quelques métaux peuvent être déposés.

Méthode: enlèvement et déposition de matière (usinage direct).

Motifs types: formes 3D, dimensions 1-2 μm , précision < 100 nm.

Avantage par rapport à la μ EDM

- Précision submicronique et rugosité de l'ordre du nanomètre.
- Zone endommagée par la chaleur très fine, alors qu'en μ EDM la zone affectée est supérieure au micromètre.

Désavantage par rapport à la μ EDM

- Vitesse d'usinage lente ($\sim 0.05 \mu\text{m}^3/\text{s}$).

3.2.1.2 Description

Cette technique d'usinage utilise l'énergie de ions (en général GA^+) accélérés et focalisés, pour déposer ou enlever de la matière avec des tolérances de 50 à 100 nanomètres.

Dans le cas du procédé par déposition de matière, l'énergie du faisceau ionique provoque localement une déposition en phase vapeur du métal ou des matériaux isolants contenus dans le gaz porteur. Des microstructures 3D peuvent être créées par un balayage approprié du faisceau ionique.

Dans le procédé par enlèvement de matière, l'impact des ions accélérés enlève physiquement la matière sur les zones exposées. L'enlèvement de matière peut être augmenté en introduisant un gaz dans la chambre de travail (*chemical etching*).

Généralement, le FIB est utilisé pour réparer ou modifier des circuits intégrés. Des connections peuvent être éliminées, ajoutées ou modifiées. Dans les microsystèmes, le FIB est utilisé pour usiner (enlever ou déposer de la matière) sur des microstructures 3D de dimensions micrométriques (fig. 3.2). Une autre application du FIB est l'affûtage de micro-outils de coupe en diamant.

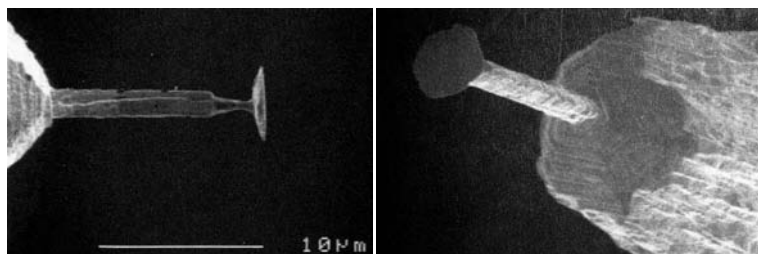


Fig. 3.2: Sonde disque en tungstène pour scanner des zones concaves [mad02a]
(le disque a un $\varnothing \sim 4 \mu\text{m}$ et une épaisseur de $\sim 0.7 \mu\text{m}$. Il est tenu par une tige carrée de $1.5 \mu\text{m}$ de côté, dont l'épaisseur la plus fine à la base du disque est intentionnellement de $0.7 \mu\text{m}$)

3.3 La photolithographie

3.3.1 Introduction

La photolithographie est la technologie la plus utilisée dans la fabrication de composants microélectroniques. La majorité des microsystèmes commerciaux (accéléromètres, gyroscopes, inclinomètres, etc.), sont fabriqués en utilisant cette technique. Dans ce paragraphe nous présentons la photolithographie de manière générale. Dans les paragraphes 3.3.3 et 3.3.4, nous traiterons les deux procédés de micro-fabrication photolithographiques les plus courants: la gravure et la technologie LIGA.

3.3.2 Description générale du principe

En photolithographie, un substrat (en général du silicium brut) ou le matériau au-dessus du substrat est couvert avec une fine couche d'un polymère photosensible par *spin-coating*. Le *spin-coating* consiste à déposer une goutte de liquide photorésistif au centre du substrat. Ensuite le substrat se met à tourner et la force centrifuge répand uniformément la résine sur sa surface, jusqu'à obtenir une pellicule de $0.1 \mu\text{m}$ d'épaisseur (fig. 3.3).

Après la centrifugation, la résine photosensible est chauffée sur une plaque ou dans un four (*soft baked*), de manière à éliminer toutes les traces de solvant et pour améliorer l'adhésion. La couche photorésistive est alors exposée à une source de radiation (usuellement des UV) au travers d'un masque. La pénétration des radiations dans les zones non protégées par le masque, induit une réaction chimique qui change la solubilité de la résine photorésistive exposée. A l'étape suivante, les zones exposées sont dissoutes (résines positives) et les zones non exposées restent intactes. Dans le cas d'une résine photorésistive négative, les zones exposées subsistent et les zones non exposées sont dissoutes. La résine restante est durcie dans un four (*hard baked*), de manière à enlever les résidus de solvants et recuire la couche de revêtement isolant. Après cette dernière étape, le substrat est prêt pour être traité en utilisant une des techniques suivantes:

Enlèvement de matière: la gravure

Un processus de gravure est appliqué pour enlever de la matière par des procédés chimiques ou physiques. Les parties non recouvertes par la résine photosensible seront graduellement enlevées.

Déposition de matière: Galvanoplastie, CVD, PVD

Un processus de déposition est appliqué pour ajouter de la matière. La matière peut être déposée sélectivement sur des surfaces non masquées (galvanoplastie), ou peut être déposée sur toute la surface du substrat (*Chemical Vapour Deposition, Physical Vapour Deposition*). En enlevant la couche de résine, le matériel éventuellement déposé au-dessus de la couche photorésistive sera également éliminé.

Modification des propriétés de la matière

Un processus de modification change les propriétés des régions non masquées. Les processus de modification utilisent des ions accélérés pour implanter des impuretés, ou des gaz réactifs pour induire une réaction chimique.

En appliquant ces procédés photolithographiques successivement, avec des masques appropriés, des microsystèmes complexes et bon marché peuvent être créés.

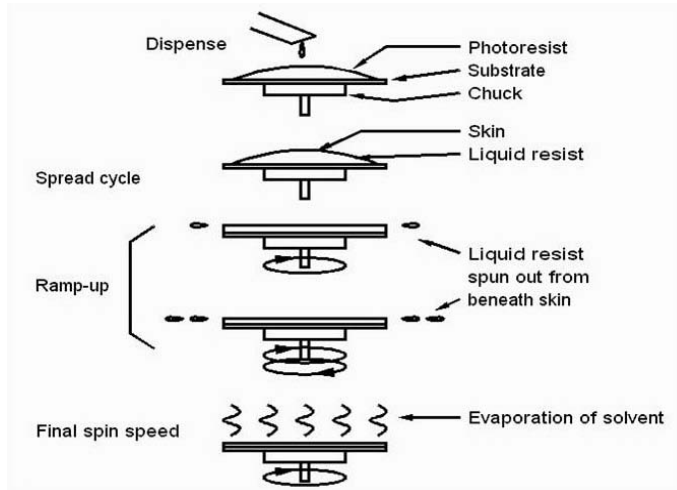


Fig. 3.3: Spin-coating

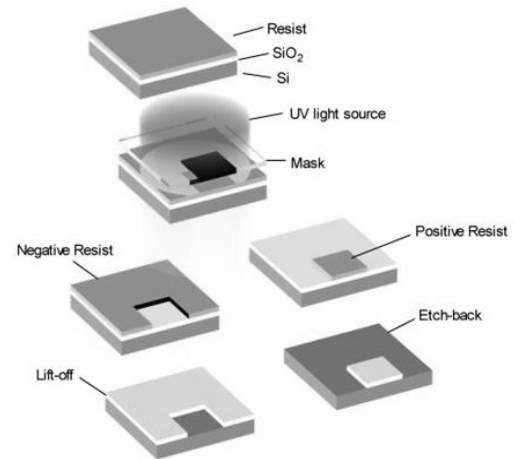


Fig. 3.4: La photolithographie

3.3.3 La gravure (procédé photolithographique)

3.3.3.1 Synthèse

Matériaux: principalement le silicium.

Méthode: enlèvement de matière (*batch-running*).

Motifs types: formes 2D, dimensions < 1 mm, précision ~100 nm.

Avantage par rapport à la μ EDM

- La zone affectée par l'usinage est négligeable comparée à la zone affectée par la chaleur en μ EDM.
- Meilleure rugosité.

Désavantage par rapport à la μ EDM

- Usinage à 2 dimensions.

3.3.3.2 Description

Le procédé de gravure (*etching*) enlève la matière par des moyens physiques ou chimiques. Pour être efficace, l'agent attaquant (*etchant*) doit être suffisamment sélectif, de manière à créer la forme désirée ou enlever le matériau souhaité.

Gravure par voie humide (*wet etching*)

En gravure par voie humide, le matériau est dissous par un agent attaquant réactif liquide.

La gravure isotropique humide est utilisée pour enlever des surfaces endommagées, arrondir des angles vifs et pour modeler ou enlever des couches minces.

La **gravure anisotropique humide** utilise des agents attaquants anisotropiques (type KOH), dont le taux de gravure est dépendant de l'orientation cristallographique de la structure monocristalline du silicium. Ce procédé est utilisé pour usiner dans le silicium brut des rainures en V, des membranes ou des structures pour des capteurs à inertie.

Gravure sèche (*dry etching*)

En gravure sèche des gaz réactifs sont appliqués dans un plasma basse pression. Des ions et des neutrons (radicaux) chimiquement réactifs sont accélérés vers le substrat.

La **gravure isotropique sèche (*plasma etching*)** est un procédé purement chimique résultant de la réaction de radicaux.

La **gravure anisotropique sèche (*sputter etching*)** est un processus purement physique, qui utilise des ions chimiquement inertes mais hautement énergétiques.

En général les procédés traditionnels (*Reactive Ion Etching*) utilisent une combinaison des processus physiques et chimiques. La gravure sèche est utilisée pour graver le polysilicium ou usiner des cavités peu profondes.

L'enlèvement de matière dans le micro-usinage du silicium, est réalisé par une combinaison de gravure par voie humide et sèche. La figure 3.5 représente une micro-sonde pour microscope AFM ou STM fabriquée par cette combinaison. Le rayon de la pointe est de l'ordre de 5 nm, l'angle d'ouverture 5° et la hauteur 10 μ m.

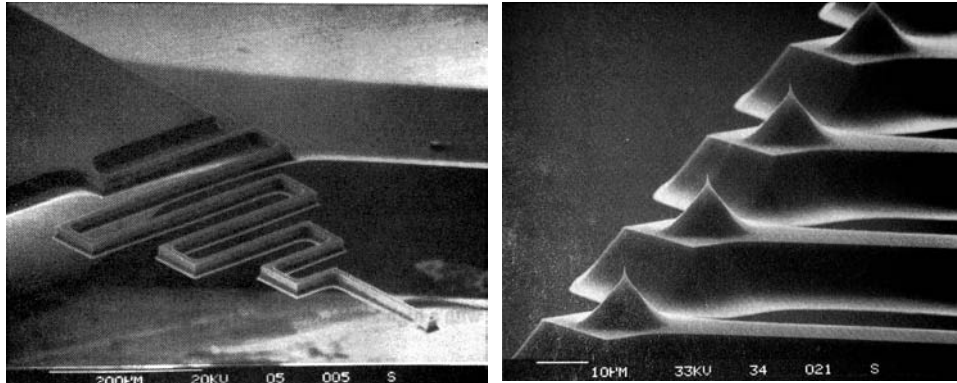


Fig. 3.5:

Sonde pour microscope AFM réalisée par combinaison de gravure sèche et humide [bru92a]

3.3.4 LIGA (procédé photolithographique)

3.3.4.1 Synthèse

Matériaux: les PMMAⁱⁱ sont utilisés comme photorésiste. Le cuivre ou le nickel sont utilisés comme matières de galvanoplastie.

Méthode: enlèvement de matière par lithographie (*batch-running*).
déposition de matière par galvanoplastie (*batch-running*).

Motifs types: formes 2D (possibilité d'un léger 3D), dimensions < 1 mm, précision > 100 nm.

Avantage par rapport à la μ EDM

- Extrêmement précis.

Désavantage par rapport à la μ EDM

- Très cher.

3.3.4.2 Description

La technologie LIGA (abréviation allemande pour: Lithographie, Galvanoformung, Abformung) consiste en une succession de techniques.

1^{ère} étape: la lithographie

Dans un premier temps une couche épaisse de photorésiste (usuellement du PMMA), est déposée sur un substrat métallique préparé chimiquement. Cette résine est ensuite exposée aux rayons X à travers un masque. Pour finir, les parties irradiées du PMMA sont dissoutes par attaque chimique.

2^{ème} étape: la galvanoplastie

Dans un bain électrolytique, une structure métallique (usuellement du cuivre ou du nickel), peut croître en complément à la structure PMMA restée sur le substrat. La croissance continue jusqu'à dépasser la hauteur de la résine et former une couche épaisse. Ensuite, on sépare le substrat de la

ⁱⁱ PMMA: Polyméthylméthacrylate de méthyle. Thermoplastique standard largement utilisé dans l'industrie: fibres synthétiques, verres de lunettes, vitrages souples (plexiglas), peinture.

partie électroformée et on enlève la résine. La structure métallique obtenue, est appelée structure secondaire ou moule mère. Du fait des coûts élevés de fabrication, ce moule n'est pas utilisé pour une production de masse. A partir de ce moule on fabrique un nombre limité de pièces polymères (structures ternaires), qui serviront à la fabrication du moule final (structures quaternaires).

3^{ème} étape: reproduction de masse

Les micro-moules métalliques sont utilisés en moulage par micro injection ou micro estampage à chaud, pour produire des microstructures en masse.

Grâce à la combinaison des techniques de photolithographie et d'électroformage, il est possible de réaliser des cavités avec des formes extrêmement complexes. La technique LIGA permet de fabriquer des microstructures avec un grand *aspect ratio* (>100), une grande précision ($\sim 0.2 \mu\text{m}$) et des parois lisses ($R_a \sim 0.03 \mu\text{m}$).

Les figures ci-dessous montrent deux applications particulières de la technologie LIGA. La figure 3.7 représente une filière qui est normalement usinée par électroérosion. Les dimensions minimales des rainures réalisables en utilisant l'EDM sont de 20-30 μm . Avec la technologie LIGA la largeur des rainures a été réduite à 10 μm . Les filières en NiCo réalisées en LIGA, ont l'inconvénient d'être sensibles à l'usure à haute température; lors de l'extrusion des fibres, les filières atteignent des températures proches de 300°C.

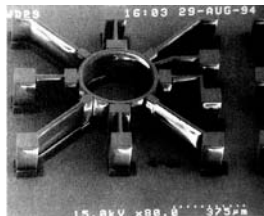


Fig. 3.6: Résonateur cylindrique [vla95a] (photo IMT, Allemagne)

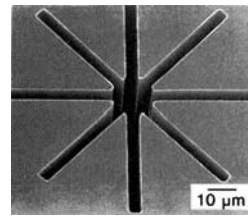


Fig. 3.7: Filière réalisée par LIGA (photo IMM, Allemagne)

3.3.5 UV-LIGA

Le procédé LIGA (ou X-LIGA) décrit ci-dessus, consiste à exposer aux rayons X des polymères à travers des masques. Avec cette technique on peut obtenir un rapport d'aspect élevé et une structuration extrêmement précise. Cependant cette méthode est difficile à exploiter industriellement, car le principe d'exposition et la confection des masques sont très onéreux.

Une alternative moins précise, mais aussi moins coûteuse est offerte par le procédé UV-LIGA. Pour des structures de 200 à 500 μm d'épaisseur, la précision est restreinte à $\pm 1.5 \mu\text{m}$. Pionnier dans cette technologie, la maison Mimotec SA [lor98a] l'utilise pour fabriquer des micro-moules pour la micro-injection plastique (fig. 3.10) et des composants métalliques électro-déposés (fig. 3.8 et 3.9). Notons que les matériaux électroformables par cette technologie, sont uniquement des alliages de nickel: Ni, NiP, NiCo.

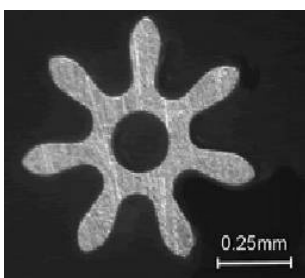


Fig. 3.8: Petit pignon de $\text{Ø}0.7 \text{ mm}$ (photo Mimotec SA)

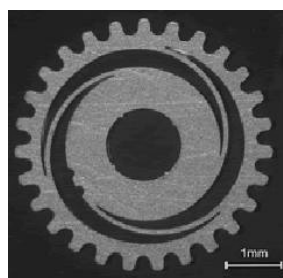


Fig. 3.9: Lame ressort à l'intérieur du composant (photo Mimotec SA)

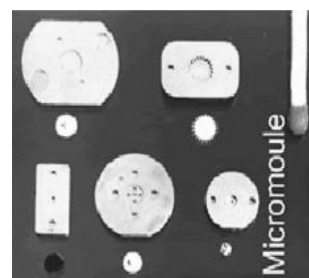


Fig. 3.10: Micro-moules électroformés et composants plastiques injectés (photo Mimotec SA)

3.4 Le micro-usinage par enlèvement de copeaux

3.4.1.1 Synthèse

Matériaux: formes géométriques stables.

Méthode: enlèvement de matière (usinage direct).

Motifs types: formes 3D, dimensions > 1 mm, précision $> 1\mu\text{m}$ (usuellement $5-10\mu\text{m}$).

Avantage par rapport à la μ EDM

- Possibilité d'usiner des matériaux non-conducteursⁱⁱⁱ.
- Vitesse d'usinage $\sim 10\text{ mm}^3/\text{min}$ (quelques centaines de fois plus rapide que la μ EDM).

Désavantage par rapport à la μ EDM

- Les forces d'usinage sont beaucoup plus élevées qu'en μ EDM, d'où l'obtention de motifs avec un rapport de forme inférieur.
- Les outils pour le micro-usinage doivent être parfaitement affûtés.
- Lors de l'usinage par enlèvement de copeaux, une déformation plastique est induite dans les premières couches de la pièce découpée (la μ EDM provoque un stress thermique).

3.4.1.2 Description

Les techniques de micro-usinage par enlèvement de copeaux sont: le micro-fraisage, le micro-tournage et le micro-perçage. Ces techniques requièrent des forces d'usinage importantes. La miniaturisation des machines comme des outils (micro-fraises, micro-mèches) se fait au détriment de la rigidité, donc de la précision.

Typiquement le micro-fraisage est utilisé pour fabriquer des micro-moules avec une précision de quelques μm .

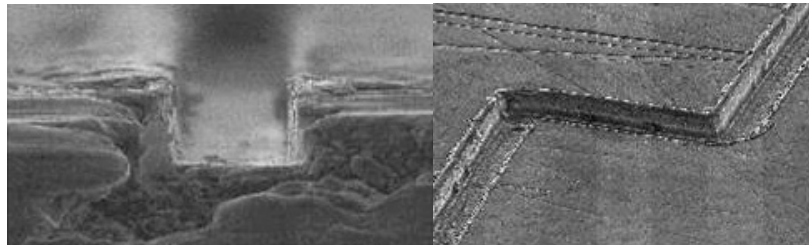


Fig. 3.11: Cavité de $25\mu\text{m}$ de profond sur $25\mu\text{m}$ de largeur
frais e dans de l'aluminium à gauche et dans du cuivre à droite
(photos Sandia National Laboratories, USA)

3.5 L'usinage laser (ou ablation laser)

3.5.1.1 Synthèse

Matériaux: pratiquement tous les matériaux en utilisant le laser approprié (cf.  3.5.1.2)

Méthode: déposition de mat re (LCVD) et enlèvement de mat re (usinage direct).

Motifs types: formes 3D, dimensions $1-100$ mm , précision $> 1\mu\text{m}$ (usuellement $10-30\mu\text{m}$)

Avantage par rapport à la μ EDM

- Possibilité d'usiner des matériaux non-conducteurs.
- Aucun outil n'est nécessaire (pas d'usure d'électrodes, etc.).
- Vitesse d'usinage $\sim 10\text{ mm}^3/\text{min}$ (quelques centaines de fois plus rapide que la μ EDM).

ⁱⁱⁱ Pour l'usinage de matériaux non-conducteur, l'ECDM est une technologie intéressante encore confinée dans les laboratoires de recherche [fas02a], [lan98a].

Désavantage par rapport à la μ EDM

- Les deux techniques génèrent un échauffement local, dont la profondeur dépend de l'intensité des impulsions.
- Il est difficile de contrôler l'épaisseur de la couche enlevée (dépend des paramètres du laser, de l'absorption et de la réflexion du matériau usiné).
- Dans le perçage, la réflexion du rayon laser entraîne des enlèvements de matière non désirés.
- Impossible d'usiner des parties non atteignables par le rayon laser. En μ EDM une électrode de forme particulière permet d'usiner des cavités cachées.
- Rapport de forme limité.
- Mauvais état de surface.

3.5.1.2 Description

Les lasers sont utilisés pour enlever de la matière ou pour assister localement la déposition de matériau. Les deux techniques utilisent la haute densité de puissance d'un rayon laser continu ou pulsé. Trois types de lasers (CO_2 , Nd-YAG et Excimère) dans différentes gammes de puissance et d'énergie, sont communément utilisés dans le micro-usinage. Le choix du type de laser et de sa longueur d'onde, dépend de la largeur du faisceau désiré et des caractéristiques d'absorption optique de la pièce à usiner ou du matériau à déposer.

Lors de l'enlèvement de matière, l'absorption de l'énergie du laser évapore la surface de la matière, de manière thermique et photochimique. L'utilisation d'un gaz sous pression permet de minimiser les refontes de matériau sur la surface. La géométrie de l'usinage est définie par le déplacement du rayon laser ou par l'illumination à travers un masque. Si la durée du pulse est longue et le substrat un bon conducteur thermique, la chaleur se disperse dans les régions avoisinantes. Les dimensions de ces zones endommagées par la chaleur, varient de moins d'un micromètre à des dizaines de micromètres.

L'usinage laser est utilisé pour percer des micro-trous, des tranchées profondes et des microstructures complexes dans une grande variété de matériaux. Les trous effectués par laser ont généralement une conicité de quelques degrés.

Les lasers sur le marché permettent d'usiner des motifs d'une grandeur minimale de $100\ \mu\text{m}$, avec une précision de quelques dizaines de micromètres et une rugosité supérieure au micromètre.

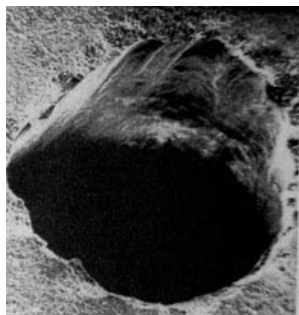


Fig. 3.12: Entrée d'un trou de $\text{\O}640\ \mu\text{m}$ percé dans de l'alumina [mor92a]

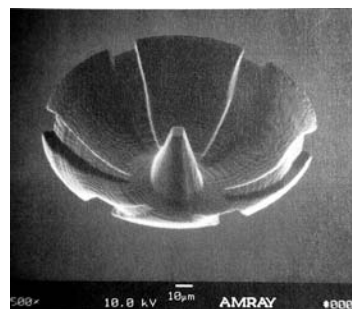


Fig. 3.13: Usinage d'un substrat de silicium. Le haut de la cuvette a un rayon de $80\ \mu\text{m}$ et le fond un rayon de $35\ \mu\text{m}$, (photo Dr. D. Ehrlich, Revise, Inc.)

3.5.2 Laser avec jet d'eau (Laser-Microjet)

Le Laser-Microjet [syn05a] est une technologie qui repose sur le couplage d'un faisceau laser extrêmement fin et intense, reflété dans un jet d'eau (pression ~ 500 bar) à l'interface même de la frontière air-eau. Le faisceau laser est totalement réfléchi par l'eau et peut être guidé sur une distance de 100 millimètres. Le laser confiné dans le jet d'eau garantit une découpe fine et précise, d'une largeur de l'ordre de 50 micromètres. L'eau permet le refroidissement immédiat des surfaces usinées, sans aucune influence thermique, contrairement aux lasers de découpe traditionnels, trop chauds. Ne subissant aucune déformation, beaucoup de types de matériaux sont découpés avec une précision inférieure à la dizaine de micromètre.

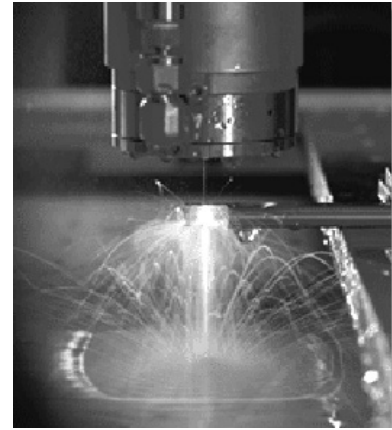


Fig. 3.14: Laser guidé par un jet d'eau (photo Synova)

3.6 Le micro-sablage (micro-powder blasting)

3.6.1.1 Synthèse

Matériaux: Matière fragile.

Méthode: enlèvement de matière (usinage direct).

Motifs types: formes 2D (car le rapport de forme est limité), dimensions 1-100 mm, précision $> 10 \mu\text{m}$.

Avantage par rapport à la μ EDM

- Pas de zone endommagée par la chaleur.

Désavantage par rapport à la μ EDM

- Il est difficile de contrôler l'uniformité du jet, de même que la profondeur de coupe.
- Le rapport de forme est limité (de 1 à 2).

3.6.1.2 Description

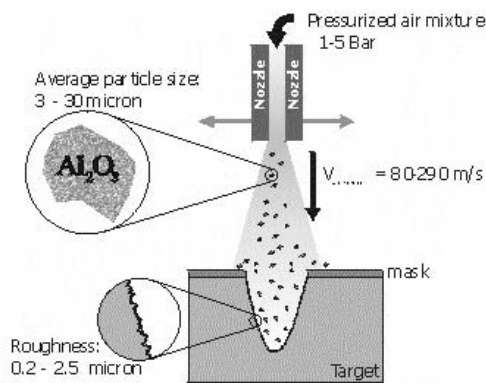


Fig. 3.15: Schéma de principe du micro-sablage

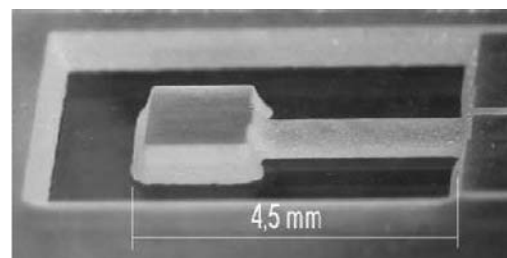


Fig. 3.16: Accéléromètre usiné par micro-sablage

Le sablage est une technique de gravure par abrasion. Le substrat est recouvert d'un masque de protection (métallique ou d'une couche de polymère) définissant la géométrie désirée, puis il est érodé en bombardant la surface avec de petites particules. Les paramètres comme la pression, l'angle d'incidence du jet de poudre ou la distance entre la buse et le substrat sont ajustables en fonction de l'application désirée.

En combinant la précision de la photolithographie pour réaliser un masque et le sablage, il est possible de réaliser des usinages précis. Plus spécifiquement, en utilisant des particules d'oxyde d'alumine (Al_2O_3) de $10\ \mu\text{m}$, on obtient une résolution d'approximativement $30\ \mu\text{m}$.

Le micro-sablage est intéressant, pour le micro-usinage à grande vitesse du verre ou toutes autres matières fragiles (par exemple Si, céramiques, ferrites). Avec une vitesse d'usinage de $100\text{-}1000\ \mu\text{m}/\text{min}$ [bel01a], ce procédé est beaucoup plus rapide que les techniques de gravure sèche ou par voie humide.

3.7 La microstéréolithographie

3.7.1.1 Synthèse

Matériaux: photopolymère.

Méthode: dépôt de matière (usinage direct).

Motifs types: formes 3D, dimensions $1\text{-}10\ \text{mm}$, précision $50\text{-}100\ \mu\text{m}$.

Avantage par rapport à la μ EDM

- Prototypage rapide.
- Fabrication de formes 3D complexes

Désavantage par rapport à la μ EDM

- Cher.
- Précision limitée.
- Les seuls matériaux façonnables sont les polymères, qui ont de mauvaises propriétés mécaniques.

3.7.1.2 Description

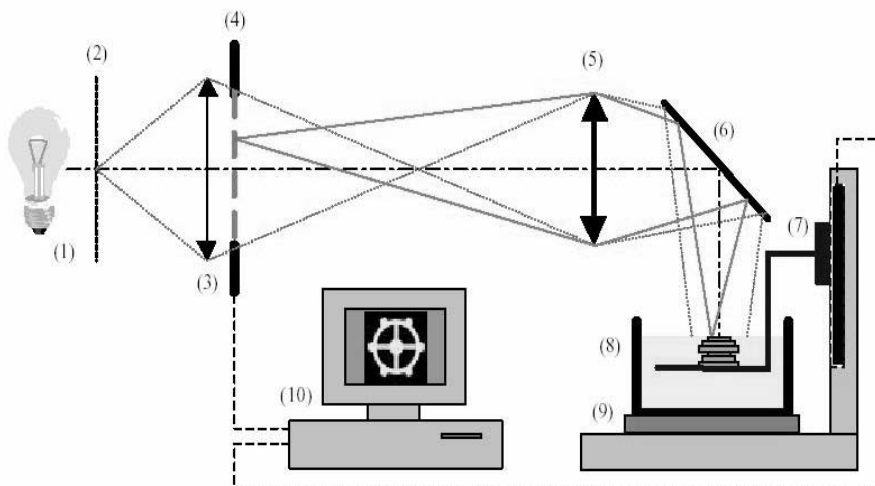


Fig. 3.17: La microstéréolithographie

(1): lampe à halogénure métallique- (2): diffuseur- (3): condenseur de lumière

(4): masque à cristaux liquides- (5): système optique imageur- (6): miroir de renvoi

(7): platine motorisée- (8): photoréacteur- (9): régulateur de température- (10): ordinateur de commande

La microstéréolithographie est un procédé de prototypage rapide, permettant la réalisation d'objets en trois dimensions à partir d'une résine liquide.

Les objets sont construits couche par couche:

- 1) Une résine photopolymérisable est étendue sur une surface.
- 2) Un rayon lumineux (ou un laser) dessine les contours de l'objet sur la résine de polymère liquide. La résine se polymérise aux endroits irradiés par le rayon.

- 3) Une fois la couche solidifiée, une nouvelle couche de résine fraîche est étendue sur la surface par mouvement descendant de la pièce dans un bain.
- 4) Lorsque la surface liquide s'est stabilisée, son irradiation peut être commencée.

La construction couche par couche des modèles, permet une complexité géométrique illimitée. Cette technique ouvre au constructeur des possibilités inespérées: vides, forages carrés ou d'autres géométries, qui ne se laissent pas construire avec les procédés de fabrications traditionnels. Les modèles produits avec la stéréolithographie peuvent être considérés comme des images spatiales des dessins que le constructeur a conçu avec son système CAD. Ces objets sont principalement en polymère, avec l'inconvénient de présenter de mauvaises propriétés mécaniques, de faibles résistances thermiques et chimiques.

Des objets d'une centaine à quelques milliers de couches peuvent être construits. L'épaisseur des couches est typiquement de 10 μ m et la vitesse d'empilement est de 3 à 6 couches par minute, ce qui correspond à une croissance de 1 à 5 mm par heure. La précision est de 50-100 μ m.

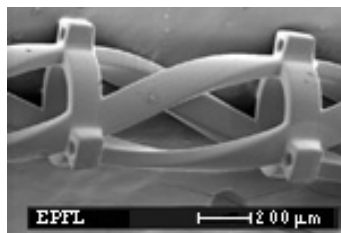


Fig. 3.18:
*Ressorts imbriqués fabriqués
par microstéréolithographie*

3.8 Conclusion

Pour fabriquer des pièces métalliques ou en alliages métalliques 3D de précision inférieure au micromètre, les techniques à disposition sont: le LIGA, les techniques par enlèvement de copeaux et la μ EDM. Pour une production de masse, la technique LIGA est la plus avantageuse. Pour la fabrication de petites séries, les procédés de LIGA traditionnels ont des coûts prohibitifs comparés à la μ EDM. L'UV-LIGA offre une alternative intéressante, tout en sachant que les matériaux électroformables par cette méthode se limitent à des alliages de nickel.

Selon la géométrie des pièces, mais surtout pour des dimensions supérieures au millimètre, la μ EDM est la seule technique intéressante.

Quelques applications μ EDM

- Usinage de pièces à géométrie complexe (découpage fig. 3.19 et plongée fig. 3.20)
- Usinage de pièces coniques en silicium
- Usinage de pièces avec un grand rapport de forme
- Pièces ne devant pas subir d'efforts mécaniques durant l'usinage.
- Usinage des matériaux très durs et fragiles
- Prototypage rapide (*rapid prototyping*)
- Usinage de céramiques conductrices
- Micro-actionneurs (micro-moteurs, engrenages, bobinages, ressorts, ...)
- Applications médicales (le titane est biocompatible)
- Microfluide (micro-réacteurs, systèmes d'analyses)
- Inserts pour moule (capteurs optiques)
- Micro-trous (fig. 3.22), injecteurs (fig. 3.21)
- Filières (fig. 3.23)
- Micro-filtres

- Capteurs d'accélération, de position, ...
- Alignement de fibres optiques, marquage pour le test de capteurs optiques (une marque tous les 5 μ m)
- Masque pour ablation laser



Fig. 3.19: Pièces usinées avec une machine EDM à fil

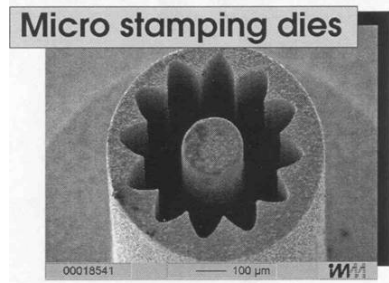


Fig. 3.20

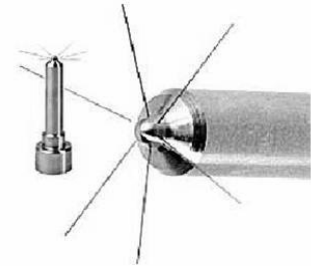


Fig. 3.21: Micro-trous pour les injecteurs diesel ($\varnothing 100 \mu\text{m}$, profondeur 1,25 mm) (photo Sarix)

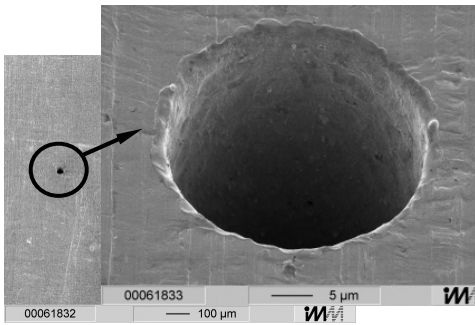


Fig. 3.22: Micro-trou

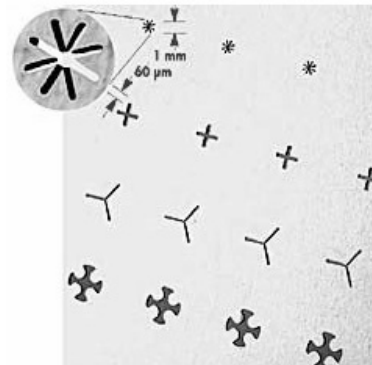


Fig. 3.23: Filière (photo Sarix)

4 L'état de l'art

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous proposons un tour d'horizon de ce qui est lié à la micro-électroérosion. De très nombreuses publications rendent compte de performances exceptionnelles. Fréquemment les résultats 'challenge' obtenus dans un contexte bien précis, sont difficilement généralisables. Nous relevons quelques publications récentes utiles en regard de nos expérimentations.

4.2 Quelques machines μ EDM à plongée

Le tableau 4.1 présente un éventail de machines à enfonçage utilisées pour la μ EDM. Actuellement, les quatre premiers modèles sont, à notre connaissance, les plus utilisés. Nous avons mentionné en italique quelques machines moins connues.

La précision de positionnement n'est pas toujours mentionnée dans les caractéristiques techniques des machines, car elle est très influencée par son mode d'utilisation. Pour les 4 premiers modèles du tableau 4.1, il est raisonnable de prétendre à une précision de l'ordre du micromètre, sur des distances inférieures à une vingtaine de millimètres.

Fabricant	Modèle	Course XYZ [mm]	Précision de positionnement [μ m]	Résolution des capteurs [μ m]	Spécialisation
Sarix	SR-VHPM (fig. 4.4)	200x150x150	± 2	0.1	-
AGIE	Compact 1 (fig. 4.2)	250x160x250	-	0.1	-
AGIE	Quadratron II (cf. Annexe III)	4 tables 10x10x50	-	0.1	micro-perçage d'injecteurs
Panasonic	MG ED82W MG-ED72W (fig. 4.3)	200x50x75	-	0.1	micro-perçage
<i>Charmilles</i>	<i>MICRO EDM HO-10</i>	<i>200x50x3</i>	-	-	<i>micro-perçage</i>
<i>Walter Klink GmbH</i>	<i>μ-SEM</i>	<i>200x200x100</i>	<i>xy: 1 z: 10</i>	-	-
<i>Mikuni Sogiyo</i>	<i>ED-α</i>	<i>300x200x300</i>	<i>10</i>	-	<i>micro-perçage</i>
<i>Toray</i>	<i>TM-ED200</i>	<i>200x120x200</i>	<i>1</i>	-	<i>micro-perçage</i>
<i>Raycon</i>	<i>SH 251-M</i>	<i>100x100x150</i>	<i>1</i>	-	<i>micro-perçage manuel</i>

Tableau. 4.1: Éventail de machines à enfonçage utilisées pour la μ EDM



Fig. 4.2: AGIETRON COMPACT 1 Micro



Fig. 4.3: Panasonic MG ED82W



Fig. 4.4: Sarix Sx100-HPM

4.2.1 Remarques

Les machines μ EDM vendues par AGIE sont des évolutions de machines à plongée standards. Elles n'ont pas été développées dans l'optique d'usiner uniquement des pièces de très petites dimensions. Leur mécanique est conçue pour supporter des pièces de quelques dizaines de kilos, sur des courses de plus d'une centaine de millimètres. La masse des électrodes pouvant être montées sur ces machines hybrides, varie de quelques dizaines de kilos à quelques milligrammes. Leur construction robuste permet de couvrir un large spectre d'applications, mais empêche de tirer parti de deux particularités de la μ EDM: de faibles masses en mouvement et des courses limitées.

4.3 Les dimensions et les précisions type en μ EDM

Le tableau 4.5 donne les valeurs typiques de dimensions minimales et de précision, que l'on peut obtenir en μ EDM. Sur la colonne de gauche, nous avons indiqué les résultats obtenus avec l'érosion à découpage et sur la colonne de droite avec l'érosion par enfonçage. Ces résultats ne correspondent pas à la réalité industrielle actuelle, mais sont l'aboutissement de travaux de recherche. Ils indiquent le potentiel de la micro-électroérosion.

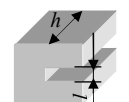
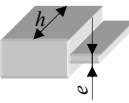
	μ EDM à fil	μ EDM à plongée
Tolérance de forme [μm]	± 1	± 2
Déviations de la position [μm]	$< \pm 1$	$< \pm 1$
Rugosité moyenne arithmétique R_a [μm]	0.1 – 0.2	0.2 – 0.3
Rugosité moyenne R_{tm} [μm]	0.5 – 2.5	1 - 5
 mortaise Largeur l de cavité minimum [μm] Rapport de forme h/l maximum [%]	50-60 20-40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

Tableau 4.5: Précisions et dimensions typiques atteignables en μ EDM [hes02a]

A côté de ces valeurs typiques, les milieux académiques publient des résultats encore plus exceptionnels. Dans le domaine du micro-perçage par exemple, des trous de 5 μm de diamètre et d'une profondeur de 20 μm ont pu être érodés [mas97a].

4.4 La dynamique au service du processus

4.4.1 Généralités

De nombreuses publications démontrent l'intérêt de la dynamique pour le processus d'érosion [mas75a], [kre91a], [mor95a], [ima96a], [wol98a], [ima04a], [zha04a]. La majorité des études portent sur:

1. De simples vibrations de quelques dizaines de micromètres d'amplitude et de fréquences allant jusqu'à 20 kHz, générées par un élément piézo-électrique. Dans la majorité des cas ces vibrations sont transmises par le support de la pièce à usiner.

2. Des actionneurs hautes fréquences montés en série sur un autre axe de plus grande course. Les deux systèmes d'axes sont contrôlés en position par deux boucles de réglage indépendantes et asservis au processus.

Aucun des résultats prometteurs trouvés dans la littérature n'est appliqué sur une machine commerciale. Constatation difficile à interpréter: Est-ce dû à des aspects techniques (manque de fiabilité et de reproductibilité) ou des aspects commerciaux (machine trop cher et marché trop étroit)? Soulignons que la dynamique prend toute son importance lorsqu'elle est au service du 'petit'. Il est illusoire de vouloir contrôler une électrode de plus de quelques kilos à des centaines de hertz. Techniquement c'est réalisable, mais la machine serait invendable.

Le peu d'intérêt des constructeurs de machines à électroérosion pour ces travaux sur la dynamique, est certainement dû au marché niche qu'est encore la μ EDM. Les systèmes proposés sont toujours des modules ajoutés en série à un système d'axes cartésiens. Dès lors, l'amélioration de dynamique est obtenue au détriment des coûts et de la précision.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons deux publications du même chercheur traitant de la dynamique.

4.4.2 Actionneurs hautes fréquences

En 1995 Yosshito IMAI présente un actionneur piézo-électrique monté en série sur un axe conventionnel [ima96a]. Cet actionneur haute fréquence (800 Hz) permet de générer des déplacements d'amplitude maximum de $\pm 14 \mu\text{m}$ selon l'axe Z. Mentionnons que la précision du système est secondaire; l'auteur veut démontrer l'intérêt de la dynamique.

Dimensions du piézo	\varnothing intérieur: 8mm \varnothing extérieur: 20 mm Hauteur: 52 mm
Course maximum	$\pm 14 \mu\text{m}$ ($\pm 7 \mu\text{m}$ avec une charge de 1kg, fréq=800Hz)
Résolution de position	$< 0.1 \mu\text{m}$

Fig. 4.6: Caractéristique de l'actionneur

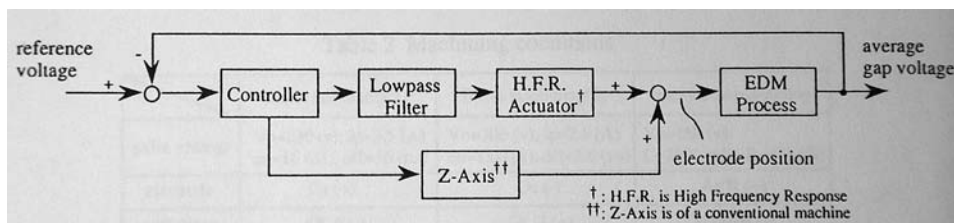


Fig. 4.7: Schéma bloc de l'asservissement du gap

La figure 4.7 représente le schéma bloc de la boucle de réglage. L'axe Z et l'actionneur haute fréquence (H.F.R.), sont contrôlés en position par deux boucles de réglage indépendantes et asservis en parallèle au processus. L'asservissement du gap avec **une réponse en fréquence de 300 Hz au lieu de 30 Hz**, augmente la vitesse d'usinage jusqu'à 50 % dans certaines conditions de finition ($U_0=300\text{V}$, $I_e=2.5\text{A}$, $T_{\text{on}}=1\mu\text{s}$, $T_{\text{off}}=3.6\mu\text{s}$).

En augmentant la pression de lavage, les turbulences générées dans le diélectrique bruyent la mesure de la tension du gap et à une fréquence de 30 Hz, l'érosion devient instable; avec une boucle de réglage de 300Hz, la stabilité est bien meilleure.

En 2004 Yosshito IMAI présente un module actionneur local XYZ pour la μ EDM de haute précision [ima04a]. Au lieu d'éléments piézoélectriques, cet actionneur utilise la force électromagnétique pour maintenir l'électrode dans l'air (fig. 4.9). Il est monté en série sur un

module grande course et a une réponse en fréquence de 200 Hz, pour un déplacement maximum de 400 μm dans les trois directions X, Y et Z. L'équipe a démontré expérimentalement, que la machine était capable de percer des micro-trous 3 fois plus rapidement que les méthodes conventionnelles, avec une usure de l'électrode 10-20% inférieure. Cet actionneur haute fréquence permet également des mouvements planétaires rapides, pour éroder des petits trous de haute précision.

Le tableau de la figure 4.8 résume les résultats, qu'ils ont obtenus avec une électrode en tungstène de $\text{Ø}30 \mu\text{m}$, sur de l'acier inox. Le diamètre des trous érodés avec l'actionneur haute fréquence, est inférieur à ceux érodés avec l'actionneur conventionnel; cette particularité est due aux temps d'usinage plus courts.

Les auteurs mentionnent que la précision sera partie intégrante de leurs futurs travaux de recherche.

Profondeur du trou [mm]	Actionneur haute fréquence (200 Hz)				Actionneur conventionnel (20-40 Hz)			
	Durée [s]	Usure [%]	Ø entrée [μm]	Ø sortie [μm]	Durée [s]	Usure [%]	Ø entrée [μm]	Ø sortie [μm]
0.3	48	65	50	50	119	76	60	53
0.5	100	68	57	58	261	88	55	60
1.0	233	151	56	65	690	167	77	88

Fig. 4.8: Résultats de micro-perçage avec et sans actionneur haute fréquence [ima04a]

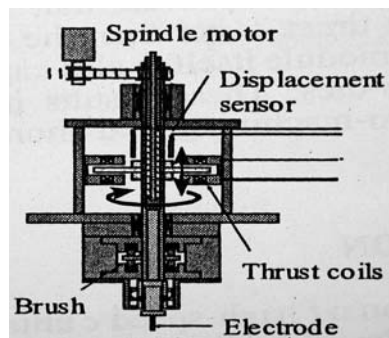


Fig. 4.9: Actionneur local pour le micro-perçage

4.5 La rotation de l'électrode (usinage de forme cylindriques)

L'érosion d'éléments cylindriques est influencée par les conditions du processus résultant de la rotation d'une des électrodes. Dans ce paragraphe, nous parcourons les travaux récents d'une équipe allemande [uhl04a] traitant de l'usinage de pièces cylindriques. Leurs travaux sont le résultat d'expériences faites avec les procédés EDT, EDG et WEDG présentés au §2.5.

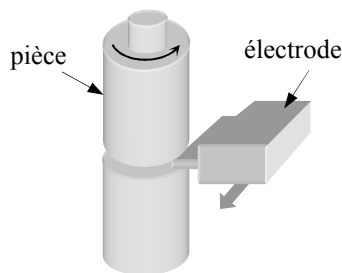


Fig. 4.10: EDT
(Electrical Discharge Turning)

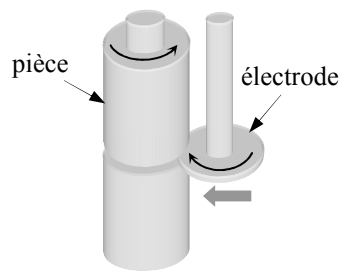


Fig. 4.11: EDG
(Electrical Discharge Grinding)

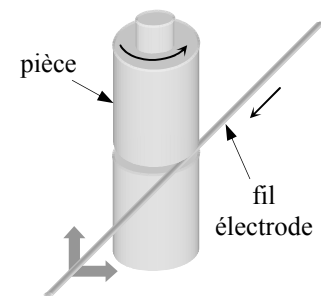


Fig. 4.12: WEDG
(Wire Electrical Discharge Grinding)

Les 3 procédés sont caractérisés par un mouvement relatif à haute vitesse (de 2 à 4 m/s), entre la pièce à usiner et l'électrode outil. Ce mouvement influence le processus d'usinage. Dans l'EDG,

deux cas sont à considérer: la rotation synchrone de la pièce et de l'électrode, comme les flèches le représentent à la figure 4.11 et la rotation en sens inverse.

Influence sur le processus

Le mouvement de rotation influence la position et l'expansion du canal de plasma à chaque décharge. Il existe deux théories opposées [uhl04a]:

1° Supposons que la base du canal de plasma (fig. 4.13) se déplace (en restant sur le point initial), le long de la surface de l'électrode tournante. Le canal de plasma s'étend donc de manière longitudinale en fonction de la direction de rotation, de la vitesse tangentielle et de la durée de la décharge. Si l'allongement dépasse une distance critique, le canal se rompt avec comme conséquence, une interruption du flux de courant.

Une augmentation de la vitesse tangentielle brisera prématurément le canal de plasma. En considérant que l'énergie de la décharge W_e détermine de manière significative la géométrie du cratère, nous supposons que ces derniers diminuent de volume avec l'augmentation de la vitesse tangentielle.

Cette théorie a été invalidée par des tests en EDG. Aucune différence topographique de la forme des cratères n'a été mesurée, entre une érosion avec rotation inverse et une rotation synchrone.

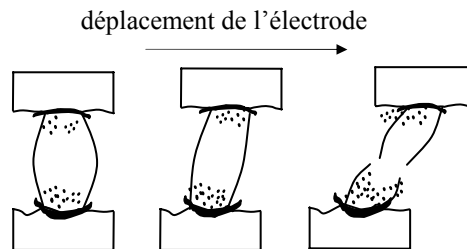


Fig. 4.13: *Durant la décharge le canal de plasma se déplace en restant sur le point initial de l'électrode*

2° Supposons que la position du canal de plasma ne se déplace pas avec la rotation de l'électrode (fig. 4.14). La position originale de la surface de l'électrode, sur laquelle le canal de plasma s'est développé change durant l'impulsion. L'échauffement de la surface n'est donc pas stationnaire.

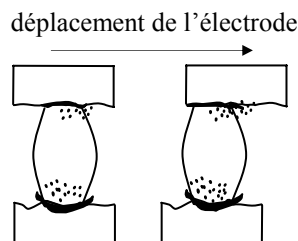


Fig. 4.14: *Durant la décharge le canal de plasma ne se déplace pas avec l'électrode*

Analyse de la conduction thermique

La distribution de chaleur à la surface de la pièce a été modélisée, en appliquant le premier théorème de la thermodynamique. Le transfert de chaleur par convection a été négligé et le mouvement de la source de chaleur est considéré comme une pure translation.

Avec une température du plasma de 10^4 000K, une température du fluide de 20°C et une durée de la décharge $t_e=1,2 \mu\text{s}$, les simulations [uhl04a] montrent que l'expansion de la distribution de chaleur a lieu dans la direction de rotation et augmente avec la vitesse. Une modification significative du profil des températures n'est perceptible qu'à des vitesses tangentielles nettement supérieures à 2 m/s.

Pour vérifier la théorie ci-dessus, des tests ont été effectués avec les procédés EDT et EDG. L'utilisation d'impulsions à 'grande' énergie $W_e=1,8$ mJ, a permis de mesurer optiquement la topographie des cratères.

- De 0,5 à 2,5 m/s aucune différence des dimensions des cratères. Ceci indépendamment du procédé et du sens de rotation.
- Une réduction de la surface du cratère de 50% est observable avec une vitesse supérieure à 2,5 m/s.

La circulation du diélectrique dans le gap, due aux mouvements de l'électrode influence le processus. Le flux de diélectrique aide à évacuer les particules érodées. Il garantit un meilleur lavage au niveau du gap et par conséquent augmente la vitesse d'usinage.

Les différences de pression dans le gap influencent la topographie. Lorsqu'une seule électrode tourne, sa vitesse de rotation influence directement la vitesse du flux et donc la pression hydrodynamique au niveau du gap. Avec de petits gaps, les flux en glissement et cisaillement, augmentent cette pression hydrodynamique.

Synthèse

La prédiction d'un canal plasma se déplaçant avec la pièce en mouvement est invalidée. La décharge n'est pas interrompue prématurément par la rupture du plasma, suite à son allongement. La réduction de la dimension des cratères observée lorsque la pièce est en rotation, est due exclusivement à la distribution de chaleur sur la surface en déplacement (théorie 2°)ⁱ.

La rotation de l'électrode et/ou de la pièce à usiner, génère des mouvements du diélectrique autour du gap. Ces flux aident à évacuer les particules érodées et créent des gradients de pressions favorisant l'implosion du canal de plasma durant la phase de la rupture (fig. 2.3).

4.6 Mesure de la 'force d'érosion' et de la dimension des cratères

L'avantage de l'érosion, réside en l'absence de contact entre l'outil et la pièce à usiner; aucune force d'usinage directe. Cependant, plus les dimensions sont petites, plus les forces du processus auront tendance à influencer des éléments comme les électrodes ultra fines utilisées pour usiner de petits composants.

En découpage par électroérosion, lors de l'utilisation des fils de Ø20, 25, 30 ou 50 µm, l'effet des forces du processus devient important, en regard des faibles forces de tension du fil et de la faible masse du fil. Les travaux de [klo04b] se sont intéressés à la mesure du diamètre des cratères et à la force par décharge unitaire. Le but de ces recherches est d'éviter des ruptures de fil. Rappelons qu'en découpe rapide lors de l'utilisation de hautes énergies, la tension du fil est faible pour éviter sa rupture. Pour garantir la haute précision lors de la finition, la tension du fil est plus grande.

Mesure de la dimension des cratères

Cette expérience a été conduite en utilisant un diélectrique à base d'hydrocarbure. Ce type de diélectrique permet des gaps plus petits qu'un diélectrique aqueux. Les électrodes utilisées pour la mesure de la dimension des cratères, sont des fils en tungstène de Ø50, 30, 25, 20 µm et en cuivre de Ø50, 30 et 25 µm.

En faisant varier les paramètres T_{on} (de 0.5 à 5 µs), le courant (1.5, 9 et 15 A) et la tension d'amorçage (80 et 150 V), on montre que le paramètre qui influence principalement la dimension du cratère, est la tension.

ⁱ Un projet de recherche interne AGIE (*Duga*) a démontré que les étincelles se déplacent avec le diélectrique. En faisant circuler ce dernier à haute vitesse entre une électrode et une pièce fixe, l'étincelle est 'poussée' par le liquide et se déplace le long de la pièce pour s'éteindre à son extrémité.

Avec **150 V** le diamètre moyen est de **36,6 μm** et avec **80 V**: **25,5 μm** . Selon [klo04b], l'explication est à chercher dans la distance de claquage: si le fil est proche de la pièce, le canal de plasma est contenu; si la distance est plus grande, le canal peut s'étendre d'avantage. Le gap a donc une influence directe sur la rugosité. Pour diminuer cette dernière, il faut éroder avec une faible distance pièce-électrode et une faible tension.

Mesure de la force d'une décharge

Cette mesure a été effectuée avec une pointe en tungstène placée horizontalement.

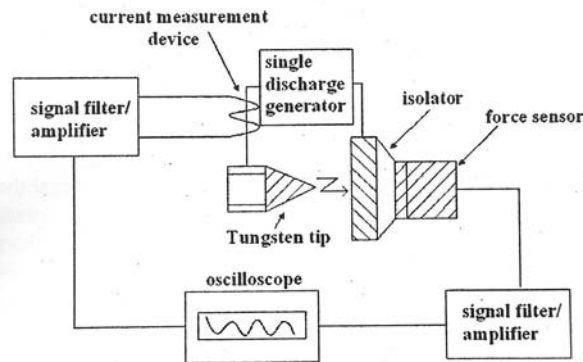


Fig. 4.15: Mesure de la force d'une étincelle [klo04b]

La force maximum dépend du courant de décharge et de la tension d'amorçage. Pour chaque tension d'amorçage, la force est proportionnelle au courant et pour un même courant, la force dépend de la tension d'amorçage. Cette dernière influence à son tour la tension de décharge, donc l'énergie d'une étincelle. Les forces mesurées sur de l'acier sont de **10-14 N** à **100 V**, **12-18 N** à **120V** et de **16-21 N** à **150 V**, avec des courants variant entre 1,5 et 14 A.

Notons qu'avec de faibles tensions d'amorçage, les cratères deviennent elliptiques.

4.7 Formage de l'électrode 'in situ' (*dressing*)

Lorsque l'on travaille dans les petites dimensions, il est avantageux de former l'électrode directement sur la machine EDM. La méthode 'classique' consiste à utiliser un système WEDG (cf. §2.5.9). Ces systèmes sont onéreux, il est dès lors intéressant de prendre en considération d'autres moyens. M. Yamazaki [yam04a] propose d'éroder l'électrode dans un trou, percé par cette dernière elle-même. Après un perçage à polarité négative (fig. 4.16), elle est formée à polarité positive par rotation et déplacement dans le trou usiné (fig. 4.17). Cette méthode permet de former l'électrode de manière très précise et de s'affranchir des problèmes de positionnements initiaux. M. Yamazaki a utilisé une électrode en tungstène de $\text{Ø}150 \mu\text{m}$ avec une pièce en cuivre. Elle a pu être réduite jusqu'à un diamètre $14 \mu\text{m}$ sur une longueur de $490 \mu\text{m}$.

Les avantages de cette technique sont d'une part l'économie d'une installation de WEDG et d'autre part, l'élimination des problèmes de référence, en usinant le *trou-outil* 'in situ'.

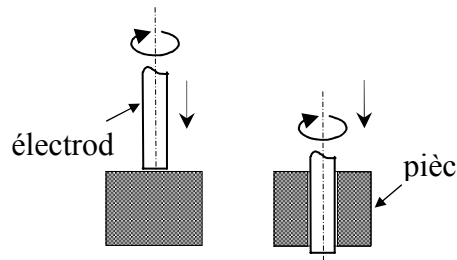


Fig. 4.16:
Perçage à polarité négative

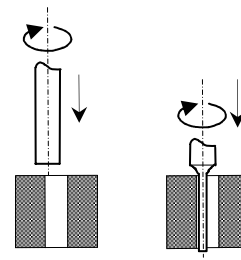


Fig. 4.17:
Formage de l'électrode à polarité positive

4.8 Conclusion

La littérature abonde de publications traitant de l'électroérosion et de la micro-électroérosion. La majorité des travaux de recherche dans ces domaines, proposent des concepts vérifiés dans des conditions particulières et difficilement exploitables en milieu industriel. A notre connaissance, aucune machine EDM n'a été conçue pour exploiter spécifiquement une des particularités de la μ EDM: à savoir, les faibles masses en mouvement.

Notre approche de la micro-électroérosion, commence par le concept d'une machine dédiée à la μ EDM et permettant d'exploiter un large spectre de concepts démontrés dans les publications. En particulier, le prototype que nous présentons au chapitre suivant, prend en compte deux aspects jamais rencontrés dans la littérature: la dynamique et la haute précision réunis sur une machine à vocation industrielle.

5 Description et analyse du prototype

5.1 Introduction

Les conclusions du chapitre 3, donnent l'ordre de grandeur de la dimension et de la précision des motifs que nous désirons usiner. Nous visons une précision d'usinage de quelques centaines de nanomètres, sur des courses d'une dizaine de millimètres. Notre petite machine μ EDM doit garantir cette précision avec des temps de réponse inférieurs à la milliseconde, de manière à profiter des bénéfices de la dynamique au niveau du processus d'érosion (cf. §4.4).

Dans ce chapitre, nous expliquons nos choix électroniques, informatiques et mécaniques, permettant de déplacer une petite électrode avec une dynamique élevée, tout en gardant une haute précision. Nous nous sommes astreints à des solutions à vocation industrielle et nous utilisons le hardware d'une commande AGIE: l'AGIE SIT B.

5.2 Particularités d'une commande pour machine EDM

Pour les procédés d'usinage classique ou les robots d'assemblage, la vitesse et la trajectoire sont deux paramètres prédéfinis et indépendants d'évènements temps réel.

En électroérosion, seule la trajectoire est prédéfinie; la vitesse est asservie au processus. Pour ajuster la tension du gap, dégager l'électrode d'éventuels courts-circuits ou pour générer des mouvements de lavage, la consigne de vitesse change de manière non prédictible durant l'usinage.

Dans ce paragraphe nous désirons mettre en évidence cette particularité fondamentale, dont il faut tenir compte au niveau de la commande.

5.2.1 Processus d'usinage non asservi

L'usinage par enlèvement de copeaux, la découpe laser, etc. sont autant de procédés, où aucun feed-back sur la qualité de la coupe influence le processus en temps réel. Pour ces procédés, comme pour la majorité des robots rapides, le profil de vitesse associé à la trajectoire, suit une loi de mouvement prédéfinie. Pour ces applications au processus non asservi, la commande peut être schématisée par la figure 5.1.

En prenant l'exemple du fraisage, la fonction $P(x,y,z)$ (fig. 5.1) associe un type de fraise et une vitesse de rotation à la géométrie que l'on désire usiner. La fonction $f(x,y,z,t)$ définit la trajectoire (la forme de l'usinage) et la loi de mouvement associée.

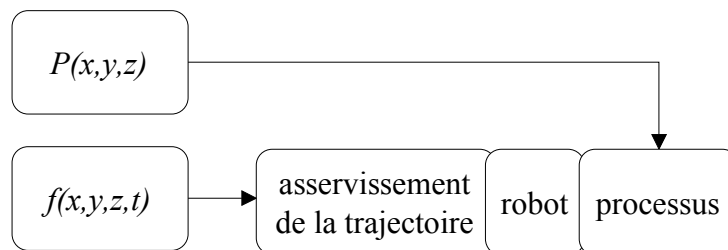


Fig. 5.1: Processus d'usinage non asserviⁱ

x,y,z : positions dans l'espace

t : temps

$P(x,y,z)$: paramètres du processus en fonction de la position

$f(x,y,z,t)$: géométrie de la trajectoire et loi de mouvement

ⁱ Les blocs imbriqués représentent des éléments liés interagissant.

La figure 5.2 représente la trajectoire $f(x,y,z,t)$ prédéfinie dans le temps et dans l'espace, d'un robot ou d'une machine outil classique. Chaque point de la trajectoire est associé à un temps t_i connu à l'avance. Il est donc possible de déterminer un profil de vitesse, permettant d'utiliser au mieux les caractéristiques dynamiques du robot. Pour ce type de commande, les interventions en temps réel sont uniquement de type arrêt d'urgence ou fin du processus.

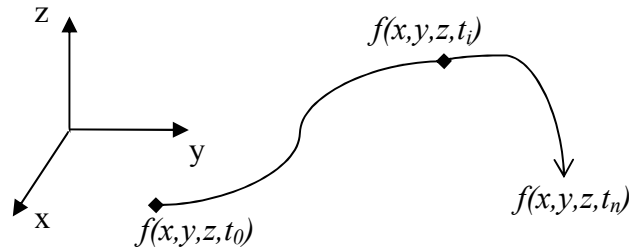


Fig. 5.2: Trajectoire prédéfinie dans le temps et l'espace

5.2.2 L'EDM: processus d'usinage asservi

En électroérosion, la loi de mouvement n'est pas prédéfinie, mais est asservie au processusⁱⁱ en temps réel (fig. 5.3). La vitesse instantanée le long de la trajectoire, dépend de conditions d'usinage non prédictibles.

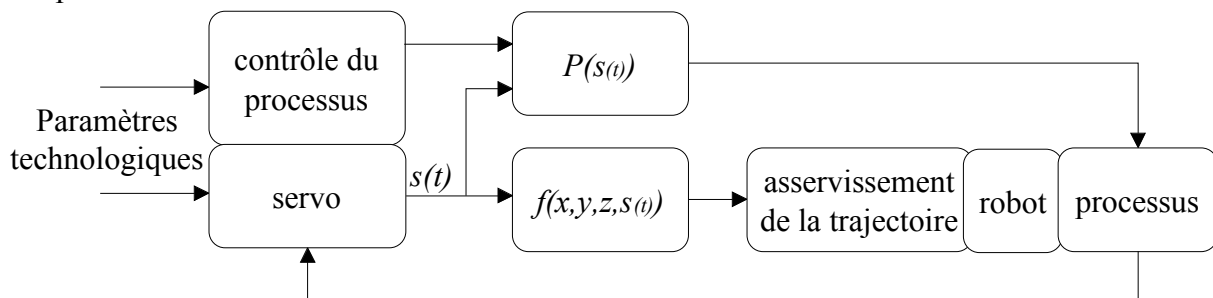


Fig. 5.3: Processus d'usinage asservi d'une machine EDMⁱⁱⁱ

$s(t)$: abscisse curviligne

$P(s(t))$: paramètres du processus en fonction de l'abscisse curviligne

$f(x,y,z,s(t))$: géométrie de la trajectoire en fonction de l'abscisse curviligne

En considérant la figure 5.3, on constate que la consigne $s(t)$ sortant de la boucle de réglage, agit d'une part sur les paramètres électriques du processus $P(s(t))$ et d'autre part sur l'avance de l'électrode le long de la trajectoire prédéfinie $f(x,y,z,s(t))$. La consigne $s(t)$ est générée en temps réel par le servo en fonction de la mesure de la tension du gap.

Considérons que notre électrode se trouve en $s(t)$ sur le front d'érosion (fig. 5.4). En aval de cette position, se trouve la matière à éroder séparée de l'électrode par le gap. Le servo cherche à placer l'électrode à la distance de la pièce, permettant de déclencher les décharges électriques. La distance de claquage variant en fonction de la pollution du gap, le servo génère des consignes de position le long de l'abscisse curviligne, qui dépendent de l'enlèvement de la matière et de son évacuation.

ⁱⁱ Le processus d'électroérosion est contrôlé par des **paramètres technologiques** (cf. Annexe VII) déterminant le type d'étincelles (tension, courant, durée, pause entre deux impulsions électriques) et l'algorithme d'asservissement du gap (la nervosité du réglage, la distance du gap, ...). L'ensemble de ces paramètres est appelé '**la technologie**'.

ⁱⁱⁱ Les blocs imbriqués représentent des éléments liés interagissant.

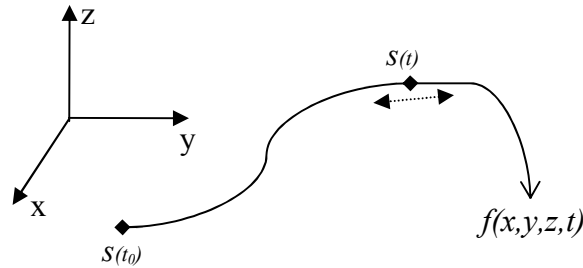


Fig. 5.4: Paramétrisation de la trajectoire pour le servo d'une machine EDM

Dans le but d'améliorer l'efficacité des algorithmes de réglage du servo, nous voulons minimiser le temps de latence, entre un ordre du servo et sa réaction au niveau de l'électrode. A la figure 5.5, nous avons indiqué le temps de latence des différents éléments intervenant dans la boucle d'asservissement du gap de notre prototype. Entre un ordre du servo et un mouvement de l'électrode mesuré par les règles optiques, le temps de latence est de $600 \mu\text{s}$ (fig. 5.13).

Les machines existantes, dédiées à la μEDM ont des temps de réponse entre 5-10 ms (§7.4.1, tableau 7.17). Toutefois ces performances sont rarement utilisées, car elles mettent à forte contribution la mécanique et ne garantissent pas la précision.

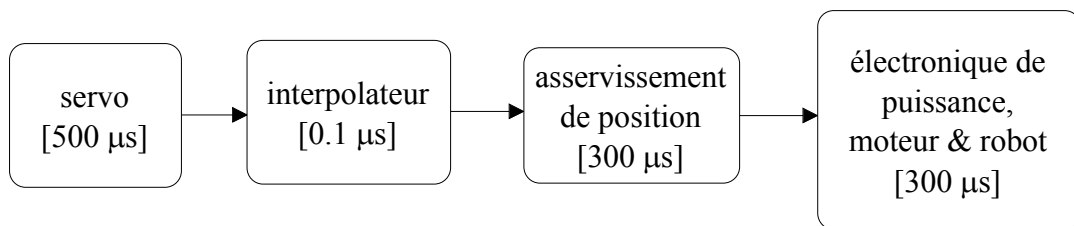


Fig. 5.5: Temps de latence des éléments intervenant dans le contrôle du gap

Dans la suite de ce chapitre, nous étudierons chacun des éléments de notre prototype sous l'aspect temps de latence et précision. Nous commencerons par la fin de la chaîne, c'est à dire le robot.

5.3 Concepts mécaniques pour un robot dynamique et précis

La base mécanique pour notre petite machine μEDM est le robot représenté à la figure 5.6. Le volume de travail est de $8*8*8 \text{ mm}^3$ pour un encombrement de $240*240*240 \text{ mm}^3$. La résolution des règles optiques est de 5 nm et la bande passante dynamique est de 500 Hz.

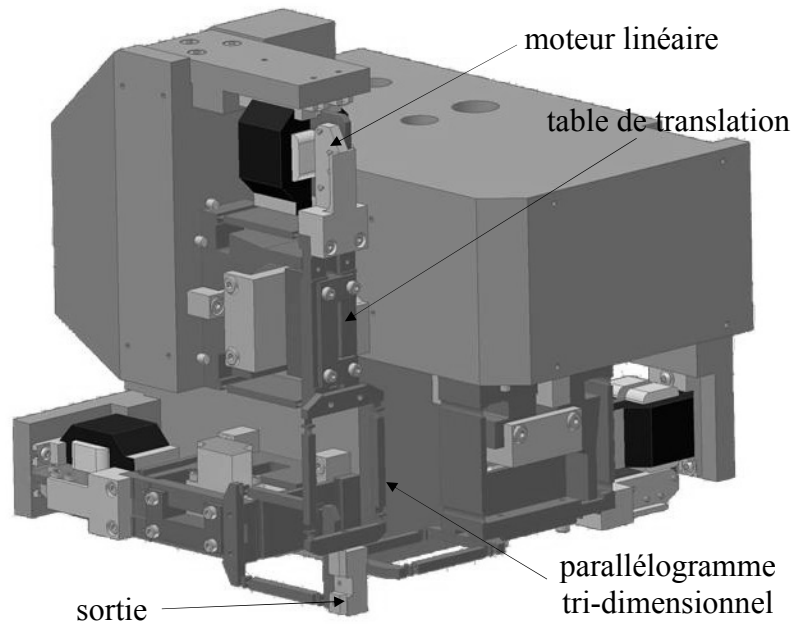


Fig. 5.6: Le robot Δ^3 proto III (Δ^3 III)

La cinématique du robot Δ^3 est illustrée à la figure 5.7. C'est un robot parallèle (cf. Annexe V) avec 5 boucles et 3 degrés de liberté (3 translations XYZ). Tous les guidages du robot sont basés sur des liaisons à articulations élastiques (cf. Annexe V) [bot99a]. Chaque chaîne cinématique (chaque axe) est composée, d'une table de translation et d'un parallélogramme tridimensionnel. La table de translation (assimilable à une glissière) est composée de quatre barres reliées par quatre cols circulaires, alors que quatre rotules relient les quatre barres du parallélogramme tridimensionnel (fig. 5.8). Les rotules sont composées de deux cols circulaires à 90° (fig. 5.9). La disposition orthogonale des parallélogrammes^{iv} permet de découpler dynamiquement chacun des degrés de liberté (fig. 5.7 et 5.6).

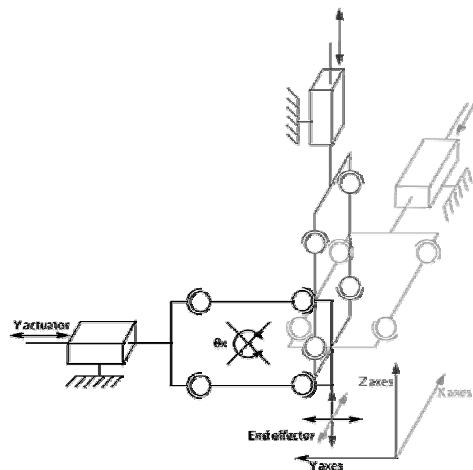


Fig. 5.7: Cinématique du robot Δ^3

^{iv} La disposition des parallélogrammes selon des plans orthogonaux (plus précisément selon les trois faces d'un cube) est à l'origine du nom Δ^3 (Delta-cube).

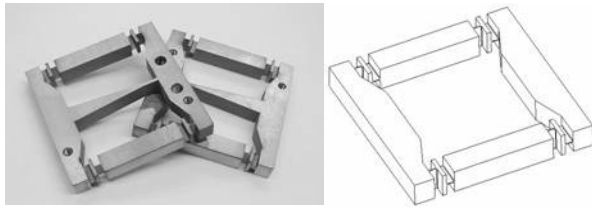


Fig. 5.8: *Parallélogrammes de l'espace (ou tridimensionnels) avec quatre rotules élastiques*

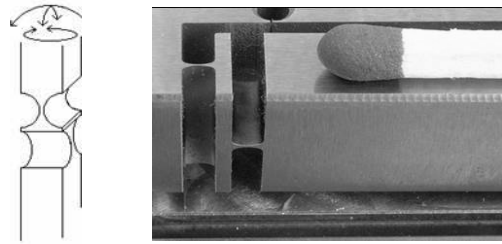


Fig. 5.9: *Rotule élastique*

Trois variantes du robot Delta³ ont été conçues et testées au cours de nos travaux (cf. Annexe IV). Dans ce mémoire, nous présentons uniquement les résultats obtenus avec le dernier prototype: le **Delta³ III**.

5.3.1 La dynamique

Un robot dynamique est un robot pouvant fournir de grandes accélérations. En partant de l'équation de Newton ($F = m \cdot a$) et sachant que nous utilisons des moteurs électriques, nous avons:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{k_t \cdot i}{m} \quad [5.1]$$

a : accélération [$m \cdot s^{-2}$]

k_t : constante de force du moteur [$N \cdot A^{-1}$]

i : courant dans la bobine du moteur [A]

m : masse en mouvement [kg]

Selon l'équation [5.1], pour maximiser l'accélération il faut réduire la masse en mouvement m et augmenter la force F engendrée par les moteurs.

Les cinématiques parallèles ont intrinsèquement de faibles masses en mouvement et elles ne doivent pas supporter le poids des moteurs sur les articulations. Le robot Delta³ III a une configuration idéale pour maximiser l'équation [5.1]: des moteurs immobiles, un entraînement direct et une masse en mouvement visible par les moteurs d'environ 350 grammes.

Sur les cinématiques sérielles, communément utilisées sur les machines à électroérosion, tous les moteurs ne sont pas immobiles. L'augmentation de la force générée par les actionneurs, peut se faire en utilisant un moteur plus puissant ou par l'intermédiaire d'un réducteur, avec les deux inconvénients suivants: dans le premier cas, plus les moteurs génèrent des forces élevées, plus leur poids augmente, donc la masse en mouvement. Dans le second cas, l'utilisation d'un réducteur (son inertie) réduit intrinsèquement la dynamique.

5.3.2 La précision

Pour obtenir une précision élevée et répétitive, notre système doit s'affranchir des erreurs d'inversion (*backlash*) et du frottement (*stick-slip*). Les guidages du robot Delta³, basés sur des structures à articulations flexibles avec un système d'entraînement direct, lui confèrent ces caractéristiques. Cette configuration sans réducteur favorise la rigidité, avec l'inconvénient de rendre les couplages^v de la structure mécanique, plus marqués au niveau des moteurs. On peut tenir compte de ces couplages dans la boucle d'asservissement de position; il est néanmoins plus

^v Notons que les 3 paires de forces agissant sur la sortie du Delta³ sont perpendiculaires, ce qui limite le couplage (cf. fig 5.7).

judicieux de réduire le couplage dynamique entre les axes, en concevant un robot comme le Delta³ III, avec une bonne répartition des masses en mouvement^{vi}.

5.3.3 Conclusion

Les caractéristiques du robot Delta³ III le rendent particulièrement bien adapté à la μ EDM, pour les raisons suivantes:

- Les courses et la précision correspondent aux objectifs fixés au chapitre 3 (fig. 3.1): usiner des motifs de dimensions inférieures à la dizaine de millimètres, avec une précision sub-micrométrique.
- La faible masse en mouvement dans tout l'espace de travail, intrinsèque aux cinématiques parallèles, permet de tirer avantage des faibles masses utiles (~ 100 mg)^{vii} à déplacer. La masse en mouvement visible par chaque moteur du robot Delta³ III est d'environ de 350 g, à laquelle s'ajoute le système de fixation et d'avance de l'électrode (pousse-fil, cf. §5.8) d'une vingtaine de grammes.

Une machine μ EDM avec une table XYZ sérielle comme la Quadratron II (cf. Annexe III), a une masse en mouvement de quelques kilos; avec le Delta³ elle est réduite d'un facteur 10.

- Les liaisons à articulations élastiques (pas de jeux, pas de frottement, aucune erreur d'inversion et pas d'usure), sont particulièrement bien adaptées aux mouvements d'électrode requis pour optimiser le processus de micro-électroérosion.

Comme nous le verrons plus loin, nous pourrons: d'une part améliorer l'asservissement du gap, en permettant au servo de contrôler des petites oscillations de quelques micromètres d'amplitude, à une fréquence de quelques centaines de hertz (fig. 5.23); d'autre part, générer un bruit aléatoire de quelques kilohertz (fig. 5.29), bénéfique à l'évacuation des particules érodées.

5.4 Les moteurs

Les transducteurs électromécaniques pouvant être une source de retards et d'imprécisions, une analyse des moteurs linéaires à aimants mobiles (cf. Annexe I) montés sur notre prototype, fait l'objet de ce paragraphe.

5.4.1 La dynamique

En considérant la partie mécanique de l'actionneur, sa masse en mouvement doit être minimisée pour maximiser l'accélération (la loi de Newton [5.1]). Le seul élément mobile du moteur linéaire est son aimant de 20 grammes, qui correspond à 10% de la masse en mouvement vue par les moteurs (§5.3.1). Pas de réducteur et faible masse en mouvement, du point de vue mécanique, les conditions sont idéales pour générer de grandes accélérations.

En considérant la partie électrique de l'actionneur, à vitesse nulle il peut être représenté par le schéma équivalent de la figure 5.10.

^{vi} Les actionneurs sont alignés sur le centre de gravité des masses en mouvement, ce qui sollicite les deux barres des parallélogrammes de la table de translation de façon identique.

^{vii} Typiquement, les électrodes utilisées sont en tungstène ($\rho = 19'300$ kg·m⁻³), de $\varnothing 149$ μ m et d'une longueur de 100 mm: la masse utile est donc de 67 mg.

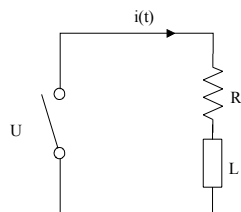
**Fig. 5.10:**

Schéma électrique équivalent des moteurs

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di}{dt} \quad [5.2]$$

La réponse en courant à un saut indiciel de tension U : $i(t) = \frac{U}{R} + \left(I_0 - \frac{U}{R} \right) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$ [5.3]

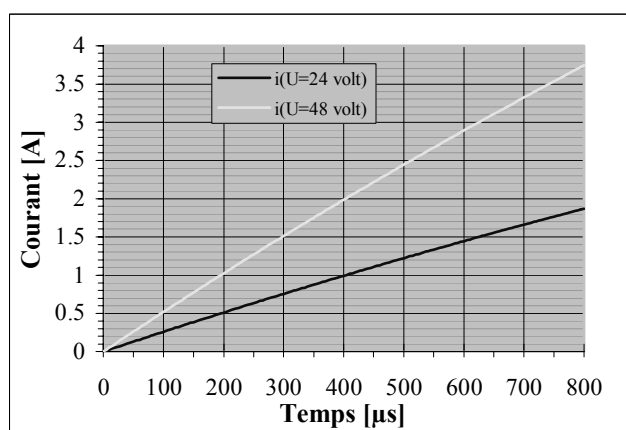
Si le courant initial I_0 est nul, [5.3] devient: $i(t) = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$ [5.4]

Constante de temps électrique: $\tau_e = \frac{L}{R}$ [5.5]

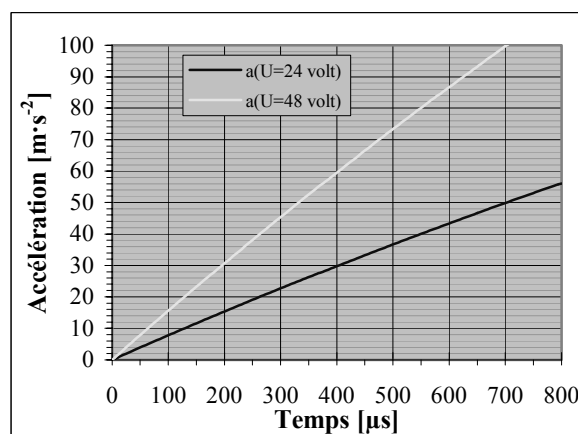
Des équations ci-dessus, nous déduisons que la montée en courant dépend, de la constante de temps du moteur τ_e et de la tension d'alimentation U .

La diminution de la constante de temps τ_e du moteur est possible en réduisant l'inductance propre L ou en augmentant la résistance R du bobinage. Augmenter la résistance du bobinage, entraîne un accroissement de l'échauffement du moteur, ce que nous désirons éviter; la stabilité thermique est primordiale pour garantir une précision nanométrique. L'autre possibilité consistant à diminuer l'inductance, entraîne une réduction de la constante de force du moteur [juf85a]. Le choix du moteur résulte donc d'un compromis, entre la constante de temps de montée du courant et la force générée correspondante.

La diminution du temps de montée du courant par le biais de la tension d'alimentation U , consiste idéalement, à transformer la source de tension en une source de courant. L'utilisation d'une alimentation à découpage avec un niveau de tension élevé, est la manière classique de diminuer le temps d'établissement du courant. Les graphiques 5.11 et 5.12 indiquent les réponses théoriques en courant et en accélération de notre prototype, pour des sauts de tension de 24 V et 48 V.

**Fig. 5.11:**

Réponse en courant théorique à un saut indiciel de tension, des moteurs (cf. Annexe I) de notre prototype

**Fig. 5.12:**

Réponse d'accélération théorique du Delta³ III à un saut indiciel de tension

La figure 5.11 représente la montée en courant dans le bobinage des moteurs (cf. Annexe I), calculée avec l'équation [5.4]. Pour piloter notre prototype, nous utilisons la commande industrielle AGIE SIT-B. Le régulateur de courant de cette dernière, module une tension de 24 V

avec un PWM de 25 kHz. Pour minimiser l'échauffement du moteur, nous avons limité le courant à ± 400 mA. En considérant la courbe $i(U=24 \text{ volt})$ du graphe 5.11, nous constatons que le temps de latence pour atteindre 400 mA est de 150 μs .

En considérant une masse en mouvement de 350 g et une constante de force des moteurs $k_t = 10.5 \text{ N}\cdot\text{A}^{-1}$, la montée de l'accélération est calculée avec l'équation [5.1]. La courbe $a(U=24 \text{ volt})$ du graphe de la figure 5.12, indique qu'après 300 μs , l'accélération disponible est d'environ 2 g.

Pour vérifier ces prédictions théoriques, nous avons mesuré la réponse de l'axe Z du Delta³ III, à une consigne de position de 20 μm (fig. 5.13). La mesure a été effectuée avec le système bouclé. Les courbes, *consigne* et *mesure* se réfèrent à l'échelle de gauche en micromètres, alors que la courbe *courant* se réfère à l'échelle de droite en ampères. Ces mesures ont été relevées à chaque période d'échantillonnage (300 μs) du régulateur de position contrôlant l'asservissement de position de l'axe Z. En considérant le graphe 5.13, nous constatons qu'au temps $t=300 \mu\text{s}$, le saut de la consigne de position de 20 μm , génère une consigne de courant de -400 mA. 300 μs plus tard, au temps $t=600 \mu\text{s}$, le déplacement mesuré est minimale (-80 nm). A la prochaine période d'échantillonnage, au temps $t=900 \mu\text{s}$, la courbe *mesure* indique un déplacement de l'axe Z de -1.08 μm .

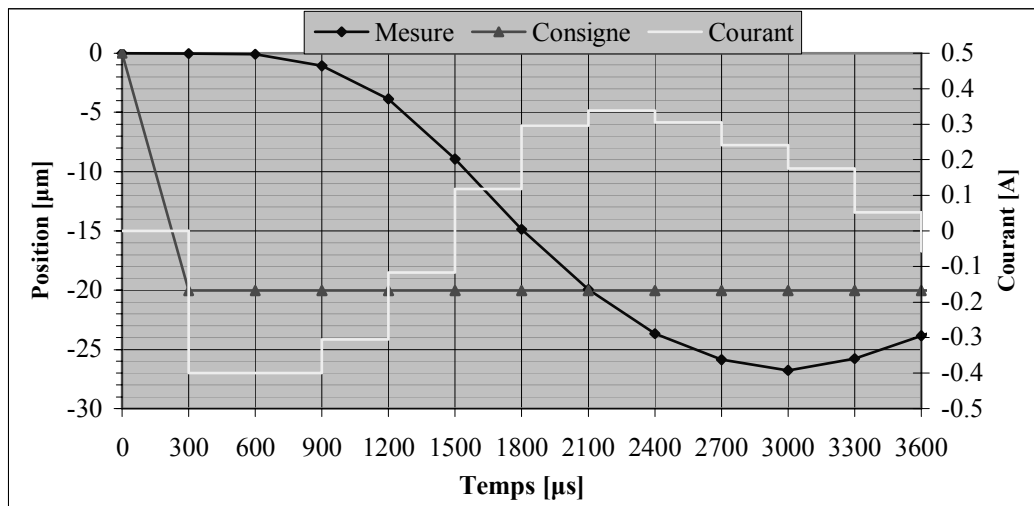


Fig. 5.13: Mesure de la réponse à un saut de position de 20 μm sur l'axe Z en régulation

La mesure présentée sur le graphe 5.13, indique que durant les 300 premières microsecondes, aucun déplacement significatif n'est mesuré. Les raisons sont:

- Le temps de montée du courant dans le bobinage du moteur.
- Le PWM de 25 kHz qui génère intrinsèquement un retard 40 μs égal à sa période de modulation.
- Les retards dans l'électronique de puissance.

Pour la période suivante, de $t=600 \mu\text{s}$ à $t=900 \mu\text{s}$, le déplacement mesuré est de 1 μm , ce qui est de l'ordre de grandeur des prédictions théoriques: avec un courant établi de 400 mA, les graphes 5.11 et 5.12 indiquent une accélération de $a=20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$; le déplacement résultant d'un mouvement uniformément accéléré (éq. [5.6]) d'une durée $t=300 \mu\text{s}$ avec une vitesse initiale nulle, est de 0.9 μm .

Mouvement uniformément accéléré:
$$x(t) = \frac{1}{2} \cdot at^2 \quad [5.6]$$

5.4.2 La précision

La caractéristique principale du mode d'actionnement choisi, est l'absence de frottement. Les sources d'imprécisions classiques, comme le *stick-slip* et le jeu sont totalement absentes de notre système.

En régime statique (en boucle ouverte), la précision de positionnement dépend de la quantification de la force imposée par les moteurs. Cette force est directement proportionnelle au courant et inversement proportionnelle à la raideur des cols. En multipliant cette force par la constante des moteurs k_t , nous pouvons associer le déplacement d'un axe du robot x au courant imposé I et à la raideur des guidages à articulations élastiques K_r (éq. [5.7]).

Déplacement d'un axe du robot:
$$x = \frac{k_t \cdot I}{K_r} \quad [5.7]$$

x : déplacement de l'axe [mm]

k_t : constante de force du moteur [$N \cdot A^{-1}$]

I : courant dans la bobine du moteur [A]

K_r : raideur des cols [$mN \cdot mm^{-1}$]

Dans le but de mettre en évidence la résolution de déplacement du robot en fonction de la résolution en courant de la commande, nous avons représenté à la figure 5.14 le déplacement théorique généré par des incréments de courant de 0.1 à 3 mA, pour différentes raideur de cols.

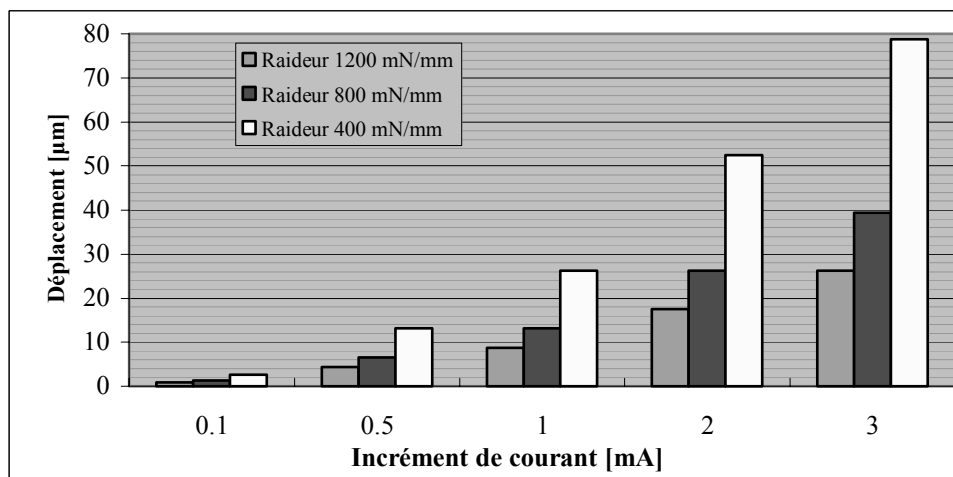


Fig. 5.14: Résolution de la position en fonction d'un incrément de courant

La raideur des articulations du Delta³ III est d'environ $400 \text{ mN} \cdot \text{mm}^{-1}$ et la résolution de courant utilisée est de 3 mA. En régime statique, nous constatons (fig. 5.14) que chaque incrément de courant correspond à un déplacement de $\sim 80 \mu\text{m}$. En régime dynamique, sachant qu'une nouvelle consigne de courant est calculée tous les $300 \mu\text{s}$, nous verrons que cette résolution satisfait la précision que nous désirons obtenir.

5.4.3 L'hystérésis

Dans ce paragraphe, nous désirons relever une particularité intrinsèque de nos actionneurs: l'hystérésis. Le statisme généré par cette non linéarité, est compensé par le terme intégrateur du régulateur de position que nous utilisons (cf. §5.6); malgré l'influence négligeable de cette erreur pour notre application, nous estimons important de la quantifier.

La mesure de l'hystérésis d'un axe a été relevée en programmant le déplacement suivant: depuis le centre de travail (position $0 \mu\text{m}$) le robot se déplace aux positions $+3400 \mu\text{m} / 0 \mu\text{m} / -3400 \mu\text{m} / 0 \mu\text{m}$. Le courant nécessaire pour asservir le robot à la position 0, est différent si elle est atteinte

depuis la position $-3400\mu\text{m}$ ou depuis la position $+3400\mu\text{m}$. Sur le graphe 5.15, nous présentons la mesure du courant associée à la position absolue de l'axe Y (les mesures des autres axes se trouvent en Annexe II). La courbe *Consigne de position* se réfère à l'échelle de gauche en micromètres, alors que la courbe *courant* se réfère à l'échelle de droite en ampères. L'hystérésis peut être assimilée à une erreur d'inversion et est d'environ 50 mA.

Connaissant la constante de force $k_f = 10.5 \text{ N}\cdot\text{A}^{-1}$ des moteurs utilisés, ces mesures nous permettent également de calculer la raideur des guidages à articulations élastiques. Nous avons reporté dans le tableau 5.16, l'hystérésis, la constante courant-position et la raideur mesurée de chacun des axes du Delta³ III.

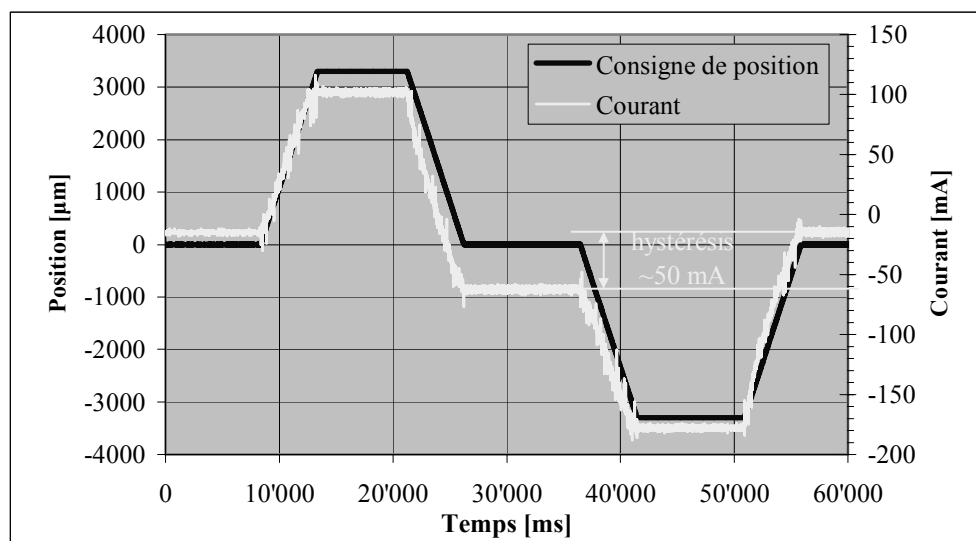


Fig. 5.15: Mesure de la position et du courant associé, pour le moteur de l'axe Y du Delta³ III

	hystérésis maximum [mA]	Constante courant-position [mA · μm^{-1}]	Raideur mesurée [mN·mm ⁻¹]
Axe X	~ 45	~ 0.037	~ 387
Axe Y	~ 50	~ 0.042	~ 445
Axe Z	~ 45	~ 0.039	~ 409

Tableau 5.16: Caractéristiques des axes du robot Delta³ III

5.4.4 Conclusion

Les moteurs linéaires à entraînement direct, sont particulièrement bien adaptés à notre application. Leur course limitée et leur force transmissible réduite (leurs principaux inconvénients) correspondent à nos exigences.

Du point de vue de la dynamique, ce mode d'actionnement associé à la configuration de notre commande, permet de générer des accélérations de 2 g avec un retard de 300 μs ; comparé aux machines μEDM couramment utilisées qui ont des retards de plusieurs millisecondes (§7.4.1, tableau 7.17), nous disposons de performances nettement supérieures. Ces performances associées à un bon suivi de trajectoire, nous permettront de démontrer l'intérêt de la dynamique en μEDM .

Du point de vue de la précision, l'absence de jeu et de frottement élimine les erreurs d'inversion et de stick-slip. Les paramètres du moteur influençant la précision sont: la constante de force et dans une moindre mesure l'hystérésis. La constante de force du moteur est liée à la résolution de la

quantification du courant et à la raideur de la structure. Le terme intégrateur du régulateur de position corrige le statisme généré par l'hystérésis.

5.5 La commande AGIE SIT-B

Dans ce paragraphe nous présentons la commande utilisée pour piloter notre prototype. Les solutions disponibles chez AGIE ont été favorisées, car l'auteur de ce mémoire est un collaborateur au département R&D de cette même entreprise. Les critères principaux qui nous ont poussé à choisir l'AGIE SIT-B sont les suivants:

- Temps de latences de la boucle d'asservissement du processus minimaux par rapport à d'autres commandes d'AGIE et de la concurrence.
- Paramètres EDM et de mouvements enregistrables, à des fréquences correspondant aux périodes d'échantillonnages des régulateurs et sans perturber le processus.
- Concept de commande ouvert, permettant de l'adapter à nos exigences.

Cette commande est employée par AGIE pour deux types d'applications: les machines nécessitant une électronique bon marché et une machine dédiée au micro-perçage d'injecteurs diesel en grande série (Quadratron II, cf. Annexe III). Cette dernière particularité, permettra de comparer nos résultats avec une machine commerciale, dont la principale différence avec notre prototype, est la mécanique.

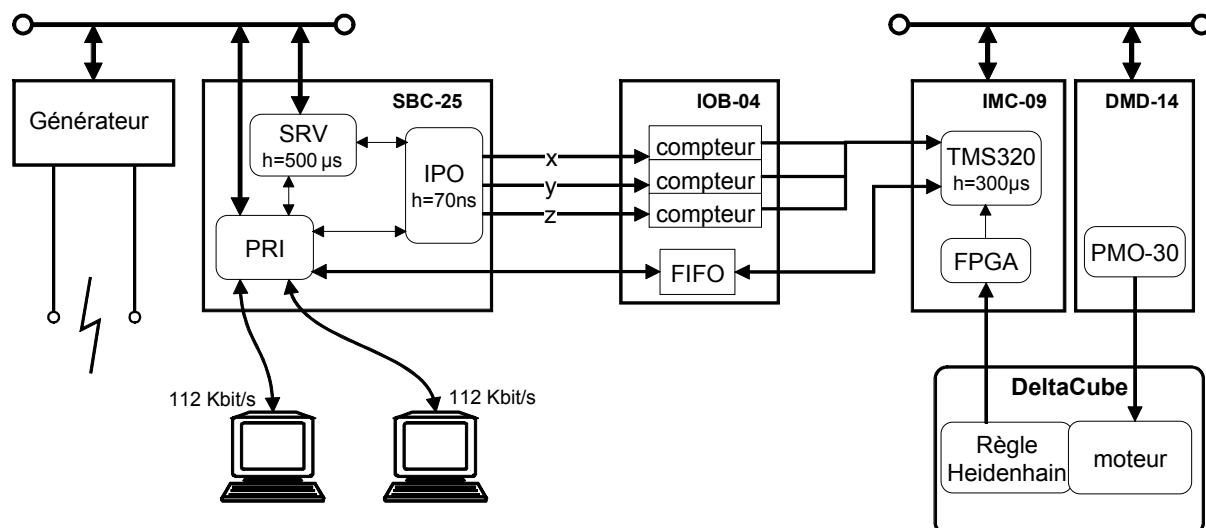


Fig. 5.17: Commande AGIE SIT-B

La figure 5.17 donne une vision matérielle de la commande; chacun des blocs représente une partie de hardware. Dans les lignes qui suivent, nous expliquons la fonctionnalité des blocs principaux:

Deux **PC** reliés à la commande par leur canal série, font office d'interface homme-machine. Un des PC est utilisé pour envoyer des ordres et l'autre comme espion, pour digitaliser les paramètres du processus.

Le bloc **générateur** englobe toute l'électronique gérant les étincelles.

Le contrôle du processus (**PRI**) est physiquement un microcontrôleur^{viii} avec différentes fonctions: il relie l'unité d'érosion avec le monde extérieur (les PC), programme le générateur d'impulsions, passe au servo les paramètres déterminant le comportement de l'asservissement du processus et programme les déplacements du robot dans l'interpolateur.

^{viii} Siemens 80C187

Le servo (**SRV**) est un microcontrôleur^{ix} qui gère les algorithmes d'asservissement du gap durant l'érosion. C'est le coeur d'une machine EDM.

L'interpolateur (**IPO**) est un FPGA^x, qui transforme la consigne de position du servo (donnée selon une abscisse curviligne, cf. §5.2.2), en une consigne de position aux axes XYZ, de manière à suivre la géométrie programmée.

Les blocs **IMC-09** et **DMD-14** représentent respectivement, la carte de contrôle de l'asservissement de position et l'électronique de puissance contrôlant le courant des moteurs du robot (cf. §5.6, fig. 5.18). L'unité centrale calculant les algorithmes d'asservissement de positions, est un DSP^{xi}.

5.6 Asservissement de position

L'usinage par électroérosion ou micro-électroérosion, a des exigences d'asservissement de position spécifiques, différentes de la robotique de précision classique. C'est un mode d'usinage sans contact avec un gap de plusieurs micromètres. Dès lors, une stabilité de positionnement à quelques incréments du capteur de position, ne garantit ni la précision d'usinage et encore moins l'efficacité de l'érosion. Des vibrations avec une position moyenne stable et une amplitude maximum définie, sont même bénéfiques au processus (cf. chapitre 7). Ce qui est primordial par contre, c'est une réaction immédiate à un ordre de déplacement.

Dans ce paragraphe, nous montrons que l'asservissement de position implémenté dans la commande industrielle AGIE SIT-B, satisfait les exigences inhérentes à la μ EDM et à nos recherches.

Nous ne développons pas les aspects algorithmiques du réglage liés aux mécanismes à articulation élastiques; nous renvoyons le lecteur aux différents travaux traitant de ce sujet [moe00a] [moe00b] et en particulier à une thèse parallèle [bac03a]. Nous mettons l'accent sur le choix du matériel électronique utilisé et nous justifions ces choix par des mesures effectuées durant l'érosion.

A la figure 5.18, nous avons schématisé les composants hardware de la boucle de réglage de position d'un axe du robot. Dans ce qui suit, nous analysons successivement les différents blocs.

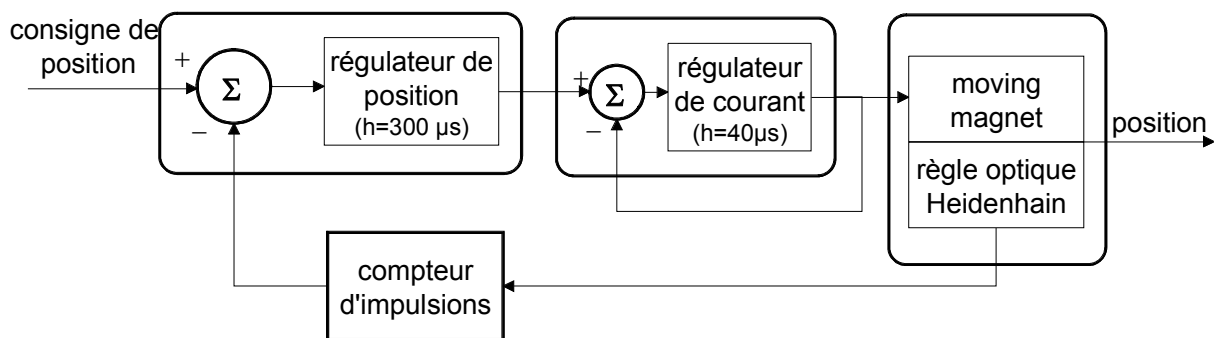


Fig. 5.18: Schéma bloc des composants matériels de la boucle de réglage de position d'un axe du robot

Le régulateur de position

Les algorithmes de réglage sont implémentés sur une carte DSP (TMS320C30) à une période d'échantillonnage de 300 μ s. Cette période d'échantillonnage est adaptée à la bande passante du système amplificateur-moteur (retard pur de 300 μ s, cf. fig. 5.13). Une période d'échantillonnage

^{ix} Siemens 80C186

^x Field Programmable Gate Array (circuit intégré programmable)

^{xi} Texas TMS320C30

inférieure, augmente le bruit dû à la quantification de la mesure de vitesse et dégrade les performances du régulateur [bac03a].

Nous avons implémenté un réglage par contre-réaction d'état. Après avoir déterminé le modèle du système en boucle ouverte, le type de comportement désiré a été ajusté par un placement de pôles en boucle fermée. Des composantes intégrales et proportionnelles ont permis ensuite d'affiner le réglage selon nos exigences (cf. Annexe VI) [buh03a].

La bonne répartition des masses en mouvement du robot Delta³ III (cf. §5.3.2), a rendu négligeable les couplages dynamiques entre les axes, inhérents à la robotique parallèle. Les trois axes X, Y et Z sont asservis en position indépendamment dans l'espace articulaire.

Nous avons également testé d'autres types de régulateur^{xii}: PID, PID avec commande a priori. Avec des consignes dont l'accélération est limitée, ce dernier type de régulateur a permis des suivis de trajectoire similaires à ceux obtenus avec le régulateur par contre-réaction d'état. Ne désirant pas filtrer les consignes de position générées par le servo, nous avons opté pour le réglage par contre-réaction d'état.

Le régulateur de courant

La consigne de courant calculée par le régulateur de position, est transmise sans retard à l'étage de puissance par un DAC de 8 bit. Le courant circulant dans la bobine du moteur 'moving magnet' est mesuré par un capteur avec isolation galvanique (LEM) et asservi à la consigne, par une tension de 24 volts modulée à 25 kHz (PWM de 25 kHz).

Notons les deux limites de ce régulateur de courant hardware:

- Le PWM de 25 kHz génère intrinsèquement un retard égal à sa période de 40 μ s.
- Pour garder une résolution de courant satisfaisante (fig. 5.14 §5.4.2), le DAC 8 bit requiert de limiter l'ampérage absolu maximal. Pour les axes X et Y, nous avons limité le courant à ± 300 mA; la résolution de courant est donc de 2.3 mA/bit. Pour l'axe Z, nous l'avons limité à ± 400 mA de manière à compenser la gravité; la résolution est donc 3.9 mA/bit.

La règle optique Heidenhain

La mesure de position de chacun des axes est faite avec des codeurs incrémentaux linéaires^{xiii}. Une règle graduée sur une période de 4 μ m est montée sur la partie mobile du robot. La tête de lecture optique fixe, lit cette graduation et génère deux signaux sinusoïdaux déphasés; la vitesse maximum est limitée par le fabricant à 200 mm/s.

Ces sinus sont interpolés par une électronique Heidenhain IBV 660B et transformés en deux signaux incrémentaux A et B déphasés de 90° (fig. 5.19). Le temps minimal a toléré entre deux flancs (une demi période) d'un signal des interpolateurs Heidenhain est de 100 ns. En configurant les interpolateurs pour obtenir une résolution de 80 nm/période, la vitesse maximale pour ne pas perdre de pas est de 400 mm/s.

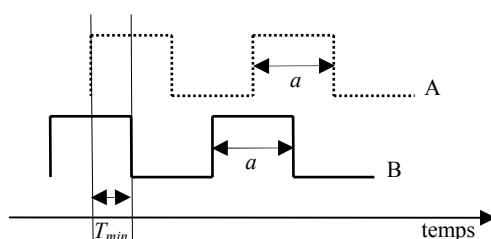


Fig. 5.19: Signaux incrémentaux sortant de l'interpolateur Heidenhain IBV 660B

^{xii} Différents régulateurs ont pu être testés et simulés aisément, grâce à une implémentation Matlab-Simulink permettant de générer directement le code C pour la commande AGIE SIT-B.

^{xiii} codeur Heidenhain LIP 401

Le compteur d'impulsions

Le compteur d'impulsions fait partie de la commande AGIE SIT-B. Il interprète chaque flanc A et B sortant des interpolateurs Heidenhain (fig. 5.19) et incrémente ou décrémente un registre définissant la position des axes dans l'espace articulaire. Ce compteur tolère une période minimale T_{min} de 75 ns (13,5 MHz); avec une résolution de chaque canal de 80 nm/période, la vitesse maximale des capteurs optique est limitée par la commande AGIE à **~250 mm/s**.

Le graphe 5.20 représente la fréquence des impulsions incrémentales, en fonction de la vitesse du robot et pour différentes résolutions des pas. Avec les interpolateurs Heidenhain configurés pour obtenir une résolution de 20 nm/impulsion et en considérant une fréquence limite de 10 MHz, la vitesse maximum pour ne pas perdre de pas est de 200 $\mu\text{m}/\text{ms}$. Vitesse suffisante pour toutes nos expériences.

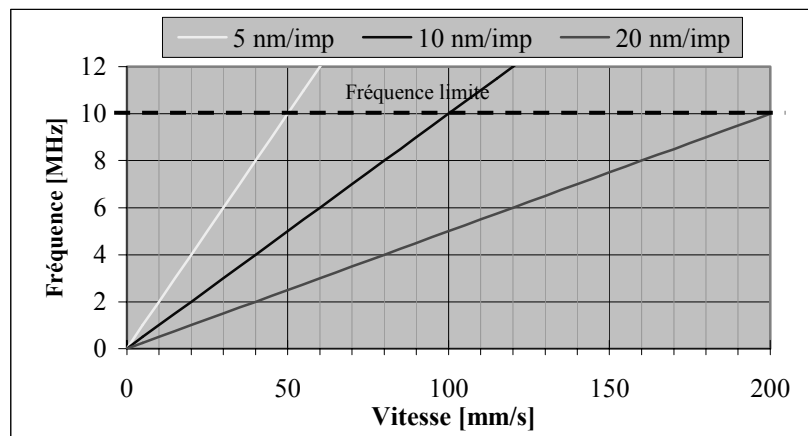


Fig. 5.20: Fréquence des impulsions incrémentales en fonction de la vitesse

5.6.1 Suivi de trajectoire

Pour vérifier si l'asservissement de position implémenté satisfait aux exigences du processus, ce paragraphe présente quelques mesures effectuées sur notre prototype. Nous avons relevé le suivi de trajectoire de l'axe Z du Delta³ III, pour des consignes sinusoïdales et durant l'érosion, lorsqu'elles sont générées par le servo.

La réponse à trois consignes sinusoïdales différentes est reportée sur le graphe 5.21:

- 1) 25 Hz avec une amplitude de $\pm 2 \mu\text{m}$,
- 2) 25 Hz avec une amplitude de $\pm 10 \mu\text{m}$
- 3) 50 Hz avec une amplitude de $\pm 2 \mu\text{m}$.

L'échelle de gauche représente les valeurs des courbes *Consigne* et *Mesure* et l'échelle de droite les valeurs pour la courbe *Erreur* (= *Mesure* - *Consigne*).

Notons que la période d'acquisition des mesures fixée à 4 ms (250 Hz)^{xiv}, dégrade la mesure du sinus à 50 Hz.

^{xiv} Limitation du hardware de la commande AGIE SIT-B

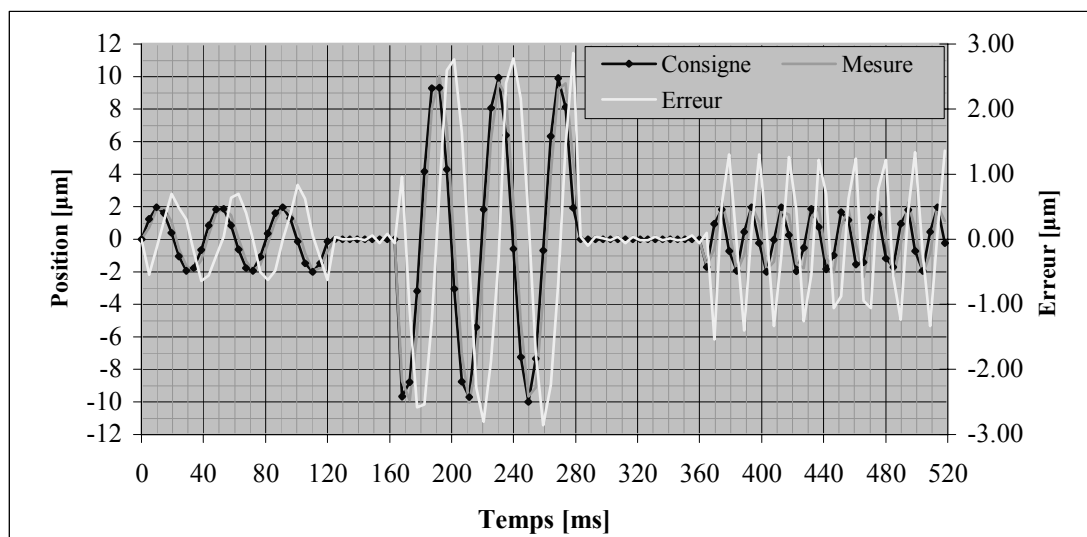


Fig. 5.21: Mesures du suivi de trajectoire pour des consignes sinusoïdales (axe Z du Delta³ III)

Sur le graphe 5.22, on observe la descente de l'axe Z durant un perçage de 2 mm de profondeur. Sur l'échelle de gauche, on lit la position du robot par rapport à la surface de la pièce percée (les courbes *consigne* et *mesure* s'y réfèrent) et l'échelle de droite indique les valeurs de la courbe *Erreur*, comme précédemment.

Les consignes de position sont générées par le contrôleur du processus (le servo) et la technologie utilisée, est celle donnant les meilleurs résultats en exploitant le maximum de la dynamique du prototype (§7.6.2, fig. 7.38). Le graphe 5.23 est un agrandissement du graphe 5.22 après 15 secondes d'érosion.

De manière à compenser l'usure de l'électrode, nous avons programmé un déplacement en Z de -2.5 mm. Le coude des courbes *Mesure* et *Consigne* observable en fin de perçage (fig. 5.22, après ~32 secondes d'érosion), indique que le trou est traversant; la vitesse de descente augmente alors brusquement.

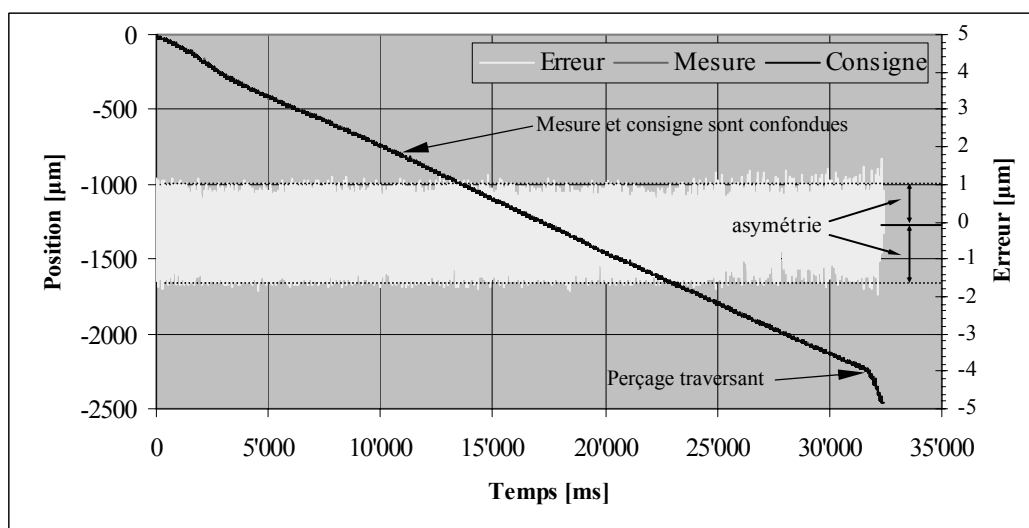


Fig. 5.22: Mesures du suivi de trajectoire pour un perçage de 2 mm de profondeur (axe Z du Delta³ III)

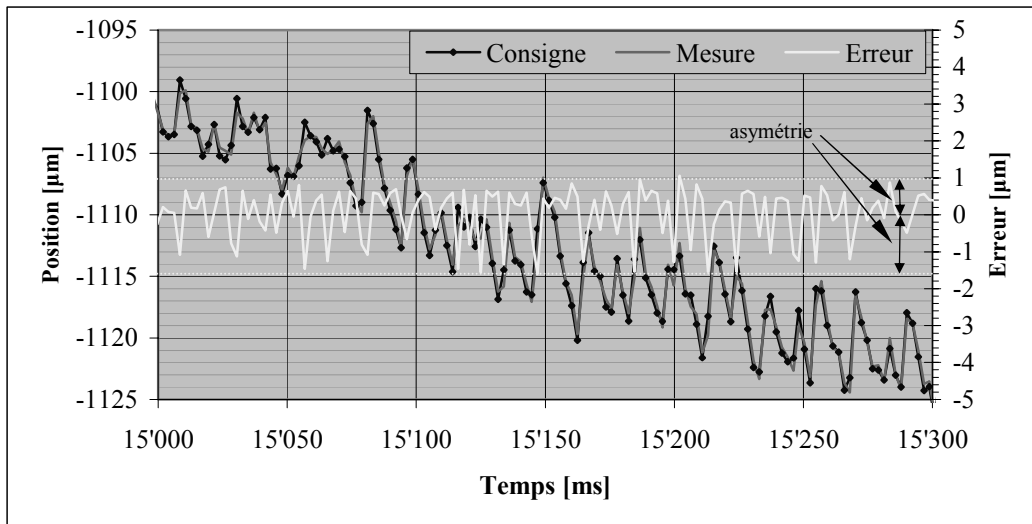


Fig. 5.23: Mesures du suivi de trajectoire durant un perçage (détail de la fig. 5.22)

On constate que la courbe *Erreur* est asymétrique. Le mouvement de retrait de l'électrode, génère une erreur négative d'environ $1.6 \mu\text{m}$, alors que lors de sa descente, l'erreur reste proche du micromètre. Nous verrons plus loin, que ce phénomène provient de l'algorithme d'asservissement du gap; les mouvements de retrait ont une vitesse plus élevée que les mouvements d'avance, pour éviter une collision électrode-pièce.

5.6.2 Conclusion

L'électroérosion est un mode d'usinage sans contact. Le servo ajuste la distance électrode-pièce (le gap) en fonction d'une mesure de tension; il ne contrôle pas la position absolue de l'électrode. Les conditions électriques du gap variant constamment et l'électrode étant toujours en mouvement, ce n'est pas la précision absolue qui améliore le contrôle du processus, mais la rapidité de réaction. Cependant, les erreurs de suivi de trajectoire doivent être contenues et en relation avec le gap. La technologie utilisée dans toutes les expériences que nous présenterons dans ce mémoire (cf. Annexe VII), génère un gap d'une dizaine de micromètres. Dès lors, des erreurs de quelques micromètres, permettent d'exclure une collision électrode-pièce; en particulier, les mesures présentées sur les graphes 5.22 et 5.23, montrent que dans les conditions d'usinage exploitant au mieux le potentiel de dynamique, l'erreur maximale est de l'ordre du micromètre.

Dans ce paragraphe, nous avons présenté succinctement la boucle d'asservissement de position, en soulignant ses limites. A titre indicatif, nous avons mesuré le suivi de trajectoire de fonctions sinusoïdales, jusqu'à une fréquence de $50 \text{ Hz}^{\text{xv}}$. La mesure dans des conditions réelles (fig. 5.23), permet de justifier nos choix et montre que la réponse en fréquence de l'asservissement de position, correspond aux exigences de notre application: d'une part l'erreur de suivi de trajectoire est de l'ordre du micromètre et les gaps d'une dizaine de micromètres^{xvi}, donc aucun risque de collision électrode-pièce; d'autre part la fréquence du va-et-vient de l'électrode est limitée à une centaine de hertz, par la masse en mouvement du Delta³ III (cf. §6.3.2).

^{xv} Nous nous sommes limités à une fréquence de 50 Hz , car le HW de la commande AGIE SIT-B, limite la période d'acquisition des mesures à 4 ms .

^{xvi} Nous perçons des trous de $180 \mu\text{m}$ avec une électrode de $149 \mu\text{m}$ (cf. chapitre 7).

5.7 Le servo (la boucle d'asservissement du gap)

Le coeur d'une machine EDM est le servo. Son rôle consiste à ajuster la distance électrode-pièce, de manière à déclencher le maximum d'impulsions érosives. Dans les lignes qui suivent, nous décrivons succinctement l'algorithme utilisé sur notre prototype.

La boucle d'asservissement du gap est représentée par le schéma bloc 5.24. Le régulateur utilise deux mesures provenant de la zone du gap appelées: *delay* et *courts-circuits*. Les paramètres *Compr* et *Gain* sont à disposition de l'utilisateur pour régler le comportement du processus. Le paramètre de sortie *epsilon*, donne la consigne d'avance ou de recul à l'électrode. Il correspond à l'abscisse curviligne $s(t)$ du graphe 5.3.

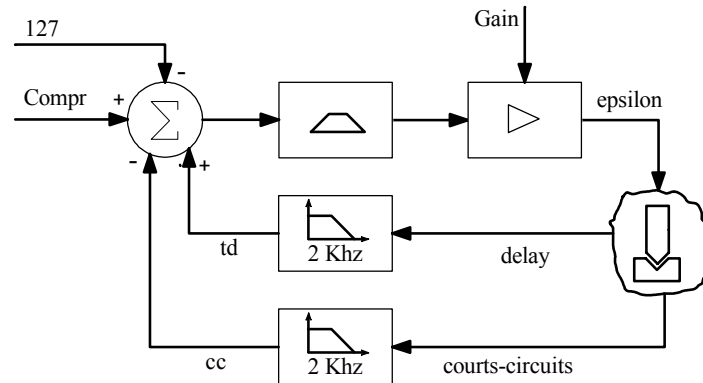


Fig. 5.24: Schéma bloc de l'algorithme d'asservissement du gap (le servo)

delay: Retard à l'amorçage (mesure de la tension moyenne du gap).

courts-circuits: Mesure du pourcentage de la tension du gap au dessous de 6 volts^{xvii} durant T_{on} .

Compr: Paramètre permettant d'ajuster le gap. Plus il est grand, plus l'électrode aura tendance à s'approcher de la pièce. [0..255]

Gain: Paramètre définissant la nervosité de l'asservissement du gap. [0..255]

epsilon: Consigne de position relative. Une valeur négative ordonne un retrait de l'électrode, alors qu'une valeur positive une avance. [-127..127]

L'algorithme de la figure 5.24 est digitalisé par l'équation [5.10] et implémenté dans le microcontrôleur (SRV) présenté au §5.5. La période d'échantillonnage de la boucle de réglage est divisée d'un facteur 2 par rapport aux machines à plongée standards d'AGIE et fixée à 500 μ s (2 kHz). Comme nous le constaterons dans les simulations (cf. §6.3.2), cette période est adaptée à la dynamique du robot Delta³ III.

$$\text{Tension moyenne du gap digitalisée: } td = \frac{U_{fsm}}{U_0} \cdot 126 \quad [5.8]$$

$$\text{Courts-circuits digitalisé: } cc = \frac{T_{6V}}{T_{on}} \cdot 126 \quad [5.9]$$

$$\text{Consigne de position } \epsilon = (td + Compr - cc - 127) \cdot \frac{Gain}{128} \quad [5.10]$$

U_{fsm} : tension moyenne du gap durant T_{on} .

U_0 : tension d'amorçage^{xviii}.

T_{6V} : durée de la tension du gap au dessous de 6 volts durant T_{on} .

T_{on} : temps durant lequel la tension est appliquée par le générateur.

^{xvii} La tension de décharge U_c d'une impulsion érosive se situant entre 20 et 35 volts, la tension de détection des courts-circuits doit être inférieure. Dans les machines AGIE, elle est fixée par expérience à 6 volts.

^{xviii} Nous avons fixé U_0 à 200V pour tous les perçages présentés au chapitre 7. (cf. Annexe VII)

5.8 Le pousse-fil (dispositif d'avance d'électrode)

L'usure des électrodes en μ EDM est importante: 10-30% de la matière érodée sur la pièce. Il est donc nécessaire de disposer d'un mécanisme permettant de compenser cette usure. Un petit dispositif, que nous appellerons 'pousse-fil', a été conçu pour être utilisé avec le Delta³ III. La photo 5.25, le représente fixé sur la sortie du robot.



lavage
(eau déionisée)

Fig. 5.25

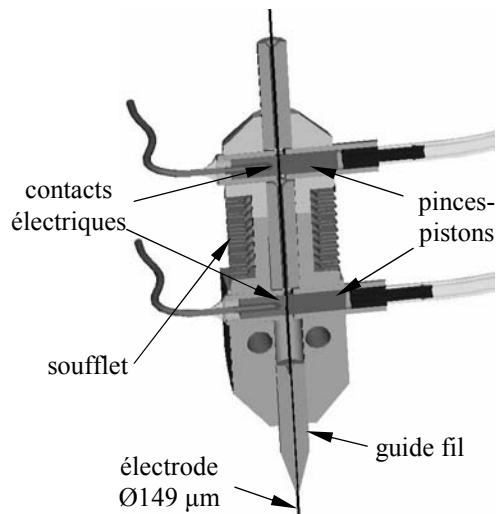


Fig. 5.26

Système de compensation d'usure (pousse-fil)
(encombrement 15x10x10 mm³, poids 20 grammes)

Grâce à l'utilisation d'actionneurs pneumatiques (génération de l'énergie en dehors du système), l'encombrement et la masse du mécanisme ont pu être minimalisés. Le pousse-fil est constitué de deux pincettes-pistons qui serrent le fil (fig. 5.26). Celle du haut est montée sur un élément ressort mobile: le soufflet. Celle du bas est fixe. Son principe de fonctionnement est basé sur celui d'un *inchworm*^{xix} pneumatique. La figure 5.27 indique les séquences des mouvements à appliquer aux pincettes et au soufflet, pour avancer l'électrode d'un pas

Durant l'érosion, les deux pincettes sont fermées. Elles bloquent l'électrode et font également fonction de contacts électriques.

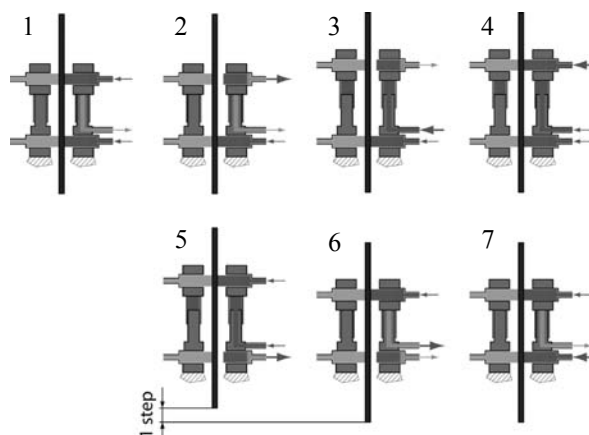


Fig. 5.27: Principe de fonctionnement 'inchworm'

^{xix} Le principe 'inchworm' est une technique d'avance spécifique à la microrobotique, il est décrit par la figure 5.27.

Le guide-fil est aligné sur les contacts électriques pour l'utilisation des électrodes de $\varnothing 149 \mu\text{m}$ (fig. 5.26). Une électrode de diamètre différent n'est pas utilisable sur notre prototype, car elle est pliée à la fermeture des pinces.

La résolution des pas, dépend de la pression du soufflet et de la fréquence à laquelle les séquences représentées à la figure 5.27 sont exécutées. Pour obtenir une 'bonne' répétitivité des pas ($\pm 5 \mu\text{m}$), nous avons fixé leur longueur à $130 \mu\text{m}$.

5.9 La fonction 'touch'

Pour détecter la surface de la pièce à usiner avec l'électrode, nous avons implémenté la fonction *touch*. Cette fonction permet de positionner la pointe de l'électrode à une distance bien définie de la pièce, avant de commencer l'usinage. Le contrôle de l'usure de l'électrode se fait également avec le *touch*.

Le principe est le suivant: nous appliquons une tension de 60 V entre l'électrode et la pièce en limitant le courant à 5 mA. Le robot est programmé pour s'approcher de la surface de la pièce à une vitesse de $30 \mu\text{m/s}$. Lorsqu'un courant est détecté, le robot est stoppé et un mouvement de retrait de $20 \mu\text{m}$ est exécuté.

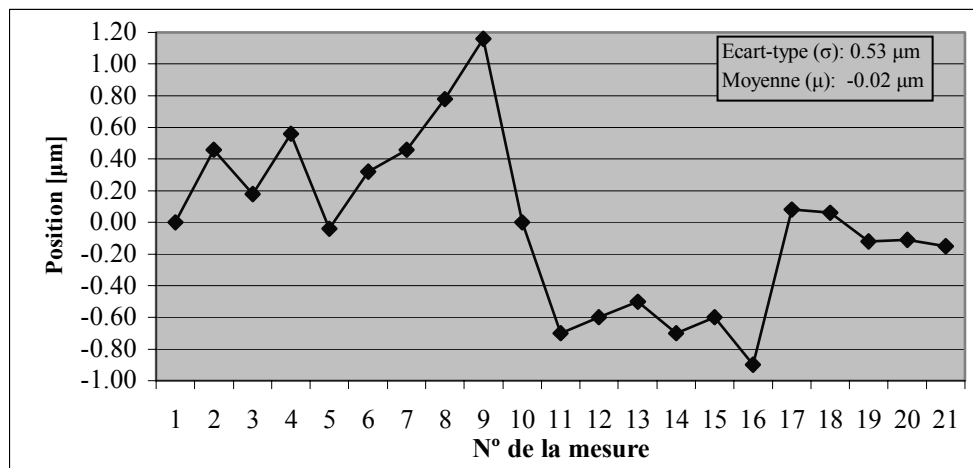


Fig. 5.28: Répétitivité du touch en Z

A la figure 5.28, nous avons représenté une série de mesures effectuées avec la fonction *touch*, pour évaluer sa répétitivité et sa précision. La précision est influencée par l'état de la pointe de l'électrode, l'état de surface de la pièce, le diélectrique ou encore la température. Notons qu'à chaque *touch*, la pièce et l'électrode s'use légèrement, même si le courant, limité à 5 mA, minimise l'énergie.

A raison de 45 secondes par mesure, les 21 *touch* représentés sur figure 5.28 ont été effectués en 15 minutes sur la même position. Pour estimer la précision, nous donnons l'écart-type sur les 21 mesures: $\sigma = 0.53 \mu\text{m}$.

Ni la compensation de l'usure de l'électrode, ni son positionnement par rapport à la surface de la pièce, n'a d'influence sur la précision de motifs traversants (par exemple des perçages). Pour nos travaux, une précision du *touch* de l'ordre du micromètre est suffisante. Cette fonction sera utilisée à partir d'une seule mesure, sans calculer de valeur moyenne.

5.10 Génération d'un bruit aléatoire (vibrations)

Les expériences avec une aide ultrasonique (§2.5.4 & §2.5.5) et différentes publications traitant des vibrations passives (§4.4) montrent que pour certaines conditions d'érosion, des mouvements à haute fréquence entre la pièce et l'électrode, améliorent le taux d'enlèvement de matière de manière significative. En général, des oscillations sinusoïdales sont transmises à la pièce à usiner, par l'intermédiaire d'un élément piézo-électrique. Leur amplitude maximale est de quelques dizaines de micromètres et leur fréquence varie selon les publications, de 2 à 20 kilohertz.

Les particularités du robot Delta³ III comme: les guidages à articulations élastiques, les moteurs linéaires à entraînement direct et la faible masse mouvement, le prédisposent pour générer des vibrations. Nous avons introduit dans la commande, une fonction permettant de générer un bruit aléatoire. Cette fonction est implémentée dans l'algorithme d'asservissement de position, en ajoutant un nombre aléatoire borné à la consigne de position (cf. Annexe VI, fig. ix). L'amplitude maximale de ce bruit est configurable et sa fréquence de ~ 3 KHz, est fixée par la période d'échantillonnage des régulateurs de position (300 μ s).

Ce bruit fait osciller l'électrode à la manière d'un élément piézo-électrique. Cette fonction fait partie intégrante de notre petite machine EDM: pas de mécanique à ajouter, ce qui évite des sources d'imprécisions et des coûts supplémentaires (cf. §4.4.1).

Nous avons vérifié le faible couplage dynamique entre les axes (cf. §5.3.2): la génération de vibrations d'amplitude de ± 2 μ m sur un axe, n'est pas perceptible sur les deux autres.

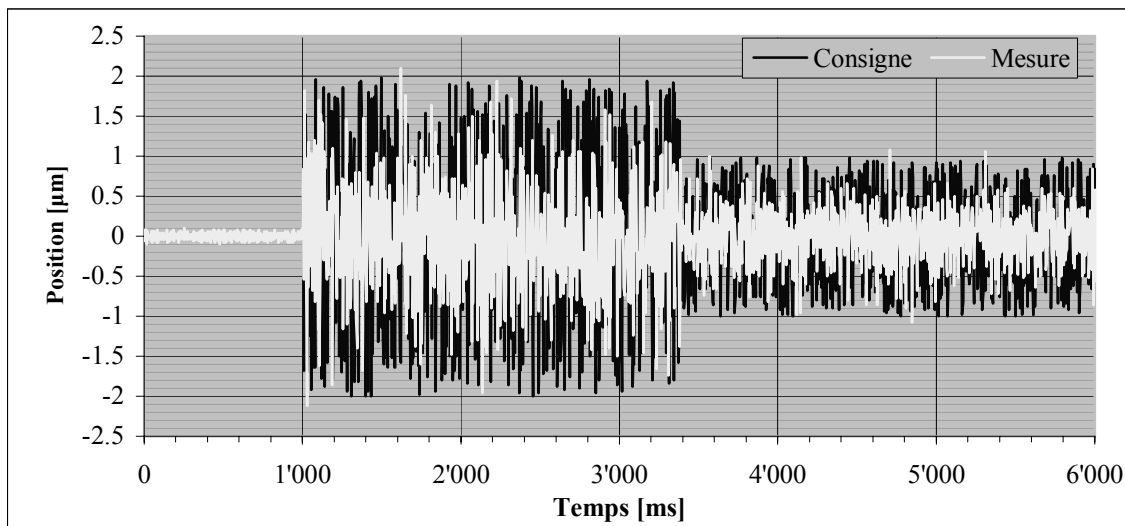


Fig. 5.29: Mesure des vibrations (~ 3 KHz) sur l'axe Z du Delta³ III

Les courbes du graphique 5.29 représentent la *Consigne* et la *Mesure* de position de l'axe Z du Delta³ III. Durant la première seconde, la consigne reste à 0 et le bruit mesuré correspond au bruit de l'asservissement de position présenté au §5.6. Après une seconde, nous avons inséré un bruit d'amplitude de ± 2 μ m et en dernier d'amplitude de ± 1 μ m.

La courbe *Mesure* indique que le bruit est borné à l'amplitude maximale de la consigne (± 2 μ m & ± 1 μ m). En programmant une amplitude inférieure au gap, il n'y a pas de risque de collision entre l'électrode et la pièce. Notons encore, que ces vibrations peuvent être générées indépendamment sur les trois axes.

5.11 Timer de lavage et timer de compensation

5.11.1 Introduction

Ces deux fonctions sont présentées ensemble, car l'une découle de l'autre.

La fonction *timer de lavage* ou plus communément appelée *timer*, est un standard sur les machines à enfonçage. Seul le terme est propre à l'entreprise à AGIE et provient de la microinformatique^{xx}.

La fonction *timer de compensation* est par contre spécifique à notre prototype. Elle fait sortir l'électrode du guide fil, en minimisant les temps morts durant l'érosion.

5.11.2 Timer de lavage

Les *timer de lavage* sont utilisés sur les machines EDM à plongée, pour régénérer le diélectrique. Ils consistent en des mouvements de va-et-vient rapides de l'électrode, permettant d'évacuer les particules érodées de la zone du gap. L'amplitude, la vitesse et la fréquence de ces mouvements sont configurables.

Pour expliquer leur principe de fonctionnement, nous prenons les valeurs des *timer* visibles à la figure 7.19 du §7.4:

Toutes les secondes, le générateur est éteint et l'électrode monte 150 μm . Elle redescend immédiatement de 145 μm , où le générateur est à nouveau enclenché pour continuer l'érosion. La différence de 5 μm entre la descente et la montée est appelée *floating*. Le *floating* permet d'éviter la collision de l'électrode avec d'éventuels débris sur le front d'érosion.

Citons quelques inconvénients de ce type de timer:

- 1) Durant la durée du mouvement du *timer* la machine n'érode pas.
- 2) A la fin du *timer*, l'électrode est placée plus haut que son point départ pour éviter une éventuelle collision; ce qui ralentit la vitesse d'usinage.
- 3) Les mouvements de recul de 150 μm visibles à la figure 7.19 ne permettent pas à l'électrode de sortir du perçage, donc peu de diélectrique frais peut être amené dans la zone du gap.

Un autre type de *timer de lavage* est couramment utilisé sur les machines à enfonçage traditionnelles. Au lieu de synchroniser les mouvements de lavage dans le temps, ils sont activés en fonction de la détection du nombre de courts-circuits, de la tension moyenne du gap ou du nombre de bonnes étincelles. Pour ce type de *timer*, un autre inconvénient s'ajoute à ceux cités précédemment:

- 4) Ils réagissent à une statistique et ne sont pas immédiats. En micro-électroérosion, les petits gaps et la difficulté de générer un flux de diélectrique pour évacuer les particules érodées, induisent des changements des conditions d'usinage rapides; il est nécessaire de réagir en conséquence, donc ce genre de *timer* est difficilement utilisable.

5.11.2.1 Remarque

Le manque d'efficacité des *timer de lavage* en μEDM est à mettre en relation avec les gradients de contamination élevés, calculés au §6.3. La simulation de micro-perçages présentée à la figure 6.11, indique des pointes de contamination^{xxi} de 2 % (4^{ème} graphe) à une fréquence correspondant à la fréquence d'asservissement du gap (3^{ème} graphe). Pour abaisser la contamination efficacement, les mouvements de lavage devraient être générés à chaque mouvement d'avance-recul contrôlé par le servo.

^{xx} Un *timer* en microinformatique est une interruption activée à intervalles réguliers. Sur les machines EDM à plongée d'AGIE, les mouvements de lavage portent le même nom, car ils sont générés par le *timer* d'un microcontrôleur.

^{xxi} Le terme **contamination** désigne le pourcentage volumique de matière érodée présent dans le diélectrique (la propreté du diélectrique).

Nous pouvons énoncer la règle suivante: ‘les *timer de lavage* sont efficaces, si leur fréquence de déclenchement pour stabiliser la contamination est inférieure d’au moins un facteur deux à la fréquence des mouvements d’avance-recul de l’asservissement du gap’. La présence d’une boucle de réglage de position électrode-pièce ne se justifie, que si quelques oscillations de l’électrode sont commandées avant l’intervention d’un *timer de lavage* !

5.11.3 Timer de compensation

La précision des micro-perçages est influencée par les deux considérations suivantes:

- La longueur d_1 de l’électrode sortant du guide fil au début du perçage (fig. 5.30).
- La distance entre l’extrémité du guide fil et la pièce à usiner durant l’usinage.

Sur notre prototype, le guide-fil accompagne le mouvement du robot dans toutes les directions. Pour tenir compte des deux considérations émises ci-dessus, nous avons conçu la fonction *timer de compensation*. Elle permet de faire sortir l’électrode du guide fil, en minimisant les temps morts durant l’érosion.

La figure 5.30, représente les différentes phases d’un perçage avec *timer de compensation*.

- 1) Au début de l’usinage, la pointe de l’électrode sort du guide fil d’une distance d_1 et le robot est positionné au niveau A.
- 2) Lorsque le robot atteint le niveau C, la fonction *timer de compensation* est enclenchée. L’érosion est stoppée et l’axe Z monte au niveau B.
- 3) Le pousse-fil est activé et l’électrode sort du guide fil d’une distance d_2 .
- 4) Le *timer de compensation* se termine, le générateur est enclenché et l’érosion continue.
- 5) Le robot atteint à nouveau le niveau C (idem phase 2), ce qui déclenche un *timer de compensation*. Les phase 3 à 5 sont répétées, jusqu’au perçage complet.

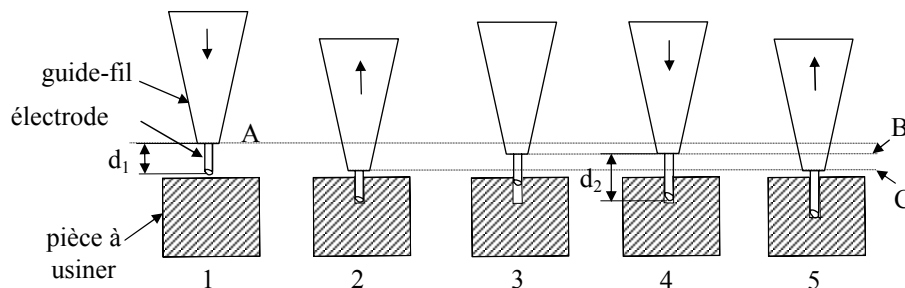


Fig. 5.30: Les différentes phases d’un timer de compensation

La fonction *timer de compensation* est spécifique à notre prototype. Sur les machines EDM conventionnelles dédiées au micro-perçage, le guide fil est immobile par rapport à la direction d’usinage (axe Z); la distance entre ce dernier et la pièce à usiner ne varie pas durant l’érosion.

5.12 Conclusion

Une analyse du robot Delta³ III, a montré qu’il est adapté aux exigences de nos recherches. Petites courses et peu de masse en mouvement, sont des contraintes à respecter pour maximiser la dynamique, tout en gardant une bonne précision.

En différenciant la μ EDM d’un procédé d’usinage classique, nous avons expliqué que la complexité d’un processus d’usinage asservi, nécessite un concept de CNC adapté. En particulier, les temps de latence dans la boucle d’asservissement du gap doivent être minimisés. Le choix de la

commande AGIE SIT-B a été justifié en expliquant ses particularités. Une mesure de suivi de trajectoire durant l'érosion (fig. 5.22 et 5.23), a confirmé la pertinence de nos solutions.

Les expériences qui seront présentées dans la suite de ce mémoire, nécessitent des accessoires et des fonctions spécifiques. Ces différents outils conçus dans le cadre de ce travail de thèse, ont été présentés et expliqués dans les derniers paragraphes de ce chapitre.

Nous avons montré que les deux concepts dynamique et précision, sont conciliables en respectant certaines contraintes. Nous proposons une machine dédiée à la μ EDM permettant de contrôler l'asservissement du processus, avec des temps de réaction impossibles à atteindre sur des machines EDM classiques.

Ce chapitre a expliqué et validé nos choix (robot parallèle sans frottement et commande AGIE SIT-B), pour la conception et la réalisation d'un prototype à vocation industrielle, d'une machine à électroérosion adaptée au micro-usinage.

6 Modélisation & simulations

6.1 Introduction

De manière à comprendre et analyser les phénomènes intervenant en micro-électroérosion, nous avons élaboré un modèle pour simuler le comportement d'une machine EDM. Notre approche est macroscopique, dans le sens où nous ne nous intéressons pas aux phénomènes physiques durant une étincelle. Nous nous plaçons au niveau des algorithmes de réglage, avec une vision statistique des phénomènes mesurés dans le gap. Le but est de comprendre le comportement de notre prototype et de montrer l'intérêt de disposer d'une bonne dynamique, lors d'usinages de petites dimensions. A partir de ce modèle, nous édictons des règles pour exploiter au mieux l'enlèvement de matière par électroérosion, dans le cas particulier du micro-usinage.

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons le modèle et son implémentation dans Matlab-Simulink. Dans la deuxième partie, nous présentons une simulation de référence avec des paramètres calibrés sur les mesures expérimentales présentées au chapitre 7. A partir de cette configuration reflétant notre prototype, nous varions différentes grandeurs, comme la réponse en fréquence de la mécanique, le lavage, la distance du gap,... et expliquons par des simulations leurs influences au niveau du processus. Notre modèle est calibré sur des mesures établies pour le cas particulier du micro-perçage, mais les conclusions restent transposables à d'autres types d'usinages.

6.2 Description du modèle

Notre modèle se compose des quatre blocs représentés à la figure 6.1. Au début de ce paragraphe, nous présentons succinctement leur fonction, de manière à donner une vue d'ensemble au lecteur. Chacun des blocs est ensuite décrit en détail dans les sous-paragrophes qui suivent. Les symboles utilisés dans les schémas blocs présentés dans ce chapitre, sont des standards utilisés par le logiciel de simulation Matlab-Simulink.

L'usinage de référence pour tous nos travaux est le perçage. Nous avons donc modélisé le processus en se basant sur ce type d'usinage.

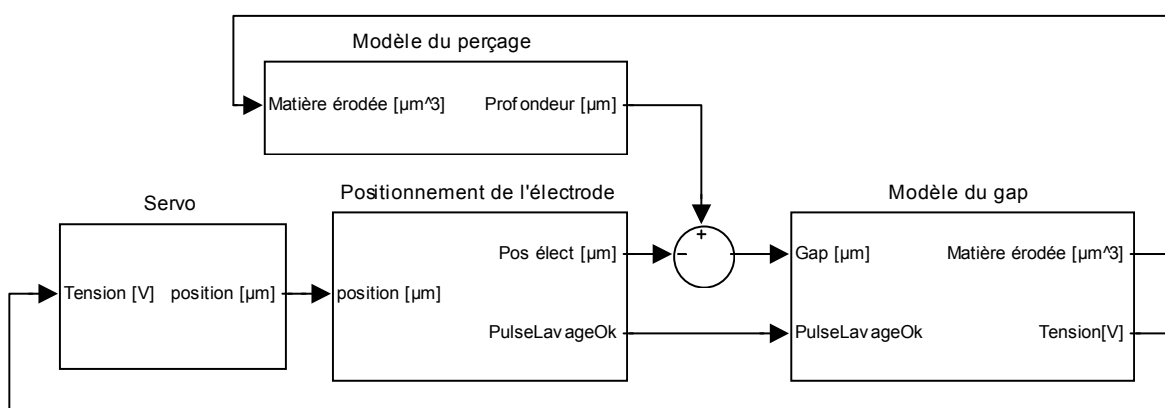


Fig. 6.1: Schéma bloc de la modélisation du processus de μ EDM

Description du schéma bloc de la figure 6.1

- 1) Le bloc '*Servo*' émet des consignes de position, destinées à ajuster la distance du gap en fonction de la tension pièce-électrode.

2) Le bloc '*Positionnement de l'électrode*' comprend le régulateur de position et la fonction de transfert du robot Delta³. A la sortie de ce bloc, le signal *Pos élect* représente la position de l'électrode.

Un mouvement de recul de l'électrode d'une amplitude supérieure à $2 \mu\text{m}^i$, génère un pulse de lavage: le signal *PulseLavageOk*. Ce signal met à zéro la variable de contamination, représentant le pourcentage de matière érodée se trouvant dans la zone du gap.

3) Le bloc '*Modèle du gap*' simule le générateur d'impulsions électriques, le claquage des étincelles et la contamination du gap. Les paramètres d'entrée sont la distance du *gap* et le *PulseLavageOk*. Ce dernier signal a pour fonction la mise à zéro de la variable de contamination.

Les deux valeurs calculées par ce bloc, sont le volume de matière érodée et la tension du gap.

4) Le bloc '*Modèle du perçage*' transforme le volume de matière érodée en un déplacement vertical dépendant du diamètre de perçage.

6.2.1 Bloc '*Servo*'

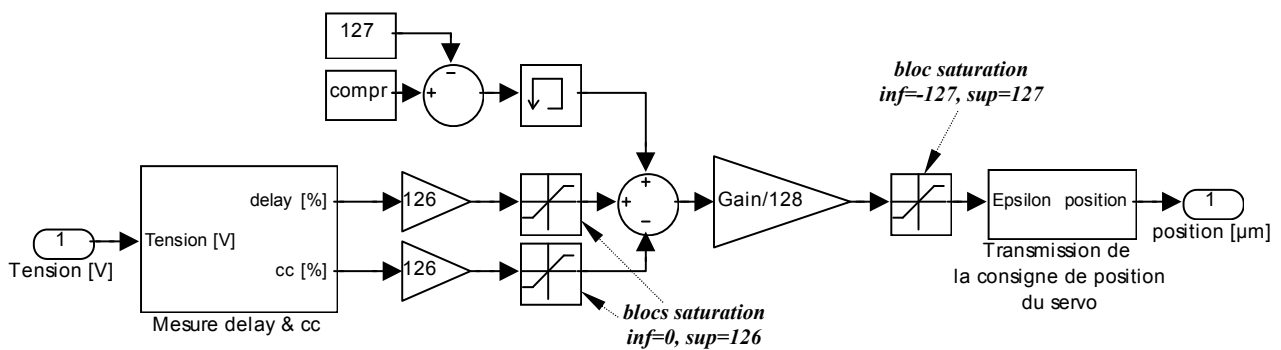


Fig. 6.2: Bloc '*Servo*' (cf. fig. 6.1)

Le bloc '*Servo*' représenté à la figure 6.2, modélise la mesure de la tension du gap et les algorithmes de réglage implémentés dans le microcontrôleur de notre prototype.

'*Mesure delay & cc*' (cf. §6.2.1.1) calcule les valeurs de court-circuit (*cc*) et de retard à l'amorçage (*delay*), à partir de la tension du gap. Ces valeurs sont utilisées par l'algorithme d'asservissement du processus (cf. §5.7), qui génère une consigne d'avance ou de recul de l'électrode. Le dernier bloc '*Transmission de la consigne de position du servo*', simule le canal de transmission implémenté dans la commande de notre prototype (fig. 7.27). Ce canal introduit une atténuation et un retard des consignes générées par le servo.

6.2.1.1 Modélisation des mesures de courts-circuits et delay (bloc '*Mesure delay & cc*')

La figure 6.3 représente le modèle implémenté pour simuler la mesure des courts-circuits et le delay.

Pour le delay, une mémoire est incrémentée d'une unité de temps lorsque la tension du gap est supérieure à U_{td} . Une nouvelle valeur du pourcentage du temps avec une tension supérieure à U_{td} est calculée à chaque boucle de réglage ($h_{servo}=500 \mu\text{s}$).

Les courts-circuits (*cc*) sont évalués de manière similaire, lorsque la tension de gap est inférieure à U_{cc} .

ⁱ Au cours de ce chapitre, à chaque fois que nous mentionnons pour la première fois un paramètre, nous donnons la valeur utilisée pour la simulation présentée à la figure 6.12. Cette simulation correspond aux meilleures conditions d'usinage obtenues avec notre prototype.

Nous avons fixé $U_{td}=50V$ et $U_{cc}=6V$. Remarquons qu'en μEDM , ces valeurs ont peu d'influence. Comme nous le verrons plus loin (fig. 6.10), les transitions des impulsions érosives entre la tension à vide $U_0=200V$ et $0V$ sont très rapides, de l'ordre de la microseconde. Dès lors les algorithmes de réglages voient: soit $0V$ soit $200V$; rarement les valeurs intermédiaires.

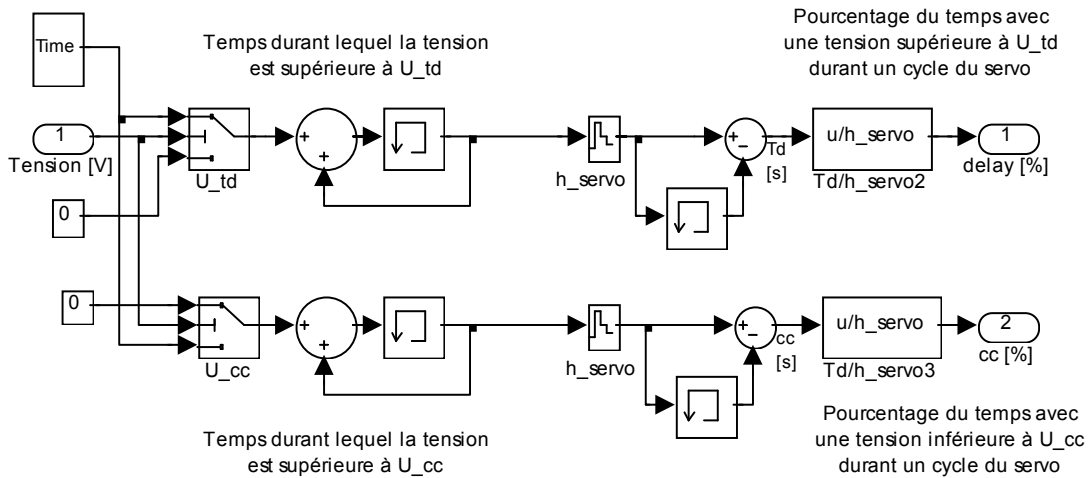


Fig. 6.3: Bloc 'Mesure delay & cc' (cf. fig. 6.2)

6.2.2 Bloc 'Positionnement de l'électrode'

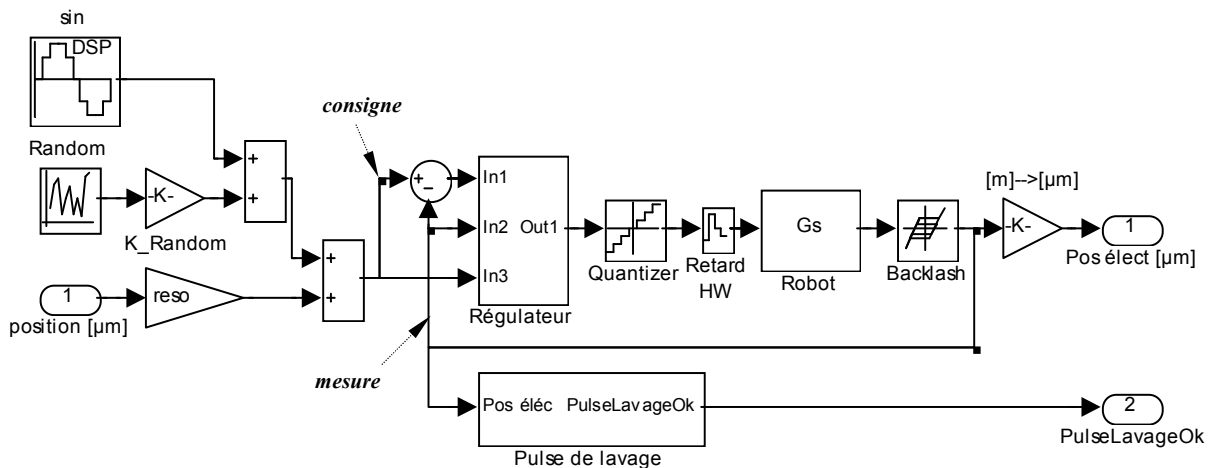


Fig. 6.4: Bloc 'Positionnement de l'électrode' (cf. fig. 6.1)

Le bloc représenté à la figure 6.4, simule le comportement du robot Delta³ associé au contrôleur de position implémenté dans la commande AGIE SITB. A la sortie du 'Régulateur' (cf. Annexe VI), nous prenons en considération une quantification du courant de 3mA/bit ('Quantizer') et un retard de la montée du courant de 100 μs ('Retard HW').

Le Delta³ est modélisé dans le bloc 'Robot' par sa fonction de transfert G_s (cf. §6.2.2.1, éq. [6.3]). Nous avons également introduit la possibilité de prendre en considération une erreur d'inversion ('Backlash'). Notons que ce type d'erreur est absent d'un mécanisme à entraînement direct et à structure flexible comme le Delta³.

Le bloc 'Pulse de lavage' génère un signal lorsque le robot effectue un mouvement de recul supérieur à 2 μm . Ce signal est utilisé par le bloc 'Modèle du gap', pour simuler une action de renouvellement du diélectrique.

6.2.2.1 Modélisation du Delta³ (bloc 'Robot' fig. 6.4)

Un guidage linéaire à articulation élastique, peut être modélisé par un oscillateur mécanique élémentaire [hol85a]. La figure 6.5 représente le système composé d'une masse m , un ressort k , un amortisseur c et une force extérieure $f(t)$ agissant sur la masse.

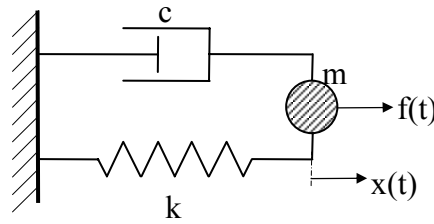


Fig. 6.5:
Oscillateur élémentaire linéaire de la mécanique

m : masse en mouvement [kg]
 c : coefficient d'amortissement visqueux [N/(m·s⁻¹)]
 K_r : raideur [N·m⁻¹]

L'équation de mouvement du système s'écrit:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + K_r x = f(t) \quad [6.1]$$

En faisant apparaître la fréquence propre ω_n et l'amortissement réduit ξ [6.2], l'équation de transfert $G(s)$ du système est:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_r}{m}} \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{K_r \cdot m}} \quad [6.2]$$

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{m \cdot s^2 + c \cdot s + K_r} = \frac{1/m}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad [6.3]$$

Les valeurs de référence correspondant au robot Delta³ III sont:

$$\begin{aligned} m &= 350 \text{ g}^{\text{ii}} \\ c &= 0.466 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1} \\ K_r &= 400 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \end{aligned}$$

6.2.3 Bloc 'Modèle du gap'

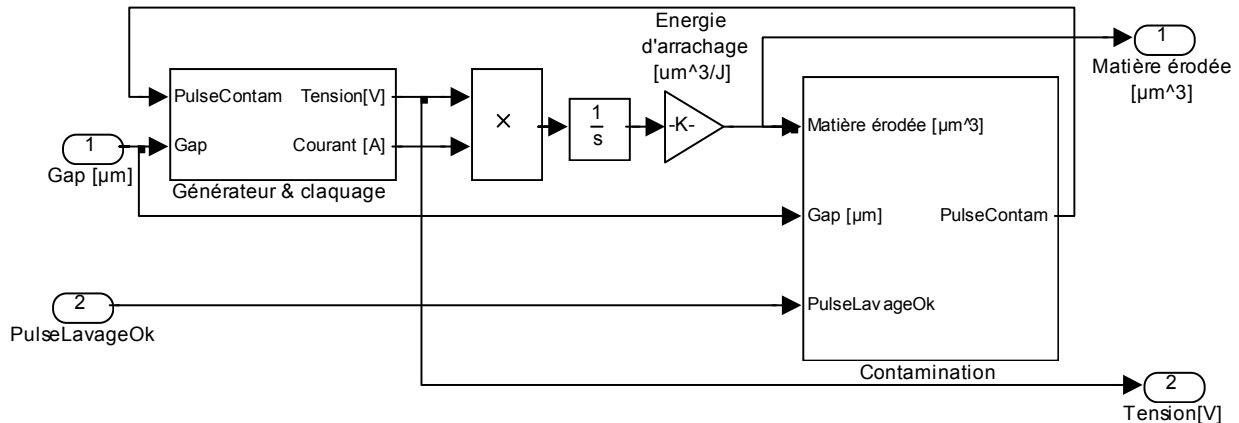


Fig. 6.6: Bloc 'Modèle du gap' (cf. fig. 6.1)

La figure 6.6 représente la modélisation du processus de μ EDM. Le bloc 'Générateur & claquage' simule le générateur d'impulsion et les conditions autorisant une étincelle érosive. Ces dernières dépendent du *Gap* et de la contamination du diélectrique *PulseContam*.

Les signaux de sortie *Tension [V]* et *Courant [A]*, permettent de calculer l'énergie des étincelles érosives. Elles 'arrachent' une quantité de matière dépendant des matériaux de la pièce et de l'électrode (éq. [6.4]). En se basant sur les expériences présentées au chapitre 7, nous avons fixé le coefficient d'arrachage α à $700 \mu\text{m}^3 \cdot \text{mJ}^{-1}$ (électrode en tungstène et pièce en acier).

ⁱⁱ Pour les simulations nous avons fixés la masse en mouvement vue par les moteurs à 350 g, de manière obtenir une réponse à un saut de position similaire à la mesure de la fig. 5.13.

$$V_e = \alpha \cdot \int_0^{t_i} U_e(t) \cdot I_e(t) \cdot dt \quad [6.4]$$

- α : Coefficient d'arrachage [$\mu\text{m}^3 \cdot \text{mJ}^{-1}$]
 $U_e(t)$: Tension durant la décharge [V]
 $I_e(t)$: Courant durant la décharge [A]
 t_i : Durée de l'impulsion [μs]

Le bloc 'Contamination' de la figure 6.6, détermine le pourcentage de matière érodée dans le volume de diélectrique situé entre l'électrode et la pièce (fig. 6.7). Ce pourcentage varie dans le temps en fonction du taux d'enlèvement de matière, du lavage induit par le flux de diélectrique (décontamination) et des mouvements de l'électrode. Nous avons fixé le taux de décontamination à $3000 \mu\text{m}^3/\text{ms}$ et le mouvement de recul de l'électrode pour mettre à zéro la variable de contamination, à $2 \mu\text{m}$. Lorsque le taux de contamination dépasse 2%, le signal *PulseContam* force la tension du gap à zéro, de manière à simuler des courts-circuits.

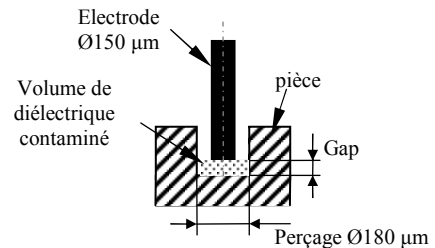


Fig. 6.7: Représentation du volume de diélectrique contaminé durant un perçage

6.2.3.1 Bloc Générateur & claquage

Pour générer des impulsions de faible énergie, nous avons utilisé le générateur AGIE en mode relaxation pour toutes nos expériences (chap. 7). Le schéma bloc de la figure 6.8 modélise ce générateur et le claquage des étincelles.

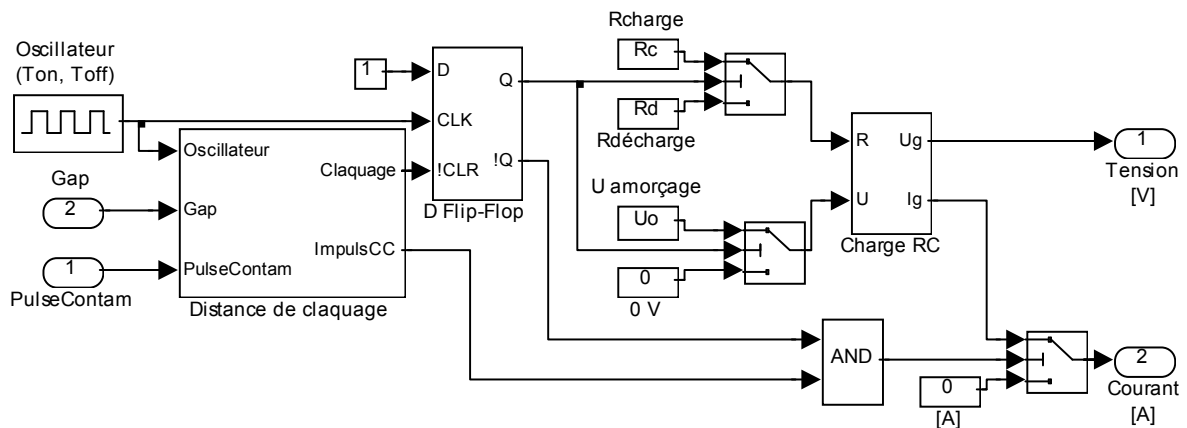


Fig. 6.8: Bloc 'Générateur & claquage' (cf. fig.6.6)

Le bloc 'Charge RC' avec ces deux entrées R et U, simule la charge et la décharge d'un condensateur (fig. 6.9). A la sortie du bloc, U_g et I_g simulent respectivement la tension et le courant dans le gap (fig. 6.10).

L'énergie des impulsions est fixée par l'énergie contenue dans la capacité $C=5\text{nF}$. La décharge de la capacité a lieu, lorsque la distance électrode pièce correspond à la distance de claquage. La résistance $R_d=50\Omega$ correspond à la résistance du canal de plasma durant la décharge érosive. Un oscillateur contrôle la charge de la capacité C . Elle est chargée tous les $T_{\text{off}}=13\mu\text{s}$, durant $T_{\text{on}}=3\mu\text{s}$, à travers une résistance $R_c=10\Omega$ et avec une tension $U_0=200\text{V}$ ⁱⁱⁱ.

Les graphes de la figure 6.10, représentent la tension et le courant simulés par le modèle. Le signal *oscillateur* visible sur le graphe de la tension est adimensionnel; il représente la charge de la capacité tous les $T_{\text{on}}+T_{\text{off}}$.

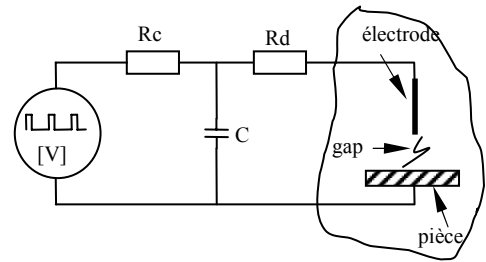


Fig. 6.9: Générateur à relaxation

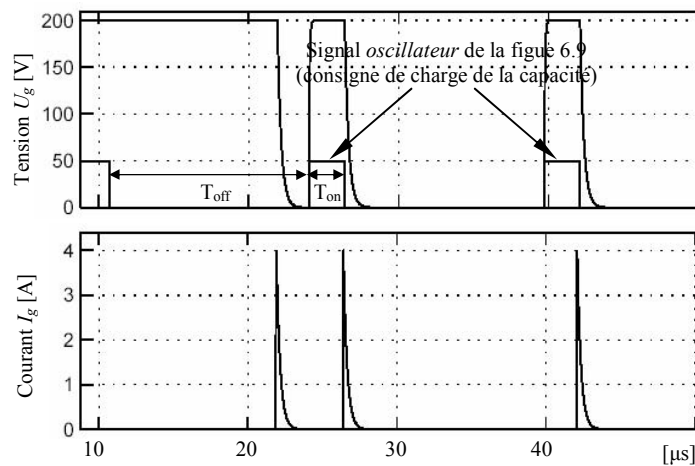


Fig. 6.10: Simulation des impulsions

6.3 Simulations

Dans ce paragraphe nous exposons quelques simulations issues du modèle décrit ci-dessus. Nous présentons tout d'abord, une simulation reflétant les meilleures conditions de perçage expérimentales obtenues au chapitre 7. A partir de ces conditions, nous varions successivement différents paramètres pour montrer leur influence sur le processus.

6.3.1 Calibrage des paramètres

La figure 6.11 présente une simulation du perçage d'un trou de diamètre de $180\mu\text{m}$, dans des conditions similaires aux perçages expérimentaux présentés sur les figures 7.37 et 7.38. La vitesse moyenne de perçage calculée par la simulation est de $55\mu\text{m/s}$.

Les deux premiers graphes de la figure 6.11 représentent respectivement la tension et le courant du gap. En se reportant à la figure 6.10, le lecteur peut observer à une échelle de temps inférieure d'un facteur 1000 (agrandissement), les impulsions singulières. Notons que les paquets d'impulsions de courants contiennent en moyenne entre 100 et 150 impulsions érosives.

Le troisième graphe de la figure 6.11, représente la distance du gap ($Gap [\mu\text{m}]$ de la figure 6.1). Nous avons fixé arbitrairement une bande de claquage entre 7 et $4\mu\text{m}$. Au-dessus de $7\mu\text{m}$, aucune décharge n'est possible; la tension entre les électrodes reste à la tension d'amorçage $U_0=200\text{V}$. Si

ⁱⁱⁱ Les valeurs de T_{off} , T_{on} , U_0 et C , correspondent à la technologie (cf. Annexe VII) que nous avons utilisée pour les expériences présentées au chapitre 7. Les valeurs de R_d et R_c ont été fixées par une estimation basée sur ces mêmes expériences.

la distance du gap est inférieure à $4\ \mu\text{m}$: courts-circuits. La tension du gap est nulle et pour simplifier la simulation, le courant reste à 0.

Sur les deux courbes en haut du graphe, nous avons représenté deux signaux adimensionnels: les pulses de contaminations et les pulses aléatoires de courts-circuits. Les premiers sont générés lorsque la contamination ($4^{\text{ème}}$ graphe) atteint 2% et les seconds simulent un pourcentage de temps de courts-circuits (10%), généré par les particules érodées devant être évacuées entre l'électrode et les parois du perçage. Ces 2 types de pulses ont pour effet de forcer la tension du gap à zéro.

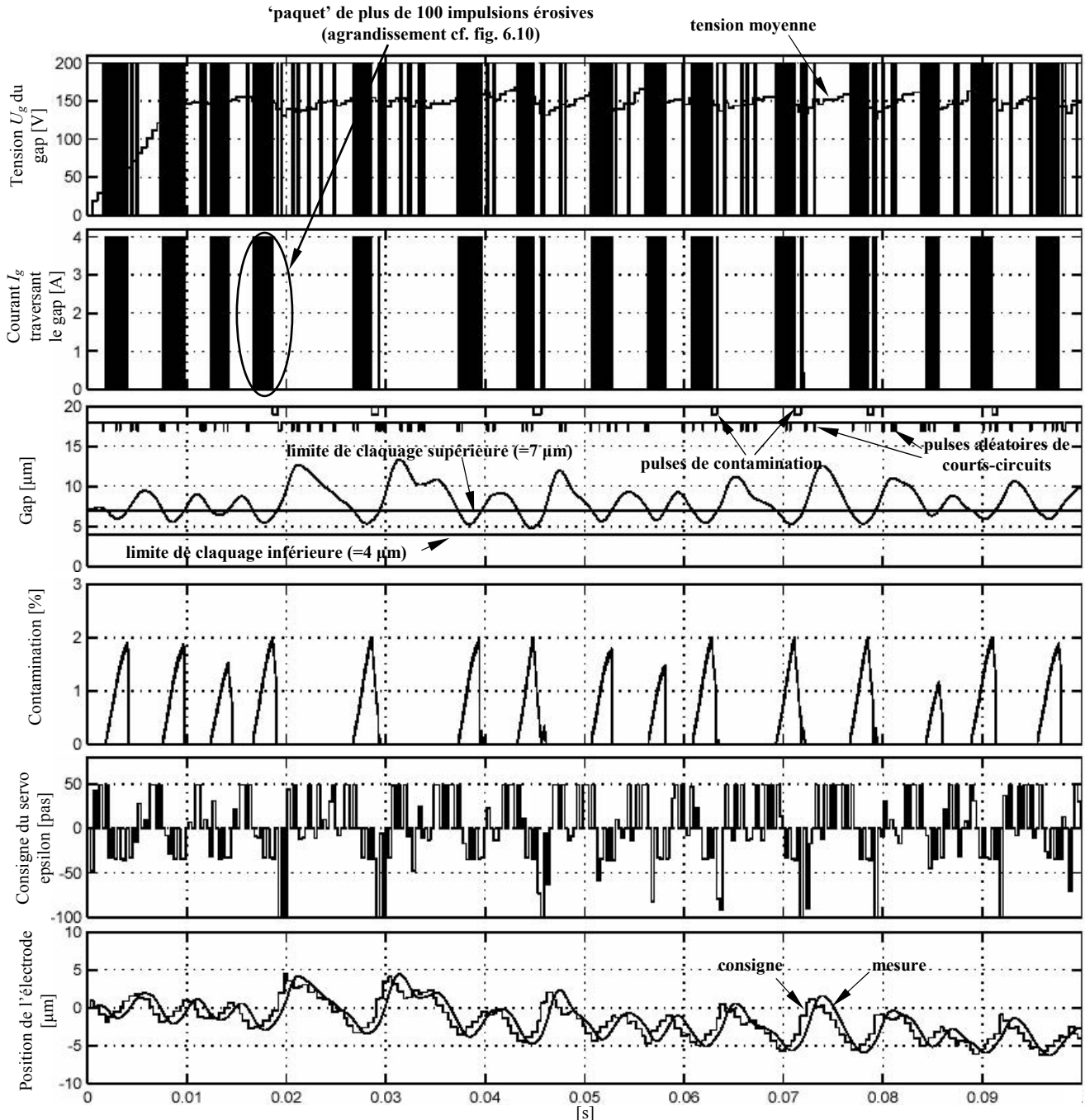


Fig. 6.11 Simulation des meilleures conditions d'usinage obtenues avec notre prototype

Le $4^{\text{ème}}$ graphe représente le pourcentage de particules érodées présentes dans le diélectrique se trouvant dans la zone du gap (fig. 6.7). Nous constatons que lorsque le gap atteint la distance de claquage, la contamination croît jusqu'à atteindre la saturation fixée à 2%. Un pulse de

contamination simule alors un court-circuit, qui bloque l'érosion et génère un mouvement de recul à l'électrode.

Le 5^{ème} graphe trace les consignes de position générées par le servo (signal *Epsilon* de la figure 6.2)

Le 6^{ème} graphe représente le déplacement de l'électrode (signaux *consigne* et *mesure* de la figure 6.4).

6.3.1.1 Bande passante du servo à 76 kHz

De manière à vérifier le calibrage de notre modèle, nous comparons son comportement avec les mesures des expériences effectuées au §7.6.

En partant de la simulation présentée à la figure 6.11, nous diminuons la bande passante du canal de communication du servo de 1.2 MHz à 78 kHz et augmentons la résolution des pas du servo de 20nm à 100nm. De cette façon, nous simulons les mesures expérimentales représentées sur les graphes 7.29 et 7.33. En considérant la figure 6.12, nous constatons que les consignes du servo ont diminué d'amplitude par rapport à la figure 6.11 et que l'ajustement du gap est moins précis, à cause du retard de la transmission des consignes, introduit avec une bande passante à 78 kHz. Il en résulte une vitesse moyenne d'usinage simulée qui passe de 55 $\mu\text{m/s}$ à 35 $\mu\text{m/s}$; tendance confirmée par les expériences présentées au §7.6.

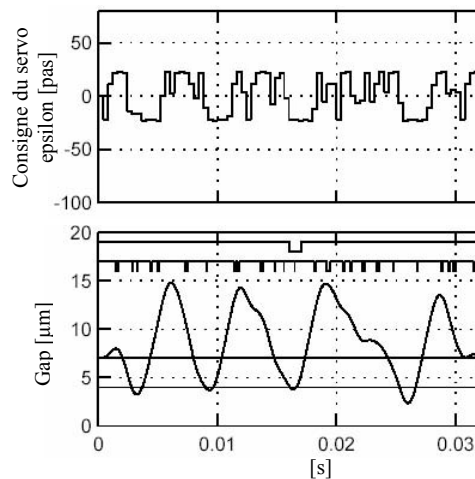


Fig. 6.12:
Simulation avec une bande passante du canal servo-interpolateur à 78 kHz (cf. fig. 7.29 et 7.33)

6.3.2 Influence de la dynamique

Dans ce paragraphe nous montrons l'intérêt de disposer d'un temps de réaction court. Notre but est de mettre en évidence les points de notre prototype à améliorer pour optimiser le processus.

Toujours en partant de la simulation présentée à la figure 6.11, nous avons simulé une boucle d'asservissement du servo, avec une période d'échantillonnage 5 fois plus rapide. Sur le schéma bloc de la figure 6.3, ceci revient à modifier le temps de maintien du signal des 2 blocs h_{servo} , et de le fixer à 100 μs . Le servo transmettant une consigne de positions tous les 100 μs au lieu de tous les 500 μs , nous avons également divisé par 5 la résolution des pas, afin de maintenir le même gain du servo (bloc 'Transmission de la consigne de position du servo' de la figure 6.2).

Résultat: l'influence de ces modifications est faible.

Nous avons alors diminué la période d'échantillonnage du régulateur de position du robot de 300 μs à 20 μs , pour avoir 5 cycles de réglage de position par consigne envoyée par le servo. Dans le schéma bloc, 'Transmission de la consigne de position du servo' de la figure 6.2, le temps de maintien de la consigne de position destinée au régulateur de position du robot Delta³ passe de 300 μs à 20 μs ; les paramètres du régulateur d'état de la figure 6.4 sont ajustés et enfin nous avons annulé le *retardHW* de la même figure (de 100 μs il est fixé à 0 μs).

Résultat: ces modifications influencent encore une fois très peu les simulations. Nous constatons une légère augmentation de la vitesse moyenne d'usinage, qui passe de 55 $\mu\text{m/s}$ à 60 $\mu\text{m/s}$.

Nous repartons avec les paramètres de la simulation présentée à la figure 6.11 et nous divisons la masse en mouvement du robot par 5 (diminution de 350g à 70g). Nous constatons alors un net changement du comportement (fig. 6.13). La fréquence du mouvement de va-et-vient augmente ($\sim 350\text{Hz}$) et la contamination ne dépasse pas 1%. Cette dernière constatation est la plus intéressante.

Résultat: avec une bonne dynamique il est possible de diminuer la contamination maximum, ce qui correspond à une optimisation du lavage.

Notons encore que la vitesse de perçage pour cette simulation a augmenté légèrement pour passer à $65\ \mu\text{m/s}$.

Pour augmenter la bande passante du robot, nous avons simulé une diminution de sa masse. Il est possible de modifier d'autres paramètres, se sera l'objet du sous-paragraphe suivant.

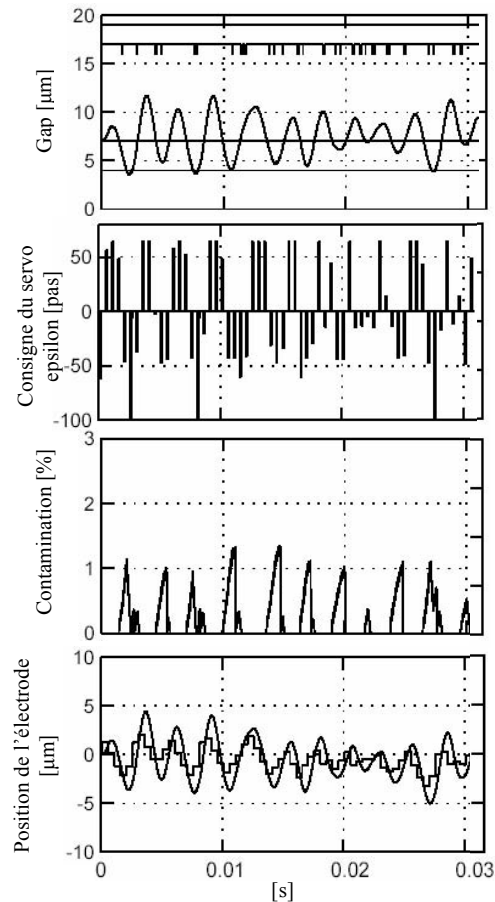


Fig. 6.13:
Masse du robot $m=70\text{g}$
(divisée par 5)

6.3.2.1 Analyse du système

Sur le graphe 6.14, nous avons représenté le diagramme de Bode du modèle masse-ressort-amortisseur représentant le robot Delta³ III (fig. 6.5). La courbe 1 représente sa réponse en fréquence réelle. En simulant une diminution de sa masse en mouvement d'un facteur 5, la courbe 2 indique une augmentation de la bande passante. La courbe 3, montre qu'une augmentation de la raideur des cols, diminue la réponse du système à basses fréquences, alors que le comportement à haute fréquence reste inchangé (1400 N/m correspond à la raideur des cols du Delta³ II). La courbe 4 montre que l'augmentation de la constante de couple des moteurs, permet d'augmenter la bande passante à basse fréquence.

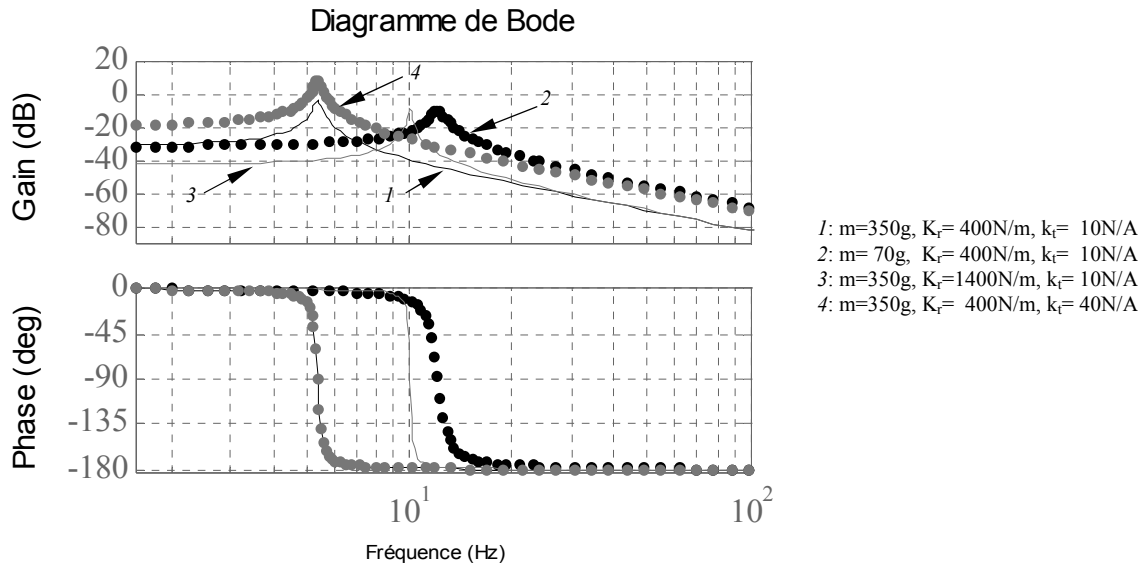


Fig. 6.14: Réponse en fréquence du robot
(analyse en boucle ouverte)

6.3.3 Influence du lavage

Encore une fois, nous repartons avec les paramètres de la simulation présentée à la figure 6.11. De manière à simuler des conditions de lavages difficiles (typiquement un perçage profond), nous réduisons la valeur du coefficient de décontamination. Pour les simulations précédentes elle est de $3000\ \mu\text{m}^3/\text{s}$; dans ce paragraphe nous la diminuons de 30% et la fixons à $2000\ \mu\text{m}^3/\text{s}$.

La figure 6.15 représente la variation du gap et sa contamination, avec une masse en mouvement de 350g. En comparant ce résultat avec la simulation présentée à la figure 6.11, nous constatons que la pollution de gap croît rapidement et génère des pulses de contamination plus amples et plus fréquents entraînant de grands mouvements de recul. Dans ces conditions, la vitesse de perçage simulée s'est abaissée à $25\ \mu\text{m/s}$.

En diminuant la masse en mouvement d'un facteur 5 et en ajustant le gain à 130, de manière à garantir environ $5\ \mu\text{m}$ de mouvement de va-et-vient pour le lavage, la vitesse de perçage passe à $60\ \mu\text{m/s}$ (fig. 6.16).

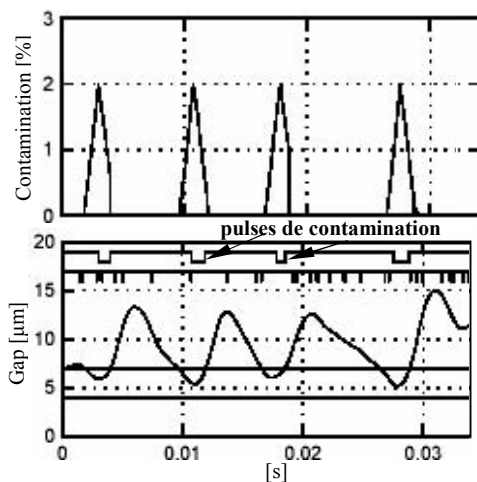


Fig. 6.15: Décontamination $2000\ \mu\text{m}^3/\text{s}$ et masse en mouvement de 350g

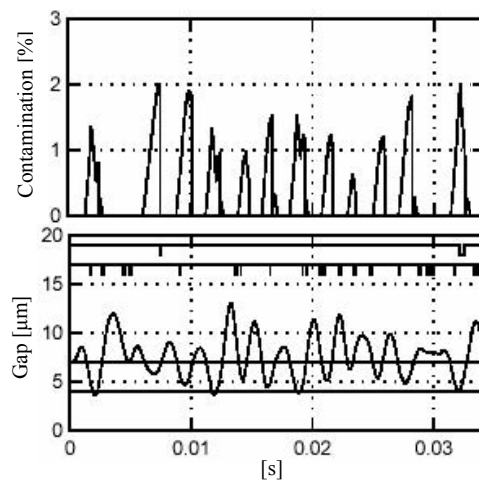


Fig. 6.16: Décontamination $2000\ \mu\text{m}^3/\text{s}$ et masse en mouvement de 70g

6.4 Conclusion

La stabilité du processus d'électroérosion, dépend de l'équilibre entre la quantité de matière usinée et son évacuation. Pour garantir cet équilibre, il est nécessaire de créer un flux de diélectrique emportant les particules érodées. Lorsque l'enlèvement de matière se fait au même rythme que son évacuation, l'usinage progresse à vitesse constante et le servo est peu sollicité. Par contre, si cet équilibre n'est pas constant, le servo a la fonction d'ajuster le gap, de manière à placer l'électrode à la distance de claquage générant des impulsions érosives. La précision et la rapidité à laquelle le servo ajuste le gap, influencent directement la vitesse (et la qualité) de l'usinage.

Les résultats des simulations montrent clairement l'intérêt de la dynamique en μ EDM. Les mauvaises conditions de lavage et les gaps très petits ($<10\mu\text{m}$), engendrent des gradients de contamination élevés auxquels la dynamique de la machine EDM doit être adaptée. Les simulations montrent que pour améliorer l'équilibre entre l'enlèvement de matière et son évacuation, il est nécessaire d'effectuer des mouvements à haute fréquence (quelques centaines de hertz). Ces mouvements de va-et-vient doivent être non seulement rapides, mais également précis. D'une part pour ajuster rapidement et précisément la distance de claquage et d'autre part pour garantir une bonne précision d'usinage.

La bonne connaissance du fonctionnement de la commande, a permis de synthétiser un modèle très proche du comportement de notre prototype. Les tendances dégagées avec les simulations, seront vérifiées par les nombreuses expériences présentées dans le chapitre 7.

7 Dynamique & processus: expériences

7.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à des expériences démontrant l'intérêt de la dynamique en μ EDM. D'une part nous confirmons les tendances issues des simulations du chapitre 6 et d'autre part nous démontrons leur réalisme, en présentant de nombreux usinages à caractère répétitif, réalisés avec le prototype (fig. 7.1) à vocation industrielle décrit au chapitre 5.

Nous commençons par différencier la dynamique passive et la dynamique active:

La **dynamique passive** sous-entend des mouvements non asservis au processus, comme les vibrations ou la rotation de l'électrode. La fonction de ces derniers, est de créer un flux de diélectrique permettant l'évacuation des déchets de la zone du gap.

La **dynamique active** est la réponse en fréquence de l'asservissement du gap. Elle tient compte de tous les éléments générant un retard dans la boucle de réglage du servo. La période d'échantillonnage des algorithmes de réglage, la bande passante des canaux de communication, le retard de l'électronique de puissance et la réponse en fréquence de la mécanique, sont autant d'éléments qui influencent la dynamique active.

Toutes les expériences présentées au chapitre 7, sont effectuées avec une électrode en tungstène de $\text{Ø}149 \mu\text{m}$ perçant une pièce en acierⁱ. La répétitivité de toutes les mesures est garantie par au moins 3 tests consécutifs avec des résultats similaires. Le diélectrique est de l'eau déionisée et nous utilisons toujours la même impulsion électrique (cf. Annexe VII). En variant uniquement les paramètres liés à la dynamique du mouvement, nous montrons que la vitesse d'usinage peut être influencée de manière significative et gardant une qualité d'usinage correspondante à celle requise pour le perçage des injecteurs diesel. En particulier, nous mettons en évidence la stabilité de l'érosion du début à la fin d'un perçage profond (*aspect ratio* 22), grâce à une bonne dynamique.

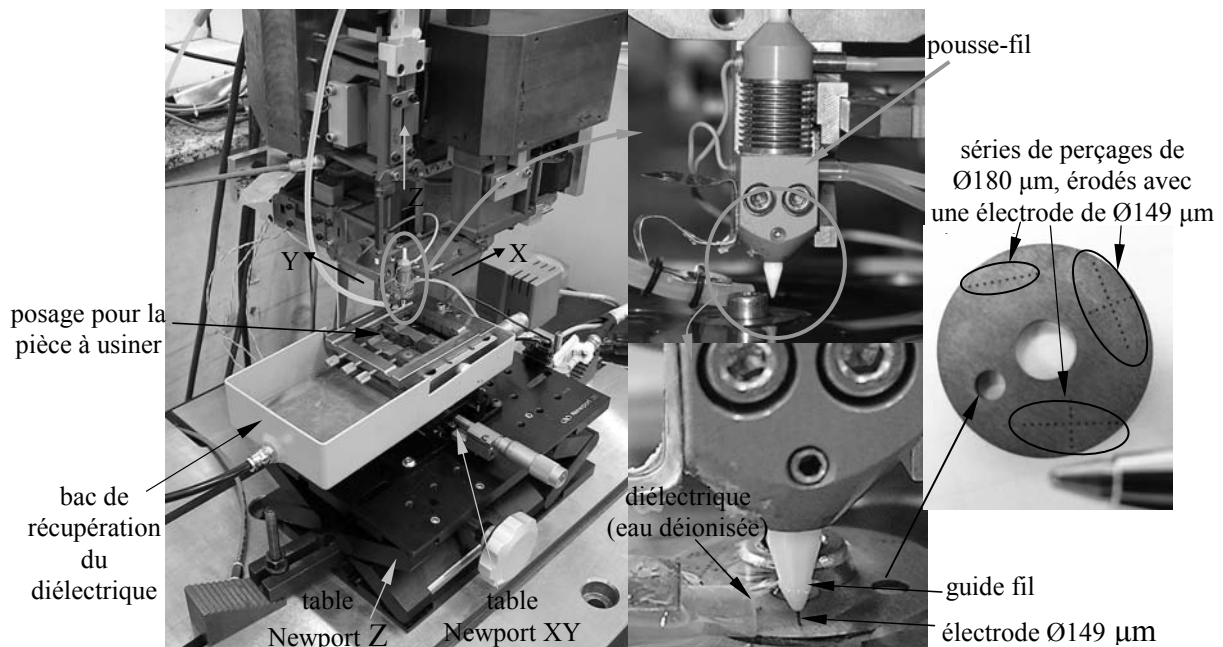


Fig. 7.1: Prototype de machine μ EDM (le Delta³)

ⁱ Acier type X37CrMoV5-1 utilisé par Bosch pour produire les injecteurs diesel. Sa composition exacte est confidentielle.

7.1.1 Fil d'Ariane

Dans les deux premiers paragraphes '*Vibrations*' et '*Rotation de l'électrode à haute vitesse*', nous traitons de la dynamique passive. Nous montrons l'intérêt et les limites de son utilisation.

Les paragraphes suivants sont dédiés à la dynamique active. Nous vérifions l'avantage de diminuer les temps de latence de la boucle d'asservissement du gap (fig. 5.3 & 5.5). Nous débutons par l'extrémité de la boucle (le robot), pour remonter jusqu'au servo. Le paragraphe '*Avantage d'un actionneur dynamique*', met en évidence l'intérêt d'un dispositif comme le robot Delta³. Les atouts d'une mécanique avec des petites courses et de très faibles masses en mouvement sont clairement mis en valeur. Avec le paragraphe '*Influence du gain*', nous montrons l'avantage de disposer d'une mécanique permettant l'utilisation de gains élevés. Dans le dernier paragraphe, '*Bande passante du servo*', nous montrons qu'un retard de quelques centaines de microsecondes dans la boucle d'asservissement du gap, a une influence déterminante sur la vitesse d'usinage et la stabilité de l'érosion.

7.2 Vibrations

7.2.1 Motivation

La particularité des guidages à articulations élastiques (pas de frottement et pas d'usure), permet d'ajouter un bruit aléatoire au contrôle de position du Delta³ (cf. §5.10). Ce bruit fait vibrer l'électrode à la manière d'un élément piézo-électrique. Cette fonction fait partie intégrante de notre machine μ EDM: pas de mécanique, ce qui évite des sources d'imprécisions et des coûts supplémentaires.

La motivation de l'expérience décrite dans ce paragraphe est d'utiliser l'éventuel effet de lavage généré par les vibrations et diminuer le gain pour avoir une descente régulière, donc rapide. Au regard de ce que nous verrons au paragraphe 7.5 et des graphes des figures 7.24 et 7.25, nous désirons vérifier si l'augmentation de la vitesse d'usinage observée avec des gainsⁱⁱ élevés, est due à l'optimisation du gap ou à un éventuel lavage induit par les oscillations de l'électrode.

La Quadratron II (Annexe III) a été développée pour le perçage d'injecteurs diesel. La profondeur typique des trous usinés par cette machine est de 1 mm et leur diamètre entre 100 et 300 μ m. De manière à vérifier un éventuel intérêt des vibrations pour cette application, nous avons choisi des conditions d'usinage semblables. Nous perçons la même profondeur avec des *timer de compensation* (cf. §5.11.3), pour limiter le déplacement du guide de l'électrode. Sur la Quadratron II le guide de l'électrode est fixe; la distance pièce guide reste constante durant tout l'usinage.

7.2.2 Tests et mesures

Le Delta³ est programmé pour percer une plaquette de 1 mm d'épaisseur avec un électrode de $\varnothing 149 \mu$ m en programmant deux *timer de compensation* de 800 μ m. La figure 7.2 représente 3 usinages avec vibrations à des gains différents et un usinage sans vibrations (*Gain100 sans Vibra*). Les vibrations sont programmées selon l'axe Z uniquement avec une amplitude maximum de $\pm 2 \mu$ m et une fréquence d'environ 3 kHz. Notons que ces vibrations ne sont pas perceptibles sur les axes X et Y.

ⁱⁱ Lorsque nous utilisons le terme *gain*, il se réfère toujours à l'algorithme d'asservissement du gap: au servo. (cf. §5.7)

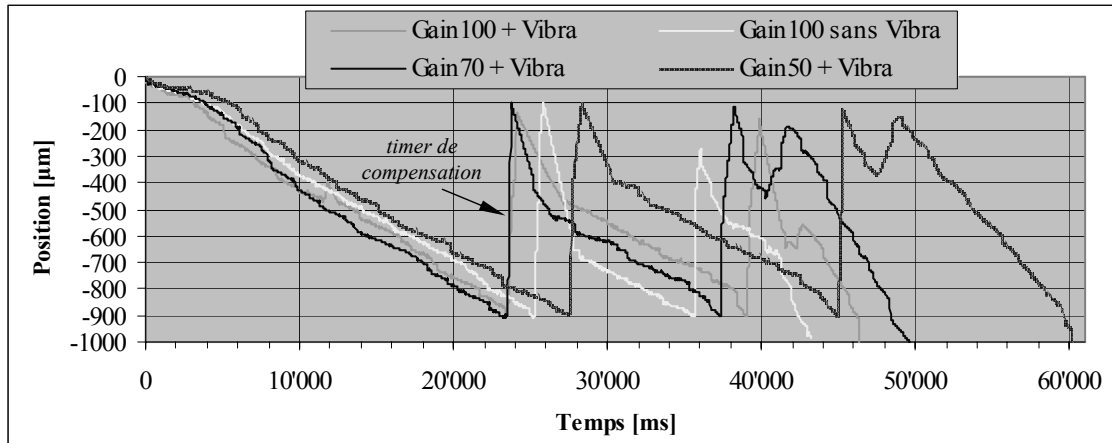


Fig. 7.2ⁱⁱⁱ: Perçages de 1 mm de profondeur en variant le gain avec et sans vibrations

Considérons les deux courbes *Gain100* avec et sans vibrations. Avec vibrations (courbe: *Gain100 + Vibra*), le temps total d'érosion a augmenté de 2 secondes; notons que la différence n'est pas significative. Les courbes *Gain70* et *Gain50* avec vibrations, indiquent une diminution de la vitesse d'usinage lorsque le gain diminue.

7.2.3 Conclusions

Jusqu'à une profondeur de 1 mm pour un diamètre du perçage de 180 µm (*aspect ratio* 5.5), l'évacuation des déchets de la zone du gap n'est pas problématique. Ajoutons que l'usage des *timer de compensation*, aide à évacuer les particules érodées et à régénérer le diélectrique au fond du trou. Dès lors, dans ces bonnes conditions de lavage, les vibrations ne permettent pas d'augmenter la vitesse d'usinage.

7.3 Rotation de l'électrode à haute vitesse

7.3.1 Motivation

La rotation de l'électrode est en général combinée avec un lavage central injecté au travers d'une électrode tubulaire (fig. 2.9). Des vitesses de rotation de quelques milliers de tours/minute, suffisent alors pour améliorer sensiblement le lavage. Les électrodes tubulaires de diamètres extérieurs supérieurs à 200 µm sont couramment utilisées. Pour des diamètres inférieurs, leur emploi est délicat et il faut injecter du diélectrique à haute pression (>100 bars) à travers l'électrode, pour obtenir un flux de lavage intéressant.

Dans cette expérience, nous montrons que la rotation d'une électrode cylindrique de Ø149 µm à 100'000 tours/minute, permet d'augmenter la vitesse d'usinage de manière significative, sans utiliser un lavage central.

7.3.2 Vitesse de rotation de 100'000 tours/min: que voit le processus ?

Pour nous rattacher aux expériences et à la théorie développée au §4.5, nous proposons ci-dessous quelques ordres de grandeur reflétant notre application.

La figure 7.3 représente la vitesse tangentielle v [7.1], en fonction de la vitesse de rotation n pour différents diamètres d d'électrode. La figure 7.4 indique le déplacement de la surface de l'électrode, en fonction de la vitesse v pour différentes durées d'impulsions.

ⁱⁱⁱ En ordonnée, '*Position [µm]*' représente la position selon l'axe Z de la pointe de l'électrode, par rapport à la surface de la pièce à usiner (l'entrée du perçage). Par convention en EDM à plongée, la descente de l'axe Z (la direction d'érosion) est négative. Les courbes des graphes sont tracées à partir des mesures des consignes de position du servo en temps réel.

$$v = \pi \cdot d \cdot \frac{n \cdot 10^{-6}}{60} \quad \begin{array}{l} d: [\mu\text{m}] \\ v: [\text{m/s}] \\ n: [\text{tr/min}] \end{array} \quad [7.1]$$

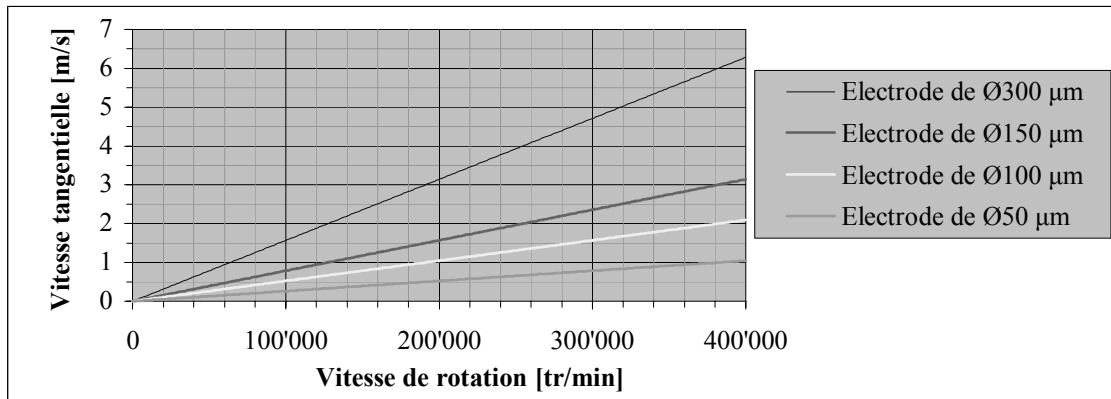


Fig. 7.3: Vitesse tangentielle fonction de la vitesse de rotation et du diamètre de l'électrode

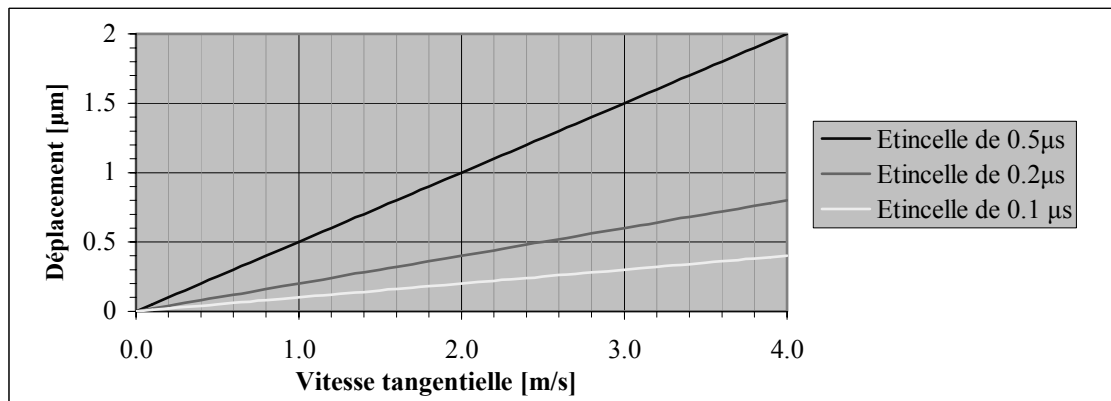


Fig. 7.4: Déplacement durant une étincelle

En considérant les graphes ci-dessus, nous constatons qu'une électrode de Ø149 µm, tournant à 100'000 tours/minute, a une vitesse v au niveau de sa circonférence d'environ **0.8 m/s**. Les étincelles types utilisées dans ce travail (cf. Annexe VII), ont une durée de $t_2-t_1 = 0.2 \mu\text{s}$. Le déplacement de la périphérie de l'électrode (fig. 7.5) durant ce laps de temps est de $l = 0.16 \mu\text{m}$. Selon la théorie développée par [uhl04a] (§4.5), la zone touchée par la source de chaleur (la base du canal de plasma) s'allonge de $l = 0.16 \mu\text{m}$, du fait de la rotation de l'électrode.

Toujours selon [uhl04a], un effet intéressant a été observé avec des impulsions d'une durée de $t_2-t_1 = 1.2 \mu\text{s}$ et un déplacement $l = 2.4 \mu\text{m}$; ce qui représente une vitesse tangentielle de 2 m/s. Une vitesse de 2 m/s à la surface d'une électrode de Ø149 µm, correspond à une vitesse de rotation de 250'000 tours/minute. Le pousse-fil rotatif développé pour notre application, est conçu pour utiliser des électrodes de Ø149 µm, avec une vitesse de rotation maximum de 100'000 tr/min. Nous ne pouvons donc pas atteindre la vitesse tangentielle critique de 2 m/s. Ajoutons que pour vérifier l'intérêt de la dynamique, nos usinages de référence sont des trous. Dès lors, le front d'érosion se situe sur la pointe de l'électrode et la vitesse tangentielle varie de 0 au centre de l'électrode, jusqu'à la vitesse maximum en périphérie.

Conclusion: même si l'effet est minime, la rotation de l'électrode aura tendance à distribuer la chaleur de chaque étincelle sur sa périphérie et à diminuer l'usure.

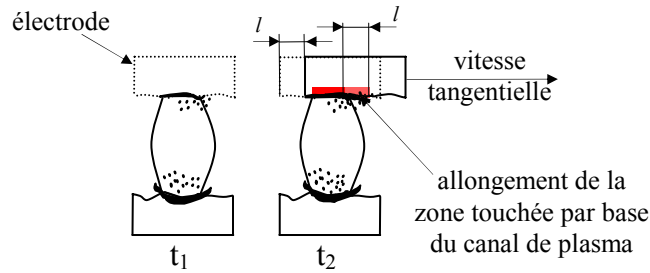


Fig. 7.5: Déplacement l de l'électrode durant une décharge de durée t_2-t_1

L'analogie avec les expériences présentées au paragraphe §4.5 est à considérer avec précaution concernant la dynamique des fluides. Les conditions de lavage ne sont pas les mêmes que les nôtres. A cause du cintrage de l'électrode (fig. 7.6), nous perçons des trous de $\sim\varnothing 210\ \mu\text{m}$ avec une électrode de $\varnothing 149\ \mu\text{m}$; la distance entre la circonférence de l'électrode et la paroi du perçage est donc d'une trentaine de micromètres. L'écoulement d'un fluide dans un canal de $\sim 30\ \mu\text{m}$, entraîné par la rotation à 100'000 tr/min de l'électrode, auquel vient s'ajouter l'énergie générée par les étincelles (explosion, implosion, phase vapeur) est difficile à comprendre et encore plus à simuler.

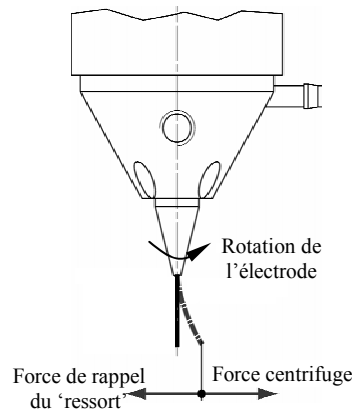


Fig. 7.6: Cintrage de l'électrode dû à la force centrifuge

7.3.3 Caractéristiques du matériel utilisé

Nous avons équipé le Delta³ III avec le prototype du pousse-fil rotatif (fig. 7.7). Cet accessoire spécialement conçu pour notre application, permet d'éroder avec des électrodes de $\varnothing 149\ \mu\text{m}$ tournant à plus de 100'000 tours/minute. Soulignons que ce petit mécanisme de quelques dizaine de grammes, ne génère aucune perturbation au robot.

Le lavage est amené par un tube visible à la figure 7.7, de manière à ce que l'eau déionisée coule le long du guide-fil.

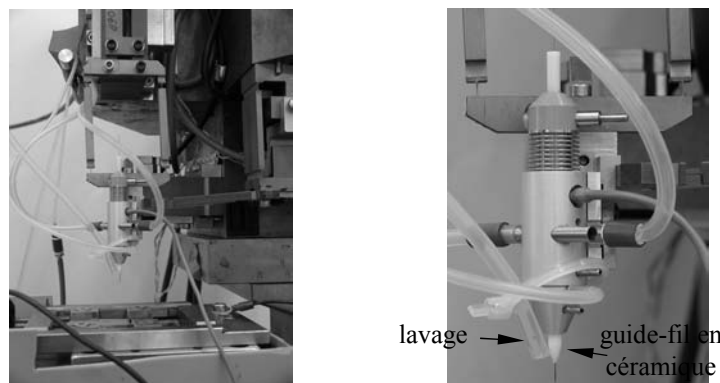


Fig. 7.7: Pousse-fil rotatif monté sur le Delta³ III

7.3.4 Tests et mesures

Pour ces tests, nous perçons une plaquette de 2 mm d'épaisseur sans *timer de compensation*, de manière à effectuer l'usinage d'une traite, sans arrêter l'érosion. Au départ de chaque perçage, la pointe de l'électrode est positionnée à plus de 3 mm de la sortie du guide en céramique. La géométrie programmée, est une descente en Z de 3 mm pour garantir un perçage traversant. A la fin de l'usinage, un *touch* sur la surface de la pièce à côté du perçage, donne la mesure de l'usure de l'électrode.

Nous n'utilisons pas les *timer de compensation*, car nous désirons montrer que la rotation de l'électrode, à elle seule, améliore les conditions de lavage. De cette manière, nous évitons de régénérer le diélectrique durant la compensation de l'usure.

Le graphe 7.8 représente un perçage sans rotation de l'électrode et le graphe 7.9 un perçage dans les mêmes conditions, mais avec rotation à une vitesse de 100'000 tr/min. Avec la rotation haute vitesse, le temps d'usinage est divisé par un facteur 2.5; nous passons d'une durée de perçage de 79 secondes à 32 secondes. Une analyse qualitative met en évidence une tension moyenne du gap (*gap voltage*) beaucoup plus stable avec la rotation. Toujours en considérant la figure 7.9, il est intéressant de noter qu'à partir d'un peu plus de 1 mm de profondeur, la tension moyenne est brusquement moins stable. Nous n'avons pas investigué sur la cause exacte de ce phénomène, mais il est évident que plus le perçage est profond plus l'évacuation des particules érodées est difficile.

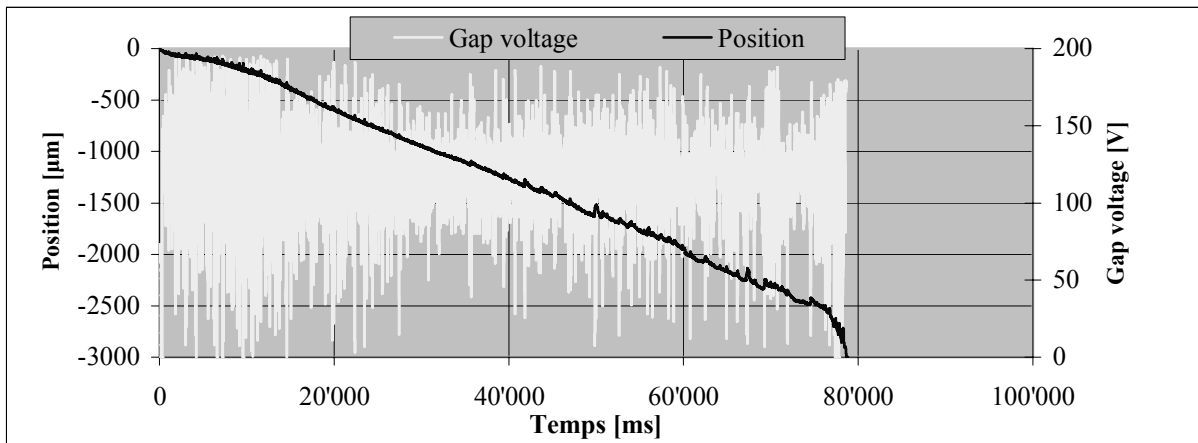


Fig. 7.8: Perçage de 2 mm de profondeur sans rotation

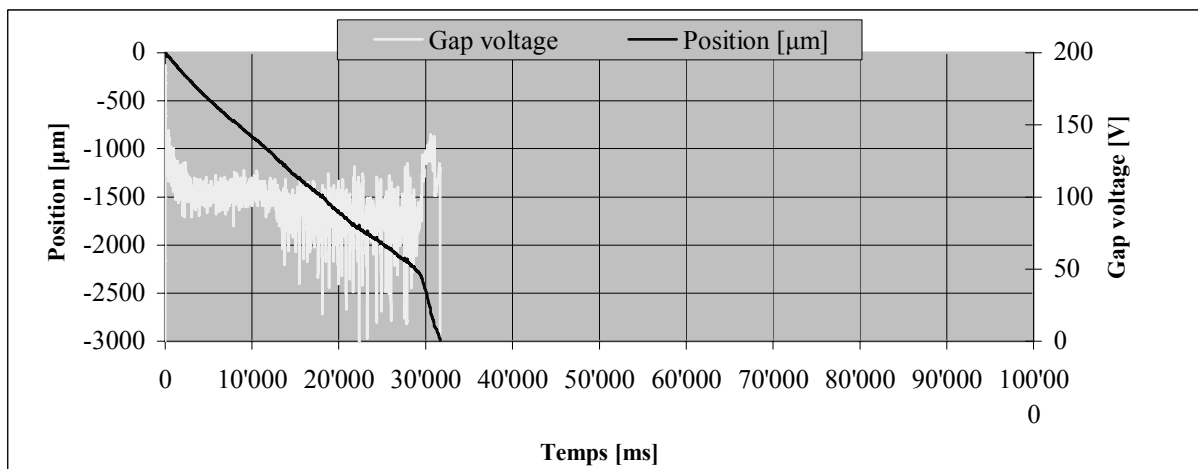


Fig. 7.9: Perçage de 2 mm de profondeur avec rotation de l'électrode à 100'000 tr/min

Les photos 7.10 et 7.11 représentent l'entrée des trous usinés. Avec la rotation, la qualité de forme du perçage est meilleure (la qualité des photos ne le met pas en évidence) et le diamètre usiné est

de 210 μm ; soit 10 μm supérieur que sans rotation. Cette différence de diamètre provient du cintrage de l'électrode résultant de la force centrifuge (fig. 7.6).

Notons encore que le diamètre de 200 μm mesuré sans rotation, est de 20 μm supérieur à ce que nous obtenons avec la même technologie, dans le paragraphe précédent (§7.2). D'une part, cette différence provient de la raideur de l'électrode: nous avons travaillé avec une électrode sortant de 3 mm du guide-fil; elle vibre et agrandi l'entrée du perçage. D'autre part, nous perçons une épaisseur de 2 mm au lieu de 1 mm: le temps d'usinage est augmenté et la quantité de matériau à évacuer est doublée. Ces deux raisons expliquent l'érosion additionnelle élargissant l'entrée de l'usinage.

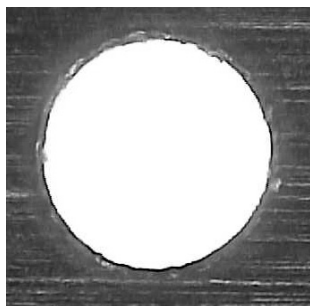


Fig. 7.10:
Rotation à 100'000 tr/min
 $\text{Ø } 210\mu\text{m}$

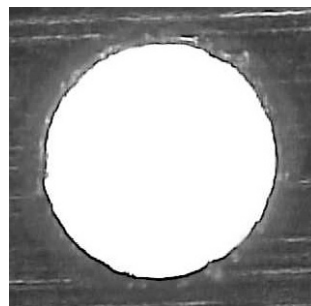


Fig. 7.11:
Sans rotation
 $\text{Ø } 200\mu\text{m}$

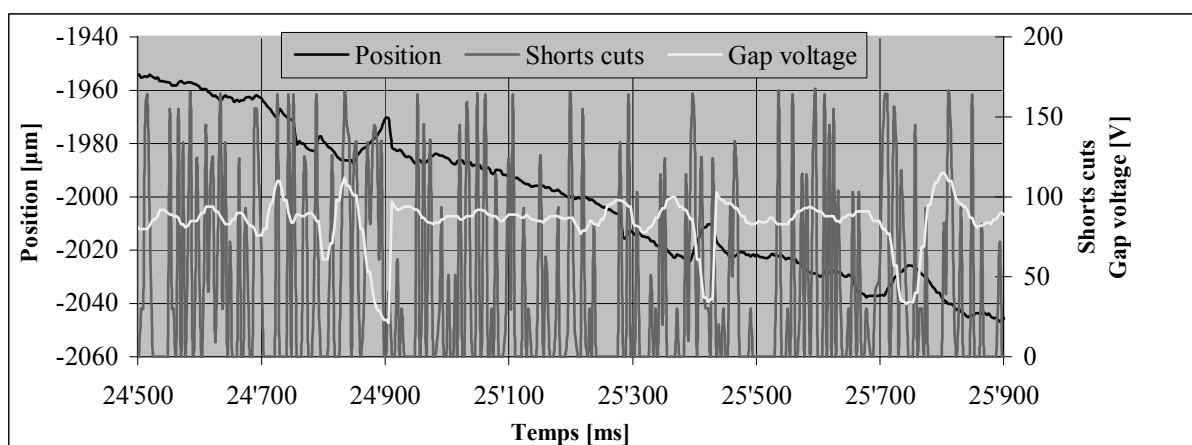


Fig. 7.12: Perçage de 2 mm de profondeur avec rotation à 100'000 tr/min (détail)

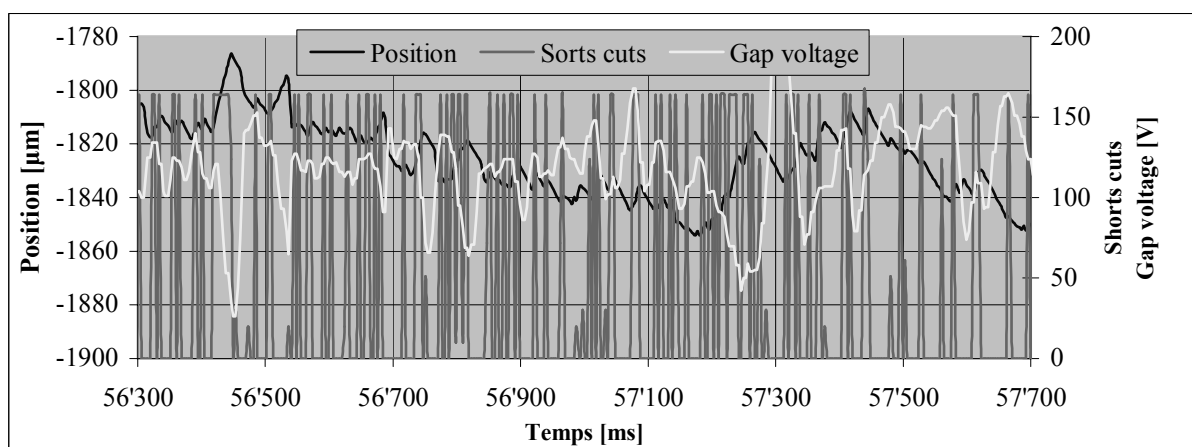


Fig. 7.13: Perçage de 2 mm de profondeur sans rotation (détail)

Les graphes 7.12 et 7.13 sont des agrandissements des figures 7.8 et 7.9. Ils montrent 1.4 seconde d'érosion à une profondeur proche de 2 mm. La difficulté d'évacuation des déchets sans rotation

(fig. 7.13), est mise en évidence par une avance perturbée, une tension moyenne du gap peu stable et la saturation de la mesure des courts-circuits.

Dans les mêmes conditions que précédemment, nous avons percé des trous dans les 3 situations suivantes:

- 1) Sans rotation avec un *timer de lavage* de 300 μm toutes les 100 ms.
- 2) Avec une rotation basse vitesse (100 tr/min).
- 3) Sans rotation en ajoutant sur l'axe Z comme au paragraphe 7.2, des vibrations d'amplitude de $\pm 2 \mu\text{m}$ et de fréquence de 3 kHz.

Sur le graphe 7.14, nous avons représenté tous les modes d'usinage testés. Ce graphe met clairement en évidence l'avantage de la rotation à haute vitesse. La courbe '*rotation 100'000 tr/min*', montre l'érosion la plus rapide, la plus régulière et avec l'usure la plus faible.

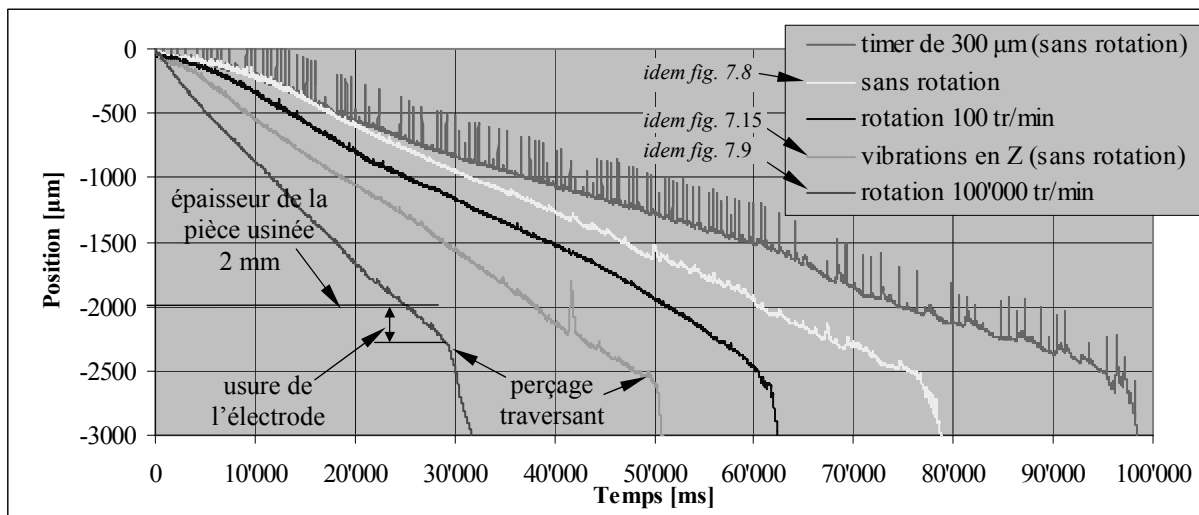


Fig. 7.14: Perçages de 2 mm de profondeur

L'usure de l'électrode peut être déterminée par le changement de pente des courbes du graphe 7.14. L'augmentation de la vitesse en fin d'usinage, indique que le perçage est traversant. En soustrayant l'épaisseur de la plaquette (2 mm) à la position du coude, nous obtenons l'usure de l'électrode.

Toujours en considérant le graphe 7.14, il ressort que les *timer de lavage* de 300 μm toutes les 100 millisecondes, ne sont pas efficaces. Ils ralentissent la vitesse d'érosion. Durant les *timer*, la machine n'érode pas et comme l'électrode ne sort pas du perçage, ces mouvements amènent peu de diélectrique frais.

Sur la courbe '*timer de 300 μm* ', tous les *timer* ne sont pas visibles, car la période d'acquisition des données est de l'ordre de grandeur de la durée des *timer* (5 ms).

La courbe '*rotation 100 tr/min*', indique une descente régulière et plus rapide que sans rotation, mais deux fois plus lente qu'avec la rotation à haute vitesse.

La courbe '*vibrations en Z*', met en valeur l'efficacité des vibrations; le temps d'usinage est diminué de 60% par rapport au perçage sans rotation. L'utilité des vibrations n'a pas pu être observée dans l'expérience du paragraphe 7.2; nous la percevons dans cette expérience pour les raisons suivantes:

- 1) Nous n'utilisons pas les *timer de compensation*, donc la courbe '*sans rotation*' ne bénéficie pas de l'effet de lavage, généré par les mouvements d'électrode durant la compensation.
- 2) En perçant une profondeur 2 mm pour un diamètre de 200 μm , nous avons presque doublé l'*aspect ratio* de nos usinages: 10 au lieu de 5.5 au §7.2; plus les trous sont profonds, plus l'évacuation des particules érodées devient difficile. Dans ces mauvaises conditions de lavage, l'usage de vibrations devient efficace.

- 3) L'électrode sort du guide-fil de 3 mm depuis le début de l'usinage. La faible raideur au niveau de la pointe, entraîne une amplitude de vibrations latérales plus élevée que pour les tests présentés au paragraphe 7.2, ce qui augmente le diamètre du perçage. Les oscillations latérales conjuguées aux vibrations générées selon l'axe Z, favorisent l'évacuation des particules érodées.

Le graphe 7.15 représente les positions de l'axe Z et la tension moyenne du gap pour le perçage avec des vibrations. On perçoit une tension moyenne du gap plus stable que sans rotation (fig. 7.8), dû au meilleur lavage généré par les vibrations. Cependant, la rotation à 100'000 tr/min (fig. 7.9) permet une meilleure stabilité de la tension du gap.

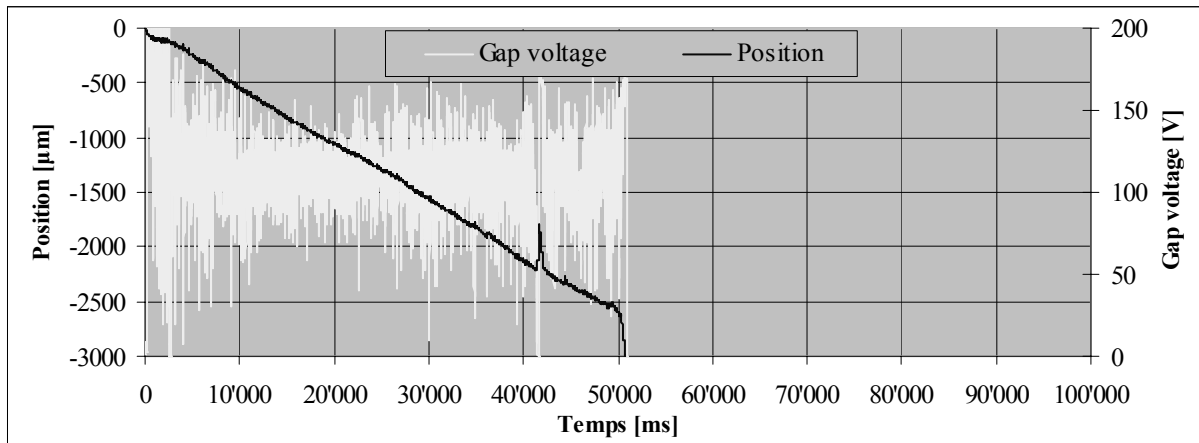


Fig. 7.15: Perçage de 2 mm de profondeur avec vibration en Z

7.3.5 Conclusion

Le tableau 7.16 indique le temps d'usinage, l'usure de l'électrode et la vitesse moyenne d'usinage, pour chacun des modes testés dans ce paragraphe. Il met clairement en évidence les avantages de la rotation haute vitesse de l'électrode: grande vitesse de perçage et usure minimale. Ajoutons qu'en tournant à 100'000 tr/min, le diamètre du perçage est de 210 µm au lieu de 200 µm dans les autres cas. La vitesse moyenne d'usinage de 63 µm/s est donc à corriger à la hausse, car l'enlèvement de matière est supérieur.

En regard de la précision, il est utile de souligner la répétitivité des résultats, tant au niveau du temps d'usinage que du diamètre obtenu. Sur un échantillon de 7 perçages avec rotation à 100'000 tr/min, tous sont érodés avec un diamètre de 210 µm. Tous les autres usinages, 3 pour chacune des situations différentes, ont un diamètre de 200 µm.

	temps d'usinage [s]	usure [%] (<i>l</i> µm)	vitesse moyenne [µm/s]
rotation 100'000 tr/min	32	18 (<i>359</i>)	63
vibration en Z	51	23 (<i>450</i>)	39
rotation 100 tr/min	64	26 (<i>510</i>)	31
sans rotation	79	26 (<i>514</i>)	25
timer de 300 µm	98	28 (<i>559</i>)	20

Tableau 7.16: Perçages de 2 mm de profondeur avec une électrode Ø149 µm

Que ce soit la rotation de l'électrode ou des vibrations à quelques kilohertz, la **dynamique passive** permet d'augmenter le taux d'enlèvement de matière et de diminuer l'usure de l'électrode.

La **rotation à haute vitesse** (100'000 tr/min) donne les meilleurs résultats, car elle concentre tous les phénomènes générant de bonnes conditions de lavage et de minimisation de l'usure:

- 1) Le diamètre du perçage est agrandi par le cintrage de l'électrode, ce qui augmente la distance entre les parois du trou et la circonférence de l'électrode. D'une part, les particules érodées peuvent être évacuées plus aisément, et d'autre part le gap le long des parois du trou étant plus élevé, les décharges érosives se concentrent sur la pointe de l'électrode, tout en limitant les courts-circuits latéraux.
- 2) La rotation de l'électrode entraîne dans son mouvement le diélectrique présent dans le perçage. Ce mouvement crée un flux de lavage évacuant les particules érodées de la zone du gap, jusqu'à l'entrée du trou.
- 3) Les gradients de pressions générés par le mouvement de l'électrode (rotation ou vibration), favorisent l'implosion du canal de plasma durant la phase de rupture de l'étincelle (fig. 2.3) et aident à évacuer les déchets du gap (§4.5) à chaque impulsion érosive.
- 4) Le déplacement de l'électrode durant la durée d'une décharge érosive, distribue la chaleur sur la périphérie de l'électrode, diminuant l'usure de cette dernière (§7.3.2).

7.4 Avantage d'un actionneur dynamique

7.4.1 Motivation

Dans ce paragraphe, nous montrons l'intérêt de disposer d'une mécanique dynamique comme le robot Delta³, pour l'asservissement du gap en μ EDM.

Le tableau 7.17 indique le temps de latence^{iv} de la boucle de réglage du servo, de quelques machines à enfonçage d'AGIE et de notre prototype (le Delta³). L'Advance et l'Innovation sont des machines à plongée, conçues pour déplacer des électrodes de quelques dizaines de kilo; elles ne sont pas dédiées à la μ EDM et sortent du contexte traité dans ce travail de thèse. Nous les avons mentionnées à titre indicatif.

Nom de la machine EDM	Temps de latence à un ordre du servo
Advance	3 ms
Innovation	5 ms
Quadratron II	9 ms
Delta ³	1.1 ms

Tableau 7.17: Temps de latence à un ordre du servo de trois machines EDM à plongée AGIE et de notre prototype le Delta³ (mesures faites sur l'axe Z)

La Quadratron II (Annexe III) est conçue pour le micro-perçage d'injecteurs et son champ d'utilisation peut être couvert par le robot Delta³; ajoutons que la commande que nous utilisons est similaire^v. La différence de 8 ms, entre le temps de latence du Delta³ et la Quadratron II, est donc imputable uniquement à la mécanique. En démontrant les avantages d'une bonne dynamique (augmentation de la vitesse d'usinage), le Delta³ pourrait remplacer avantageusement la mécanique classique d'une machine comme la Quadratron II.

En regard de ce tableau, nous remarquons que des temps de latences de 5 à 10 ms sont représentatifs de l'état de l'art des machines EDM communément utilisées.

^{iv} Le temps de latence de la boucle de réglage du servo, est le temps écoulé entre un ordre de mouvement donné par le servo et un déplacement de l'électrode 0.1 μ m.

^v Un hardware identique avec de nombreuses adaptations software.

7.4.2 Tests et mesures

De manière à vérifier l'avantage d'un actionneur dynamique, nous avons introduit dans la commande la possibilité de simuler une mécanique lente. Un retard variable a été inséré dans la boucle de réglage du servo, entre l'interpolateur et l'asservissement de position. Au lieu d'ajourner la consigne des régulateurs de position, à chaque boucle de réglage (tous les $300\mu\text{s}$), les consignes du servo sont prises en compte avec un retard software Tr variable. Chaque nouvelle position est répartie proportionnellement à chaque cycle de réglage, de manière à être atteinte à la fin du retard Tr imposé.

La figure 7.18 représente les éléments intervenant dans la boucle de réglage du servo et leur temps de latence respectif. Par rapport à la figure 5.5 du paragraphe 5.2, nous avons ajouté le bloc 'retard Tr ' pour simuler une inertie mécanique.

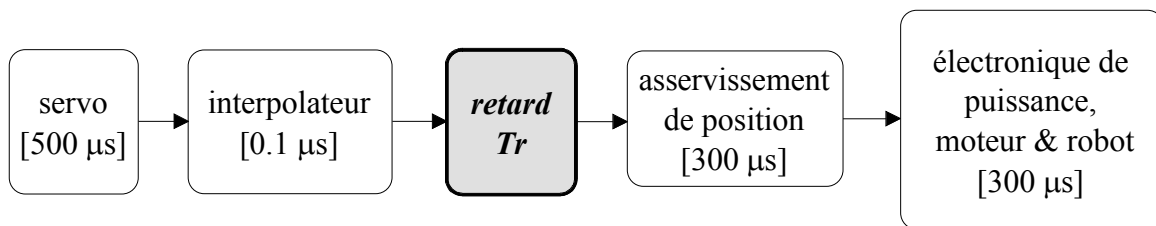


Fig. 7.18: Temps de latence des éléments intervenant dans le contrôle du gap

Pour ce test, nous érodon des trous dans une plaquette d'épaisseur de 4 mm. De manière à garder le guide électrode le plus proche de la pièce, nous avons programmé 14 *timer de compensation* de $300\mu\text{m}$ et un quinzième de $400\mu\text{m}$. Durant l'érosion, des *timer de lavage* de $150\mu\text{m}$ sont activés toutes les secondes sans rotation de l'électrode et sans vibrations. Le diamètre de perçage obtenu est de $\sim 180\mu\text{m}$, ce qui donne un *aspect ratio* de 22.

La figure 7.19 représente la position de l'axe Z pour trois perçages complets et trois retards différents. Avec la dynamique maximum de la machine nous perçons 4 mm en 80 secondes. Avec un retard de 4.2 ms en 100 secondes et avec un retard de 8.1 ms, il faut 140 secondes. Nous avons également pris des mesures pour des retards intermédiaires. Nous ne les avons pas représentées à la figure 7.19, pour une raison de lisibilité. De toutes ces mesures, il ressort clairement que la vitesse d'usinage diminue lorsque le retard Tr augmente.

Nous n'avons pas présenté de mesures sans les *timer de lavage*. Sans ces *timer*, le perçage à une profondeur de 4 mm avec un retard Tr de 8.1 ms s'est avéré impossible; l'électrode se soude dans le perçage à une profondeur de 3-4 mm. Le choix de garder la même impulsion pour toutes les expériences présentées dans ce chapitre, nous a conduit à insérer les *timer de lavage* de $150\mu\text{m}$. La pointe de l'électrode ne sortant pas du perçage, ils ne sont pas très efficaces pour régénérer le diélectrique. Cependant, en ralentissant la vitesse d'usinage, ils contribuent à équilibrer l'évacuation et l'enlèvement de matière.

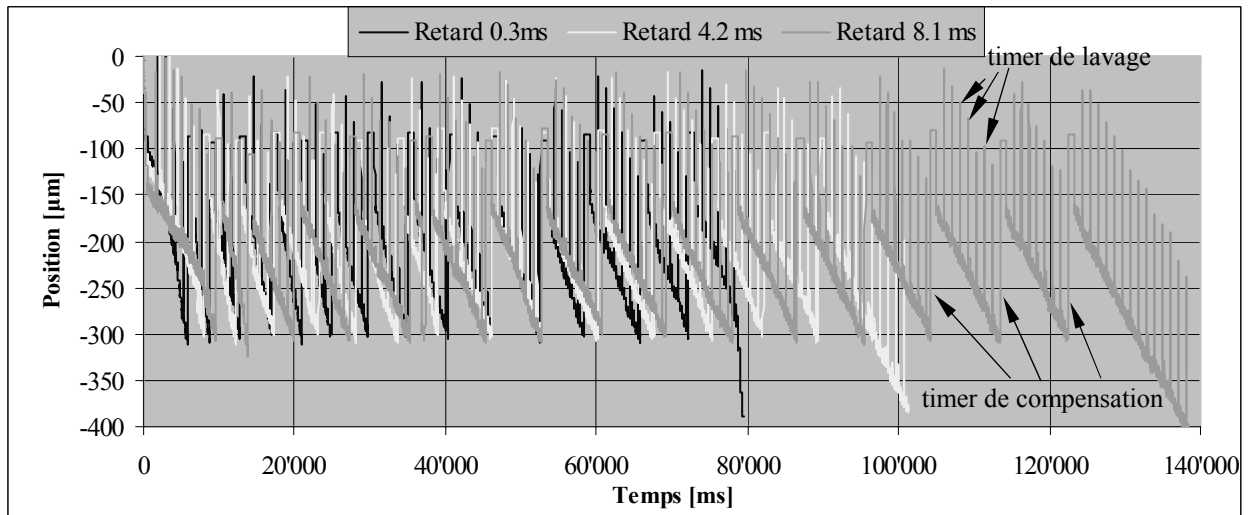


Fig. 7.19: Percages de 4 mm de profondeur avec différents retards

Nous avons tenté le même usinage avec la Quadratron II: percer un trou de 4 mm de profond avec une électrode de $\varnothing 149 \mu\text{m}$. Cette machine ne disposant pas de la fonction *timer*, la pause entre deux impulsions a été augmentée, pour éviter que l'électrode ne se soude dans le perçage. Arrivé à une profondeur d'environ 3 mm, la vitesse d'usinage chute jusqu'à être pratiquement nulle. Nous n'avons pas réussi à percer la plaquette de 4 mm d'épaisseur. Rappelons que la Quadratron II dispose de la même commande que notre prototype. La différence essentielle est la réponse en fréquence de la mécanique, inférieure d'un facteur 10.

Les graphes des figures 7.20 à 7.22, représentent les consignes du servo et la mesure des courts-circuits (*shorts*) à une profondeur d'environ 3 mm. Ces graphes sont des agrandissements des courbes de la figure 7.19. Le temps en absolu permet de situer précisément l'instant d'usinage agrandi.

Une analyse fréquentielle des consignes de position, n'a donné aucun résultat interprétable. Une analyse qualitative de ces résultats, montre que l'amplitude des oscillations de position augmente avec le retard de la boucle de réglage. Environ $10 \mu\text{m}$ avec un retard de 8.1 ms (fig. 7.22) et $5 \mu\text{m}$ avec le retard minimum (fig. 7.20).

En considérant le paramètre courts-circuits (*shorts*) représenté sur les graphes, nous constatons qu'avec des temps de latence de 4.1 ms (bonne machine EDM standard), ils atteignent leur valeur maximum et saturent. Avec un retard de 0.3 ms, le servo arrive à dégager l'électrode avant que le paramètre *shorts* arrive à saturation.

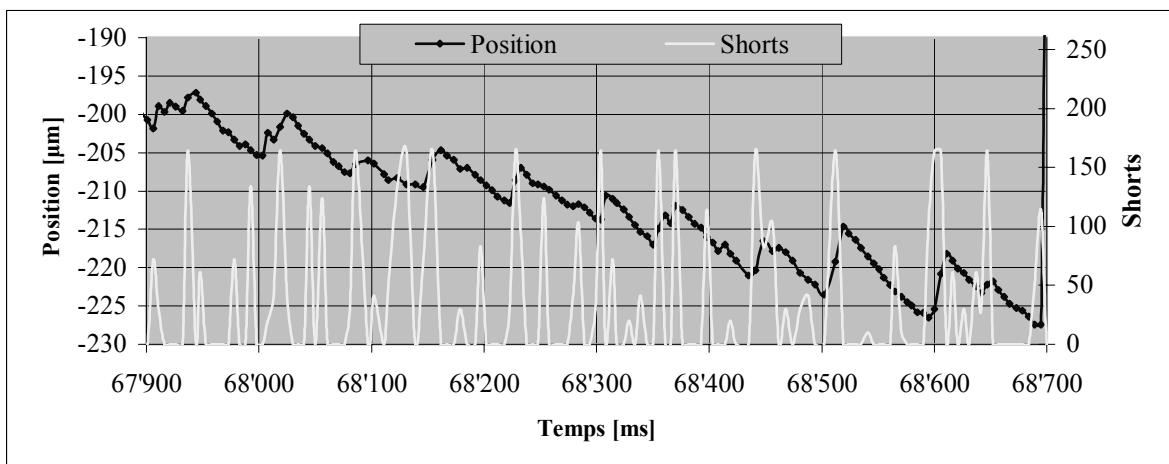


Fig. 7.20: Retard minimum 0.3 ms
(détail à une profondeur ~ 3 mm)

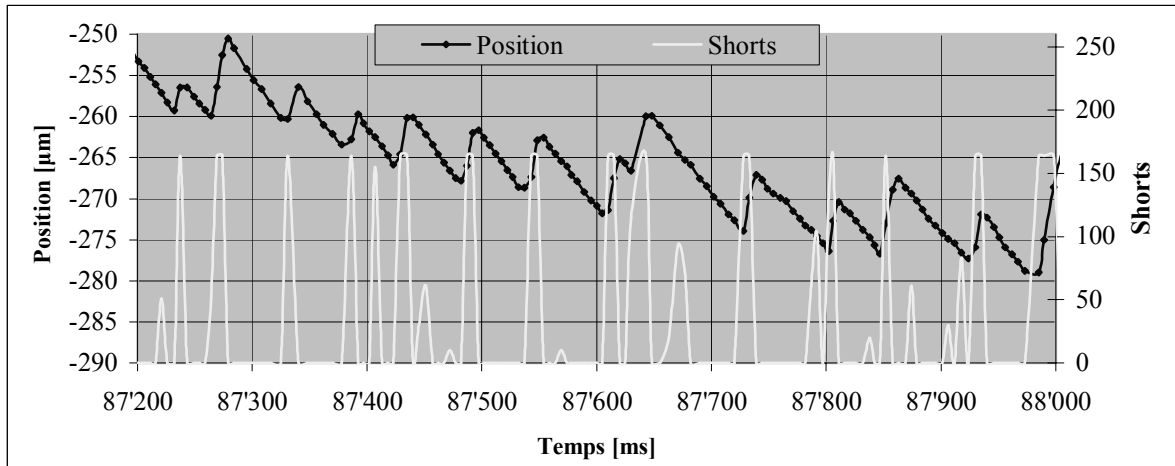


Fig. 7.21: Retard 4.2 ms
(détail à une profondeur ~3 mm)

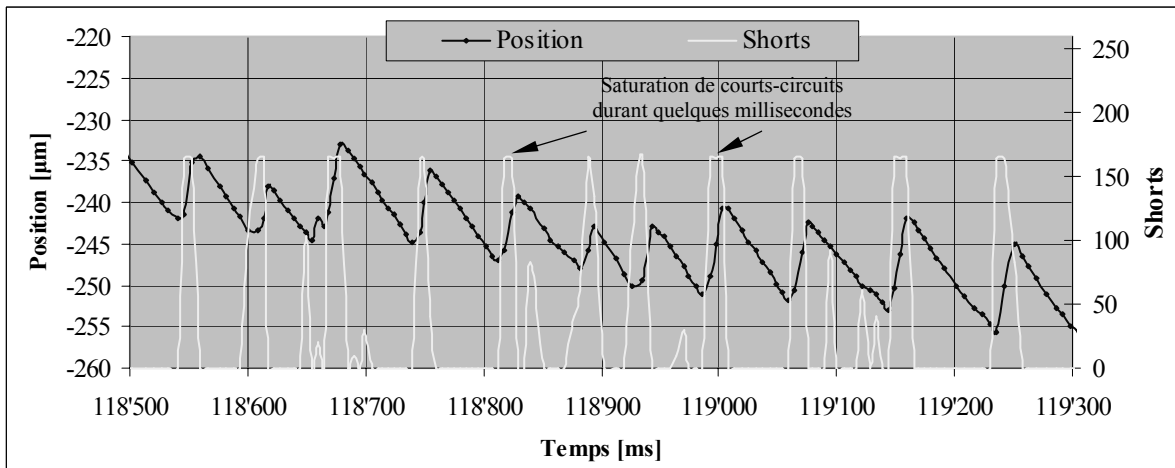


Fig. 7.22: Retard 8.1 ms
(détail à une profondeur ~3 mm)

7.4.3 Conclusions

Les mouvements de recul d'en moyenne 5 μm que nous observons à la figure 7.20, sont assimilables à des **micro-timer asservis au processus**. La machine érode jusqu'à la limite des conditions de propreté du gap (courts-circuits). La rapidité de réaction de l'actionneur, permet d'anticiper la saturation des courts-circuits par un retrait rapide, ce qui limite le mouvement de recul à 5 μm. Durant ce mouvement, les débris sont évacués du gap et l'érosion peut continuer. Avec un actionneur lent (fig. 7.22), l'amplitude du mouvement de recul est amplifiée par la saturation des courts-circuits due à l'inertie de réaction. Le fait de doubler l'amplitude du mouvement, 10 μm au lieu de 5 μm, n'apporte aucun lavage supplémentaire, mais abaisse la vitesse moyenne d'usinage.

Soulignons que pour éviter toutes collisions électrode-pièce, le servo génère une vitesse maximum de retrait, plus élevée que la vitesse d'avance. Donc dans des conditions d'érosion difficiles, si les courts-circuits ne peuvent pas être anticipés, la vitesse moyenne d'avance diminue jusqu'à devenir nulle.

Cette expérience a démontré l'intérêt d'un actionneur dynamique, en particulier lorsque les conditions de lavage sont mauvaises. Avec un actionneur réagissant en 300 μs, les 'micro-timer' dû à l'asservissement du processus, évacuent des débris du gap avant la saturation de la mesure des courts-circuits et en minimisant le temps perdu pour ce 'lavage'. Dans les mêmes conditions, si l'actionneur réagit avec un retard 14 fois plus élevé (4.2 ms), ce qui correspond à une bonne

machine standard, les courts-circuits saturent à leur valeur maximum. Le mouvement de recul de l'électrode est amplifié et la vitesse d'érosion diminue en conséquence. La saturation des courts-circuits est assimilable au pulse de contamination (fig. 6.15) du modèle présenté au chapitre 6.

Sans modifier la technologie ou les algorithmes de réglage du servo, mais simplement en augmentant la bande passante de l'actionneur, nous avons montré qu'il est possible d'améliorer les conditions d'usinage. Ce résultat confirme les tendances dégagées par les simulations du §6.3 et confirme l'avantage de minimiser les masses en mouvement, lors de la conception d'une machine dédiée à la micro-EDM.

Sur une machine comme la Quadratron II, le simple fait de disposer d'une mécanique plus dynamique, permettrait d'améliorer de manière significative les performances: possibilité de percer des trous profonds (*aspect ratio* de 22) et augmentation de la vitesse d'usinage.

7.5 Influence du gain^{vi}

7.5.1 Motivation

Les résultats du paragraphe précédent (comme les simulations du §6.3), montrent que les algorithmes du servo sont prédisposés pour exploiter une mécanique dynamique. En effet, sans modifier aucun paramètre du servo, simplement en améliorant la réponse en fréquence de l'actionneur, nous avons constaté une nette amélioration de l'asservissement du processus.

Dans ce paragraphe, nous mettons en évidence l'influence du *gain* sur la vitesse d'usinage. En particulier, nous montrons que l'usage d'un actionneur dynamique donne la possibilité d'exploiter des gains élevés et d'augmenter la vitesse d'usinage.

Pour montrer les avantages de notre prototype par rapport à une machine EDM à mécanique classique, nous comparons encore une fois nos résultats avec la Quadratron II. La comparaison avec cette machine est édifiante, car comme nous l'avons déjà mentionné, la commande et le générateur sont similaires à notre prototype; seule la mécanique est différente.

7.5.2 Tests et mesures

Pour cette expérience nous avons choisi de percer une plaquette d'épaisseur de 1 mm, avec 2 *timer de compensation* de 800 μm . Nous avons opté pour ce type d'usinages, de manière à pouvoir comparer nos résultats avec les perçages types de la Quadratron II. L'épaisseur correspond à la profondeur des trous usinés pour les injecteurs. Le choix de deux *timer de compensation* de 800 μm , garantit une qualité d'usinage comparable à celle obtenue avec le guide fixe utilisé par la Quadratron II.

Le graphe de la figure 7.23 représente 3 perçages avec 3 *gains* différents. Il ressort clairement que la vitesse d'usinage augmente avec le *gain*.

^{vi} Le *gain* se réfère à l'algorithme d'asservissement du gap contrôlé par le servo. (cf. §5.7)

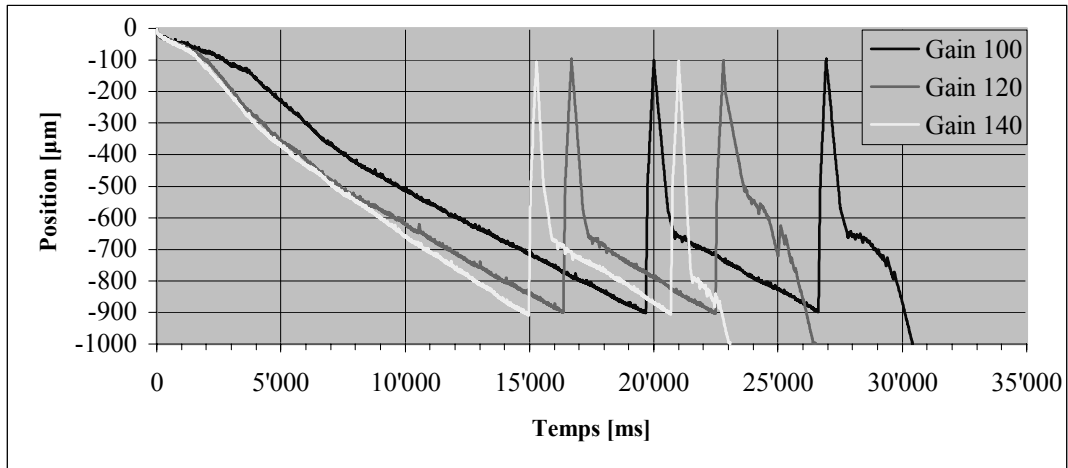


Fig. 7.23: Influence du gain

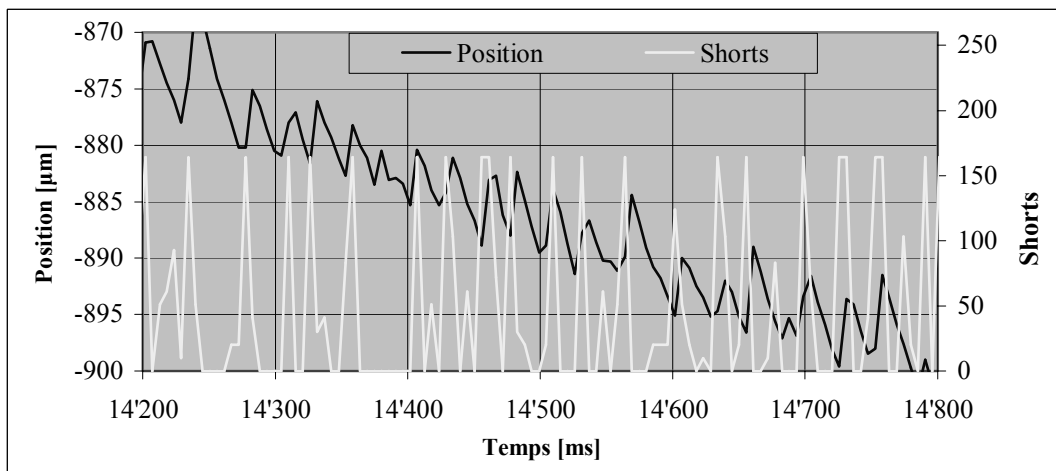


Fig. 7.24: gain 140

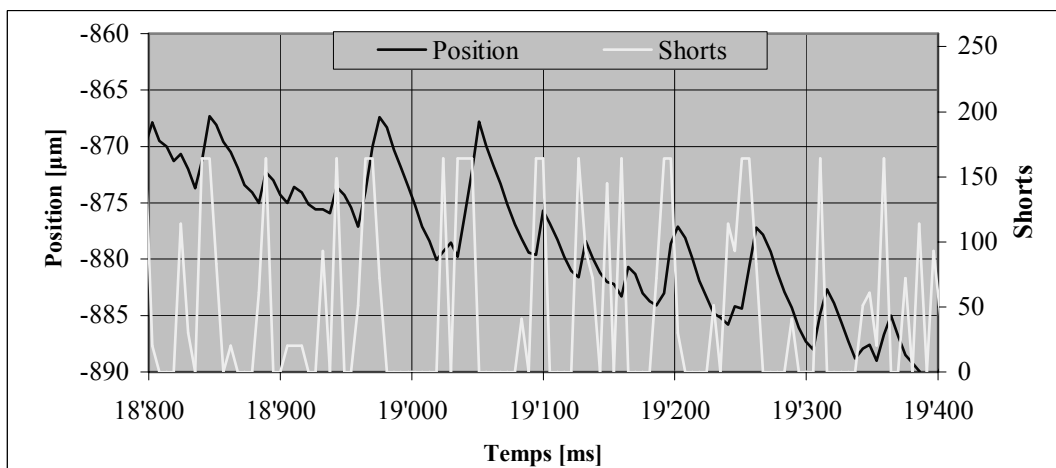


Fig. 7.25: gain 100

Les graphes des figures 7.24 et 7.25, représentent les positions générées par le servo et les courts-circuits, avant le premier *timer de compensation* pour deux *gains* différents. Une analyse qualitative des mesures, montre qu'avec l'augmentation du *gain*, l'amplitude des oscillations diminue, de même que la période. Avec un gain de 100, la fréquence des oscillations est de 30 Hz, pour arriver à 36 Hz avec un gain de 140.

Notons qu'avec un *gain* de 160 (fréquence des oscillations ~ 40 Hz), le temps d'usinage augmente; l'instabilité générée par un gain aussi élevé, ralentit l'érosion.

7.5.3 Conclusions

L'augmentation du gain, fait croître la fréquence des mouvements de l'électrode, tout en diminuant leur amplitude; le résultat est une vitesse d'usinage plus élevée.

Notons qu'avec la Quadratron II, il n'a pas été possible de dépasser des gains de 100; les masses en mouvement sont trop élevées et génèrent des vibrations.

7.6 Bande passante du servo

7.6.1 Motivation

Au paragraphe précédent, nous avons constaté que la fréquence des oscillations contrôlées par le servo, est de l'ordre d'une trentaine de hertz. La bande passante du Delta³ est de quelques centaines de hertz. De manière à exploiter au maximum la dynamique du robot, nous analysons notre commande pour déterminer si cette fréquence est limitée par le processus ou par la commande.

Dans ce paragraphe, nous montrons que des retards dans la commande de l'ordre de quelques centaines de microsecondes, influencent la vitesse d'usinage de manière significative.

7.6.2 Tests et mesures

Les expériences présentées dans ce paragraphe, sont des perçages sur une profondeur de 2 mm. Pour compenser l'usure et garantir le perçage complet, nous programmons un déplacement du robot en Z de -2.7 mm. La technologie utilisée est identique à celle des expériences précédentes (pas de rotation, ni de vibrations), de même que les algorithmes de réglage du servo. Nous modifions uniquement la bande passante du canal transmettant la consigne de position du servo à l'interpolateur. Cette bande passante est définie par la fréquence f_r des pas du servo (fig. 7.26).

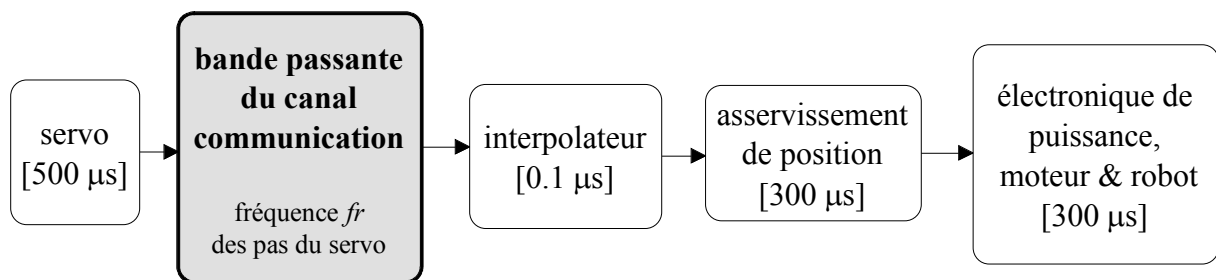


Fig. 7.26: Temps de latence des éléments intervenant dans la boucle d'asservissement du processus

La communication entre le servo et l'interpolateur est représentée à la figure 7.27. Le hardware du servo est un microcontrôleur Siemens 80C166. La boucle de réglage qu'il contrôle, a une période d'échantillonnage de 500 μ s. A chaque cycle, les algorithmes du servo génèrent un nombre compris entre ± 127 , qui correspond au nombre de pas d'avance ou de recul de l'électrode. Cette consigne de position est envoyée sous la forme de deux signaux (fig. 7.27): un signal à deux états pour contrôler la direction et un signal carré où chaque flanc montant correspond à un pas. La fréquence $f_r (= T_r^{-1})$ du signal 'pas', limite la vitesse de consigne et génère un temps de latence supplémentaire dans la boucle d'asservissement contrôlant du processus (fig. 7.26).

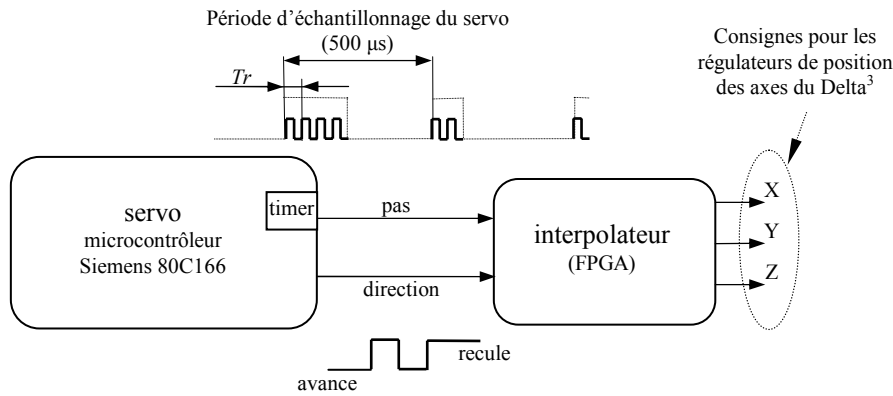


Fig. 7.27: Transmission de la consigne de position du servo à l'interpolateur

Dans le tableau 7.28, nous avons représenté différentes valeurs en relation avec la fréquence f_r ^{vii} de la bande passante de la consigne de position émise par le servo:

- La colonne 'Résolution de la consigne', définit la résolution des pas du servo après l'interpolation; ce qui représente la résolution de la consigne de position de chacun des axes du robot.
- La colonne 'Nombre de pas maximum en 500 µs', indique le nombre de pas qu'il est possible de générer en un cycle de réglage du servo. A 78 kHz, il n'est pas possible d'envoyer plus de 39 pas en 500 µs, ce qui correspond à un déplacement maximum de 3.9 µm et à une vitesse maximum de 7.8 µm/ms. A partir 312 kHz, la vitesse n'est plus limitée par la fréquence f_r , mais par l'architecture hardware du servo qui limite la consigne à 127 pas, toutes les périodes d'échantillonnage.
- La colonne 'Temps de latence', indique le temps nécessaire pour transmettre le nombre de pas maximum. Nous constatons qu'à 1.2 MHz, le temps de latence est de 100 µs pour générer 127 pas.

f_r [kHz]	Nombre de pas maximum en 500 µs	Temps de latence [µs]	Déplacement maximum en 500 µs [µm]	Vitesse maximum [µm·ms ⁻¹]	Résolution de la consigne [nm/pas]
78	39	500	3.9	7.8	100
156	78	500	7.8	15.6	
312	127 (156) ^{viii}	406	12.7	25.4	
624	127 (312)	203	12.7	25.4	
1200	127 (625)	100	12.7	25.4	
1200	127 (625)	100	2.5	5	20

Tableau 7.28: Caractéristiques du canal de transmission des pas du servo

Il est intéressant d'analyser les valeurs du tableau 7.28, en tenant compte de la structure de la commande. La boucle de réglage du servo et les boucles d'asservissement de position des axes XYZ sont asynchrones. Ces dernières sont cadencées à 300 µs (fig. 7.26). Pour que tous les pas générés par le servo puissent être pris en compte en un cycle de réglage, le temps de latence (tableau 7.28) doit être inférieur à 300 µs; ce qui est le cas à partir d'une fréquence $f_r = 624$ kHz.

^{vii} Note microinformatique: la génération des pas est faite par un timer (fig. 7.27) du microcontrôleur 80C166; la fréquence f_r peut être ajustée en modifiant le temps de reload T_r du timer.

^{viii} Les nombres entre parenthèses et en italiques, indiquent le nombre de pas qu'il serait possible de transmettre, si le servo ne limitait pas la vitesse à 127 pas par période d'échantillonnage.

Pour des fréquences inférieures, deux cycles du régulateur de position sont nécessaires, ce qui ajoute un retard de 300 μ s dans la boucle d'asservissement du gap.

Sur les graphes 7.29 à 7.32, nous avons représenté des perçages avec des bandes passantes f_r variant de 78 kHz à 1.2 MHz. La courbe *Gap Voltage* se réfère à l'échelle de droite en volts et la courbe *position*, se réfère à l'échelle de gauche en micromètres. Le gain est fixé à 100, comme pour les autres expériences présentées dans ce chapitre. Une première analyse montre que l'augmentation de la bande passante, a pour effet de stabiliser la tension moyenne du gap.

Avec une fréquence f_r de 78 kHz (fig. 7.29), nous remarquons qu'au moment du perçage complet (après 53 secondes), l'instabilité générée par le brusque changement des conditions d'usinage, font reculer l'électrode; lorsque cette dernière traverse et agrandi la sortie du trou, l'avance devient difficile car la tension du gap fluctue énormément.

Avec des fréquences f_r plus élevées (fig.7.30 à 7.32), cet effet disparaît et le perçage complet est marqué par le coude de la courbe *Position*, suivi d'une augmentation de la vitesse de descente.

Les graphes 7.33 à 7.36 sont des agrandissements après 20 secondes d'érosion des figures 7.29 à 7.32. Nous constatons que la fréquence et l'amplitude des oscillations, augmentent avec la bande passante des pas du servo. La fréquence passe d'une trentaine de hertz (fig. 7.33), à une centaine de hertz (fig. 7.36) et l'amplitude des oscillations d'environ cinq micromètres, à une trentaine de micromètres.

Soulignons encore, que malgré la forte instabilité visible à la figure 7.36, la vitesse moyenne d'érosion reste régulière (fig. 7.32).

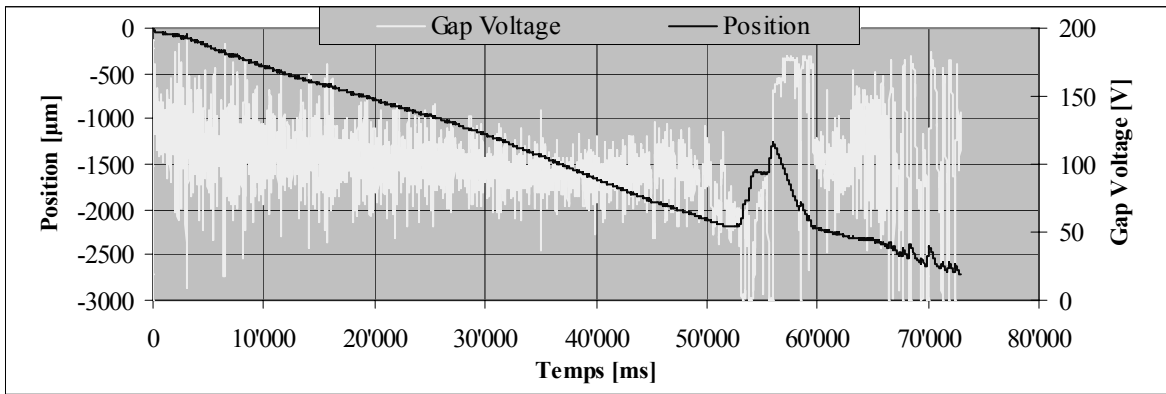


Fig. 7.29: Perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=78$ kHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

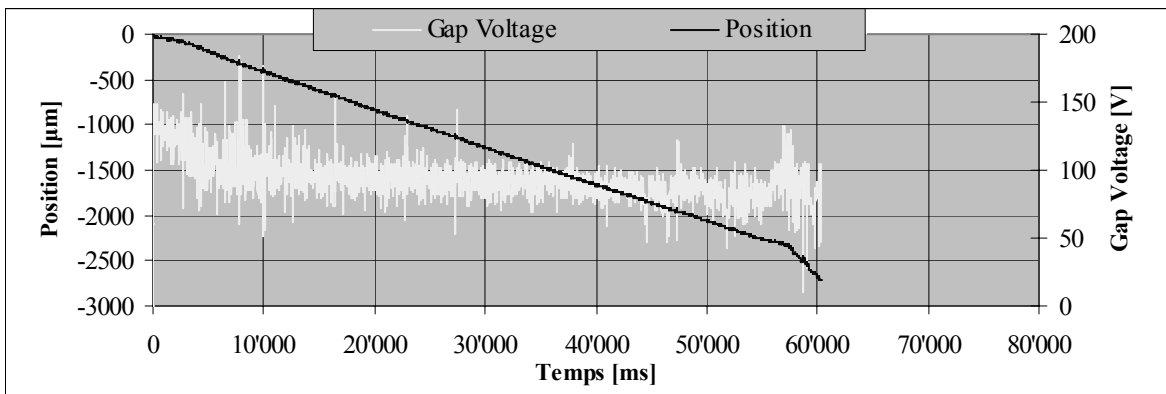


Fig. 7.30: Perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=156$ kHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

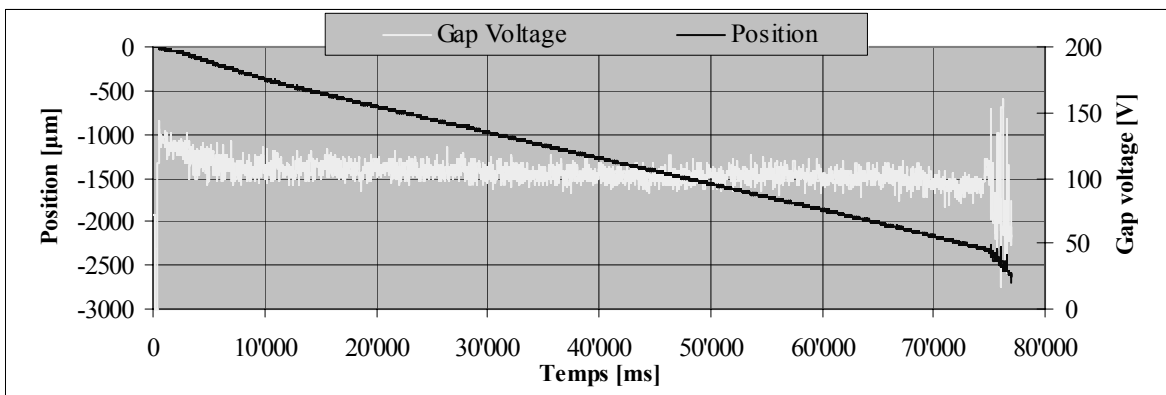


Fig. 7.31: Perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=624$ kHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

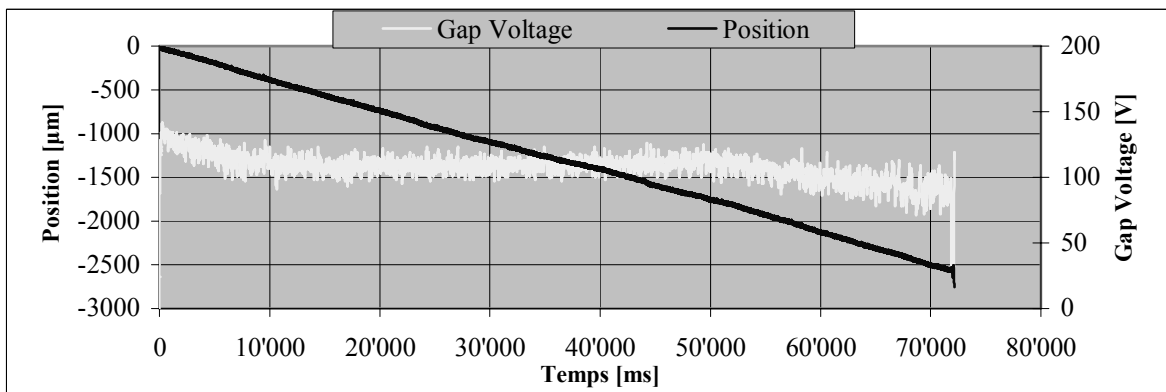


Fig. 7.32: Perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=1.2$ MHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

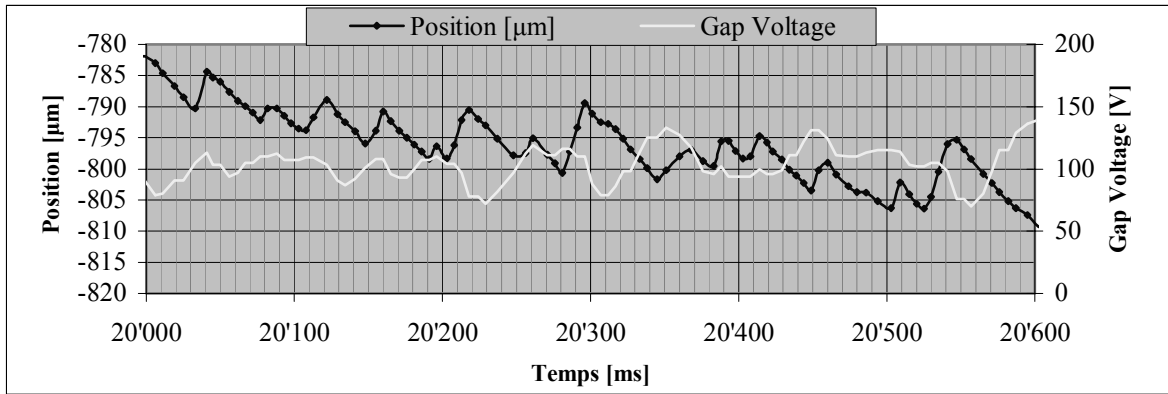


Fig. 7.33: Détail du perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=78$ kHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

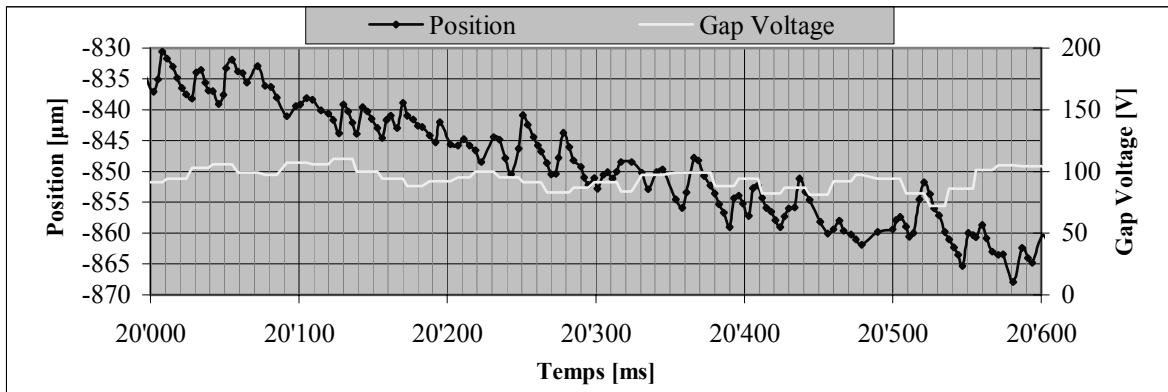


Fig. 7.34: Détail du perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=156$ kHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

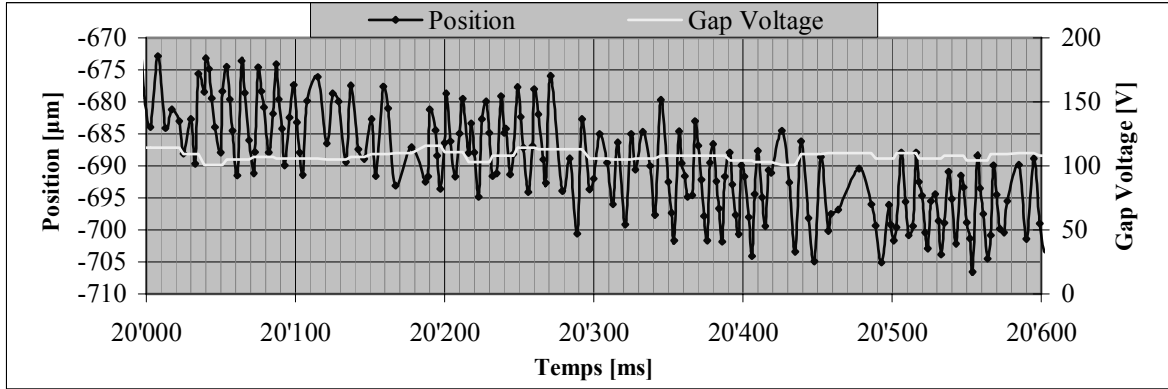


Fig. 7.35: Détail du perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=624$ kHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

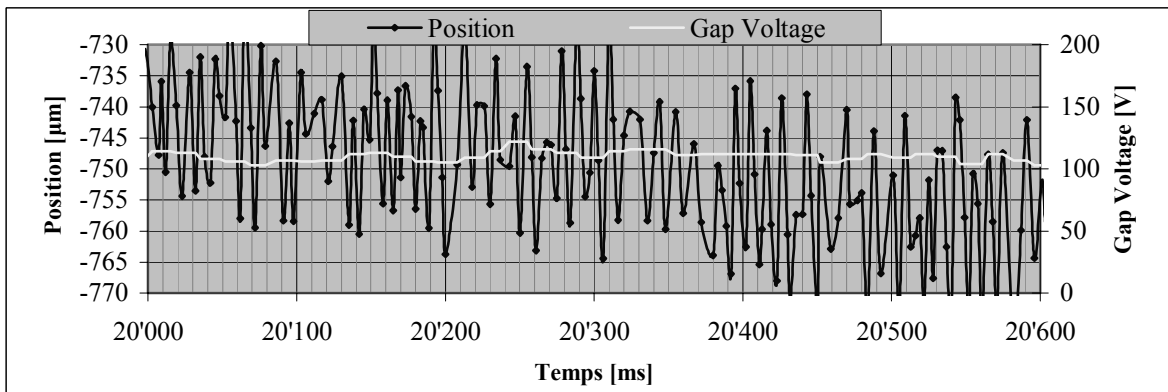


Fig. 7.36: Détail du perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=1.2$ MHz (gain=100, résolution=100 nm/pas)

Sur les graphes 7.37 et 7.38, nous avons représenté un perçage dans des conditions les plus performantes. Nous travaillons avec la bande passante f_r maximum (1.2 MHz) et nous avons ajusté le gain de manière à optimiser le temps d'usinage. En imposant une résolution des pas du servo à 20 nm au lieu de 100 nm, nous avons divisé le gain par cinq par rapport aux expériences précédentes.

Sur le graphe 7.37, nous observons une descente régulière et des oscillations de la tension du gap, maintenues dans une fourchette d'une cinquantaine de volts. En considérant le graphe 7.38, nous notons que la fréquence des oscillations de la courbe *Position*, est d'une centaine de hertz et que leur amplitude moyenne est d'environ 5 μm . Dans ces conditions, le temps de perçage sur une profondeur de 2 mm a été abaissé à 32 secondes; **la vitesse d'usinage a été doublée** par rapport aux autres tests.

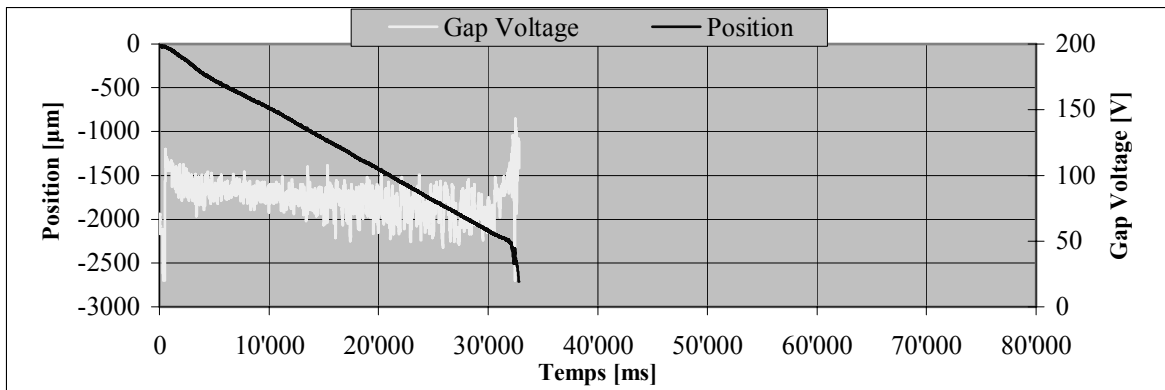


Fig. 7.37: Perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=1.2$ MHz (gain=100, résolution=20 nm/pas)

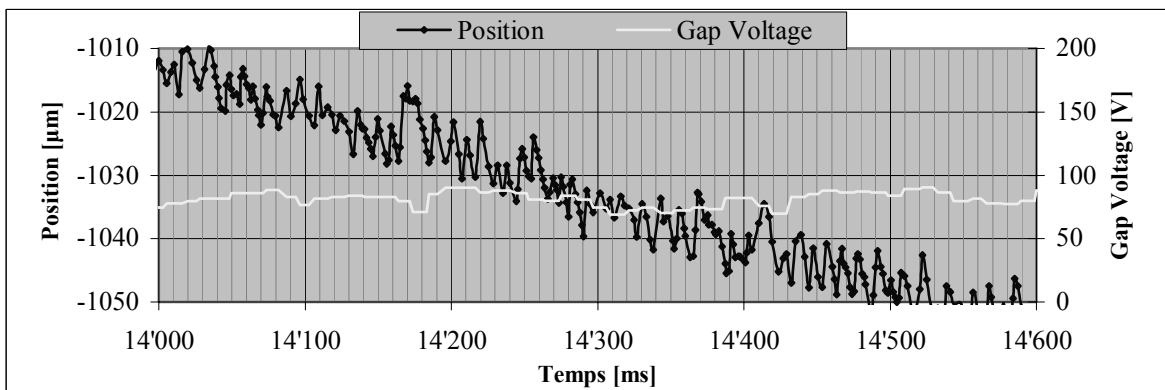


Fig. 7.38: Détail du perçage de 2 mm de profondeur avec $f_r=1.2$ MHz (gain=100, résolution=20 nm/pas)

7.6.3 Conclusion

Le tableau 7.39 résume les différents paramètres caractérisant les mesures relatées plus haut:

- Dans la première colonne '*Fréquence f_r des pas du servo*', nous avons indiqué entre parenthèses, la période T_r correspondant à un pas du servo et la valeur du gain multipliée par la résolution d'un pas en nanomètre. Seule la dernière mesure est effectuée avec une résolution de consigne de 20 nm/pas, toutes les autres le sont avec une résolution de 100 nm/pas.
- La colonne '*Fréquence des oscillations*', représente la fréquence moyenne du va-et-vient de l'électrode durant le perçage. Les valeurs sont calculées en déterminant les maximums des courbes *Position* (fig. 7.33-7.36 et 7.38).

- La colonne ‘*Vitesse instantanée maximum*’, indique la vitesse maximum commandée par le servo au cours du perçage.
- La colonne ‘*Tension moyenne du gap*’, correspond à la tension moyenne du gap calculée à partir de mesures pour le perçage complet.
- Les valeurs du *temps d’usinage*, de *l’usure de l’électrode* et de la *vitesse moyenne de perçage*, sont indiquées dans les trois dernières colonnes du tableau.

Fréquence f_r des pas du servo	Fréquence des oscillations [Hz]	Vitesse instantanée maximum [$\mu\text{m}/\text{ms}$]	Tension moyenne du gap [V]	Temps d’usinage [s]	Usure de l’électrode [%] [μm]	Vitesse moyenne de perçage [$\mu\text{m}/\text{s}$]
78 kHz ($Tr = 12.8 \mu\text{s}$) (Gain = 100, rés=100 nm/pas)	~30	1	103	72	19 (375)	27
156 kHz ($Tr = 6.4 \mu\text{s}$) (Gain = 100, rés=100 nm/pas)	~45	2	93	60	17 (330)	33
312 kHz ($Tr = 3.2 \mu\text{s}$) (Gain = 100, rés=100 nm/pas)	~45	3	95	60	18 (361)	33
624 kHz ($Tr = 1.6 \mu\text{s}$) (Gain = 100, rés=100 nm/pas)	~100	7	103	77	19 (384)	25
1.2 MHz ($Tr = 0.8 \mu\text{s}$) (Gain = 100, rés=100 nm/pas)	~100	11	107	72	30 (600)	27
1.2 MHz ($Tr = 0.8 \mu\text{s}$) (Gain = 100, rés=20 nm/pas) ^{ix}	~100	4	88	32	14 (285)	62

Tableau 7.39: Résumé des mesures pour un perçage de 2 mm de profondeur

La structure particulière de la commande utilisée (AGIE SIT-B) et les valeurs du tableau 7.39, nous permettent de formuler les deux considérations suivantes:

- 1) La fréquence des oscillations (2^{ème} colonne), augmente de ~45 Hz à ~100 Hz, lorsque f_r passe de 312 kHz à 624 kHz. Elle reste à ~100 Hz, lorsque f_r passe de 624 kHz à 1.2 MHz. Les remarques concernant le tableau 7.28, ont mis en évidence qu’à partir de 624 kHz, tous les pas générés par le servo sont pris en considération, en un cycle d’asservissement de position de 300 μs ; à 312 kHz il faut deux cycles, donc un temps de latence supplémentaire de 300 μs .
En éliminant un retard de 300 μs dans la boucle d’asservissement du gap, nous avons plus que doublé la fréquence moyenne du va-et-vient de l’électrode commandée par le servo.
- 2) La mesure effectuée avec une bande passante $f_r = 312 \text{ kHz}$, est semblable à celle de 156 kHz; pour cette raison nous la traitons directement dans le tableau 7.39, sans la présenter sur des graphes. Avec $f_r = 312 \text{ kHz}$, le temps de latence pour effectuer le nombre maximum de pas est de 406 μs (tableau 7.28). Sachant que la période d’échantillonnage du régulateur de position est de 300 μs , le nombre maximum de pas ne pourra pas être pris en compte à chaque cycle de réglage. La vitesse instantanée maximum théorique est de 25.4 $\mu\text{m}/\text{ms}$ pour une fréquence $f_r = 312 \text{ kHz}$ et de 15.6 $\mu\text{m}/\text{ms}$ avec $f_r = 156 \text{ kHz}$ (tableau 7.28). Malgré cette différence, les valeurs relevées pour les deux perçages sont similaires.
Une augmentation de la bande passante de la vitesse, n’influence pas à elle seule le processus.

Pour quantifier les grandeurs de vitesse et d’accélération réellement exploitées par le processus, nous analysons les valeurs présentées sur la dernière ligne du tableau 7.39 (fig. 7.38). Ces valeurs résultent des conditions d’usinage les plus favorables; elles sont obtenues avec une fréquence f_r ,

^{ix} La résolution des pas du servo est fixée à 20 nm pour diminuer, le gain sans modifier les consignes du servo (cf. §6.3.1.1, fig. 6.12). Ce n’est pas l’augmentation de la précision de la consigne de position (passage de 100nm/pas à 20nm/pas) qui améliore le temps d’usinage, mais la diminution du retard dans la boucle d’asservissement du gap et le gain adapté.

fixée à 1.2 MHz et en réduisant la résolution des pas de 100 à 20 nm, ce qui équivaut à diminuer le gain d'un facteur 5. Dans ces conditions, la vitesse de perçage est doublée par rapport aux autres tests. Quelques ordres de grandeurs en relation avec cette mesure:

- La fréquence moyenne des oscillations est de 100 Hz, ce qui signifie qu'un aller-retour de l'électrode nécessite en moyenne 10 ms. Un mouvement de retrait a donc une durée moyenne de **~5 ms**.
- La figure 7.38, montre que l'amplitude moyenne du va-et-vient de l'électrode est d'environ 5 μm . La vitesse instantanée maximum mesurée étant de 4 $\mu\text{m}/\text{ms}$, cette distance est parcourue au plus vite en **1.25 ms**.
- Au paragraphe 5.4.1 nous avons vu que l'accélération maximum disponible est de $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Du tableau 7.39 dernière ligne, nous constatons que la vitesse instantanée maximum commandée par le servo est de 4 $\mu\text{m}/\text{ms}$. L'inversion du mouvement, le passage d'une vitesse positive de 4 $\mu\text{m}/\text{s}$ à une vitesse de négative de 4 $\mu\text{m}/\text{s}$, nécessite donc **0.4 ms**.

Les temps mis en évidence ci-dessus, sont du même ordre de grandeur que le temps de latence de la boucle d'asservissement du gap (1 ms, cf. fig. 7.26). Une amélioration successive du contrôle du processus, passe donc par une diminution des temps de latence dans la boucle d'asservissement du gap. Comme nous l'avons vu plus haut, une diminution du retard de quelques centaines de microsecondes, permet de doubler la vitesse d'usinage.

Notons que l'amplitude du mouvement de va-et-vient de 5 μm , est similaire à celle obtenue sur les 3 premières mesures du tableau 7.39 (fig. 7.33 et 7.34). Nous en déduisons, que cette distance ne dépend pas de la fréquence des oscillations. Elle est à mettre en relation avec la distance du gap et le mouvement nécessaire, pour évacuer les particules érodées du front d'érosion.

L'électroérosion est usuellement considérée comme un processus avec des constantes de temps 'lentes'. Les algorithmes de réglage ne réagissent pas à chaque étincelle et la stabilité de l'érosion est perçue comme un équilibre, garantissant en moyenne toujours les mêmes conditions d'usinage. Avec une bonne dynamique active, nous avons rapproché les constantes de temps mécaniques, des constantes de temps électriques et nous avons augmenté la vitesse d'usinage de manière significative. En anticipant les courts-circuits et en ajustant la distance de claquage à une fréquence d'une centaine de hertz, au lieu de quelques dizaines de hertz communément, nous avons doublé la vitesse d'usinage.

Les étincelles de faibles énergies utilisées en μEDM , sont produites par un générateur à relaxation. L'électronique de puissance d'un générateur transistorisé, n'étant pas capable de contrôler des constantes de temps de quelques centaines de nanosecondes et des énergies de quelques micro-joules, seul l'ajustement de la distance de claquage permet de garantir un maximum d'étincelles érosives. La technologie utilisée pour toutes les expériences présentées dans ce chapitre, commande une pause de 13 μs entre chaque recharge du condensateur générant les étincelles. Avec un temps de latence de 1 ms dans la boucle d'asservissement du gap, la position de l'électrode est ajustée toutes les ~ 80 étincelles. Nous avons constaté, qu'un temps de latence de 300 μs (23 étincelles), influence déjà la tension moyenne du gap, donc la vitesse d'usinage.

7.7 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'intérêt de la dynamique en μEDM à plongée. Une analogie avec l'EDM à fil, montre au premier abord des conditions d'usinage semblables aux nôtres: un fil électrode avec un diamètre d'une centaine de micromètres et des impulsions à polarité négative de très faible énergie. Malgré une dynamique très basse (table XY déplaçant la pièce dans un bac rempli de diélectrique), les machines EDM à fil atteignent des vitesses d'usinage élevées (350-500

$\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)^x. Pour comprendre ces performances, soulignons quelques différences essentielles entre une machine à micro-érosion à enfonçage et une machine à découpage: avec cette dernière, le fil électrode est guidé au deux extrémités (fig. 2.5), il est sans cesse renouvelé, le front d'érosion est distribué sur toute la longueur du fil et le diélectrique peut circuler le long de l'électrode entre l'entrée et la sortie de la pièce. Cette ultime particularité, permet à un système de lavage 'intelligent', d'ajuster le flux d'eau déionisée dans la zone du gap, en contrôlant indépendamment la pression du fluide sur la tête inférieure et sur la tête supérieure de la machine. L'évacuation des particules érodées, se fait à un rythme régulier et continu durant l'avance du front d'érosion.

En μEDM à plongée, l'utilisation de la **dynamique passive** est une manière de s'approcher des excellentes conditions de lavage présentes dans une machine à découpage. Les vibrations, mais en particulier la rotation à haute vitesse de l'électrode, permettent de générer des flux de diélectrique évacuant régulièrement les particules érodées de la zone du gap.

Ajoutons que les mouvements relatifs de l'électrode par rapport à la pièce à usiner, ont deux autres avantages: d'une part ils génèrent des gradients de pression favorisant l'implosion du canal de plasma durant la phase de rupture de l'étincelle et d'autre part, le déplacement de l'électrode durant la durée de la décharge érosive, distribue la chaleur sur sa périphérie; ce qui a pour effet d'en diminuer l'usure.

Le tableau 7.40 résume quelques manières de favoriser l'évacuation des particules érodées de la zone du gap en μEDM à plongée.

1	La rotation de l'électrode.
2	Les vibrations de l'électrode ou de la pièce.
3	L'utilisation d'électrodes tubulaires, permet d'injecter du diélectrique propre directement dans la zone du gap. Pour des diamètres supérieurs à 200 μm , l'usage de telles électrodes est courant; pour des diamètres inférieurs, il l'est beaucoup moins. Les électrodes tubulaires d'une centaine de micromètres de diamètre sont délicates à utiliser et la petite dimension du tube oblige à injecter le diélectrique à très haute pression, pour avoir un lavage intéressant.
4	Les mouvements de planétaire, permettent de diminuer la concentration des particules érodées. Ces mouvements fournissent un espace supplémentaire, facilitant l'évacuation des débris [yuz02a].
5	L'usinage horizontal au lieu de vertical, permet aux particules érodées d'être évacuées plus facilement [mas89a]. Lors du perçage vertical, la force de gravitation s'oppose à l'évacuation des déchets du front d'érosion situé au fond du trou; ils doivent remonter entre les parois du perçage et la circonférence de l'électrode, jusqu'à l'entrée du trou à la surface de la pièce.

Tableau 7.40:

Quatre manières de favoriser l'évacuation des déchets de la zone du gap en μEDM à plongée

En abordant le processus d'EDM de manière classique - équilibre entre la quantité de matière usinée et son évacuation - nous proposons des solutions permettant d'évacuer les particules érodées du gap de manière continue. Cette perception idéale du processus n'est pas réaliste en μEDM . Durant le micro-perçage par exemple, les conditions se dégradent avec la profondeur du trou. Plus le front d'érosion est éloigné de l'entrée du trou, plus le processus est perturbé. Le

^x La vitesse d'usinage d'une machine EDM à découpage est donnée en $\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$, car elle dépend de la hauteur de la pièce à usiner. Une vitesse de coupe de $350 \text{ mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ sur une hauteur de 20 mm, donne une avance de $\sim 290 \mu\text{m/s}$. Ces vitesses sont atteintes avec des fils de $\text{Ø}330 \mu\text{m}$.

Mentionnons que la vitesse de coupe atteint un optimum pour des pièces de 50-100 mm d'épaisseur. Elle diminue pour des pièces plus fines, comme pour celles plus épaisses. (cf. documentation AGIE: Agiecut Progress)

diélectrique frais a toujours plus de difficulté à arriver au fond de l'usinage et le chemin effectué par les particules érodées pour sortir du perçage s'allonge; plus le parcours pour sortir du perçage est long et plus la probabilité est grande d'influencer la mesure de la tension du gap, en générant des courts-circuits entre la périphérie de l'électrode et les parois du trou. L'abaissement de la tension du gap et les courts-circuits, vont commander des mouvements de recul de l'électrode; chacun de ces mouvements va freiner la vitesse d'usinage, jusqu'à l'annuler.

Pour réduire ces mouvements de recul, la solution 'classique' consiste à augmenter la pause entre chaque impulsion, pour diminuer le taux d'enlèvement de matière. Une réduction de ce taux, diminue la concentration de particules présentes dans le diélectrique; la probabilité de courts-circuits durant le parcours d'évacuation est alors limitée, avec l'inconvénient de diminuer la vitesse d'érosion.

Si l'on observe l'électroérosion à une échelle de temps des étincelles, l'enlèvement de matière n'est plus perçu comme un processus continu. Chaque étincelle érosive fond un peu de matériau, qu'il faut évacuer du gap et diluer dans le diélectrique le plus rapidement possible. En minimisant les temps de latence dans la boucle de réglage du servo, nous avons montré que nous pouvons optimiser le processus. Avec une **dynamique active** en rapport avec le nombre d'étincelles érosives, l'enlèvement de matière est stoppé avant que le gap ne soit trop pollué, ce qui permet aux particules érodées de se diluer dans le diélectrique et d'être évacuées plus aisément. D'autre part en intervenant rapidement, le mouvement de recul n'est plus influencé par le paramètre court-circuit, ce qui limite la distance de recul.

Cette dernière particularité prend toute sa valeur, si l'on considère les perturbations générées par les particules érodées. Elles doivent être évacuées entre la circonférence de l'électrode et les parois du perçage. Si le mouvement de recul de l'électrode est rapide et court, les particules ayant générés l'abaissement de la tension du gap, seront rapidement diluées par le mouvement de fluide entraîné par le déplacement de l'électrode et l'érosion pourra se poursuivre sans perte de temps. Nous avons montré que des retards de quelques centaines de microsecondes influencent déjà le temps d'usinage. Si l'on dispose d'une bonne dynamique active, il est possible de gérer instantanément le déséquilibre - quantité de matière usinée et son évacuation - et d'optimiser le processus.

8 Quelques usinages et observations

8.1 Introduction

Au cours des chapitres précédents, nous nous sommes concentrés sur un seul type d'usinage: le perçage. Cette géométrie simple, nous a permis de mettre en évidence les avantages de disposer d'une mécanique dynamique et précise. Nous avons démontré l'amélioration du contrôle du processus inhérente à une bonne dynamique.

A ce jour, l'application 'type' de la μ EDM est le micro-perçage. Citons quelques raisons:

- L'usure de l'électrode n'influence pas la géométrie de l'usinage; pas besoin d'algorithmes complexes pour la compenser.
- Les électrodes cylindriques d'une centaine de micromètres de diamètre sont courantes.
- La précision de la forme du trou ne dépend pas de la précision de positionnement des axes X et Y, mais du contour de l'électrode. (Sur les cinématiques communément utilisées par les machines EDM et sans utiliser de mouvements planétaires, seul l'axe Z travaille durant le perçage).
- Les performances et l'ergonomie des machines μ EDM existantes, sont un frein à l'élargissement du spectre d'utilisation de la micro-électroérosion. Le taux d'enlèvement de matière est bas et des précisions d'usinage sub-micrométriques, sont difficilement atteignables.

En proposant une petite machine à électroérosion garantissant une précision sub-micrométrique, avec un taux d'enlèvement de matière optimisé (grâce à la dynamique), nous ouvrons la μ EDM à un large spectre d'applications microtechniques. Dans ce chapitre nous présentons succinctement quelques usinages réalisés avec notre petite machine μ EDM. Nous proposons une méthode de réduction du diamètre de l'électrode 'in situ' et une stratégie pour éroder des profils, à la manière d'une machine EDM à fil. Nous désirons montrer que notre prototype se prête non seulement à l'usinage de formes borgnes, mais aussi au découpage de profils (engrenages, capteurs, filières, etc.); applications usuellement érodées par des machines à fil.

Nous commençons par exposer une méthode, permettant de mesurer les forces du processus agissant sur l'électrode.

8.2 Mesure de la 'force d'érosion'

8.2.1 Motivation

L'électroérosion est un mode d'usinage sans contact direct entre l'outil et l'objet à usiner. Toutefois, des forces dues au processus sont transmises aux surfaces de l'électrode et de la pièce à éroder. Plus les dimensions des éléments diminuent, plus ces forces auront une influence importante (lois de similitude). Elles proviennent de plusieurs phénomènes:

- Des pressions engendrées par le processus, durant les différentes phases d'une étincelle érosive (§2.4).
- Du flux du diélectrique nécessaire à l'évacuation des particules érodées. (Ce flux peut être entretenu par des mouvements de l'électrode, cf. §7.2 & §7.3).
- Des tensions et courants électriques générés entre l'électrode et la pièce à usiner (forces électrostatiques et électromagnétiques).

Au paragraphe 4.6, nous avons présenté une expérience permettant de déterminer la force engendrée par une étincelle. Cette mesure a été effectuée avec un montage dédié à cette expérience et ne prend pas en compte tous les phénomènes intervenant lors d'un usinage réel. Dans ce paragraphe, nous proposons de mesurer la force réelle subie par l'électrode durant un perçage.

Le procédé que nous utilisons, est issu d'un problème relevé durant les premiers tests en érosion avec le pousse-fil (fig. 8.1). Nous avons constaté, que la force F_e agissant sur l'électrode durant un perçage, la faisait glisser entre les deux pinces si la force de fermeture F_p était trop faible (fig. 8.2). Nous avons eu l'idée, d'utiliser ce phénomène pour quantifier 'la force d'érosion'.

8.2.2 Caractérisation des conditions limites de glissement de l'électrode

Pour différentes pressions P_p de fermeture des pinces (fig. 8.1), nous mesurons avec un dynamomètre fixé à l'électrode, la force F_g pour laquelle cette dernière commence à glisser. Ces valeurs sont reportées sur le graphe 8.3.

Sur l'échelle de droite dénommée *Pression d'érosion*, nous avons reporté la pression nécessaire sur la surface d'une électrode de $\varnothing 149 \mu\text{m}$, pour générer la force F_g indiquée par l'échelle de gauche.

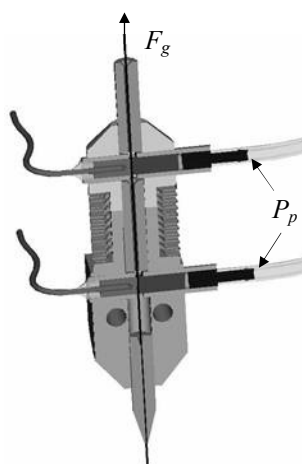


Fig. 8.1

Pousse-fil et ses pinces pneumatiques maintenant l'électrode en position

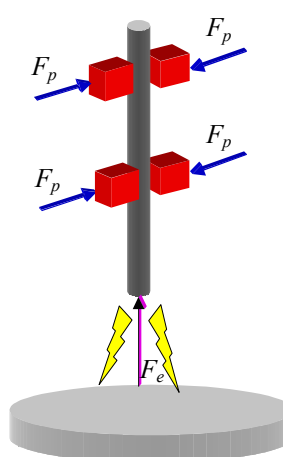


Fig. 8.2

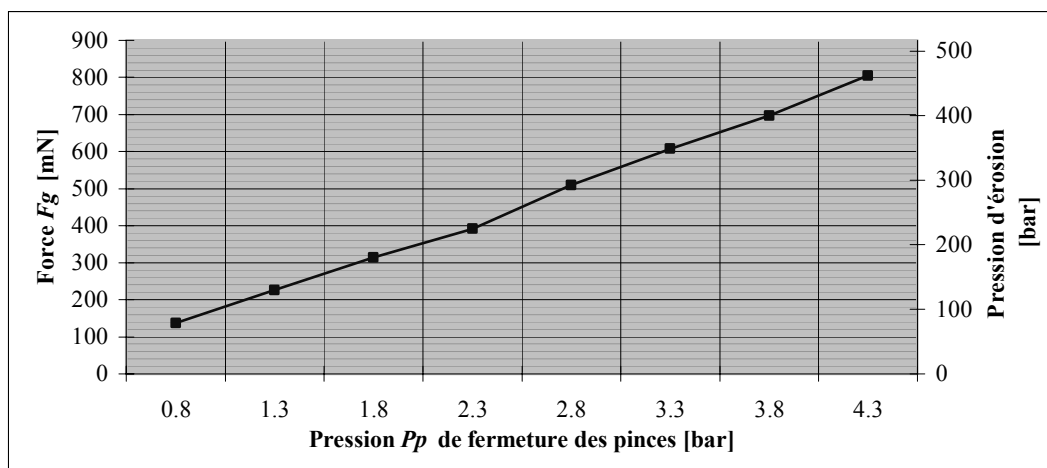


Fig. 8.3: Forces et pressions définissant la limite de glissement de l'électrode entre les pinces du pousse-fil

8.2.3 Tests et mesures

Pour ce test, nous perçons une pièce en acier avec une électrode en tungstène de $\varnothing 149 \mu\text{m}$. Le diélectrique est de l'eau déionisée et nous érodons avec la même technologie utilisée pour toutes les expériences précédentes (cf. Annexe VII).

Pour déterminer un éventuel glissement de l'électrode, nous procédons comme suit: nous fixons une pression de fermeture des pinces suffisamment élevée pour que l'électrode ne glisse pas. Puis nous érodons quelques trous borgnes, en programmant une descente en Z de $-800 \mu\text{m}$. Après chaque perçage, nous mesurons l'usure de l'électrode avec la fonction *touch*, de manière à déterminer l'usure moyenne pour la technologie utilisée.

Nous perçons alors d'autres trous, en fermant les pinces avec différentes pressions. Comme précédemment, nous mesurons après chaque usinage le retrait de l'électrode avec la fonction *touch*. Le graphe 8.4 représente les valeurs de glissement obtenues, après avoir déduit à la mesure du *touch*, l'usure moyenne inhérente à la technologie. Nous constatons que l'électrode commence à glisser, lorsque la pression dans les pinces se situe entre 3.3 et 2.3 bar. En prenant la valeur intermédiaire de 2.8 bar, le graphe 8.3 indique qu'une pression d'érosion d'environ **300 bars** est nécessaire pour la faire glisser. La force agissant sur la pointe de notre électrode de $\varnothing 149 \mu\text{m}$ est donnée en se référant à l'échelle de gauche du graphe 8.3; elle est d'environ **500 mN**.

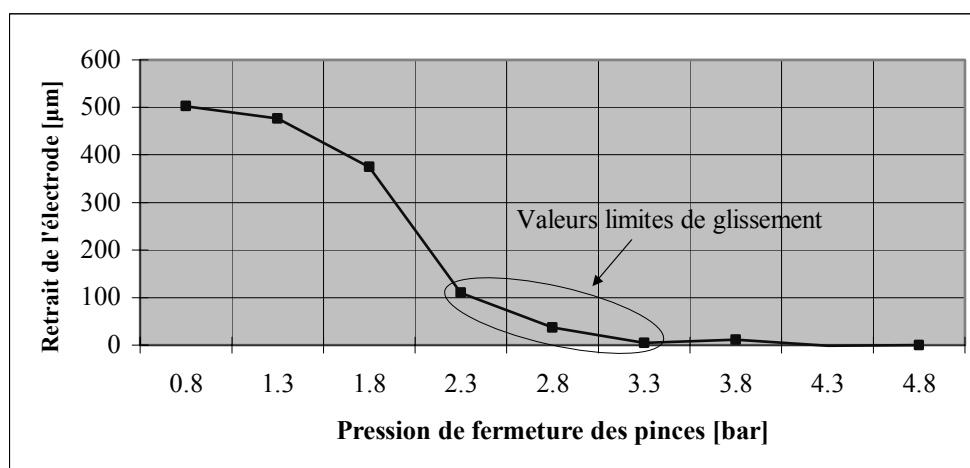


Fig. 8.4: Mesure du glissement de l'électrode en érosion pour différentes pressions de fermeture des pinces

8.2.4 Conclusion

Ces forces négligeables pour de grosses machines, sont à prendre en considération lorsqu'on travaille dans 'le petit'. Pour rappel, la masse de l'électrode en tungstène que nous utilisons est de quelques millièmes de gramme, ce qui donne une force de gravité de quelques centièmes de millinewton. La force de gravité est inférieure d'un facteur **10'000** à la force d'érosion que nous avons mesurée.

En considérant l'électrode en tungstène de $\varnothing 149 \mu\text{m}$, comme une poutre encastree dans le guide-fil: une force latérale de 500 mN à une distance de 0.5 mm du guide, la déplacerait de **2 µm**

8.3 Réduction du diamètre de l'électrode

8.3.1 Motivation

Le maniement d'électrodes très fines est délicat. C'est pourquoi le formage de 'grosses' électrodes directement sur la machine, comporte différents avantages: pas de problèmes d'ajustement, de manipulation ou encore de fixation.

Le WEDG (§2.5.9) associé à la rotation de l'électrode, est la solution usuelle pour la former 'in situ'. Cet accessoire permet de réduire leur diamètre jusqu'à 10 μm . Son principal inconvénient est son coût.

Dans ce paragraphe, nous proposons une méthode pour réduire le diamètre de l'électrode, ne nécessitant ni rotation, ni accessoires supplémentaires.

8.3.2 Tests et mesures

Nous utilisons un mouvement planétaire, pour diminuer le diamètre de l'électrode. En premier lieu, nous perçons une pièce avec une électrode de $\text{Ø}149 \mu\text{m}$. Le perçage terminé, le robot sort l'électrode du trou et par un *touch* à la surface de la pièce, contrôle l'usure et reprend la référence de la pointe de l'électrode. Cette dernière est alors positionnée au fond du trou et sa circonférence érodée contre les parois du perçage, en imposant un mouvement planétaire. La technologie à polarité positive utilisée pour la réduction planétaire, se trouve en Annexe VIII.

La photo 8.5 représente une électrode dont nous avons réduit le diamètre à $\sim 40 \mu\text{m}$, sur une longueur de 900 μm . En travaillant avec une pièce d'épaisseur de 1 mm, nous obtenons une longueur de 900 μm , car la pointe de l'électrode s'use durant l'usinage. La forme conique de l'électrode réduite provient du même phénomène: au départ du planétaire, le perçage comme l'électrode ont une forme conique.

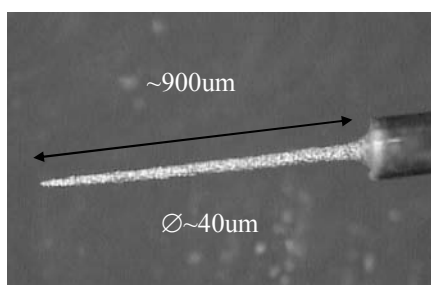


Fig. 8.5:
Réduction de l'électrode à un $\text{Ø}\sim 40\mu\text{m}$ sur une longueur de $\sim 900 \mu\text{m}$

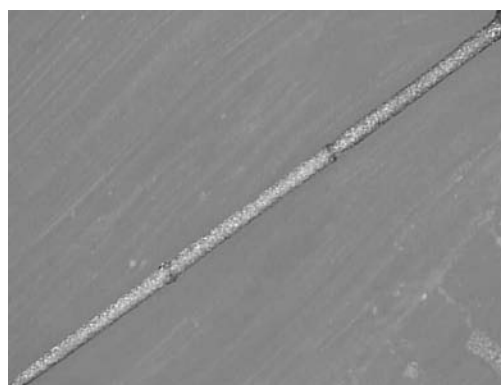


Fig. 8.6:
Réduction de l'électrode à un $\text{Ø}\sim 86\mu\text{m}$ sur une longueur de $\sim 3 \text{ mm}$

La photo 8.6 montre une électrode réduite sur 3 mm en trois étapes. Nous perçons 3 trous dans une pièce d'épaisseur de 1 mm. Ensuite, nous positionnons la pointe de l'électrode au fond du premier perçage et érodons avec un mouvement planétaire. Le temps nécessaire pour réduire une électrode de $\text{Ø}149 \mu\text{m}$ à $\sim \text{Ø}86 \mu\text{m}$ sur une hauteur de 1 mm, est d'environ deux minutes. Le robot sort alors l'électrode du trou, le pousse-fil la fait avancer de 1 mm et le robot la positionne dans le second trou pour un autre planétaire. Après avoir répété la même opération dans le dernier trou, nous obtenons l'électrode présentée sur la photo 8.6. Les 'escaliers' proviennent de la forme conique des perçages 'outils'.

8.3.3 Conclusion

Les résultats présentés ouvrent la voie à une manière de faire simple, permettant de travailler avec des diamètres inférieurs à 100 μm sans accessoires supplémentaires. Concevoir des accessoires adaptés aux différentes grandeurs d'électrodes, qu'il faut à chaque fois monter et démonter de la machine serait coûteux, peu pratique et source d'ennuis. Nous croyons que l'usinage de l'électrode 'in situ' est la solution la plus ergonomique pour travailler dans le 'très petit'.

8.4 Le découpage avec une machine μ EDM à plongée

8.4.1 Motivation

Le problème principal du fraisage par électroérosion (§2.5.6), est la gestion de l'usure de l'électrode. Dans ce paragraphe, nous montrons que l'usinage de profils à la manière des machines EDM à fil, est réalisable en μ EDM à plongée, sans faire intervenir des algorithmes complexes de compensation d'usure. Nous nous différencions du fraisage par électroérosion, en ne proposant pas d'éroder des cavités, mais uniquement des profils.

La stratégie d'usinage présentée, ne nécessite pas la rotation de l'électrode et minimise l'influence de l'usure, sur la géométrie érodée. Nous montrons que le champ d'applications de notre prototype ne se limite pas au micro-perçage, mais s'ouvre sur des usinages spécifiques aux machines à découpage.

8.4.2 Tests et mesures

La figure 8.7 représente le profil d'un carré de $340\ \mu\text{m}$ de côté et de $\sim 150\ \mu\text{m}$ de profondeur. Il est réalisé sur de l'acier avec une électrode en tungstène de $\text{Ø}149\ \mu\text{m}$. Chaque côté est érodé en utilisant la stratégie présentée à la figure 8.8: une descente en Z de $-150\ \mu\text{m}$, suivie d'une avance rectiligne pour éroder un bord. Après l'usinage d'un côté du carré, l'électrode est usée et se présente comme à la figure 8.9. Elle est alors formée (dressing) en perçant un trou à polarité positive, de manière à aplanir sa pointe. Pour terminer, les trois flancs restants sont érodés en procédant de la même manière.

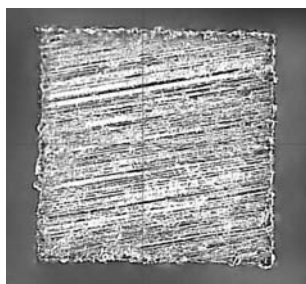


Fig. 8.7: Profil carré de $340\ \mu\text{m}$ de côté

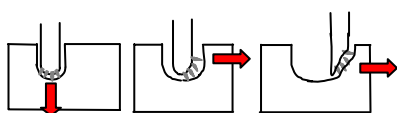


Fig. 8.8: Erosion d'un côté du carré



Fig. 8.9: Electrode de $\text{Ø}149\ \mu\text{m}$ après l'usinage d'un côté du carré

La profondeur des cavités définissant le profil du carré, diminue avec l'avance rectiligne de l'électrode; c'est une conséquence de l'usure de cette dernière (fig. 8.8). Pour corriger ce phénomène, nous proposons de programmer une descente en Z durant l'avance rectiligne. Cette manière de faire, définit un front d'érosion perpendiculaire à la direction de compensation de l'usure, exactement comme lors du perçage. Dans ce dernier cas, le front d'érosion est délimité par un cercle du diamètre de l'électrode; dans notre cas c'est une ellipse (fig. 8.10).

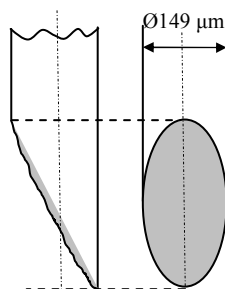


Fig. 8.10: Surface de l'électrode en contact avec le front d'érosion

Pour contrôler la qualité des perçages présentés aux chapitres précédents, il est nécessaire de découper la pièce érodée au niveau du centre des trous. Usuellement, ce type d'usinage est réalisé par une machine à fil. En réalisant perçage et découpage sur la même machine, nous gagnons du temps et nous évitons les problèmes d'alignement. C'est ce que nous présentons dans l'expérience qui suit.

Avec une électrode en tungstène de $\text{Ø}149 \mu\text{m}$, nous avons percé dans de l'acier une série de 3 trous traversant de 2 mm de profondeur et distants de $500 \mu\text{m}$. Puis en utilisant la technique de compensation d'usure expliquée plus haut, nous avons découpé la pièce en 14 passages. Le déplacement est programmé, en alignant la circonférence de l'électrode sur une droite passant par le centre des trous. En enlevant $150 \mu\text{m}$ par passage, nous avons érodé les 2 mm d'épaisseur de la pièce en environ 15 minutes et obtenu la coupe transversale des perçages, présentée sur la photo de la figure 8.11.

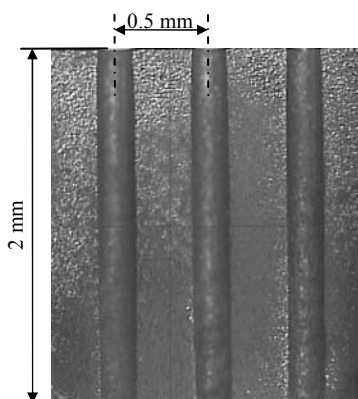


Fig. 8.11:

Coupe transversale d'une série de trous de 2 mm de profondeur et de $\text{Ø}180 \mu\text{m}$

8.4.3 Conclusion

En utilisant une stratégie d'usinage permettant de compenser l'usure de l'électrode dans la direction du front d'érosion, il est possible de la 'renouveler' durant l'usinage. L'usure est compensée par des passages successifs et ne doit pas être connue précisément. Comme lors du perçage, c'est la circonférence de l'électrode qui donne la référence au profil usiné et le front d'érosion se situe sur une surface renouvelable.

Nous ne proposons pas d'usiner des cavités, pour éviter des algorithmes de compensation d'usure de l'électrode, complexes et difficiles à maîtriser [zuy00a]. Nous proposons d'utiliser la μEDM à plongée pour des applications destinées aux machines à fil. Cette manière de concevoir les usinages, simplifie la gestion de l'usure de l'électrode et élargit immédiatement le spectre d'applications d'une petite machine μEDM .

9 Conclusion générale

Après un rappel des principes de bases de l'électroérosion, nous avons proposé un tour d'horizon des techniques de micro-fabrication couramment utilisées. Nous avons relevé qu'il existe peu de techniques de fabrication éprouvées pour usiner des motifs d'une dizaine de millimètres, avec une précision sub-micrométrique.

Pour le prototypage ou pour de petites séries, les techniques d'usinage par enlèvement de copeaux, couvrent partiellement ce domaine d'application. Les inconvénients de ces procédés sont la présence de forces d'usinage et la miniaturisation des outils (micro-fraises, micro-mèches), qui se fait au détriment de la rigidité, donc de la précision.

Pour une production de masse, les procédés photolithographiques comme le LIGA et ses dérivés, sont utilisables. Toutefois, ces techniques impliquent des limitations dans le type de matériaux usinables (Ni, Cu, Si).

L'électroérosion est un mode d'usinage sans contact, qui permet d'usiner un grand spectre de matériaux différents; il suffit qu'ils soient conducteurs. L'usinabilité du matériau ne dépend pas de ses caractéristiques mécaniques, mais de sa conductibilité électrique. En tant que procédé d'usinage direct, la μ EDM est adaptée au prototypage et aux petites séries (pièces d'horlogerie, micro-moules), mais également à la production de masse (micro-perçage d'injecteurs).

L'étude de l'état de l'art a montré le vif intérêt porté par de nombreux chercheurs depuis bientôt quarante ans à la micro-électroérosion. Les publications traitant cette technologie, donnent des directions, montrent des potentiels expérimentés dans des conditions de laboratoire, mais sont rarement dirigées vers une réalisation industrielle. Les expériences proposées, sont principalement conduites en ajoutant un module μ EDM sur une machine EDM à plongée traditionnelle. Cette approche permet aux chercheurs de disposer immédiatement de tous les outils d'une machine commerciale (base de technologie, outil de programmation, interface homme-machine). L'inconvénient réside dans la difficulté de proposer un concept de machine μ EDM réaliste, débouchant sur un attrait industriel.

Nous avons relevé, qu'aucune machine μ EDM disponible sur le marché, ne possède l'ensemble des performances utiles à la μ EDM. A savoir: haute précision, dynamique et ergonomie. Les machines existantes sont une réduction homothétique des machines EDM traditionnelles et cette approche top-down, ne permet pas de concilier les deux notions antagonistes que sont les grandes accélérations (la dynamique) et la précision.

La dynamique et la précision sont le fil conducteur de l'analyse de notre prototype. Nous étudions tous les aspects influençant la boucle d'asservissement du gap et présentons les paramètres, les fonctions et les accessoires utilisés dans les expériences relatées au cours de ce travail de thèse. Nous expliquons les particularités du processus d'érosion et validons le concept de commande utilisé (AGIE SIT-B). Cette dernière est employée par AGIE pour deux types d'applications: les machines nécessitant une électronique bon marché et une machine dédiée au micro-perçage d'injecteurs diesel en grande série (la Quadratron II). La première application montre que nos objectifs peuvent être atteints avec des coûts contenus et la seconde donne la possibilité de comparer nos résultats avec une machine commerciale, dont la différence avec la nôtre réside essentiellement dans la mécanique.

Notons que la conception de notre prototype, a été guidée par l'approche suivante: utiliser la technologie d'AGIE contrôlant l'étincelage (le générateur et la commande) avec un minimum d'adaptations et intégrer une valeur ajoutée, sous forme d'une mécanique dynamique et précise (le robot Delta³).

9. Conclusion générale

Un modèle et des simulations du comportement de notre prototype ont mis en évidence l'importance de la dynamique en présence de mauvaises conditions de lavage. Les petits gaps rencontrés en μ EDM engendrent des gradients des contaminations élevés. La fluctuation de pollution du diélectrique, peut être améliorée par des mouvements micrométriques à des fréquences de quelques centaines hertz.

La dynamique active a été dissociée de la dynamique passive et nous avons démontré par des expériences, que cette dernière améliore la vitesse d'usinage, en induisant des flux de diélectrique évacuant les particules érodées. En particulier, nous avons mis en évidence l'efficacité de la rotation à très haute vitesse.

L'importance de la dynamique active, a été vérifiée expérimentalement en minimisant les temps de latence de tous les éléments intervenant dans l'asservissement du processus de notre prototype. En rapprochant le temps réponse de la boucle du servo de la fréquence des étincelles, la vitesse d'érosion et l'usinage dans des conditions difficiles ont pu être améliorés.

Pour terminer, nous avons montré que les applications de notre prototype ne se limitent pas au perçage. Le formage de l'électrode 'in situ' ou l'érosion de profils à la manière des machines à découpage, font partie du spectre d'applications de la μ EDM.

Les résultats obtenus dans ce travail et l'avenir prometteur des nanotechnologies ont suscité un intérêt industriel. Une vision futuriste de la micro-électroérosion et symbolisée par le prototype d'une machine μ EDM de table (desktop-type μ EDM) de la figure 9.1. Un premier pas en vue d'utilisation des structures flexibles et prévue par AGIE, en intégrant un Delta³ sur une machine avec les courses usuelles des machines EDM.



Fig. 9.1:
*Prototype de machine μ EDM
(Delta3 III caréné)*

9.1 Note finale

‘Le micromètre est synonyme de roulement et glissement, le nanomètre rime avec déformations réversibles’ (Heinrich Rohrerⁱ).

Le micromètre peut être considéré comme une frontière disruptive dans la conception des machines outils. De l’avis de l’auteur, la μ EDM sera un procédé de micro-fabrication concurrentiel, voire incontournable, lorsque des précisions inférieures au micromètre seront garanties avec des machines à l’encombrement, à l’ergonomie et au coût adapté.

ⁱ Prix Nobel de physique 1986 pour l’invention du microscope à effet tunnel.

Définitions & formulaires

Les acronymes

AEDG	Abrasive E lectro D ischarge G rinding
AFM	A tomic F orce M icroscopy
AJM	Abrasive J et M achining (ou powder blasting)
CAD	C omputer A ided D esign
CAM	C omputer A ided M anufacturing
CBN	C ryatalline B oron N itride
CNC	C omputer N umerical C ontrol (C ommandes N umériques par C alculateur)
CVD	C hemical V apour D eposition
DSEDM	D ie S inking E lectrical D ischarge M achining (usinage par électroérosion à plongée)
DSP	D igital S ignal P rocessor (processeur de signal numérique)
ECAM	E lectrochemical A rc M achining (usinage électrochimique par arc ou usinage mixte EDM-ECM)
ECDM	E lectro C hemical D ischarge M achining (usinage par étincelage assisté par attaque chimique. Idem SACE)
ECM	E lectro C hemical M achining (usinage électrochimique)
EDM	E lectrical D ischarge M achining (usinage par électroérosion)
EFAB	E lectrochemical F abrication
FIB	F ocussed I on B eam
FPGA	F ield P rogrammable G ate A rray (circuit intégré programmable)
IBE	I on B eam E tching (procédé photolithographique par gravure sèche)
IE	I on E tching (procédé photolithographique par gravure sèche)
LASER	L ight A mplification by the S imulated E mission of R adiation
LCVD	L aser C hemical V apour D eposition
LIGA	L ithographie G alvano f ormung A bformung (acronyme allemand pour lithography, plating and molding)
MEMS	M icro E lectro M echanical S ystems
Nd:YAG	N eodymium- d oped: Y ttrium- A luminium- G arnet (laser utilisé pour usiner des matériaux métalliques)
NEMS	N ano E lectro M echanical S ystems
PCD	P oly- C rystalline D iamond (le diamant polycristallin est un matériau extrêmement résistant utilisé pour les outils de coupes: burins, fraises, plaquettes alésoirs, ...)
PE	P lasma E tching (procédé photolithographique par gravure sèche)
PMMA	P oly m ethyl m ethacrylate de méthyle (thermoplastique standard largement utilisé dans l'industrie: fibres synthétiques, verres de lunettes, vitrages souples 'plexiglas', peinture)
PVD	P hysical V apor D eposition
PWM	P ulse W idth M odulation
RIBE	R eactive I on B eam E tching (procédé photolithographique par gravure sèche)
RIE	R eactive I on E tching (procédé photolithographique par gravure sèche)
SACE	S park A ssisted C hemical E ngraving (usinage par étincelage assisté par attaque chimique. Idem ECDM)
SEM	S canning E lectron M icroscope (microscope électronique à balayage)
STM	S canning T unneling M icroscope
USM	U ltra S onic M achining
WEDG	W ire E lectro D ischarge G rinding (meulage par électroérosion à fil. Application: préparation d'électrodes)
WEDM	W ire E lectrical D ischarge M achining (usinage par électroérosion à fil)

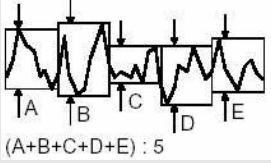


Lexique anglais - français

Abrasive Jet Machining	Usinage par jet de poudre ou sablage (powder blasting)
aspect ratio	rapport d'aspect ou rapport de forme Quantification de l'usinabilité de la troisième dimension en considérant la résolution latérale. Pour des trous (usinages cylindriques), le rapport d'aspect est défini comme le quotient de la profondeur par le diamètre.
backlash	erreur d'inversion
batch-running	procédé d'usinage par lots. Défini les procédés de fabrication basés sur des masques permettant la production de plusieurs microsystèmes en même temps (e.g. la photolithographie).
brass	laiton
copper	cuiivre
cutting	découpage, usinage par enlèvement de copeaux
die	matrice
dressing	formage En μ EDM le dressing est la phase d'érosion à polarité positive destinée à former l'électrode.
drilling	perçage
electroplating	galvanoplastie
etching	gravure
grinding	meulage
hardware	matériel (par opposition a software)
high temperature etching	attaque chimique à haute température
hot embossing	estampage à chaud
micro-machining	micro-usinage
milling	fraisage
photoresist	polymère photosensible
powder blasting	sablage ou jet de poudre (Abrasive Jet Machining)
punch	poinçon
punch (to)	étamper, poinçonner
roughness	rugosité
software	logiciel (par opposition a hardware)
spinning	centrifugation
stainless steel	acier inoxydable
streamer	serpentin Claquage du gaz entre les électrodes, caractérisé par la propagation locale de fronts d'ionisation.
turning	tournage
voxel size	résolution volumétrique
wet etching	gravure par voie humide

Lexique français

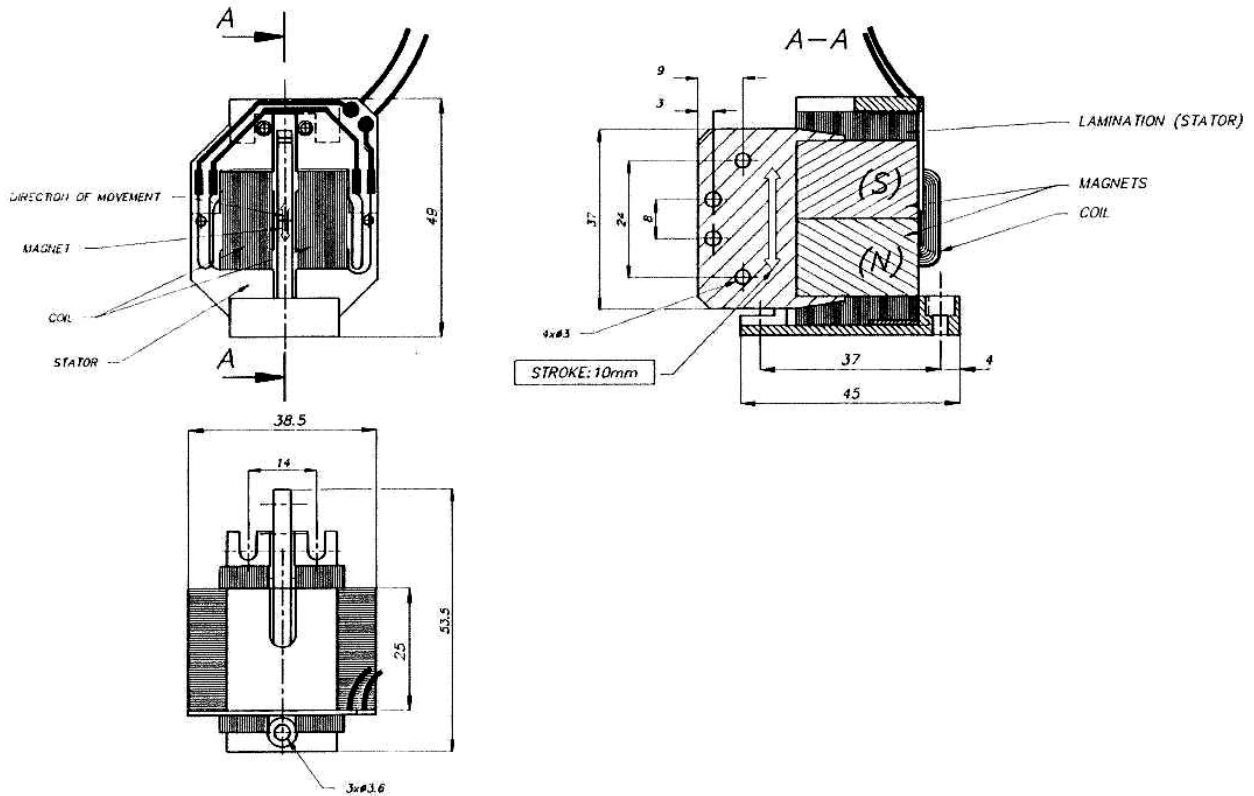
anisotrope	Relatif aux corps et aux milieux dont les propriétés diffèrent selon la direction considérée.
cinématique	Etude du mouvement d'un corps solide sans considération de force.
claquage	Processus, dû à un champ électrique, qui transforme brusquement tout ou partie d'un milieu isolant en un milieu conducteur.
courant de décharge I_e	Courant entre la pièce et l'électrode durant la décharge.
durée de l'impulsion t_c (ou t_i)	Temps pendant lequel une tension est appliquée entre la pièce et l'électrode.
espace articulaire	Espace des configurations articulaires d'un robot représentant la situation des différents corps entre eux. La solution la plus classique pour décrire cet état consiste à utiliser les variables de chacune des articulations.
espace opérationnel	Espace dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal du robot. La solution la plus simple est d'utiliser les coordonnées cartésiennes
galvanoplastie	Procédé consistant à déposer par électrolyse une couche de métal sur un support, métallique ou non, pour le recouvrir.
gap	Zone située entre l'électrode et la pièce à usiner.
géométrie	Etude de la position d'un corps solide sans considération de son évolution temporelle.
ionisation	Transformation d'atomes, de molécules neutres en ions.
isotrope	Dont les propriétés physiques sont identiques dans toutes les directions.
jerk	En robotique troisième dérivée de s ou accélération de l'accélération. (unité: $[m \cdot s^{-3}]$)
lithographie-X profonde	Lithographie profonde avec le rayonnement synchrotron.
loi de mouvement	La loi de mouvement (ou loi horaire) définit les positions temporelles d'un robot sur sa trajectoire dans l'espace opérationnel.
modèle dynamique directe	Description du mouvement de l'organe terminal d'un robot lorsqu'on applique une certaine force (ou couple) sur les articulations.
modèle dynamique inverse	Expression de la force (ou du couple) que chaque actionneur d'un robot doit fournir pour obtenir le déplacement désiré de l'organe terminal.
plasma	Fluide composé de molécules gazeuses, d'ions et d'électrons.
rayonnement synchrotron	Rayonnement électromagnétique émis par des électrons en mouvement dans un champ magnétique. (émission de faisceaux intenses de rayons X et ultraviolets).
rigidité diélectrique	Faculté d'un milieu isolant de résister au claquage. Elle est exprimée en kV/mm pour une épaisseur donnée car elle varie en fonction de l'épaisseur du diélectrique. Exemple: la rigidité diélectrique de l'air sec est de 4.36KV/mm pour 1 mm d'épaisseur et de 2.98 KV/mm pour 10 mm d'épaisseur.
servo	Coeur d'une machine EDM asservie. Unité de calcul temps réel contrôlant la position de l'électrode en fonction des paramètres électriques mesurés par le générateur. Dans notre cas, le servo est un microcontrôleur.
temps de latence	Le temps de latence de la boucle d'asservissement du processus, est le temps écoulé entre un ordre de mouvement donné par le servo et un déplacement de l'électrode de 0.1 μm .
temps de repos t_0 , T_{off} , P (pause)	Temps séparant deux impulsions de tension successives.
temps de retard à l'amorçage t_d	Temps qui s'écoule entre le début d'une impulsion de tension et l'amorçage de l'étincelle qui se traduit par une montée du courant et une chute de la tension.
tension d'amorçage U_0 (tension à vide)	Amplitude de l'impulsion de tension appliquée entre la pièce et l'électrode qui permet l'amorçage d'une décharge, lorsque ces dernières sont suffisamment rapprochées. En μEDM , elle se situe entre 80- 200 V.
tension de claquage U_c	Idem à la tension d'amorçage.
tension de décharge U_e	Tension entre la pièce et l'électrode durant la décharge. D'environ 15-25V, elle dépend de la nature des électrodes et du diélectrique les séparant.
trajectoire naturelle d'un robot	Trajectoire de l'organe terminal du robot si on génère la consigne dans l'espace articulaire.

Unités, symboles, notations

Symbole	Nom	Unité	
Å	Angström	0.1 nm	
arcsec	Seconde d'arc (unité d'angle plan)	$\sim 5 \mu\text{rad}$	
bar		10^5 Pa	
K	Conductivité thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Pa	Pascal	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	
P_{art}	Vecteur des positions dans l'espace articulaire		
P_{op}	Vecteur des positions dans l'espace opérationnel		
rpm	Tours par minute (<i>revolutions per minute</i>)	tr/min	
t_0, T_{off}, P	Temps de repos (pause)	μs	
T_{on}	Durée d'application de la tension nominale	μs	
t_d	Temps de retard à l'amorçage	μs	
t_e, t_i	Durée de l'impulsion	μs	
U_0	Tension à vide ou tension d'amorçage	V	
U_c	Tension de claquage (idem à la tension d'amorçage U_0)	V	
I_e	Courant de décharge	A	
U_e	Tension de décharge	V	
v	Variance (moyenne des écarts quadratiques)		
W_e	Energie d'une étincelle érosive	J	
α_{therm}	Coefficient de température Coefficient de dilatation thermique (Part Per Million/Kelvin = $10^{-6}/\text{K}$)	ppm/K	
ϵ	Permittivité absolue $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$	pF/m	
ϵ_0	Permittivité de l'air ou du vide $\left(\frac{1}{36 \cdot \pi \cdot 10^{-9}} = 8.85 \right)$	pF/m	
ϵ_r	Permittivité relative (ou constante diélectrique)	%	
σ	Conductivité électrique	$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	
σ	\sqrt{v} écart-type		
R_z (DIN) R_{tm} (ISO)	Rugosité moyenne	 (A+B+C+D+E) : 5	μm
R_a (ISO)	Rugosité moyenne arithmétique		μm
R_{max} (ISO)	Rugosité maximale		μm

Annexes

Annexe I: Moving magnet ETEL MMA3008-025-10A



x	Course:	8	mm
F_p	Force maximum instantanée:	40	N
F_{c80}	Force continue (bobine à 80°C):	20	N
K_m	Constante du moteur (à 20° C):	6.26	$\frac{N}{\sqrt{W}}$
T_e	Constante de temps électrique:	3.92	ms
R_{t80}	Résistance thermique (bobine à 80° C):	13	K/W
M_m	Masse en mouvement:	20	g
M_w	Masse totale:	235	g
k_f	Constante de force:	10.5	N/A
R20	Résistance électrique (à 20° C):	2.8	Ohm
L	Inductance:	9.1	mH

Annexe II: Mesures du courant associées à la position des axes XYZ

Les liaisons à articulation élastique ont une raideur dans la direction du mouvement, qui impose d'exercer un effort pour maintenir une position excentrée. Les mesures présentées sur les graphes ci-dessous, représentent la *Consigne de position* et le *Courant* circulant dans les moteurs, pour toute la course des axes du robot. La position '0' correspond au centre de la zone de travail de chacun des axes (position initiale du modèle géométrique).

Ces graphes permettent également de déterminer l'hystérésis des moteurs linéaires (§5.4.3).

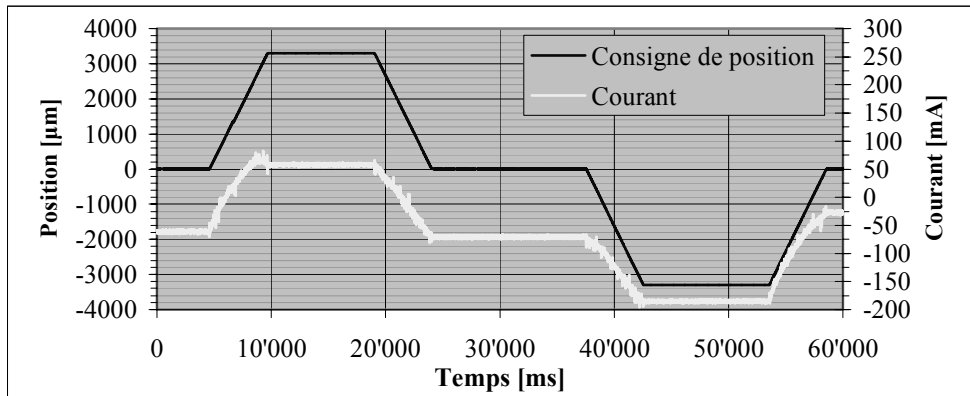


Fig. i: Mesure de la position et du courant associé, pour le moteur de l'axe X du Delta³ III

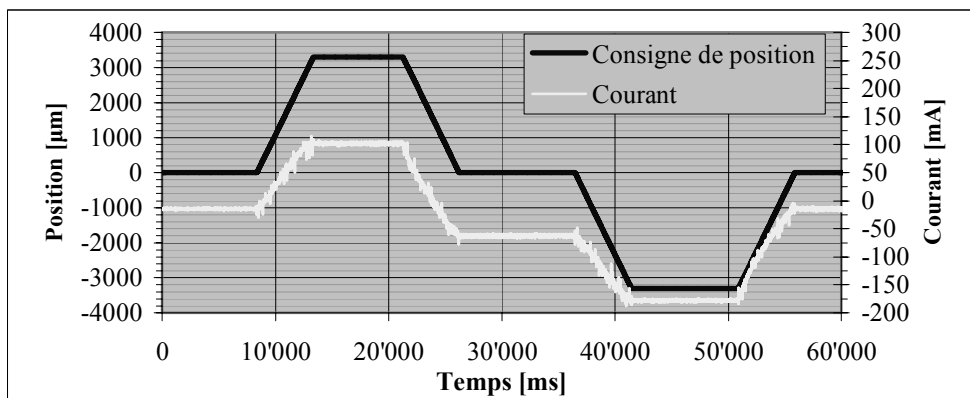


Fig. ii: Mesure de la position et du courant associé, pour le moteur de l'axe Y du Delta³ III

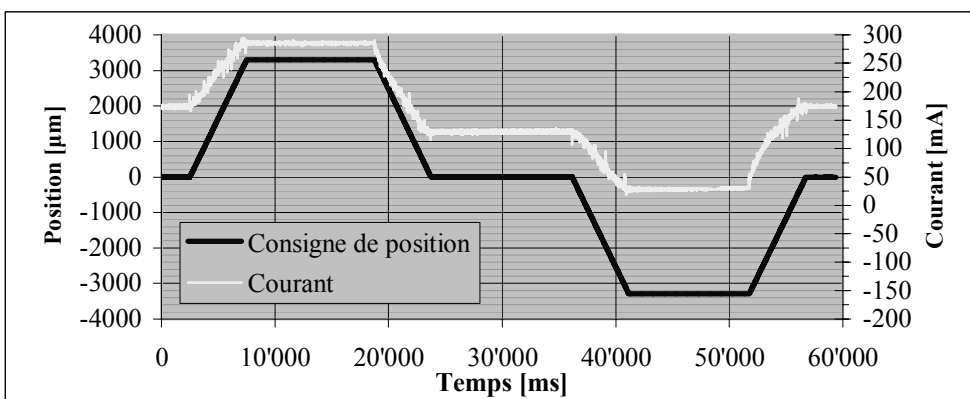


Fig. iii: Mesure de la position et du courant associé, pour le moteur de l'axe Z du Delta³ III

Annexe III: Machines AGIE utilisées pour la μ EDM en 2005

Quadratron II (ou AGIETRON 4HP)

Machine développée pour BOSH, fabricant d'injecteurs pour le marché de l'automobile. Cette machine est dédiée au micro-perçage de production. Elle dispose de 4 têtes d'érosion indépendantes. Ce qui représente 4 générateurs et 4 tables XYZ de course 10x10x50 mm. Elle dispose d'un axe W pour le positionnement des quatre unités d'étincelage, d'un axe pour incliner le posage des pièces et de quatre axes C pour la rotation des pièces à usiner.

La commande des unités d'érosion est semblable à celle utilisée pour piloter le Delta³ et le générateur est similaire.

Cette machine nous sert de référence pour les micro-perçages.

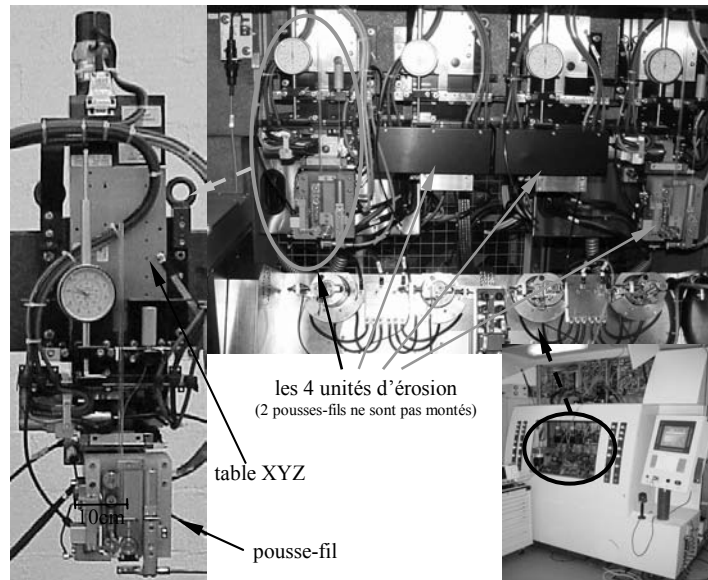


Fig. iv: *Quadratron II*

AGIETRON Compact 1 Micro

Machine disposant d'un grand nombre d'accessoires pour la micro-érosion. Elle dispose d'un axe C intégré et la course des axes XYZ est de: 250 x 160 x 250 mm.

Poids admissible de la pièce: 200 kg

Poids admissible de l'électrode: 70 kg

C'est actuellement (2004) la machine de référence pour la micro-érosion de l'entreprise AGIE.



Fig. v: *Compact 1 Micro*

Annexe IV: Les 3 prototypes du robot Delta³

Le Delta³ I a permis de démontrer la faisabilité du concept et a mis en évidence des fréquences propres, limitant la bande passante à une centaine de hertz. Sans adjonction artificielle de frottement visqueux, le contrôle en position de ce robot s'avère difficile avec une tendance à l'instabilité. Disposant d'un volume de travail de $2*2*2 \text{ mm}^3$ pour un encombrement de $100*100*100 \text{ mm}^3$. La résolution des capteurs (règles optiques) est de 50 nm et la bande passante dynamique est inférieure à 100 Hz.

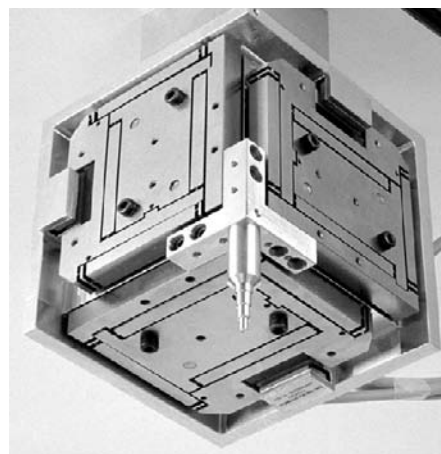


Fig. vi: Delta³ proto I

Le Delta³ II est bien équilibré avec peu de couplage entre les axes. Le volume de travail est de $4*4*4 \text{ mm}^3$ pour un encombrement de $200*200*200 \text{ mm}^3$. La résolution des capteurs est de 5 nm et la bande passante dynamique est de 500 Hz.

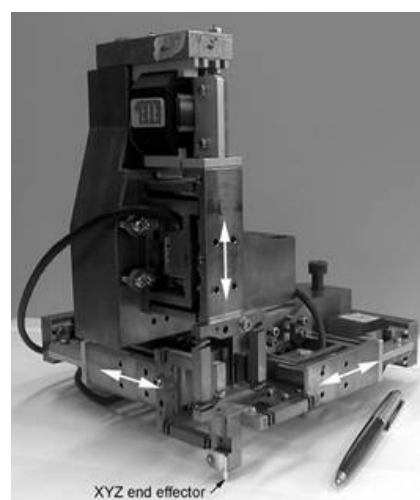


Fig. vii: Delta³ proto II

Le Delta³ III est une version industrielle. Le montage est plus aisé et il est composé de trois chaînes cinématiques identiques, permettant de réduire les coûts. Le volume de travail est de $8*8*8 \text{ mm}^3$ pour un encombrement de $240*240*240 \text{ mm}^3$. La résolution des capteurs est de 5 nm et la bande passante dynamique est de 500 Hz.



Fig. viii: Delta³ proto III

Annexe V: Cinématiques parallèles et articulations élastiques

Les cinématiques parallèles

[cla91a], [bon03a], [mer97a]

Définition

Un robot parallèle est caractérisé par une plate-forme mobile reliée au bâti par plusieurs chaînes cinématiques.

Avantages

- Grande rigidité.
- Faible masse en mouvement: d'une part les robots à structure parallèle ne doivent pas supporter le poids des moteurs distribués sur chaque articulation et d'autre part, pour une rigidité imposée, la sollicitation avantageuse de la structure en traction compression, permet de réduire la masse par rapport à des structures sollicitées en flexion.
- Haute dynamique qui découle de l'avantage précédent.
- Economie de fabrication, car les machines parallèles comportent des éléments modulaires "simples" qui se répètent.

Inconvénients

- Le volume de travail est faible par rapport à l'encombrement.
- Modélisation géométrique nécessaire et relativement complexe.

Les liaisons à articulations élastiquesⁱ

[hen00a]

Définition

Les liaisons articulations élastiques sont des guidages sans contact, qui reposent sur le principe physique de l'élasticité de la matière. Elles servent à relier deux solides en autorisant certains mouvements et en bloquant les autres.

Avantages

- Les mécanismes utilisant les liaisons à articulations élastiques sont exempts de jeux.
- Pas de frottement sec, donc pas d'usure ni d'émission de particules.
- Les déplacements sont doux et continus jusqu'à des déplacements nanométriques.
- La durée de vie est liée au phénomène de fatigue qui est prédictible.
- Elles sont faciles à assembler.
- Elles permettent une conception monolithique: possibilité de concevoir plusieurs pièces reliées par des articulations élastiques, à partir d'un seul bloc de matière première.

Inconvénients

- Les courses admissibles sont limitées.
- Les raideurs dans les directions des mouvements, imposent d'exercer des efforts pour maintenir une position excentrée.
- Les mouvements obtenus suivent des modèles géométriques dont la description mathématique est relativement complexe.

ⁱ Une liaison à articulation élastique est également dénommée: liaison flexible ou articulation flexible. En anglais: 'flexure' ou 'elastic mechanism'.

Annexe VI: Schémas blocs de l'algorithme d'asservissement de position

Le software des régulateurs de position des axes du Delta³ III, a été implémenté dans la commande AGIE SIT-B en utilisant le logiciel Matlab-Simulink. La fonction RTW (Real-Time Workshop) de Simulink, permet de générer le code C correspondant aux schémas blocs représentés ci-dessous. Le code généré par RTW est directement compilé et utilisé par les DSP de Texas contrôlant l'asservissement de position des axes X, Y et Z.

La figure ix représente les variables d'entrées et de sortie du régulateur de position d'un axe du robot. Les blocs *sin* et *random* sont deux fonctions permettant d'ajouter respectivement, un sinus et un bruit aléatoire à la valeur de consigne. Le bloc *consigne* correspond à la position commandée. Le bloc *mesure* est la position de l'axe du robot mesurée par le capteur de position (la règle optique Heidenhain). La sortie du régulateur est représentée par le bloc *courant*, qui correspond à la consigne de courant destinée au moteur linéaire.

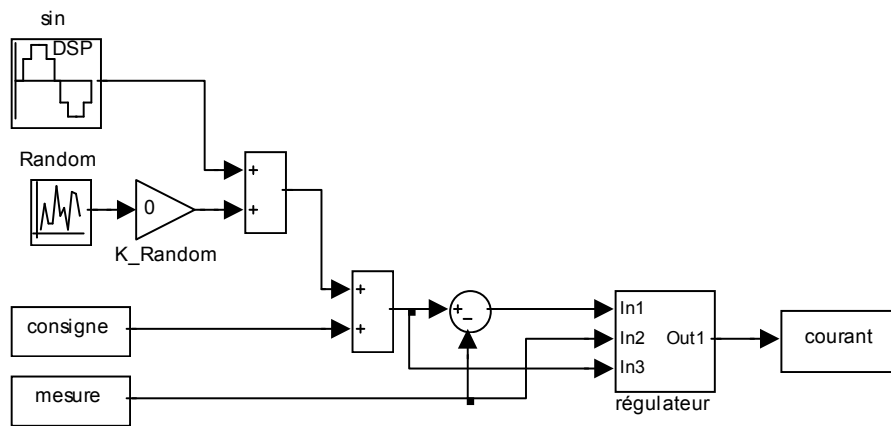


Fig. ix: Schéma bloc des variables d'entrées et de sortie des régulateurs de position des axes X, Y et Z

Le bloc *régulateur* avec trois entrées et une sortie (fig. ix) est reproduit à la figure x; c'est un réglage par contre-réaction d'état avec composante intégrale K_{int} et proportionnelle K_{prop} [buh03a]. Le bloc $K_{raideur}$ génère une consigne de courant proportionnelle à la position absolue, pour compenser la raideur des cols (cf. tableau 5.16).

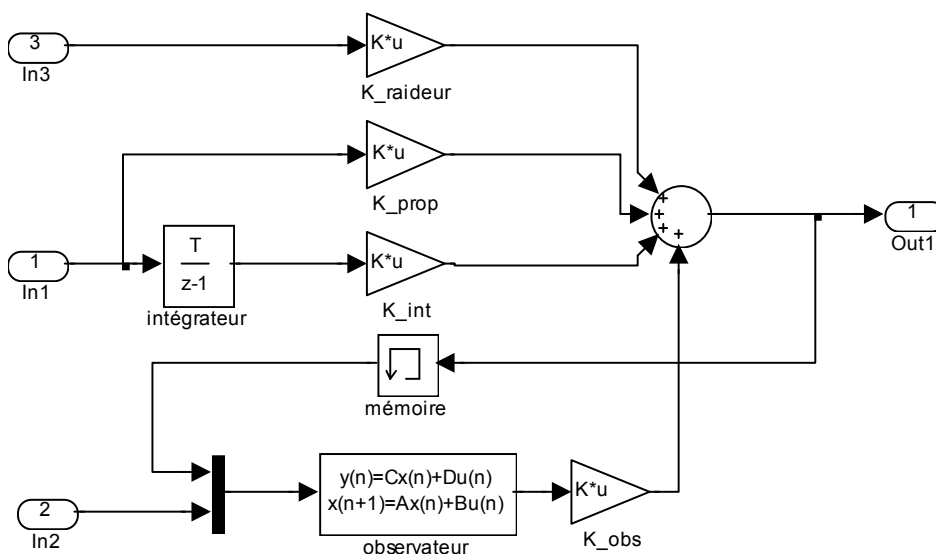


Fig. x: Schéma bloc du réglage d'état (bloc régulateur de la figure ix)

Annexe VII: Technologie de perçage

La figure xi représente les paramètres de la technologie standard, utilisée pour les usinages relatés dans ce travail de thèse. C'est une copie de l'interface homme-machine *Labview*, conçue pour piloter notre prototype. Les formes de tension et de courant des étincelles relatives à cette technologie, sont visibles à la figure xii (électrode en tungstène, pièce en acier, diélectrique aqueux).

Fig. xi: Technologie standard

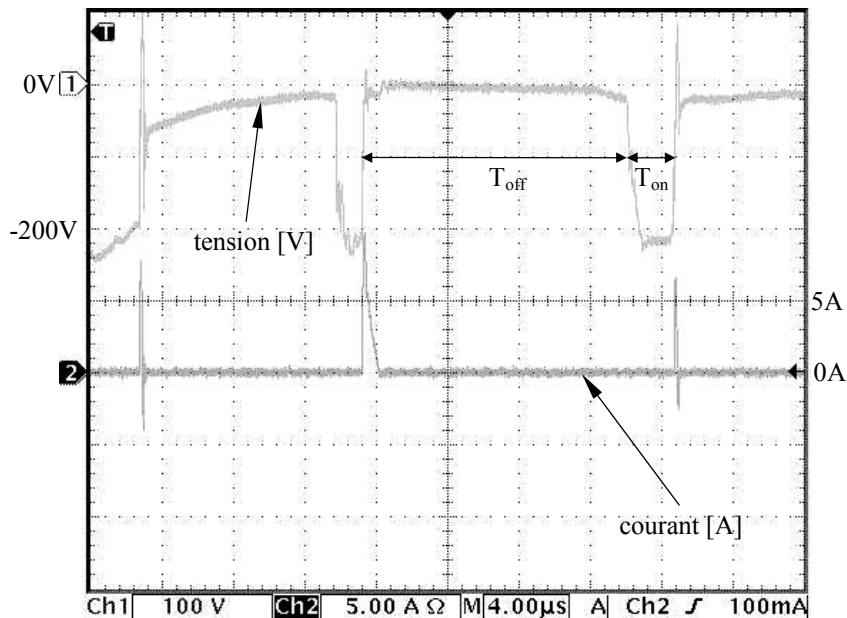


Fig. xii: Mesure de la tension et du courant d'impulsions 'standard' (cf. fig. xi)

Annexe VIII: Technologie pour la réduction de l'électrode par planétaire

La figure xiii représente les paramètres de la technologie utilisée pour former l'électrode. C'est une copie de l'interface homme-machine *Labview*, conçue pour piloter notre prototype. Les formes de tension et de courant des étincelles relatives à cette technologie, sont visibles à la figure xiv (électrode en tungstène, pièce en acier, diélectrique aqueux).

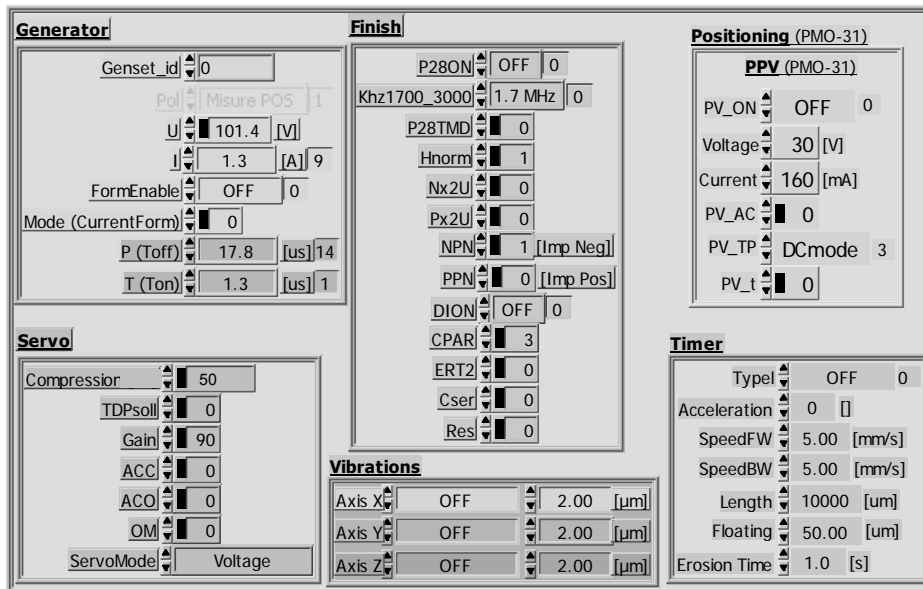


Fig. xiii: Technologie pour la réduction de l'électrode par planétaire

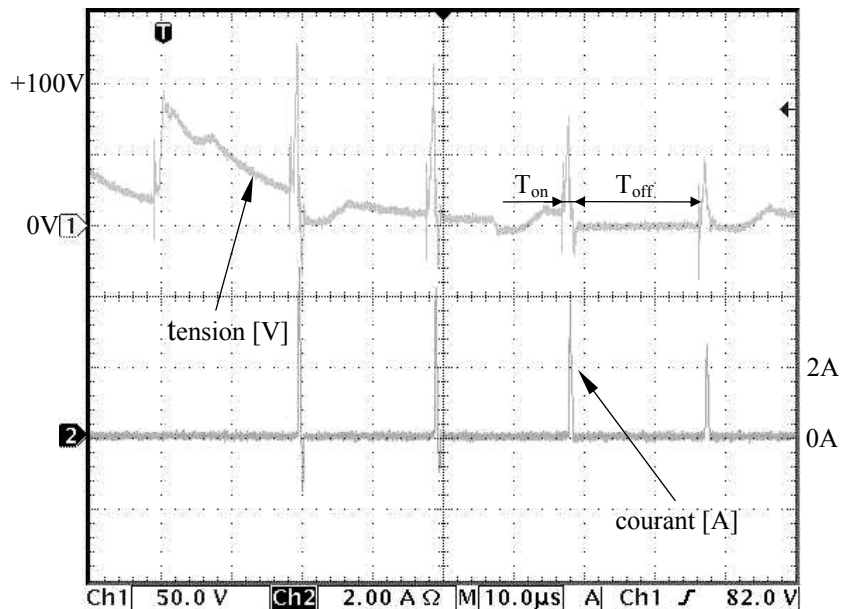


Fig. xiv: Mesure de la tension et du courant d'impulsions pour la réduction de l'électrode par planétaire (cf. fig. xiii)

Bibliographie

L'électroérosion

- [ble02a] Bleys P.¹, Kruth J-P.¹, Lauwers B.¹, Zryd A.², Delpretti R.², Tiricarico C.², (2002), **“Real-time Tool Wear Compensation in Milling EDM”**, *Annals of the CIRP Vol. 51/1/2002 (pp. 157)*
¹Division PMA, Dept. of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium
²Charmilles Technologies S.A., Geneva, Switzerland
- [ble04a] Bleys P., Kruth J-P., Lauwers B., (2004), **“Sensing and compensation of tool wear in milling EDM”**, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, Departments of Mechanical Engineering, Division PMA, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium
- [bri00a] Brink Dean, (2000), **“New technology sparks EDM”**, *EDM Technology Transfer (EDMTT)*, Orem UT, USA
<http://www.edmtt.com>
- [cet80a] CETIM (France) & ENIMS (U.R.S.S), (1980), **“Guide des usinages par électroérosion et par électrochimie”**, CETIM, France
- [cur04a] Curodeau A., Richard M., Frohn-Villeneuve L. (2004), **“Molds Surface Finishing with New EDM Process in Air with Thermoplastic Composite Electrodes”**, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, Department of Mechanical Engineering, Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4
- [des03a] Descoedres A., Hollenstein Ch., (2003), **“Optical Emission Spectroscopy of Electrical Discharge Machining Plasma”**, Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP), EPFL, CH-1015 Lausanne, Switzerland
- [dib89a] DiBotonto Daryl D., Eubank Philip T., Patel Mukund R., Barrufet Maria A., (1989), **“Theoretical models of the electrical discharge machining process. (I. A simple cathode erosion model)”**, *Journal of applied physics Vol.66 1/11/1989*, Department of Physics & Department of Chemical Engineering, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA
- [fle04a] Fleischer J.¹, Masuzawa T.², Schmidt J.¹, Knoll M.¹ (2004), **“New applications for Micro-EDM”**, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*
¹Wbk Institute of Production Science, University of Karlsruhe, Germany
²Institute of industrial science, University of Tokyo, Japan
- [fuk89a] Fukui M., Kinoshita N., (1989), **“Developing a ‘Mole’ Electric Discharge Digging Machining”**, *Annals of the CIRP Vol. 38/1/1985 (pp. 203-206)*, Japan
- [ima04a] IMAI Yoshihito¹, NAKAGAWA Takayuki¹, MIYAKE Hidetake¹, HIDAI Hirofumi², TOKURA Hitoshi² (2004), **“Local Actuator Module for Highly Accurate Micro-EDM”**, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*.
¹Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki, Hyogo, Japan.
²Mechanical Science and Engineering Dept., Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan.

- [ima96a] IMAI Yoshihito, SATAKE Akira, KOBATASHI Kazuhito (1996), “**Improvement of EDM machining Speed by Using High Frequency response Actuator**”, *International Journal of Electrical Machining No.1, January 1996*, Industrial Electronics & Systems Lab, Mitsubishi Electric Corp., Hyogo 661, Japan
- [kar97a] Karden A. (1997), “**Der Entladenkanal – was passiert wirklich bei der Funkenerosion ?**”, *Bericht Nr255-4/96*, Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren, WZL (Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre), Aachen, Deutschland
- [klo04a] Klocke F., Lung D., Antonoglou G., Thomaidis D. (2004), “**The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies**”, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, Aachen University, Laboratory for Machine Tools and Production Engineering, 52074 Aachen, Germany
- [klo04b] Klocke F., Lung D., Thomaisis D., Antonoglou G. (2004), “**Using ultra thin electrodes to produce micro-parts with Wire-EDM**”, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, Laboratory for machine tools and production engineering (WZL), RWTH Aachen, Germany
- [kön82a] König Wilfried, (1982), “**ELECTTROEROSIONE macchine e sistemi alternativi**”, *Techniche Nuove (ISBN 88-7081-0798)*, Milano, Italia
- [kre91a] Kremer D.¹, Lhiaubet C.², Moisan A.³, (1991), “**A Study of the Effect of Synchronizing Ultrasonic Vibrations with Pulse in EDM**”, *Annals of the CIRP Vol. 40/1/1991*, France
¹ENSAM, Paris
²LGEP-ESE, Gif-sur-Yvette
³ENSAM, Aix-en-Provence
- [kru79a] Kruth Jean-Pierre, (1979), “**Adaptive control optimization of electro-discharge machining**”, *Thesis 79D3*, Dept. of Mechanical Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium
- [kun96a] Kunieda Masanori, Yanatori Kenji, (1996), “**Study on Debris Movement in EDM Gap**”, *International Journal of Electrical Machining No.2, January 1997*, Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture & Technology, Koganei, Tokyo 184, Japan
- [kur67a] Kurafuji H., Masuzawa T., (1967), “**EDM of microholes in cemented carbide alloys**” (in Japanese), *Proc. of Annual Autumn Assembly of JSPE (pp. 77-78)*, Japan
- [laz44a] Lazarenko B.R., Lazarenko N.I., (1944), “**Elektrische Erosion von Metallen**”, *Cosenergoisdat Moskau, USSR*
- [mas75a] Masuzawa T., Tanaka K., Fujino M., (1975), “**Improvement of Micro-EDM machining speed by using voice coil actuator**” (in Japanese), *Journal of JSEME Vol.6 No.16 (pp. 43-52)*, Japan
- [mas85a] Masuzawa T., Fujino M., Kobayashi K., (1985), “**Wire electro-discharge grinding for micro machining**”, *Annals of the CIRP Vol. 34/1/1985 (pp. 431-434)*, Japan
- [mas89a] Masuzawa T., Tsukamoto J., Fujino M., (1989), “**Drilling of Deep Microholes by EDM**”, *Annals of the CIRP Vol. 39/1/1989, I.I.S., University of Tokyo, Japan*

- [mas89b] Masaki T., Kawata K., Mizutani T., Yonemochi K., Shibuya A., Masuzawa T., (1989), “**Micro Electro-Discharge Machining**”, *Proceedings of International Symposium for Electro-Machining (ISEM-9)*, p. 26-29
- [mee03a] Meeusen Wim (2003), “**Micro-electro-discharge machining: technology, computer-aided design & manufacturing and applications**”, D/2003/7515/9 (ISBN 90-5682-398-1), Faculteit Toegepaste Wetenschappen Arenbergkae-steel, Katholieke Universiteit Leuven, B-3001 Heverlee, Belgium
- [mor95a] Morita H.¹, Furutani K.², Mohri N.², (1995), “**Electrical Discharge device with Direct Drive Method for Thin Wire Electrode**”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation 1995 (0-7803-1965-6/95)*
¹Toyota Technological Institute, 2-12-1 Hisakata, Tempaku-ku, Nagoya 468, Japan
²Production Engineering R&D Department, Nippondenso Co., Ltd., 1-1 Showa-cho, Kariya-city, Aichi 448, Japan
- [ose65a] Osenbruggen C.V., Luimes G., Dijk A.V., Siekman J. (1965), “**Micro spark erosion as a technique in microminiaturization**”, *IFAC-IFIP Symposium on microminiaturization*
- [rey02a] Reynaerts D., Van Brussel H., Meeusen W., Driesden W., Dierickx V. (2002), “**Micro-Electro-Discharge Machining: Review and applications**”, D/2003/7515/9 (ISBN 90-5682-398-1), Department of Mechanical Engineering, Div. PMA Celestijnenlaan 300B, Katholieke Universiteit Leuven, B-3001 Heverlee, Belgium
- [sat85a] Sato T., Mizutani T., Kawata K., (1985), “**Electro-discharge machine for micro-hole drilling**” (in Japanese), *National Technical Report 31 (725-733)*, Japan
- [uhl04a] Uhlmann E., Piltz S., Jerzembeck S. (2004), “**Micro Machining of Cylindrical parts by Electrical Discharge Grinding**”, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, Technical University Berlin, Institute for Machine Tools and Factory Management, Berlin, Germany
- [val04a] VALENTICIC Josko, JUNKAR Mihael (2004), “**On-line selection of rough machining parameters**”, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, Faculty of Mechanical Engineering, Laboratory for Alternative Technologies, SI-1000 Ljubljana, Slovenia
- [wol98a] Wolf A.¹, Ehrfeld W.¹, Michel F.¹, Koch O.¹, Preuss S.¹, Soultan H.¹ and Gruber H.P.², (1998), “**Application of New Actuator and Vision Control Systems for Micro Electro Discharge Machining**”, *Proceedings of SPIE's International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing 1998, Vol. 3517 01-06 11, Boston, USA*
¹Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH, Carl-Zeiss-Str. 18-20, D-55129 Mainz, Germany
²AGIE AG für industrielle Elektronik, CH-6616 Losone, Switzerland
- [yam04a] YAMAZAKI Minoru, SUZUKI Takemi, MORI Noritoshi, KUNIEDA Masanori (2004), “**EDMing of Micro-Rods by Self-Drilled Holes**”, *14th International Symposium on Electromachining (ISEM XIV)*, Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, Kitaku, Tokyo 115-8586, Japan

- [yuz02a] Yu Z. Y., Rajurkar K. P., Shen H., (2002), “**High Aspect Ratio and Complex Shaped Blind Micro Holes by Micro EDM**”, *Annals of the CIRP Vol. 5/1/2002*, Department of Industrial and Management Systems Engineering, University of Nebraska-Lincoln, USA
- [zha04a] Zhang Q.H., Du R.X., Zhang J.H., Yang J.Y., Ren S.F., (2004), “**The Mechanism of Ultrasonic vibration Improving MRR in UEDM in Gas**”, *Materials Science Forum Vols. 2004 (pp. 741-745)*, Department of Automation & Computer-Aided Engineering, Chinese University of Hong Kong School of Mechanical Engineering, Shandong University, China
<http://www.scientific.net>
- [zha97a] Zhang J.H.¹, Lee T.C.², Lau W.S.², Ai X.¹, (1997), “**Spark erosion with ultrasonic frequency**”, *Journal of Materials Processing Technology 68 (1997) (pp. 83-83)*,
¹Department of Mechanical Engineering, Shandong University of technology, Jinan 250014, China
²Department of Manufacturing Engineering, The Hon Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong
- [zuy00a] Yu Zuyuan, Rajurkar K. P., (2000), “**Generation of Complex Micro Cavities by Micro-EDM**”, *Conference NAMRC XXVIII, May 24-26 2000, University of Kentucky, Lexington*, University of Nebraska-Lincoln, USA

Les techniques de micro-usinage

- [bel01a] Belloy E., Sayah A., Gijs M.A.M., (2001), “**Oblique powder blasting for three-dimensional micromachining of brittle materials**”, *Sensors and Actuators, vol. A92 (pp.358-363)*, *Institute of Microsystems, EPFL, Switzerland*
- [bru92a] Brugger J., Buser R. A., de Rooij N. F., (1992), “**Silicon Cantilevers and Tips for Scanning Force Microscopy**”, *Sensors and Actuators, vol. A34 (pp.193-200)*
- [ega96a] Egashira Kai, Masuzawa Takahisa, FUJINO Masatoshi, SUN Xi-Qing, (1996), “**Application of USM to micromachining by on-the-machine tool fabrication**”, *International Journal of Electrical Machining No.2/2 January 1997*, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Japan
- [fas02a] Fascio Valia (2002), “**Etude de la microstructuration du verre par étincelage assisté par attaque chimique: une approche électrochimique**”, *Thèse N°2691*, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, EPFL, Suisse
- [hes02a] Hesselbach Jürgen (September 2002), “**mikroPRO Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik**”, (*ISBN 3-8027-8669-6*), IWF (Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik), der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Deutschland
- [lan98a] Langen H.¹, Breguet J.-M.¹, Bleuler H.¹, Renaud P.¹, Masuzawa T.² (1998), “**Micro electrochemical discharge machining of glass**”, *International Journal of Electrical Machining 3 (pp. 65-69)*
¹Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, EPFL, Suisse
²Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan

- [lor98a] Lorenz Hubert (1998), “**Nouvelles technologies de microstructuration de type UV-LIGA et fabrication de composants micromécaniques**”, *Thèse N°1770*, Département de microtechnique, EPFL, Suisse
- [mad02a] Madou Marc J. (2002), “**Fundamentals of MICROFABRICATION**”, 2nd ed., *CRC PRESS LLC (ISBN 0-8493-0826-7)*, USA
<http://www.crcpress.com>
- [mas97a] Masuzawa T.¹, Tönshoff H. K.², (1997), “**Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools**”, *Annals of the CIRP Vol. 2/1997*
¹I. I. S., University of Tokyo, Japan
²Laser Zentrum Hannover, Germany
- [mor92a] Moreland M.A., (1992), “**Ceramics and Glasses**”, *Engineering Materials Handbook, Vol4*, ASM Int.
- [sch01a] Schöpf Martin (2001), “**ECDM Abrichten metallgebundener Diamant-schleifscheiben**” (Dissertation Nr.14120), *Fortschritt-Berichte VDI Reihe2 Nr. 580. Düsseldorf: VDI Verlag 2001*, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF), ETH Zürich, Schweiz
- [sun96a] Xi-Qing Sun, Masuzawa T., J., Fujino M., (1996), “**Micro ultrasonic machining and its applications in MEMS**”, *Sensors and Actuators A 57 1996 (pp. 159-164)*, Institute of industrial Science, University of Tokyo, Japan
- [syn05a] Synova S.A. (2005), “**The Water Jet Guided Laser**”, Ecublens, Switzerland
<http://www.synova.ch/>
- [vla95a] Vladimírsky Y., Vladimírsky O., Saile V., Morris K., Klopff J. M., (1995), “**Transfer Mask for High Aspect Ratio Micro-Lithography**”, *In Microlithography '95, Proceedings of the SPIE 1995 (pp. 391-96)*, Santa Clara, Calif., USA
- [wut99a] Wüthrich R., Fascio V., Viquerat D., Langen H., (1999), “**In situ measurement and micromachining of glass**”, *In International Symposium on Micromachronics and Human Science (MHS 99)*, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, EPFL, Suisse

Robotique, réglage et commande

- [bac03a] Bacher Jean-Philippe (2003), “**Conception de robots de très haute précision à articulations flexibles: interaction dynamique-commande**”, *Thèse N° 2907*, *Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur*, EPFL, Suisse
- [bon03a] Bonev Ilian, (2003), “**The true origins of parallel robots**”
<http://www.parallemic.org/>
- [bot99a] Brevet Bewegungsübertragungsvorrichtung, DE19962247, AGIE SA
- [buh03a] Bühler H., (2003), “**Réglage d'état, bases et compléments**”, *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes*, Lausanne, Suisse
- [cla91a] Clavel Reymond (1991), “**Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté**”, *Thèse N° 925*, *Département de microtechnique*, EPFL, Suisse

- [cod91a] Codourey Alain (1991), “**Contribution à la commande des robots rapides et précis, application au robot delta à entraînement direct**”, *Thèse N^o 922, Département de microtechnique, EPFL, Suisse*
- [cra89a] Craig J.J. (1989), “**Introduction to robotics, mechanics & control**”, 2 ed., *Reading, Massachussets: Addison-Wesley*
- [hen00a] Henein Simon (2000), “**Conception des structures articulées à guidages flexibles de haute précision**”, *Thèse N^o 2194, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, EPFL, Suisse*
- [hol85a] Hollis R. (1985), “**A planar xy robotic fine positioning device**”, *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*
- [juf85a] Jufer Marcel (1985), “**Transducteurs électromécaniques**”, *Traité d'électricité volume IX, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse*
- [lon95a] Longchamp Roland (1995), “**Commande numérique de systèmes dynamiques**”, *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (ISBN: 2-88074-282-X), Lausanne, Suisse*
- [mer97a] Merlet (1997), “**Les robots parallèles**”, *Hermes Science Publications, ISBN 2866015991*
- [moe00a] Moerschell Joseph, Onillon Emmanuel (2000), “**Control of the secondary mirror unit for the SOFIA telescope**”, *Département de microtechnique, HEVS, Sion Switzerland & CSEM, Neuchâtel, Switzerland*
- [moe00b] Moerschell Joseph, Zhao Jun (2000), “**Motion control of flexure structures in fast optomechanical systems**”, *Département de microtechnique, Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM), Neuchâtel, Switzerland*

Curriculum Vitae

JOSEPH Cédric

Né le 16 juin 1964 à St-Aubin (NE)

de nationalité suisse originaire de S^{te}-Croix (VD)

Formation

- 1990 **Diplôme d'ingénieur en microtechnique** - EPFL
1984 **Baccalauréat scientifique** - Gymnase de la Cité, Lausanne
1981 **Certificat d'études secondaires maths-sciences** - Collège de l'Elysée, Lausanne

Expérience professionnelle

- Depuis 2002 **EPFL**
Thèse de doctorat
- 1999 – 2001 **AGIE SA**
Développement du software de contrôle du processus d'une famille de machines à électroérosion à enfonçage en collaboration avec la filiale AGIE aux Etats-Unis.
- 1997 -1999 **AGIE SA**
Développement du software de contrôle du processus pour une série de machines à enfonçage destinée à la production d'injecteurs diesel en collaboration avec Bosch Allemagne.
- 1993 -1997 **AGIE SA**
Responsable d'une équipe pluridisciplinaire composée de mécaniciens, d'informaticiens et d'électroniciens pour le développement, le test et la mise en production du Système de Transport du Fil (*S.T.F.*) des machines à électroérosion à découpage.
- 1990-1992 **AGIE SA**
Conception du hardware et du software du *S.T.F.* pour la nouvelle génération de machines à électroérosion à découpage.
Maintenance hardware du *S.T.F.* des machines en production.
Développement HW et SW d'une interface *MultibusII*.

Publications

- 2004 Beltrami I., Joseph C., Bacher J.-P., Clavel R., "Micro and Nano Electric-Discharge Machining", *14th International Symposium of ElectroMachining (ISEM XIV)*, avril 2004, Edinburgh, Scotland
Journal of Materials Processing technology, 149 (2004), 263-265
- 2003 Joseph C., Bacher J.-P., Fracheboud M., Clavel R., "Mini machine à électroérosion pour l'usinage de haute précision (μ EDM)", *Société Suisse de Chronométrie (journée d'étude 2003)*, 4 septembre 2003, Bienne, Suisse

- 2002 Joseph C., Bacher J.-P., Breguet J.-M. and Clavel R., "Miniature Electro discharge machine for high precision micro-structurisation", *Third International Workshop on Microfactories (IWMF 2002)*, September 16-18 2002, Minneapolis, MN, USA
- 2002 Bacher J.-P., Joseph C., Clavel R., "Flexures for high precision robotics", *Industrial robot*, Vol 29 (n°4/2002), p.349-353

Reuves de presse

- 2003 Heinzelmann E., "Die Nanofabrik – «Mini»-Fertigung im geschützten Raum", *Technische Rundschau*, (n°11/2003), p.34-36
- 2002 Heinzelmann E., "Von der Makro- zur Mikroerosion: EDM in der «Nanofabrik»", *Technische Rundschau*, (n°9/2002), p.66-68