

Développement d'une machine et du contrôle d'un procédé d'usinage électrochimique pour matériaux difficiles à usiner

par

Guillaume VILLENEUVE

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 20 DÉCEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Guillaume Villeneuve, 2022



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Lucas Hof, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kenné, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Chatelain, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 8 DÉCEMBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Bien que ce mémoire soit un travail individuel, il n'aurait pas été possible de le compléter sans l'aide d'une multitude de personnes que j'aimerais remercier.

Je commence par remercier mon directeur de recherche, Lucas Hof, pour ses excellents conseils tout au long de ma maîtrise autant pour l'expérimentation que la rédaction. Personne ne m'a jamais autant poussé vers la perfection.

Je remercie également mes collègues Douglas, Jean-Philippe, Gabriel et Rafael pour leurs commentaires et réflexions toujours pertinents.

Finalement, je remercie ma conjointe et mes parents pour l'accompagnement constant et le soutien moral tout au long de ces travaux.

Développement d'une machine et du contrôle d'un procédé d'usinage électrochimique pour matériaux difficiles à usiner

Guillaume VILLENEUVE

RÉSUMÉ

Ce mémoire a pour but de faire des avancements dans le développement d'un procédé d'usinage électrochimique, la gravure chimique assistée par étincelage (*Spark-Assisted Chemical Engraving*, SACE). Le procédé SACE a des applications particulièrement pour la fabrication de formes à l'échelle des dizaines aux centaines de micromètres dans des matériaux durs et fragiles. Notamment, le verre, qui sera le cas à l'étude, est utilisé dans les systèmes micro-électromécaniques et microfluidiques.

Le SACE est présentement un procédé académique, avec peu d'adoption en industrie. Ceci est dû à un manque de contrôle sur le procédé, menant à une mauvaise répétabilité des formes usinées. L'objectif principal de ce projet de recherche est l'identification d'un signal de rétroaction permettant un meilleur contrôle sur le procédé. La mesure du courant électrique passant par les électrodes est un bon candidat, et sera étudiée ici.

Premièrement, la littérature en micro-usinage du verre a été revue. La niche que pourrait occuper le SACE dans l'industrie a été identifiée, principalement dans le contexte de prototypage rapide et production en petite série. Ensuite, l'état de l'art du SACE a été étudié. Les enjeux actuels ont été identifiés et des avenues de recherche pertinentes permettant d'améliorer le procédé et son adoption en industrie ont été proposés.

Deuxièmement, deux machines SACE ont été conçues et développées. La première, ayant une très bonne précision de positionnement, offre de nombreuses avenues de recherche par sa flexibilité et facilité d'interface. Le système de contrôle de celle-ci a été programmé, incluant un module pour AutoCAD permettant la création de parcours d'outil spline. La seconde, simple et à faible coût, a permis de faire des essais à faible délai. Elle a été conçue et fabriquée à base d'une fraiseuse de bureau à commande numérique.

Finalement, une étude a été complétée et soumise à une revue scientifique avec comme objet l'utilisation du signal de courant en usinage SACE. Des opérations SACE de base ont été exécutées avec la machine à faible-coût. Deux applications ont été proposées : un palpage sans contact, en profitant d'un pic dans le courant à l'approche de l'outil, et puis un monitoring de l'état du film gazeux entourant l'outil, ce qui affecterait la stabilité des décharges et l'uniformité de l'enlèvement de matière.

Mots-clés: micro-usinage, verre, systèmes micro-électromécaniques

Development of an electrochemical machining process for hard-to-machine materials

Guillaume VILLENEUVE

ABSTRACT

This thesis aims to make advances in the development of an electrochemical machining process, Spark-Assisted Chemical Engraving (SACE). SACE has applications for the machining of features in the sub-millimeter scale in hard and fragile materials. In particular, glass is used in microelectromechanical and microfluidic systems and the processes available to machine it are limited.

SACE is currently an academic process, with limited adoption in industry. This is due to a lack of control over the process, leading to poor repeatability of the machined shapes. The main objective of this research project is the identification of a feedback signal allowing a better control on the process. The measurement of the electric current passing through the electrodes will be studied as a good candidate.

First, the literature in glass micromachining is reviewed. The industry niche that SACE could occupy is identified, mainly in the context of rapid prototyping and small series production. Then, the state of the art of SACE is studied. Current issues are identified and relevant research avenues to improve the process and its adoption in industry are explored.

Secondly, two SACE machines are designed and developed. The first, having a very good positioning accuracy, offers many avenues of research by its flexibility and ease of interface. The control system of this machine is designed and programmed, including a module for AutoCAD allowing the creation of spline tool paths. The second one, simple and low cost, allows execution of tests with low delay. This machine is designed and manufactured using a desktop CNC milling machine.

Finally, a study is completed and submitted to a scientific journal with the purpose of using the current signal in SACE machining. Basic SACE operations are performed with the low-cost machine. Two applications are proposed : non-contact probing, taking advantage of a peak in the current as it approaches the tool, and then monitoring the state of the gas film surrounding the tool, which would affect the stability of the discharges and the uniformity of the material removal.

Keywords: micromachining, glass, micro-electromechanical systems

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Introduction	3
1.2 Propriétés et structure du verre	3
1.2.1 Structure chimique	3
1.2.2 Types de verre utilisés en industrie	5
1.3 Applications industrielles du verre	6
1.3.1 Interposeurs	6
1.3.2 Dispositifs Micro-électro-mécaniques (MEMS)	7
1.3.3 Dispositifs microfluidiques	7
1.4 Procédés d'usinage du verre	8
1.4.1 Introduction	8
1.4.2 Procédés mécaniques	8
1.4.2.1 Usinage conventionnel	8
1.4.2.2 Usinage par jet abrasif	9
1.4.2.3 Usinage ultrasonique	10
1.4.3 Procédés thermiques	11
1.4.3.1 Usinage laser	11
1.4.3.2 Gravure par décharges ciblées	12
1.4.4 Procédés chimiques	12
1.4.4.1 Gravure chimique	12
1.4.4.2 Gravure par ions directs	13
1.4.5 Procédés hybrides	14
1.4.5.1 Gravure chimique assistée par étincelage (SACE)	15
1.4.6 Comparaison des procédés	15
1.5 Usinage chimique assisté par étincelage (SACE)	16
1.5.1 Introduction	16
1.5.2 Mécanismes physique	17
1.5.2.1 Réaction chimique	17
1.5.2.2 Mécanisme de génération de la décharge	18
1.5.2.3 Caractéristiques du film gazeux	19
1.5.2.4 Mécanisme d'enlèvement de matière	23
1.5.3 Paramètres d'usinage SACE	25
1.5.3.1 Distance outil-pièce	26
1.5.3.2 Taux d'enlèvement de matière et vitesse d'avance	26
1.5.3.3 Paramètres du perçage de trous	28
1.5.3.4 Tension	30
1.5.3.5 Caractéristiques de l'électrode-outil	30
1.5.4 Approches d'usinage	31

1.5.4.1	Méthodes d'avance de perçage	31
1.5.4.2	Méthodes de palpé et rétroaction	32
1.5.4.3	Parcours d'outil	34
1.5.5	Avenues de recherche	37
1.5.5.1	Amélioration de la répétabilité du procédé	37
1.5.5.2	Expansion des stratégies d'usinage	37
1.5.5.3	Signaux de rétroaction	37
1.5.5.4	Application à d'autres matériaux	38
1.6	Conclusion	40
CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE		43
2.1	Objectifs	43
2.2	Méthodologie	44
CHAPITRE 3 CONCEPTION ET FABRICATION D'UNE PLATEFORME DE RECHERCHE SACE		45
3.1	Conception électronique et programmation des sous-systèmes d'une machine SACE flexible et de haute précision	45
3.1.1	Introduction	45
3.1.2	Contrôle	46
3.1.3	Sous-systèmes	47
3.1.3.1	Génération de fonctions de tension	48
3.1.3.2	Pompe à électrolyte	48
3.1.3.3	Rotation de la broche	49
3.1.4	Mesure et contrôle de l'axe Z auxiliaire	49
3.1.5	Programmation du contrôleur XPS-D en langage TCL	52
3.1.6	Programmation d'un Module AutoCAD pour génération des trajectoires d'outil	53
3.1.6.1	Les splines Catmull-Rom	54
3.1.6.2	Interpolation par spline	55
3.1.6.3	Architecture et programmation	56
3.1.7	Conclusion	61
3.2	Conception d'une machine SACE à faible coût	62
3.2.1	Fraiseuse et modifications	62
3.2.2	Caractérisation de la précision du positionnement	63
3.3	Expérimentation avec le procédé SACE	67
3.3.1	Palpé	67
3.3.2	Usinage de base	68
CHAPITRE 4 ON THE USE OF THE CURRENT SIGNAL IN SPARK- ASSISTED CHEMICAL ENGRAVING FOR MICROMACHINING PROCESS CONTROL		71
4.1	Abstract	71
4.2	Introduction	71

4.3	Materials and methods	74
4.3.1	Spark-Assisted Chemical Engraving principles	74
4.3.2	Experimental setup	75
4.3.3	Experimental Design and Methods	77
4.3.4	Introduction of the arcing height z_a and its initial measurement	78
4.3.5	Tool descents	80
4.3.6	Tool advances at varying Z-levels and feed rates	81
4.4	Results and discussion	82
4.4.1	Tool descents	83
4.4.1.1	Glass material removal resulting from tool descents	83
4.4.1.2	Current signal during tool descents	84
4.4.1.3	Machining gap – Arcing height relation	88
4.4.1.4	Potential application of the current spike	88
4.4.2	Lateral tool movements	89
4.4.2.1	Material removal from tool advances	89
4.4.2.2	Current signal during tool advances at varying Z-levels	91
4.4.2.3	Current signal during tool advances at varying feed rates	93
4.4.3	Discussion on current modes in the SACE process	94
4.4.4	Towards active control of the gas film with current feedback	95
4.5	Conclusion	96
4.6	References	97
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		99
ANNEXE I	BANQUE DE FONCTIONS D'USINAGE SACE POUR LE CONTRÔLEUR XPS-D	101
BIBLIOGRAPHIE		103

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Propriétés de trois verres Tiré de Matweb (2022) 5
Tableau 1.2	Caractéristiques de trois types de lasers pour l’usinage du verre 12
Tableau 1.3	Comparaison de procédés de perçage de trous dans le verre Tiré de Hof & Abou Ziki (2017) 15
Tableau 1.4	Quelques propriétés du saphir Tiré de Roditi (2022) 39
Tableau 1.5	Paramètres utilisés pour le perçage du saphir Tiré de Ho & Chen (2020) 39
Tableau 3.1	Certaines caractéristiques de l’actuateur linéaire ILS-150cc 47
Tableau 3.2	Dynamique à imposer à l’outil lors du contrôle actif pour les opérations SACE 51
Tableau 3.3	Paramètres utilisés lors des essais SACE 68
Tableau 4.1	SACE process parameters 77
Tableau 4.2	Geometry of holes created by n tool descents 84
Tableau 4.3	Average durations of machining modes for different Z-levels during milling at $F = 20 \text{ mm/min}$ 93

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Structures amorphe et cristalline du SiO ₂ Tiré de OpenStax (2022)	4
Figure 1.2 Micro-mécanismes de diverses complexités Tiré de Prime Faraday (2002)	7
Figure 1.3 Procédé d'usinage conventionnel	9
Figure 1.4 Procédé d'usinage abrasif	10
Figure 1.5 Procédé d'usinage laser - noter les dépôts de matière resolidifiée en bordure de la zone usinée	11
Figure 1.6 Schématisation du phénomène de «undercut» résultant d'une gravure chimique	13
Figure 1.7 Gravure par ions directs	14
Figure 1.8 Schématisation du procédé SACE	17
Figure 1.9 Régions clefs de la tension Tiré de Hof & Wüthrich (2006)	19
Figure 1.10 Formation du film gazeux Tiré de Hof & Wüthrich (2006)	20
Figure 1.11 Film de gaz et matière enlevée simulés pour différentes profondeurs de solution. Temps de coupe de 2 s Tiré de Kolhekar & Sundaram (2019)	21
Figure 1.12 (a) et (b) : Variation des caractéristiques des trous selon l'écoulement appliqué, (c) et (d) : Qualité des trous avec écoulement de 0 et 2.5 ml/min respectivement pour tension de 60 V Tiré de Singh & Dvivedi (2021)	22
Figure 1.13 Température d'usinage selon la position de l'outil Tiré de D. Abou Ziki, Hof & Wuthrich (2015)	24
Figure 1.14 Schéma de cause-à-effet du procédé SACE Tiré de Singh & Dvivedi (2016)	26
Figure 1.15 Modèles des sources de chaleur : disque et anneau Tiré de Hof & Wüthrich (2018)	28

Figure 1.16	Force de réaction pour différentes profondeurs de trou et vitesses d'avance, tension de 33 V et diamètre d'outil de 500 μm Tiré de Abou Ziki (2014)	29
Figure 1.17	Méthodes d'avance lors du perçage SACE	32
Figure 1.18	Méthode de palpage par conduction	33
Figure 1.19	Schématisation d'une stratégie multi-passes Tiré de Hof & Wüthrich (2018)	35
Figure 1.20	État de surface selon le nombre de passes de finition Tiré de Hof & Wüthrich (2018)	36
Figure 3.1	Système SACE de base	45
Figure 3.2	Machine SACE haute-précision Adapté de Falise (2020)	46
Figure 3.3	Schéma des connexions pour le contrôle de la machine SACE	48
Figure 3.4	Principaux sous-systèmes de la tête d'usinage SACE	49
Figure 3.5	Méthode de palpage par détection du déplacement	50
Figure 3.6	Système proposé pour simplifier le contrôle de l'axe Z auxiliaire SACE	52
Figure 3.7	Fonctionnement de base du module AutoCAD	54
Figure 3.8	Approximation par spline. Une grande tolérance est utilisée afin de mieux illustrer l'erreur.	56
Figure 3.9	Architecture simplifiée du module AutoCAD	57
Figure 3.10	Algorithme de génération de points de contrôle pour un spline d'interpolation	60
Figure 3.11	Courbes interpolées a) avec longueur de segment dynamique et b) segments constants	61
Figure 3.12	Porte-outil SACE	63
Figure 3.13	Déplacements de l'outil pour mesurer : a) la précision de déplacement et b) le jeu mécanique de la machine SACE à faible coût	64
Figure 3.14	Méthode de mesure des formes usinées sur verre soda-lime	65

Figure 3.15	Erreur de positionnement en X des lignes, trois séries en même position X	66
Figure 3.16	Géométries usinées par SACE en essais de base : a) texte, b) poche (profondeur 1 mm) et c) rainure	69
Figure 4.1	Illustration of SACE process principles	75
Figure 4.2	Principal elements of the developed experimental setup : a) Modified Genmitsu 3018-PROVer 3-axis milling machine, b) Tool-electrode, c) electrical connections	76
Figure 4.3	Preliminary arcing height measurement procedure	79
Figure 4.4	Tool descents illustrated in a) vertical and b) horizontal planes. Descents have been numbered by row and column	81
Figure 4.5	Illustration of tool milling advances in second and third sets of experiments	82
Figure 4.6	Laser confocal microscopy images of holes resulting from descents to depths a) z_a , b) $z_a - 10 \mu\text{m}$, c) and d) $z_a - 20 \mu\text{m}$. a) and b) present the characteristic ring shape of SACE-machined holes while c) and d) are irregular	84
Figure 4.7	Filtered (running average over 20 ms) current during 5 descents to $Z = z_a$ and pause a) without and b) with material removal. Line colors represent individual descents.	86
Figure 4.8	Current samples at different stages of tool descents	87
Figure 4.9	Filtered (running average over 20 ms) currents for descents to three depths. Note the absence of current spike in some descents to $0 \mu\text{m}$ due to uncertainty in true tool position. Line colors represent individual descents.	88
Figure 4.10	Grooves machined at different feed rates with $Z = z_a - 10 \mu\text{m}$, a) 20 mm/min, b) 10 mm/min, c) 5 mm/min	90
Figure 4.11	Filtered (running average over 2 ms) current during advances at : a) $z_a + 20 \mu\text{m}$ b) $z_a - 20 \mu\text{m}$	91
Figure 4.12	Mean current during advances at varying Z-levels around z_a with $F = 20 \text{ mm/min}$	92

Figure 4.13	Filtered (running average over 2 ms) current signals for milling advances at varying feed rates, tool position $Z = z_a - 10\mu\text{m}$. Some instances of current modes 2 and 3 are indicated	94
Figure 4.14	Current samples in modes 2 and 3	95
Figure 4.15	Proposed method of stabilizing the gas film through current signal feedback	96

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

SACE	Spark-Assisted Chemical Engraving
ECDM	Electro-Chemical Discharge Machining
MEMS	Micro-Electromechanical systems
TCL	Tool Command Language

INTRODUCTION

Le verre est un matériau relativement peu exploité ayant pourtant un grand potentiel. Ses propriétés mécaniques, chimiques et optiques rendent ses applications industrielles nombreuses et variées. Les micro-systèmes à base de verre sont présents dans plusieurs secteurs industriels. Dans l'industrie médicale, des dispositifs microfluidiques en verre servent de laboratoires miniaturisés permettant une analyse plus simple et plus rapide. Les avancées technologies en MEMS sont continues, avec l'arrivée de capteurs miniaturisés à très faible consommation énergétique et d'interfaces humain-machine de plus en plus performantes (Zhu *et al.*, 2020).

Actuellement, il existe une niche non-comblée pour la production de MEMS en petite série. En effet, comme il sera vu au chapitre 1, les procédés actuels sont limités par leur vitesse, leur coût ou leur très grande taille de série viable. Le procédé de gravure chimique assistée par étincelage (SACE, Spark-Assisted Chemical Engraving) est une solution potentielle pour occuper cette niche. Il est relativement peu-coûteux et rapide tout en offrant un bon état de surface. Toutefois, le procédé est encore presque purement académique ; des problèmes de répétabilité le rendent peu attrayant pour l'instant. L'objectif principal de ce projet est de faire passer ce procédé du niveau académique à industriel.

Premièrement, une revue de littérature a été faite pour comprendre l'état de l'art du procédé, son contexte d'utilisation et ses applications. Puis, afin de pouvoir faire des recherches sur le procédé SACE, il a avant tout été nécessaire de développer une plateforme de recherche. Le développement du système de contrôle d'une machine SACE est détaillé. Puis, le temps de fabrication de ladite machine ne permettant pas d'en faire usage pour ce projet, une solution à faible coût à partir d'une fraiseuse à commande numérique a été conçue pour étudier le SACE à un niveau de base. Des expériences exploratoires ont été faites. Finalement, une étude sur l'utilisation du signal de courant comme rétroaction soumise à un journal scientifique est présentée.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Ce projet de recherche concerne le développement du SACE, un procédé de micro-usinage rapide et flexible, plus particulièrement appliqué au verre. Ces objectifs requièrent une connaissance approfondie d'une multitude de sujets, qui seront étudiés ici. Cette revue de littérature a comme objectifs la compréhension d'éléments relatifs à la micro-fabrication du verre et du SACE :

1. Des propriétés du verre ;
2. Des applications industrielles de la micro-fabrication du verre ;
3. Des méthodes actuelles de micro-fabrication du verre ;
4. Des mécanismes fondamentaux du procédé SACE ;
5. Des développements actuels du SACE et des avenues possibles de recherche.

1.2 Propriétés et structure du verre

1.2.1 Structure chimique

Un verre est un matériau dans l'état vitreux ; c'est à dire, un solide amorphe ayant une structure rigide et des propriétés thermodynamiques stables (Schmelzer *et al.*, 2011). En plus du très connu SiO_2 , des composés vitreux existent pour de nombreux composés. En effet, les verres ont une classification selon les éléments qui les composent (Margaryan, 1999) :

- Les verres oxides, à base d'oxygène, tels que SiO_2 ou GeO_2 ;
- Les verres métalliques, comme le $\text{Au}_{75}\text{Si}_{25}$;
- Les verres Halides, à base de Fluor tels que BeF_2 ;
- Les verres monoatomiques, tels que Se ;

- D'autres types de verres.

L'état vitreux a été considéré un quatrième état de la matière en raison de ses propriétés semblables à la fois au solide et au liquide ; la forme définie et la viscosité presque infinie sont superposées à la structure amorphe et l'isotropie (Parks, 1925). La vitrification, ou le mécanisme de formation d'un verre, se produit lorsque les liaisons entre les particules élémentaires d'un matériau augmentent en quantité à basse température, dont le seuil est la température de transition vitreuse T_g (Schmelzer *et al.*, 2011). On distingue l'état vitreux de cristallin par l'état d'ordre de la structure ; une structure ordonnée (à basse entropie) sera cristalline alors qu'une structure désordonnée sera amorphe. La figure 1.1 illustre des états amorphe et cristallin du SiO_2 .

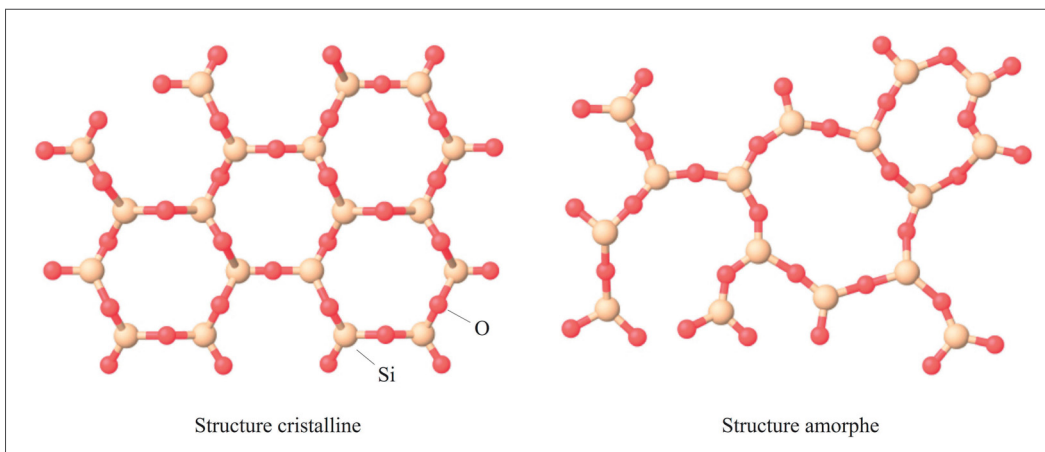


Figure 1.1 Structures amorphe et cristalline du SiO_2
Tiré de OpenStax (2022)

Le verre Soda-Lime, qui sera le principal utilisé dans cette étude en raison de son accessibilité, est un verre oxide de silicium SiO_2 auquel les additifs Na_2CO_3 , CaO , Al_2O_3 et MgO ont été ajoutés afin de réduire sa dureté et sa température de transition vitreuse, le rendant plus facile à mettre en forme comparativement au quartz (Brooks, 1975).

1.2.2 Types de verre utilisés en industrie

Trois principaux types de verre seront présentés. Le verre Soda-Lime est le plus commun et l'option à plus faible coût. Ses propriétés mécaniques et chimiques sont moins bonnes que celles d'autres types de verre plus coûteux, par contre. Le verre borosilicate, en plus d'avoir des propriétés mécaniques et chimiques supérieures à celles du Soda-Lime, a un coefficient d'expansion thermique très proche de celui du silicone. Cette particularité permet une intégration entre les deux matériaux par liaison anodique ; les contraintes résiduelles résultantes rendent ceci impossible avec des verres à plus haut coefficient de dilatation thermique. Le quartz, bien qu'il ne soit pas un verre, a des propriétés et utilisations semblables. Il a une très haute dureté et un très faible coefficient d'expansion thermique. Sa transparence à une plus haute bande de longueurs d'onde est également un avantage (Hwang, Hak Cho, Park & Kim, 2019). Le tableau 1.1 présente certaines propriétés de ces trois matériaux.

Tableau 1.1 Propriétés de trois verres
Tiré de Matweb (2022)

Matériau	Soda-Lime	Borosilicate	Quartz
Résistance en traction (MPa)	71	67-80	48
Module d'Young (GPa)	70	62	74
Ténacité à la rupture (MPa m ^{1/2})	0.62	0.77	0.67
Dureté (Knoop)	650	450	800
Conductivité thermique (W/(mK))	1.06	1.13	1.382
Température de transition vitreuse (deg C)	726	821	1600
Coefficient de dilatation thermique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	8.6	3.3	0.627
Résistivité électrique (ohm cm)	10 ¹² à 10 ¹³	10 ¹⁴ à 10 ¹⁸	10 ¹⁸ à 10 ¹⁹
Bande transparente (nm)	300 à 2750	350 à 750	190 à 2500

1.3 Applications industrielles du verre

Le verre est un matériau avec plusieurs applications en raison de ses propriétés intéressantes :

- Dans le domaine des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS), les propriétés optiques du verre et ses hautes résistivités électrique et thermique en font un excellent matériau (Hwang *et al.*, 2019).
- Dans le domaine des semiconducteurs, on peut l'utiliser comme substrat en raison de sa haute résistivité électrique, sa facilité à former des liens avec le Silicone et son coefficient de dilatation thermique similaire à celui de cet élément essentiel dans le domaine (Nguyen, Masaya & Takahito, 2016).
- Le verre est un matériau biocompatible et peu réactif, le rendant très attrayant pour les applications médicales telles que les implants (Lachhman, Zorman & Ko, 2012).

Cette section détaille certains produits pour lesquels la technologie de micro-fabrication du verre est adaptée.

1.3.1 Interposeurs

Une importante application du verre en électronique est en tant qu'interposeur ; c'est à dire une plaque mince isolante entre deux éléments d'un circuit intégré, des canaux conducteurs permettant la communication au travers de celle-ci (Delmdahl & Paetzel, 2014). Ces canaux, nommés « through-glass vias » (TGV), présentent le principal défi de fabrication des interposeurs. Des trous ayant un facteur de forme (profondeur/diamètre) élevé doivent être percés dans le verre ; ceux-ci doivent avoir un diamètre constant sur toute la profondeur, être les plus ronds possibles et ne pas présenter de défaut tel que des fissures (Laakso *et al.*, 2018).

1.3.2 Dispositifs Micro-électro-mécaniques (MEMS)

Les MEMS sont des dispositifs de dimensions de l'ordre allant du micromètre à la centaine de micromètres. Ils sont présents dans une multitude d'industries, et sont particulièrement communs dans les industries automobile, informatique et des télécommunications. Ils peuvent servir de capteurs (accéléromètres, gyroscopes...) ou d'actuateurs (relais pour fibre optique, filtres, buses de jet d'encre...). Les implants intelligents, tels que des capteurs de taux de glycémie pour diabétiques, font également grand usage de MEMS (Zhu *et al.*, 2020).

Typiquement, la fabrication à l'échelle du micromètre est limitée à deux axes. Par conséquent, les MEMS sont composés de pièces planaires superposées en plusieurs niveaux. La figure 1.2 présente des micromécanismes de diverses complexités et nombres de niveaux.

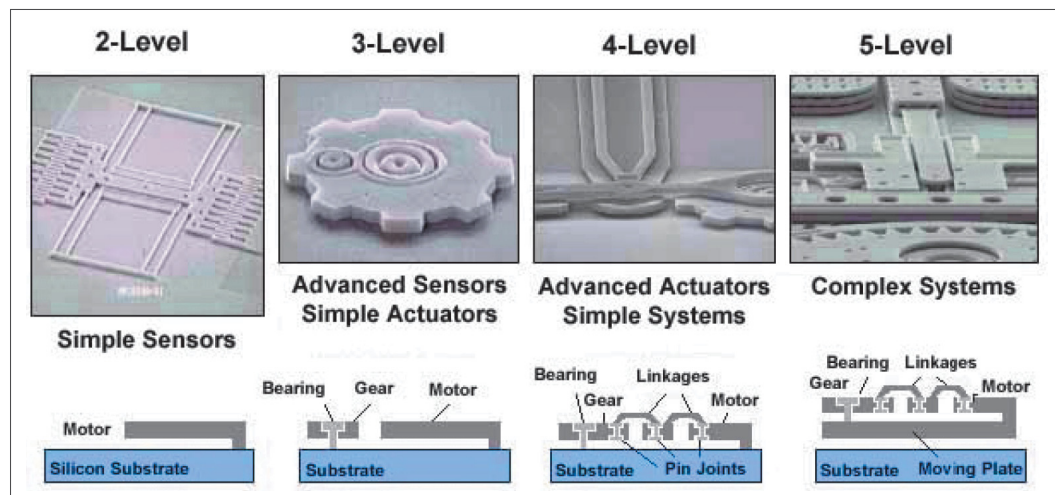


Figure 1.2 Micro-mécanismes de diverses complexités
Tiré de Prime Faraday (2002)

1.3.3 Dispositifs microfluidiques

Les dispositifs microfluidiques sont une catégorie de MEMS consistant en des instruments d'analyse de laboratoire utilisant une très petite quantité de fluide. Ils permettent d'effectuer des analyses à des vitesses significativement plus rapides que les tests en laboratoire traditionnels.

On les surnomme «lab on a chip». Bien que des dispositifs microfluidiques en silicone ou en polymère existent, les propriétés mécaniques, optiques et chimiques du verre font en sorte que celui-ci est le principal utilisé (Hwang *et al.*, 2019).

1.4 Procédés d'usinage du verre

1.4.1 Introduction

Plusieurs méthodes existent pour usiner le verre. Celles-ci se distinguent en quatre catégories : mécanique, chimique, thermique et hybride (Hof & Abou Ziki, 2017). Chaque procédé a ses avantages et inconvénients aux niveaux techniques et économiques. Aucun n'est totalement préférable aux autres ; lequel choisir est conditionnel à l'application. Premièrement, les caractéristiques des formes à usiner seront étudiées. Par la suite, les procédés de micro-fabrication du verre seront présentés et comparés.

1.4.2 Procédés mécaniques

Les méthodes mécaniques d'usinage du verre ont en commun un faible coût, une grande flexibilité et la possibilité de formes complexes. Par contre, leur précision et les états de surface pouvant être obtenus sont inférieurs à d'autres types de procédés (Hwang *et al.*, 2019). Dans le contexte des systèmes micro-électro-mécaniques, on peut considérer les procédés mécaniques d'usinage pour les étapes de découpe initiale ou d'ébauche, qui ne nécessitent pas une grande précision et peuvent être effectués rapidement.

1.4.2.1 Usinage conventionnel

Cette méthode consiste simplement à usiner le verre avec un outil coupant. Bien que cette méthode soit rapide et peu coûteuse, son défaut principal est sa tendance à créer des fissures en raison des hautes forces et vibrations. La fréquence et la gravité de ces fissures peuvent être réduites par plusieurs techniques. Les fissures se forment en général au fond des trous ;

des méthodes existent pour réduire l'apparition de ces fissures, mais elles impliquent un grand ralentissement du procédé, par exemple en réduisant les forces axiales, ce qui diminue la vitesse d'avance, ou en utilisant un panneau sacrificiel sous la pièce ce qui augmente la complexité du procédé (Park, Choi & Chu, 2002). La figure 1.3 schématise le procédé.

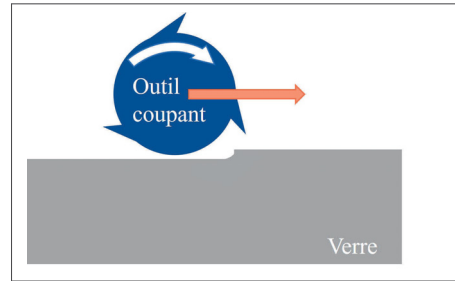


Figure 1.3 Procédé d'usinage conventionnel

1.4.2.2 Usinage par jet abrasif

En propulsant des particules fines à haute vitesse sur la surface à usiner, on peut obtenir une surface sans bavure, fissure ou zone affectée thermiquement (Nguyen *et al.*, 2016). Par contre, l'état de surface est très rugueux. Un masque est utilisé pour délimiter les zones à attaquer. Ces méthodes résultent difficilement en des structures aux échelles sous $50\ \mu m$. De plus, les surfaces obtenues ont une haute rugosité et il est difficile d'obtenir des trous à haut facteur de forme. (Kowsari, Nouhi, Hadavi, Spelt & Papini, 2017). La figure 1.4 schématise le procédé.

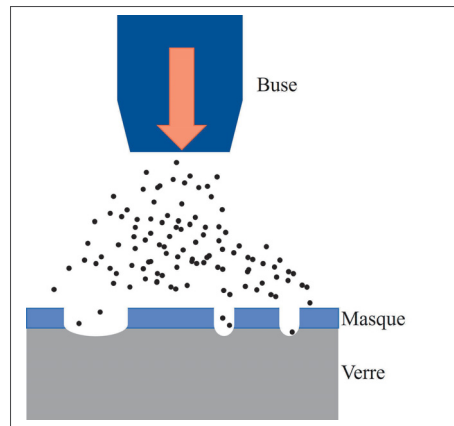


Figure 1.4 Procédé d'usinage abrasif

1.4.2.3 Usinage ultrasonique

Cette technologie permet d'usiner le verre en induisant une vibration ultrasonique dans l'outillage (un négatif métallique des formes à usiner), le tout aidé par un mélange abrasif (Bullen, 2022). Des formes de dimensions minimales de 200 μm sont possibles. Une multitude de formes peuvent être fabriquées :

- Trous de forme quelconque ;
- Rainures ;
- Trous borgnes ;
- Cavités ;
- Opérations sur les diamètres internes et externes.

Cette grande variété de formes est un grand atout. De plus, l'absence de restrictions sur l'angle de dépouille démarque ce procédé. Cependant, la dimension minimale de forme de 200 μm est élevée par rapport à d'autres procédés semblables. La nécessité d'usiner un outillage complexe fait également augmenter les coûts.

1.4.3 Procédés thermiques

1.4.3.1 Usinage laser

Cette méthode consiste à retirer de la matière au verre par ablation, en le chauffant à l'aide d'un laser. Un défi est que le substrat est transparent à la plupart des longueurs d'onde ; il est nécessaire d'utiliser des lasers à haute intensité de pics afin de générer des effets d'absorption non-linéaires. Les hautes températures résultent en une zone affectée thermiquement aux alentours des trous usinés. On y observe des contraintes résiduelles et un excès de matière resolidifiée déposé autour de la zone usinée (Okazaki, 2011). La figure 1.5 illustre le procédé et le dépôt typique de matière resolidifiée.

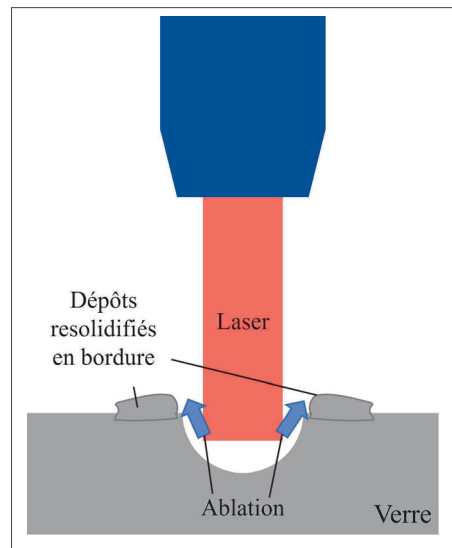


Figure 1.5 Procédé d'usinage laser - noter les dépôts de matière resolidifiée en bordure de la zone usinée

Lasers au CO₂

Les caractéristiques de ce procédé varient selon le type de laser utilisé. Les lasers les plus communément utilisés sont les lasers au CO₂, pour leur relativement faible coût. Leur utilisation résulte par contre en une grande zone affectée thermiquement (15 μ m) et une résolution dans les dizaines de micromètres (Bovatsek & Patel, 2022).

Lasers UV

Les lasers ultraviolets permettent un usinage plus précis, pouvant percer des trous de diamètre minimal de 30 μm . La zone affectée thermiquement est grandement réduite par rapport aux lasers au CO_2 (Tseng, Chen, Chao, Ma & Chen, 2007). L'équipement étant plus complexe, les coûts relatifs à ce type de laser seront plus élevés.

Lasers picoseconde/femtoseconde Les lasers ayant des durées d'impulsion ultra-courtes permettent un usinage très précis, sans zone affectée thermiquement. Le taux d'enlèvement de matière est par contre grandement réduit (Hwang, Choi & Grigoropoulos, 2004).

Le tableau 1.2 résume les caractéristiques principales des trois types de lasers présentés.

Tableau 1.2 Caractéristiques de trois types de lasers pour l'usinage du verre

Type de laser	Vitesse (um/s)	Diamètre de trou (um)	État de surface Ra (um)	Coût
CO2	20 000	25	5	Bas
UV	100	30	0.5	Moyen
nano-femtoseconde	30	7	0.25	Élevé

1.4.3.2 Gravure par décharges ciblées

Il est possible, en générant une décharge électrique, de retirer du verre par la combinaison d'une diminution de la viscosité du verre et un chauffage de Joule. Des trous de très petit diamètre et à surface lisse ont été obtenus. Par contre, un post-traitement thermique est nécessaire, ce qui augmente la complexité du procédé (Takahashi *et al.*, 2017).

1.4.4 Procédés chimiques

1.4.4.1 Gravure chimique

Le verre peut être attaqué à l'aide d'une substance corrosive, notamment l'acide hydrofluorique (HF). Un masque résistant à cette substance permet de contrôler la matière à enlever. Celui-ci est typiquement composé de composés de silicone inertes au HF, mais plusieurs types de

masques existent. Une fois le masque appliqué, une grande quantité de formes peut être gravée simultanément sur une pièce avec une même application de la substance corrosive (Iliescu, Chena & Miao, 2008).

Un aspect clé de la gravure chimique est la nature et le contrôle de la qualité du masque. En effet, la qualité des gravures sur le verre dépendent directement de la qualité du masque. De plus, l'aspect hydrophobe ou hydrophile du masque influencera l'écoulement du fluide dans les gravures et ainsi le comportement et la vitesse de gravure (Iliescu *et al.*, 2008).

Un désavantage de la gravure chimique utilisant un masque est que l'attaque chimique se fait dans toutes les directions. Ceci résulte en un enlèvement de matière sous le masque et donc une limitation des dimensions possibles des trous et canaux. Ce phénomène se nomme «undercut». Dans le cas de matériaux isotropes tels que le verre, ceci se manifeste par un enlèvement de matière semi-circulaire s'étendant des limites du masque (Chen, Fang, Hai-Feng & Varahramyan, 2008). La figure 1.6 schématise le phénomène.

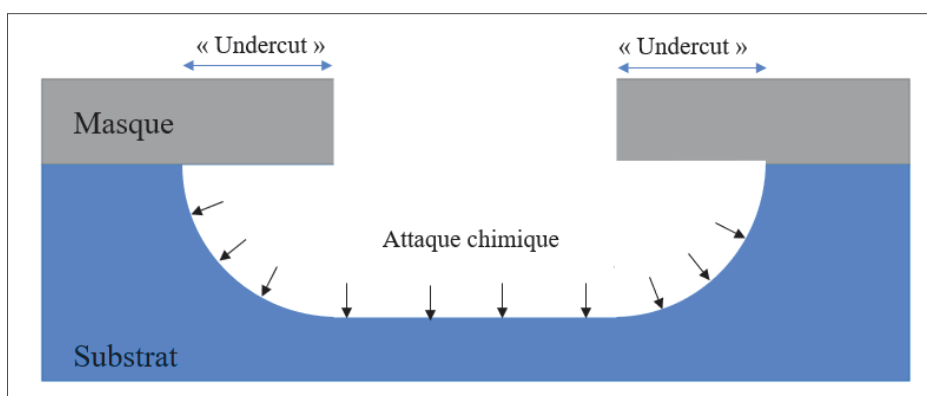


Figure 1.6 Schématisation du phénomène de «undercut» résultant d'une gravure chimique

1.4.4.2 Gravure par ions directs

Un plasma, obtenu en ionisant un gaz tel que l'hexafluorure de soufre, peut être utilisé d'une manière semblable à la gravure chimique (Li, Abe, Liu & Esashi, 2002). La surface du verre

couverte d'un masque est bombardée d'ions. Ce procédé, bien que plus complexe que la gravure chimique standard, permet d'obtenir des trous à plus haut facteur de forme et un état de surface plus lisse (Bagolini *et al.*, 2017). Le jet d'ions est perpendiculaire à la surface et donc l'enlèvement de matière se fait de façon anisotrope, contrairement à la gravure chimique. Il est ainsi possible d'obtenir des trous et canaux plus profonds pour une largeur donnée, avec des parois verticales. La figure 1.7 schématise le procédé.

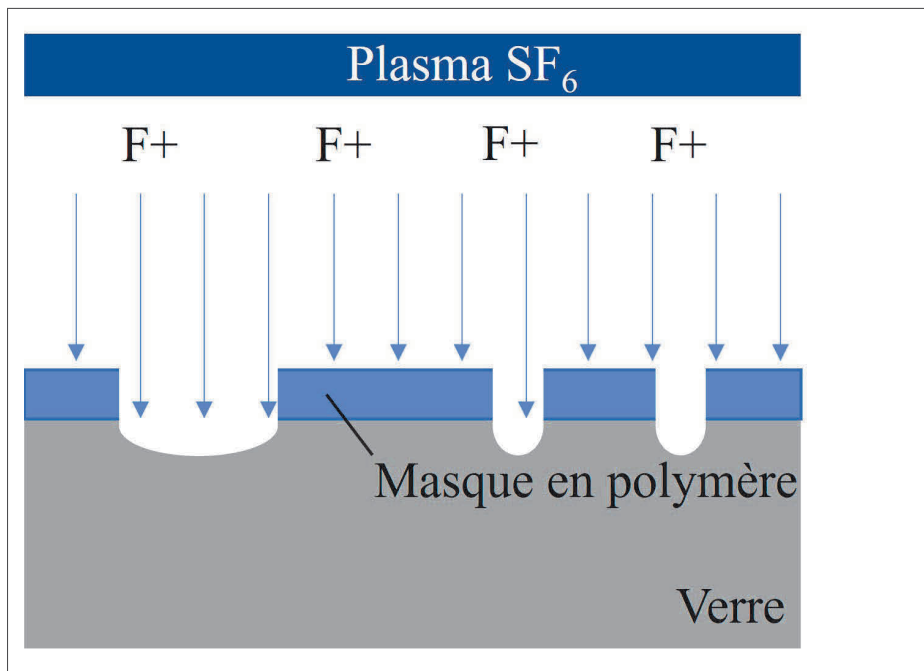


Figure 1.7 Gravure par ions directs

1.4.5 Procédés hybrides

Les procédés hybrides profitent des aspects les plus avantageux de d'autres procédés en les combinant, soit simultanément ou bien successivement (Lauwers *et al.*, 2014).

Le micro-usinage assisté par fluide est un exemple de procédé hybride. En ajoutant une couche d'eau sur la surface à usiner par laser, l'accumulation de débris en bordure de la zone usinée peut être réduite. De plus, le taux d'enlèvement de matière est amélioré (Chavoshi & Luo, 2015).

L'usinage assisté par laser est un autre procédé hybride. Un laser peut être utilisé pour chauffer localement le matériau afin de faciliter son usinage mécanique. Ce procédé permet l'usinage de matériaux fragiles tels que le verre et les céramiques sans la formation de fissures ; le matériau devient plus ductile et donc permet une meilleure formation de copeaux (Lauwers *et al.*, 2014).

1.4.5.1 Gravure chimique assistée par étincelage (SACE)

Cette méthode d'usinage hybride combine les attaques chimique et électrique. La section 1.5 étudie l'état de l'art de ce procédé plus en détail.

1.4.6 Comparaison des procédés

Plusieurs facteurs techniques et économiques permettent de discriminer parmi les procédés présentés. (Hof & Abou Ziki, 2017) ont compilé et comparé plusieurs méthodes d'usinage de verre. Le tableau 1.3 présente une comparaison qualitative de ces méthodes dans le contexte de la création de trous dans le verre. Les symboles + et - indiquent une échelle qualitative de favorabilité d'un aspect du procédé ; – étant le moins favorable et ++ étant le plus favorable.

Tableau 1.3 Comparaison de procédés de perçage de trous dans le verre
Tiré de Hof & Abou Ziki (2017)

Procédé	Usinage conventionnel	Jet abrasif	Usinage ultrasonique	Laser	Gravure chimique	Gravure par ions réactifs	SACE
Facteur de forme	-	–	-	++	–	++	+
Taux d'usinage	+	-	–	++	–	–	+
État de surface (Ra)	-	–	-	-	+	++	+
Dimensions minimales (µm)	150	50	200	5	1	0.5	100
Prototypage rapide	++	–	+	++	–	–	++
Fabrication de masse	–	++	-	-	++	++	–
Coût de l'outillage	–	–	-	++	–	–	++
Application à divers matériaux	++	++	++	+	-	–	++
Coût de l'équipement	++	+	-	-	-	–	+

En raison de leur bonne vitesse mais l'impossibilité de production en parallèle, les procédés par laser et SACE se démarquent tous deux dans un contexte de fabrication en petite série personnalisée. Dans les deux cas, la procédure en une seule étape sans outillage (par opposition à la gravure chimique, par exemple, qui requiert un masque) se prête très bien à une «personnalisation de masse». Le laser peut fabriquer des pièces de dimensions 20 fois plus petites que le SACE ; en

contrepartie, le SACE a des coûts beaucoup plus faibles en équipement. Le SACE a également l'avantage de produire un meilleur état de surface et l'absence de dommages thermiques.

1.5 Usinage chimique assisté par étincelage (SACE)

1.5.1 Introduction

Ce procédé hybride combinant l'électroérosion et l'attaque chimique a vu le jour au vingtième siècle (Kurafuji, 1968). Par contre, un intérêt plus grand lui a été accordé dans les dernières décennies dans le contexte des microsystèmes électro-mécaniques et de la personnalisation de masse (Hof, 2018). Plusieurs noms lui sont donnés ; les plus communs sont usinage à décharges électro-chimique (Électro-Chemical Discharge Machining, ECDM), et usinage chimique assisté par étincelage (Spark-Assisted Chemical Engraving, SACE). Bien qu'initialement conçu pour le verre, le SACE est adaptable à plusieurs matériaux fragiles et non-conducteurs.

Le substrat est submergé dans une solution électrolyte, qui à température ambiante l'attaque à des vitesses négligeables. Une électrode-outil et une contre-électrode sont toutes deux submergées dans la solution. Une tension (environ 30V) est appliquée entre les électrodes, portant à l'état gazeux la solution. Une décharge électrique se produit au travers de la couche de gaz ainsi générée, entraînant un enlèvement de matière. Cet effet, en combinaison avec l'attaque chimique de l'électrolyte accélérée par la haute température, forme le principe de ce procédé (Hof & Abou Ziki, 2017). La figure 1.8 schématise le système.

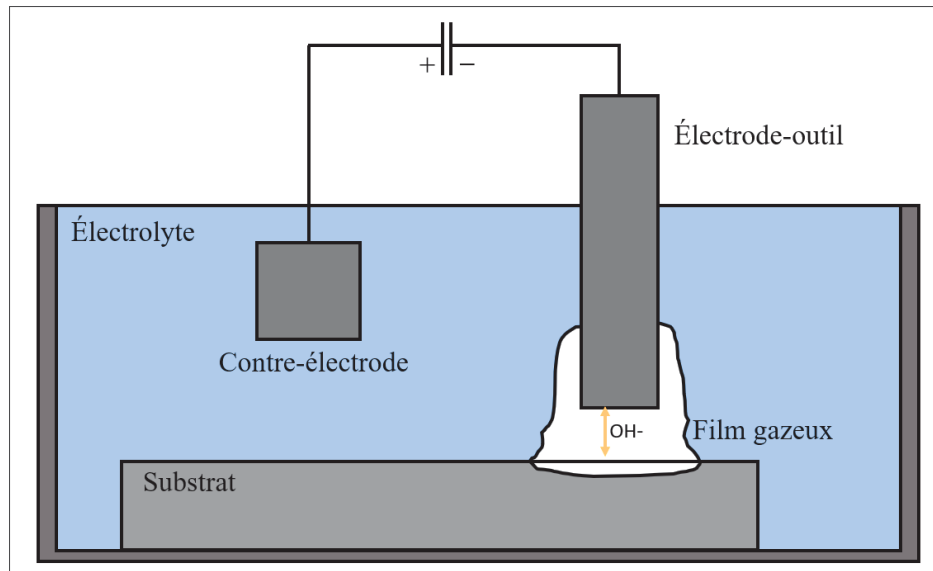
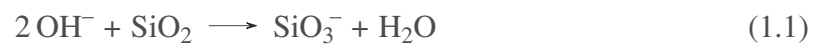


Figure 1.8 Schématisation du procédé SACE

1.5.2 Mécanismes physique

1.5.2.1 Réaction chimique

La réaction chimique à la base du SACE est la dissolution du dioxyde de silicium dans une solution basique, tel que présenté à l'équation 1.1 dans le cas général et spécifique au KOH (Fascio, Wüthrich & Bleuler, 2004). Les ions hydroxydes provenant du soluté de la solution électrolyte (généralement NaOH ou KOH) attaquent les liens silicium-oxygène et un sel (Na_2SiO_3 ou K_2SiO_3) est formé. Cette réaction se produit très lentement à température ambiante, mais est accélérée localement aux températures élevées produites par les décharges électriques.



1.5.2.2 Mécanisme de génération de la décharge

Les chercheurs (Basak & Ghosh, 1996) ont développé un modèle simplifié du mécanisme menant aux décharges à l'anode. Le cycle charge-décharge suivrait ces étapes :

1. Le courant résultant de la tension appliquée au système entraîne l'électrolyse de l'eau et l'apparition de bulles d'hydrogène à l'électrode-outil.
2. Les bulles ainsi formées font augmenter la résistance du circuit en obstruant l'interface électrode-solution ;
3. L'augmentation de la résistance augmente la chaleur dégagée à l'interface ;
4. L'électrolyte entre localement en ébullition, générant plus de bulles ;
5. Les bulles forment un film gazeux isolant totalement l'électrode-outil et la résistance devient très grande ;
6. Une décharge électrique se produit, les bulles se dissipent, et le circuit revient à son état initial.

Il a toutefois été démontré que le courant électrique n'est pas nul lors de la décharge, et donc que la résistance ne peut pas être modélisée comme infinie. En effet, l'hypothèse a été faite que les décharges étaient de type Townsend alors que les valeurs de pression et de courant ne correspondent pas à ce type de décharge, étant beaucoup plus élevées dans les deux cas. Le mécanisme de décharge serait plutôt par arc (Jain, Dixit & Pandey, 1999).

La figure 1.9 montre l'évolution du courant lors du procédé selon la tension appliquée. Les bulles de gaz formées par l'électrolyse de la solution apparaissent dans les régions de A à C. À mesure que les bulles coalescent et obstruent le courant, celui-ci atteint sa valeur maximale I_{crit} à la tension critique U_{crit} . La zone de transition C-D voit la formation d'un film de gaz instable. Les phénomènes de décharge se produisent simultanément aux effets électrochimiques. Lorsque le film de gaz recouvre totalement l'outil, le courant se fait uniquement par décharges (Hof & Wüthrich, 2006).

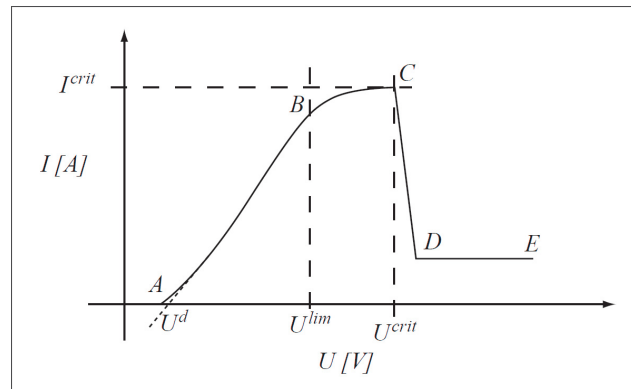


Figure 1.9 Régions clefs de la tension
Tiré de Hof & Wüthrich (2006)

1.5.2.3 Caractéristiques du film gazeux

Un aspect essentiel au procédé est le contrôle de l'épaisseur du film de gaz. Cette valeur est influencée par deux caractéristiques des bulles de gaz formées : leur diamètre moyen et la distance moyenne entre leurs sites de nucléation. Les bulles se forment à la surface de l'outil selon un processus stochastique, et croissent jusqu'à soit se détacher, soit atteindre un diamètre tel que la bulle coalesce avec les bulles voisines (Hof & Wüthrich, 2006).

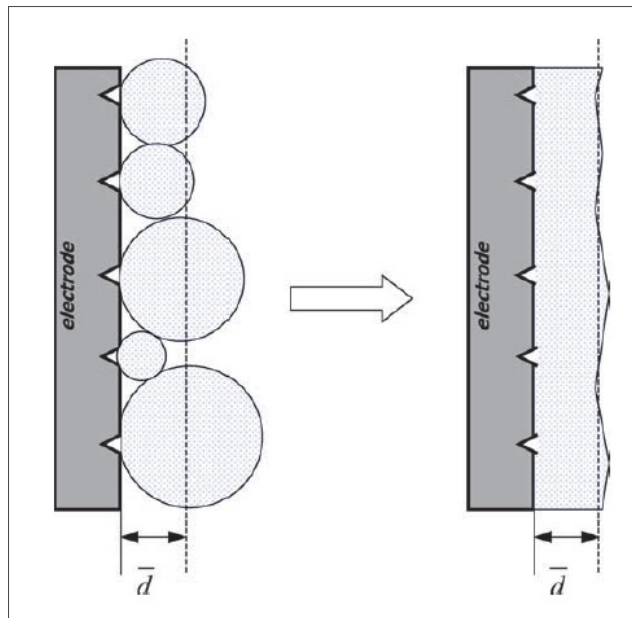


Figure 1.10 Formation du film gazeux
Tiré de Hof & Wüthrich (2006)

Une réduction de l'épaisseur du film gazeux permet une meilleure répétabilité du procédé en réduisant la surépaisseur d'usinage («overcut»). De plus, comme mis en évidence à la figure 1.10, la nature aléatoire des bulles influence négativement l'état de surface. Une façon de diminuer cette épaisseur est d'accélérer la formation du film gazeux avec des bulles de plus petit diamètre. Ceci peut s'accomplir en influençant trois éléments (Hof & Wüthrich, 2006) :

1. l'écoulement de l'électrolyte ;
2. la mouillabilité de l'outil ;
3. la densité des sites de nucléation des bulles.

La première méthode est d'influencer l'écoulement de l'électrolyte. L'induction d'un écoulement par la rotation de l'outil stabilise le film gazeux, en plus d'améliorer la circularité des trous percés (Hof & Wüthrich, 2006). De plus, Kolhekar et Sundaram (2019) ont démontré que la profondeur de la solution électrolyte a un impact sur la dimension et la stabilité du film gazeux. Une augmentation de la profondeur augmente l'épaisseur du film gazeux, mais diminue sa stabilité. Un film gazeux moins épais résulte en une plus petite surépaisseur d'usinage et une plus

grande vitesse d'usinage vers le bas, comme on peut voir à la figure 1.11. Cet effet est dû à un changement dans la forme de l'écoulement convectif autour du film gazeux. Le diamètre du trou varie plus en fonction de la profondeur pour un électrolyte plus profond ; l'effet de l'écoulement externe diminue avec la profondeur du trou.

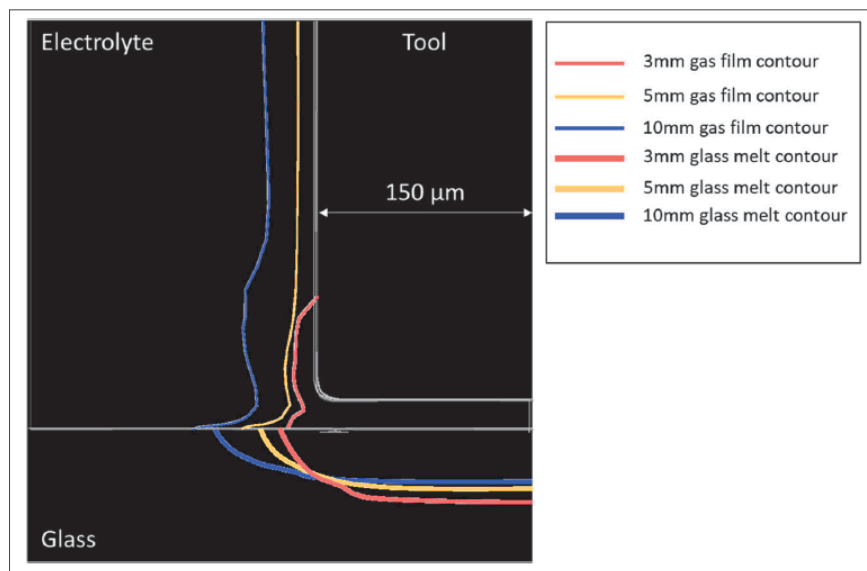


Figure 1.11 Film de gaz et matière enlevée simulés pour différentes profondeurs de solution. Temps de coupe de 2 s
Tiré de Kolhekar & Sundaram (2019)

Singh et Dvivedi (2021) ont usiné le zircone stabilisée à l'yttrium, un matériau céramique dur et chimiquement inerte, par SACE. Un écoulement a été induit dans l'électrolyte lors de l'usinage. La variation de la surépaisseur de coupe et de la profondeur du trou (donc du taux d'enlèvement de matière) est fonction de l'écoulement induit. De plus, les trous percés avec écoulement présentent moins de défauts. La figure 1.12 montre ces résultats. Ces résultats supportent l'hypothèse que les caractéristiques de l'écoulement ont une influence sur le film gazeux.

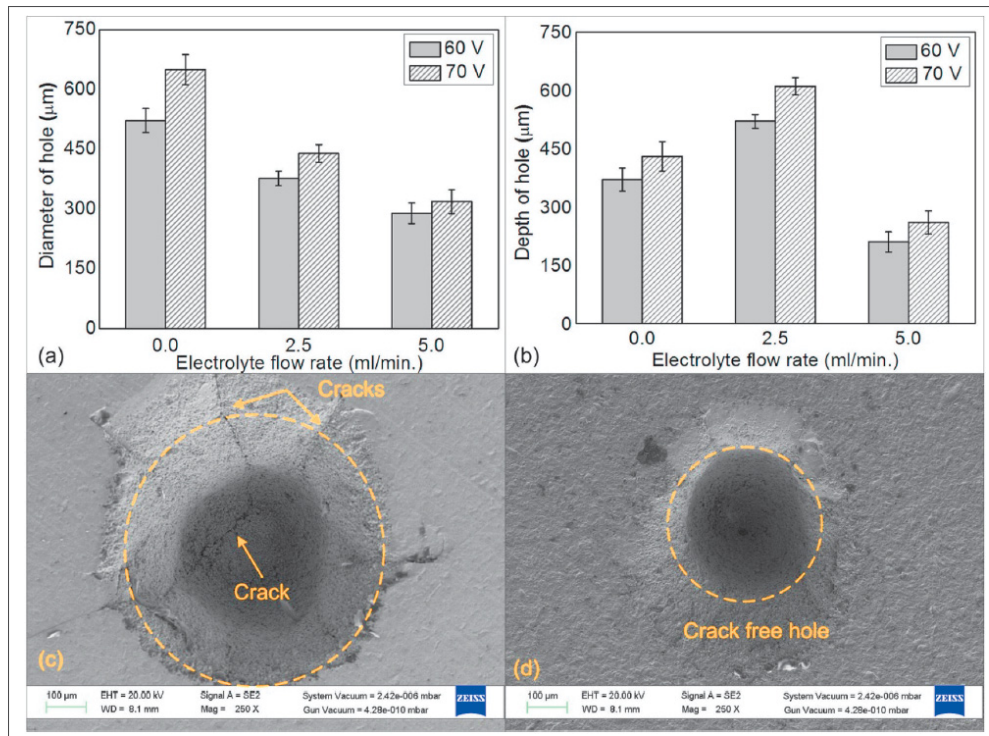


Figure 1.12 (a) et (b) : Variation des caractéristiques des trous selon l'écoulement appliqué, (c) et (d) : Qualité des trous avec écoulement de 0 et 2.5 ml/min respectivement pour tension de 60 V
Tiré de Singh & Dvivedi (2021)

Un surfactant, tel que du savon, peut être ajouté à la solution électrolyte afin d'augmenter la mouillabilité de l'outil et ainsi favoriser la coalescence des bulles de gaz. L'addition de savon à une solution de NaOH en proportion 10 : 1 (30wt%) a diminué le diamètre du film de 172 μm à 9 μm . (Hof & Wüthrich, 2006). (Rajput, Goud & Mohan Suri, 2020) ont amélioré le taux d'usinage et diminué les dommages thermiques de la même façon. Il a été trouvé que la concentration critique de Micelle CMC du surfactant est la concentration optimale à utiliser (0.036wt%). Une augmentation du nombre de sites de nucléation à la surface de l'outil augmenterait également le nombre de bulles, et donc diminuerait leur diamètre moyen.

1.5.2.4 Mécanisme d'enlèvement de matière

Le mécanisme permettant l'enlèvement de matière est la haute température locale provenant des décharges électriques et permettant l'attaque chimique du verre (Abou Ziki & Wüthrich, 2013). Plus précisément, les radicaux OH de l'électrolyte attaquent les liens Si-O-Si du verre à un taux accéléré par la haute température locale. De plus, les décharges électriques impactent physiquement le verre, créant des microcratères. Toutefois, ce mécanisme ne se produit pas suffisamment fréquemment pour avoir un grand impact sur le taux d'enlèvement de matière (D. Abou Ziki *et al.*, 2015).

La température à laquelle se produit l'usinage est une principale incertitude. (D. Abou Ziki *et al.*, 2015) ont démontré que la température locale en surface du verre varie selon le cas particulier. En effet, l'usinage peut se produire à toute température (quoique, à température ambiante il se produit très lentement). La plage de températures supérieures à la température de vaporisation de l'électrolyte mais inférieures à la température de fusion du sel électrolyte sont exclues : à l'intérieur de cette plage, le sel électrolyte est sous forme solide et non-dissous, rendant l'usinage impossible.

Trois cas ont été déterminés par (D. Abou Ziki *et al.*, 2015) pour la température d'usinage T_M et sont présentés à la figure 1.13. Le cas (a) se produit lorsque l'outil est en contact avec le substrat, notamment lors du perçage de trous profonds à avance constante. La température est alors celle de l'outil en raison de la conduction directe. Le cas (b) se produit lorsque la vitesse d'avance est inférieure au taux d'enlèvement de matière. Un espace se forme entre l'outil et le substrat et la température en surface baisse à mesure que cet espace augmente. Un équilibre se forme à une distance telle que la température en surface est égale à la température de fusion du sel. Le cas (c) se produit dans des conditions similaires à (b) où il y a un espace entre l'outil et le substrat, mais où l'écoulement d'électrolyte n'est pas obstrué. Ici, la solution est limitée à une température environnant sa température de vaporisation.

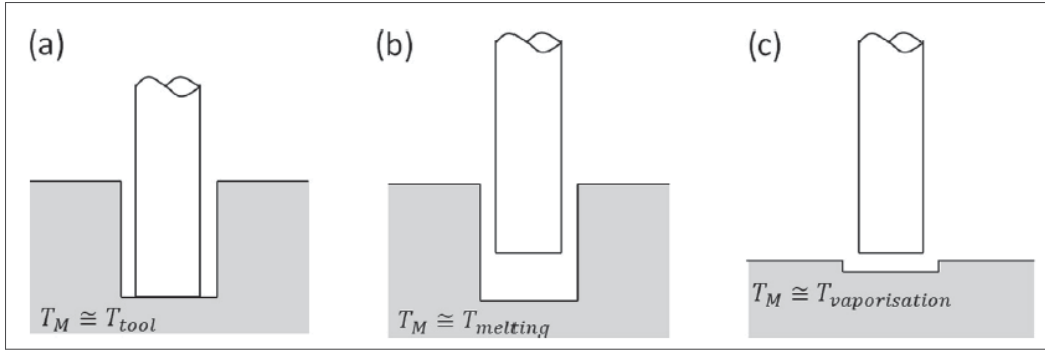


Figure 1.13 Température d'usinage selon la position de l'outil
Tiré de D. Abou Ziki *et al.* (2015)

Les résultats expérimentaux de (D. Abou Ziki *et al.*, 2015) dans une configuration (c) ont démontré que la propagation de l'enlèvement de matière correspond à la propagation de l'isotherme 185°C, la température de vaporisation de la solution. La position des isothermes a été simulée en modélisant une source de chaleur en forme d'anneau d'épaisseur 10µm correspondant à l'arête inférieure de l'outil cylindrique.

(Kang, Tang, Zhao, Qian & Lauwers, 2021) ont modélisé le transfert de chaleur au substrat par la génération aléatoire de décharges dans une zone annulaire. Les décharges ont une énergie fixe de 3.8 mJ. La fréquence de décharges pour une tension supérieure à 25V suit l'équation 1.3 :

$$f_s = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right) \quad (1.3)$$

Avec A et B des constantes respectivement égales à 3e-9 V⁻²s⁻¹ et 5.4e6 Vm⁻¹. E est l'intensité du champ électrique, proportionnelle à la tension.

Le terme Effective Discharge Ratio (EDR) correspond au pourcentage des décharges électriques qui font contact avec le substrat et ne se dissipent pas simplement dans l'électrolyte. Le terme Energy transfer Ratio (ETR) est le pourcentage de l'énergie d'une décharge transmise sous

forme de chaleur au substrat. Ces deux valeurs s'obtiendraient expérimentalement, en comparant les résultats à ceux de la simulation.

La fréquence de décharges efficaces est donc :

$$f_e = f_s EDR \quad (1.4)$$

La condition de retrait de matière utilisée par (Kang *et al.*, 2021) est une température de 600°C. Ceci correspond au cas de (D. Abou Ziki *et al.*, 2015) où il n'y a pas écoulement libre d'électrolyte à la zone d'usinage et donc que la température locale atteint le point de fusion du sel électrolyte.

On peut critiquer cette méthode car la valeur de l'EDR est ajustée jusqu'à arriver à une profondeur d'usinage en simulation concordant avec les résultats expérimentaux. C'est ainsi qu'un EDR de 10.1% a été obtenu. Cette méthode emmène des problèmes de validation : la simulation pourrait être erronée et une fausse valeur de EDR pourrait mener à des résultats concordants. Une méthode alternative d'estimation du EDR pourrait servir à valider la simulation et donner de la crédibilité à la valeur obtenue.

1.5.3 Paramètres d'usinage SACE

Le procédé SACE est influencé par une multitude de paramètres de nature mécanique, thermique, chimique et électrique. Cette section discute des paramètres clés du SACE. La figure 1.14 présente certains paramètres importants. Les caractéristiques de l'électrode-outil, dont sa conductivité électrique et son état de surface, influencent la formation du film gazeux. Les caractéristiques de la pièce (matériau, épaisseur) vont également influencer les paramètres d'usinage. Le type d'électrolyte et sa concentration, en plus d'influencer les décharges, joue un rôle dans l'écoulement autour de l'outil. La tension affecte la quantité et l'intensité des décharges ainsi que la formation du film gazeux. Bref, des dizaines de paramètres ont une influence sur la performance du procédé SACE. Cette section tente de présenter les plus importants d'entre eux.

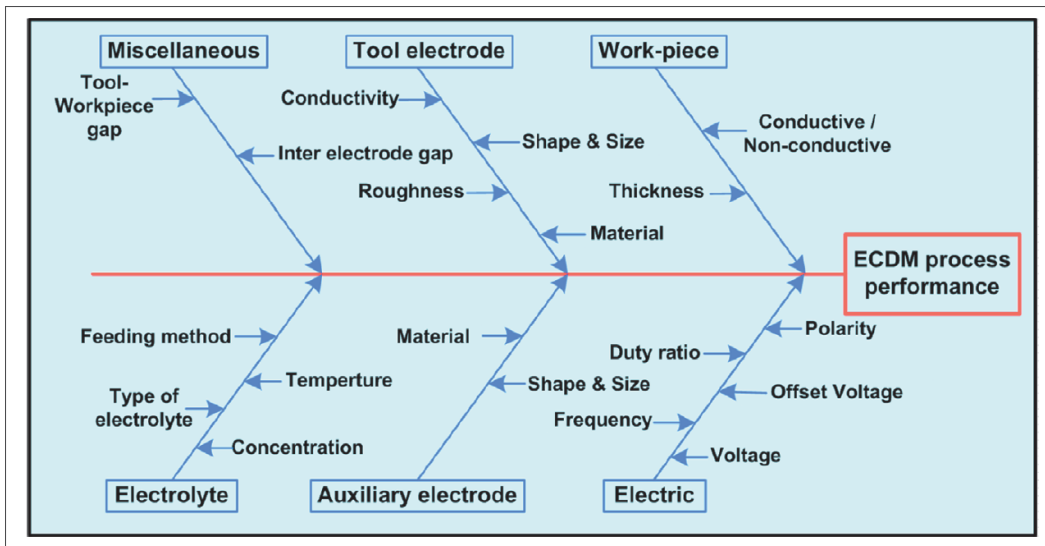


Figure 1.14 Schéma de cause-à-effet du procédé SACE
Tiré de Singh & Dvivedi (2016)

1.5.3.1 Distance outil-pièce

La distance entre l'outil et la pièce à usiner, appelée « machining gap, » ou « working gap, » a une grande influence sur la performance du SACE. À une distance trop élevée, généralement aux alentours de 25 μm , les décharges n'ont aucun effet sur le verre. Bien que la littérature concorde sur la présence d'un effet important de ce paramètre, les valeurs optimales ne font pas l'objet d'un consensus.

1.5.3.2 Taux d'enlèvement de matière et vitesse d'avance

Le taux d'enlèvement de matière du procédé est principalement déterminé par l'écoulement de l'électrolyte dans la zone d'usinage et par la transmission de chaleur entre l'électrode et le substrat. Dans le cas du fraisage, l'hypothèse peut être faite que l'écoulement d'électrolyte est suffisamment bon pour ne pas limiter le procédé. Le facteur clé influençant la vitesse d'avance en découpe est donc la transmission de chaleur (Hof & Wüthrich, 2018).

La température critique T_m est définie comme la température minimale à laquelle il y a enlèvement de matière. Le taux d'enlèvement de matière est uniquement dépendant du taux de propagation de l'isotherme $T = T_m$. Ce taux de propagation, noté $\dot{h}$, régit la vitesse d'avance F et la profondeur de coupe p maximales pour un diamètre d donné selon l'équation 1.5. L'équation 1.6 exprime $\dot{h}$ pour une source de chaleur circulaire. Le paramètre a est la diffusivité thermique du substrat. κ est un nombre adimensionnel déterminé empiriquement dépendant de la tension : $\kappa = 0.018 \cdot U + 0.615$.

$$F \cdot p_{max} = d \cdot \dot{h} \quad (1.5)$$

$$\dot{h} = \frac{4a}{d} \frac{\kappa - 1}{\kappa} \left[1 - \exp \left(-\pi \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right)^2 \right) \right] \quad (1.6)$$

À l'aide des équations 1.5 et 1.6, on peut obtenir le taux d'enlèvement de matière $F \cdot p$. Celui-ci est indépendant du diamètre de l'outil :

$$F \cdot p_{max} = 4a \frac{\kappa - 1}{\kappa} \left[1 - \exp \left(-\pi \left(\frac{\kappa - 1}{\kappa} \right)^2 \right) \right] \quad (1.7)$$

Cette approximation est valide tant que l'outil peut être considéré comme une source de chaleur circulaire. Pour un diamètre d'outil plus grand que 100 μm , la source de chaleur doit être approximée en tant qu'anneau. L'efficacité de l'outil à transmettre la chaleur diminue rapidement avec une augmentation du diamètre au-delà de 100 μm , ce qui diminue la vitesse d'avance et la profondeur possibles ; les taux d'enlèvement de matière sont inférieurs d'un facteur de 3 à 4 (Hof, 2018). La figure 1.15 présente les deux modèles de source de chaleur.

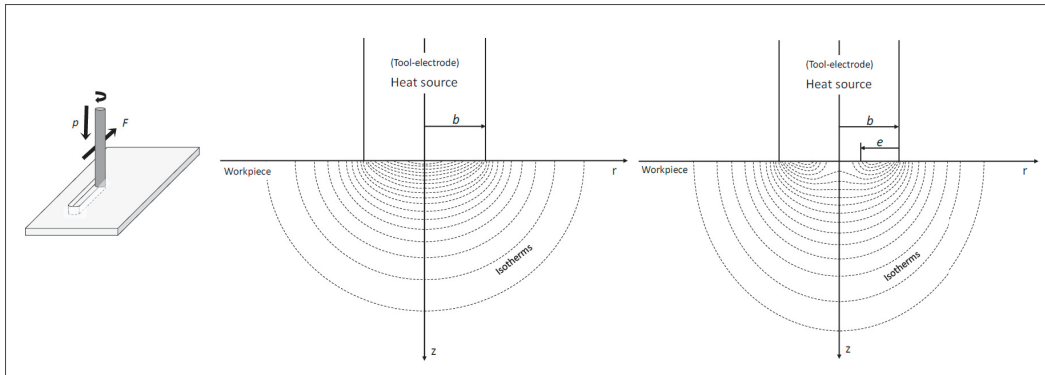


Figure 1.15 Modèles des sources de chaleur : disque et anneau
Tiré de Hof & Wüthrich (2018)

1.5.3.3 Paramètres du perçage de trous

Dans le cas du perçage de trous, la profondeur du trou a une grande influence sur la vitesse d'avance pouvant être atteinte. En effet, un écoulement suffisant de l'électrolyte n'est pas garanti, contrairement à pour une découpe. Plus le trou est profond, plus l'écoulement est restreint et donc moins la vitesse d'usinage peut être élevée. La figure 1.16 montre la force de réaction verticale lors du perçage de trous. Lorsque cette force augmente brusquement, cela signifie que la vitesse d'avance de l'outil est plus rapide que le taux d'enlèvement de matière et l'outil entre en contact avec le substrat. La profondeur correspondant à un certain taux d'enlèvement de matière est donc égale à la profondeur où la force de réaction augmente brusquement (Abou Ziki, 2014).

La température locale du verre a également une influence sur le perçage. Les pics de force en début de perçage à la figure 1.16 sont dûs à un taux d'enlèvement de matière plus lent en raison d'une basse température locale du substrat. Le taux d'enlèvement de matière se rétablit ensuite alors que la température locale augmente (Abou Ziki, 2014). On définit t_0 , le temps typique nécessaire pour chauffer adéquatement la surface du verre avec l'usinage (Abou Ziki & Wüthrich, 2013) :

$$t_0 = \frac{\kappa^2 r^2}{4\pi a(\kappa - 1)^2} \quad (1.8)$$

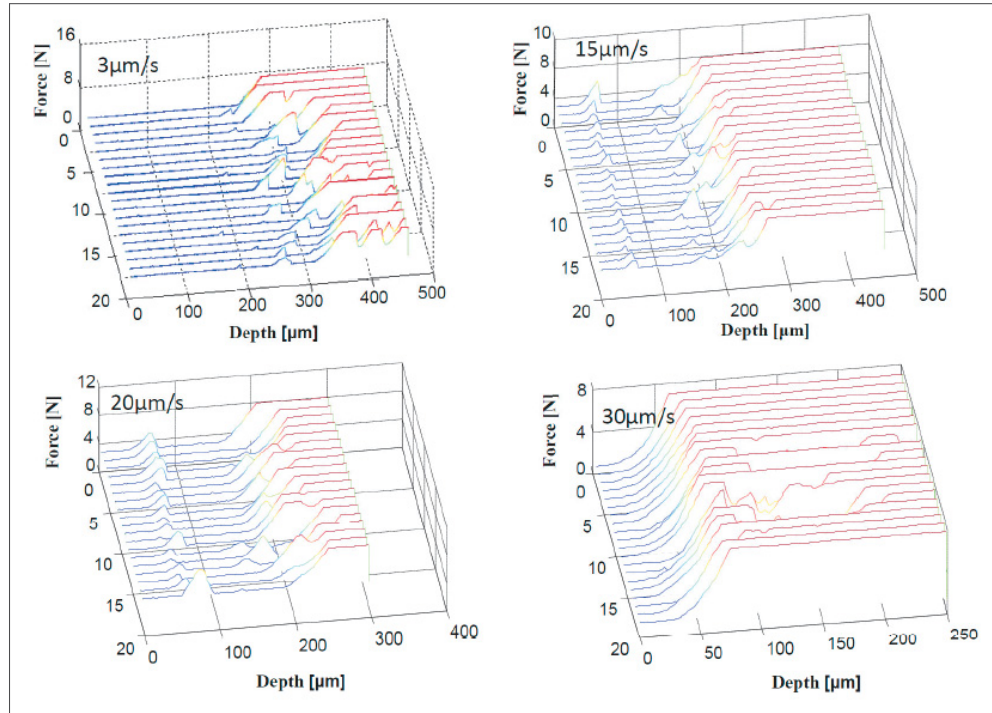


Figure 1.16 Force de réaction pour différentes profondeurs de trou et vitesses d'avance, tension de 33 V et diamètre d'outil de 500 μm
Tiré de Abou Ziki (2014)

L'effet de l'augmentation de la profondeur peut être réduit et des vitesses d'avances significativement plus élevées peuvent être atteintes en effectuant régulièrement des retraits lors du perçage à la manière du dégagement de copeaux en usinage conventionnel, pour permettre à l'électrolyte de se réintroduire dans le trou. Ceci a le désavantage d'induire un refroidissement de la surface en introduisant de l'électrolyte à température ambiante. Un équilibre doit être atteint en effectuant des retraits à une fréquence adéquate (Abou Ziki & Wüthrich, 2013).

1.5.3.4 Tension

Selon l'équation 1.7, le taux d'enlèvement de matière augmente avec la tension. À l'inverse, la qualité de surface diminue avec une augmentation de la tension (Hof & Wüthrich, 2018). Il y a donc place à l'optimisation de la tension à appliquer de façon à obtenir des valeurs acceptables de rugosité et de vitesse de coupe.

L'application d'une tension pulsée rectangulaire plutôt que constante offre plusieurs avantages. Premièrement, il en résulte un refroidissement du substrat lors des périodes sans tension, réduisant la zone affectée thermiquement (ZAT) et l'apparition de fissures. De plus, un état de surface plus lisse peut être obtenu, quoique le taux d'usinage sera diminué. Une augmentation de la fréquence réduit le taux d'usinage et améliore l'état de surface (Dae-Jin, Yoomin, Seoung-Hwan & Yong-Kweon, 2006).

Les tensions utilisées en SACE varient de 18V, dans le cas de passes de finition (Singh & Dvivedi, 2021), à 100 V pour des matériaux plus résistants à l'attaque chimique comme le Zircon (Manoharan, Tamilperuvalathan, Natarajan & Ponnusamy, 2022). Une valeur commune dans la littérature est 33 V (Abou Ziki & Wüthrich, 2013).

1.5.3.5 Caractéristiques de l'électrode-outil

Le diamètre d'outil optimal pour le procédé SACE est de 100 μm ; les diamètres plus grands font en sorte que la source du transfert de chaleur ne peut plus être considérée comme un disque mais plutôt un anneau, et les approximations de la section 1.5.3 ne sont plus valides. Les diamètres inférieurs ne permettent pas non plus d'augmenter la vitesse d'avance (Singh & Dvivedi, 2021). La figure 1.15 montre les deux modèles de transmission de chaleur.

Le matériau de l'électrode-outil a une influence sur le taux d'enlèvement de matière ; (Rashedul *et al.*, 2021) ont démontré, pour une pièce usinée en acier inoxydable 304, que la conductivité électrique est fortement positivement corrélée au taux d'enlèvement de matière.

1.5.4 Approches d'usinage

Cette section décrit les méthodes actuelles utilisées en SACE, et qui serviront de point de départ pour les recherches futures. Le procédé d'usinage SACE est encore peu développé, ce pourquoi peu d'approches bien définies existent. Les avancées faites à ce jour seront présentées.

1.5.4.1 Méthodes d'avance de perçage

La vitesse d'avance lors du perçage SACE peut être contrôlée en deux méthodes ayant chacune ses avantages et inconvénients : la descente par gravité ou à vitesse constante (Abou Ziki & Wüthrich, 2021). Les deux approches sont schématisées à la figure 1.17.f La première est une descente à vitesse constante ; l'outil est simplement déplacé vers le bas à vitesse constante. Si la vitesse d'avance est moins rapide que le taux d'enlèvement de matière, une distance pièce-outil (« machining gap » ou « working gap », Wg) se crée et se maintient. Cet espace facilite un écoulement d'électrolyte dans la zone à usiner, et ainsi accélère l'usinage. Si la vitesse d'avance dépasse le taux d'enlèvement de matière, l'outil entre en contact avec la pièce ; l'usinage a alors les propriétés de la seconde méthode, la descente par gravité (Wüthrich, Spaelter, Wu & Bleuler, 2006). Pour cette méthode, une force constante vers le bas est appliquée sur l'outil pour le maintenir en contact avec la surface à usiner. L'écoulement de solution est plus restreint, mais le contact direct avec l'outil augmente la température locale du verre, accélérant l'usinage.

Un algorithme de contrôle peut être appliqué pour les deux approches, tel que décrit à la section 1.5.4.2.

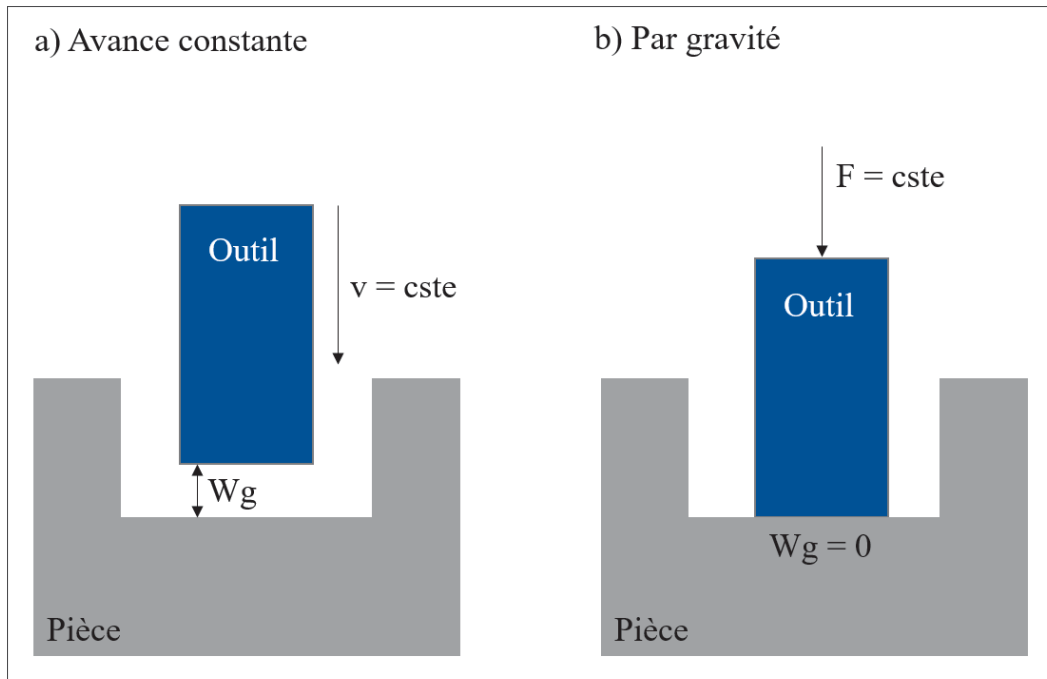


Figure 1.17 Méthodes d'avance lors du perçage SACE

1.5.4.2 Méthodes de palpage et rétroaction

En usinage conventionnel, il est essentiel d'avoir une méthode pour déterminer la position de l'outil par rapport à la pièce à usiner. Ceci s'applique également à l'usinage SACE, quoique avec certaines différences ; les stratégies conventionnelles ne s'appliquent pas nécessairement.

En usinage CNC conventionnel, le palpage s'effectue généralement avec un outil conçu expressément à cette fin, qui est installé au lieu de l'outil coupant. Des palpeurs suffisamment précis ($\pm 0,25 \mu\text{m}$) existent sur le marché (Marposs, 2022) ; il serait donc en principe possible d'appliquer une telle solution au SACE. Par contre, un désavantage apparent est la nécessité de retirer et réinstaller l'outil à chaque opération de palpage ; dans l'environnement corrosif de la solution électrolyte, ceci emmènerait des complexités non-triviales : comment isoler le porte-outil de la solution avec les fréquents changements palpeur-outil ?

Une solution simple pour mesurer la surface à usiner a récemment été proposée (Sambathkumar & Arunagirinathan, 2022) et est illustrée à la figure 1.18. Une jauge d'épaisseur métallique est fixée sur la pièce de verre. Ensuite, la continuité électrique entre l'outil et la jauge est mesurée alors que l'outil est abaissé vers la jauge. On obtient la position de référence au moment que le contact électrique est mesuré (en compensant l'épaisseur de la jauge). Cette méthode est très peu coûteuse à implémenter, et est autant précise que les axes de déplacement et l'épaisseur de la jauge le permettent. Elle requiert cependant des opérations manuelles pour positionner la jauge sur la pièce. De plus, si un palpé doit être accompli alors que la pièce est mouillée de solution électrolytique, la cellule d'usinage au complet doit être nettoyée, sans quoi l'environnement corrosif endommagera la jauge. Ceci peut être acceptable dans certains cas, mais les délais de nettoyage seraient substantiels.

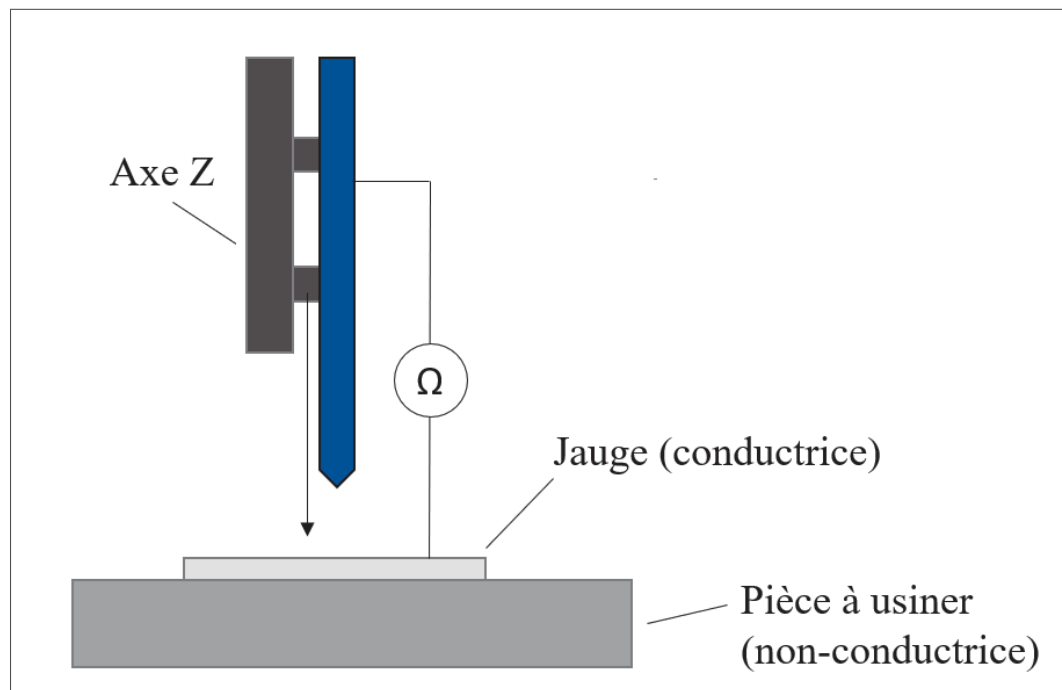


Figure 1.18 Méthode de palpé par conduction

La méthode de palpé et rétroaction la plus avancée est appliquée en permettant à l'outil de se déplacer verticalement indépendamment de l'actuateur linéaire en Z (Abou Ziki & Wüthrich, 2013). Ce déplacement, restreint par des ressorts et mesuré par un capteur suffisamment précis

(optique dans le cas à l'étude), permet de palper la pièce directement avec l'outil, évitant la gestion d'un système séparé de palpation. Un actuateur à bobine assure la stabilité de l'outil lors de l'usinage. Ce même système permet d'obtenir une rétroaction durant l'usinage sur l'enlèvement de matière. En effet, lors d'un perçage SACE, l'outil ne devrait idéalement jamais appliquer une grande force sur la pièce. Si une force excédant un seuil prédéfini est détecté par le capteur de déplacement, la vitesse d'avance peut être temporairement ralentie, ou l'outil peut être rétracté et replongé afin de permettre l'évacuation des produits d'usinage. Un algorithme appliquant cette méthode a été utilisé avec succès lors d'un perçage avec avance par gravité pour améliorer la vitesse de perçage (Abou Ziki & Wüthrich, 2021). Cette méthode ajoute cependant un grand niveau de complexité au système et donc des coûts élevés.

1.5.4.3 Parcours d'outil

Lors du SACE, l'ordre dans lequel la matière est enlevée a un grand impact sur de nombreux paramètres ; l'écoulement d'électrolyte, la densité des décharges et le refroidissement en sont quelques exemples. Cette section explore différentes stratégies de parcours d'outil présentes dans la littérature.

Il a été déterminé qu'en augmentant la tension appliquée ou le facteur de charge, le taux d'enlèvement de matière augmente au détriment de la qualité de surface. Une technique proposée est d'effectuer une première passe «ébauche» suivie d'une passe de «finition». La passe de finition s'effectue avec une tension et une vitesse d'avance réduites ainsi qu'une vitesse de rotation plus élevée. Cette approche permet d'effectuer la première coupe à des tensions plus élevées que pour l'usinage en une seule passe, augmentant à la fois la vitesse du procédé et la qualité de surface résultante. La figure 1.19 illustre la stratégie.

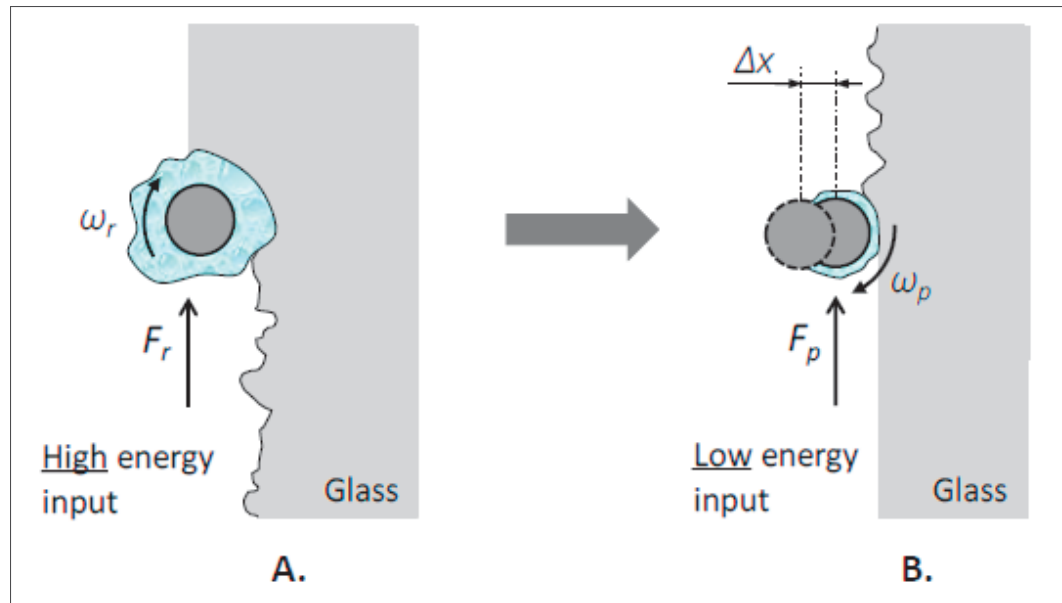


Figure 1.19 Schématisation d'une stratégie multi-passes
Tiré de Hof & Wüthrich (2018)

(Hof & Wuthrich, 2021) ont fait des essais en faisant varier divers paramètres de coupe. La coupe initiale a été faite avec une tension pulsée 38V :15V à intervalles 2.5ms :0.1ms, résultant en une surface brute de mauvaise qualité. Les passes de polissage optimales ont été faites avec $\Delta x = 2\mu m$, une vitesse de 5 mm/min et une tension de 23 V, sans modifier la fréquence. La figure 1.20 montre l'état de la surface coupée selon le nombre de passes accomplies. La surface a le meilleur état pour un usinage à 10 passes (Hof & Wuthrich, 2021); les passes successives n'améliorent pas l'état de surface, et même le détériorent.

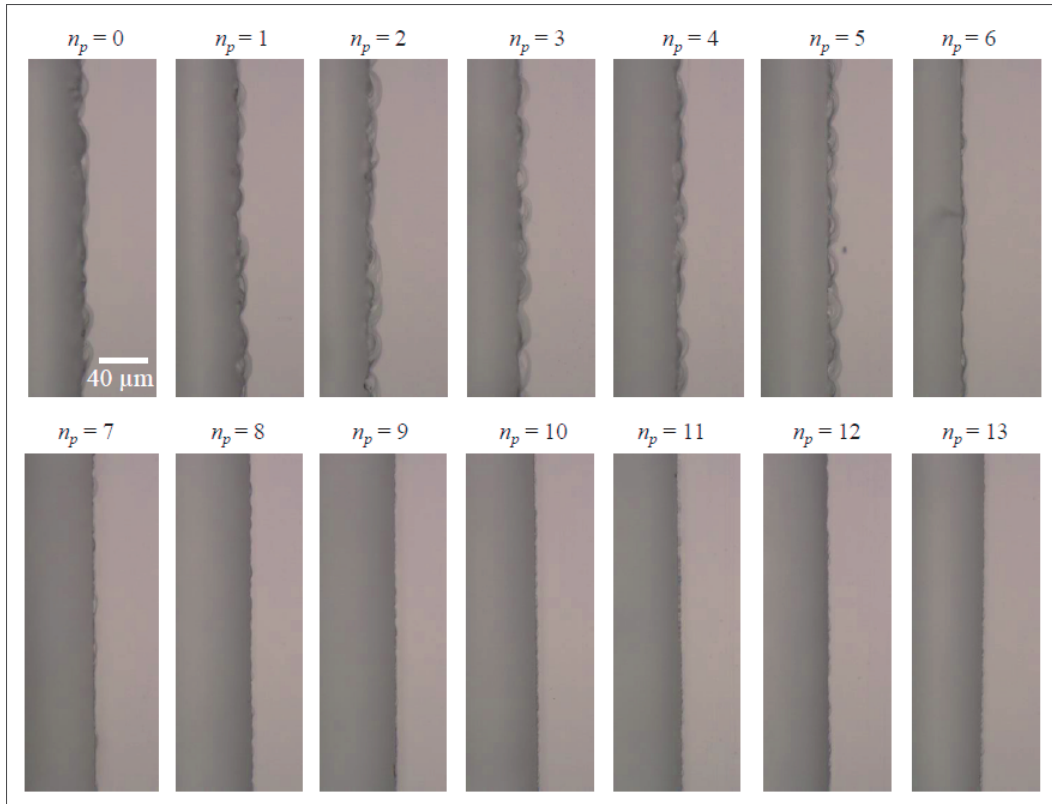


Figure 1.20 État de surface selon le nombre de passes de finition
Tiré de Hof & Wüthrich (2018)

Il a été démontré que le perçage par SACE est limité en profondeur par la restriction de l'écoulement de l'électrolyte au fond du trou. Une solution à ceci est d'effectuer régulièrement des retraits lors du perçage, mais ceci a un impact négatif sur la productivité. Une solution alternative est de donner une trajectoire hélicoïdale à l'outil. Ainsi, l'électrolyte peut s'écouler autour de l'outil sans nécessiter de retrait. Naturellement, le diamètre minimal d'un trou augmente à une valeur plus grande que le diamètre de l'outil. Cette technique a été utilisée dans le cadre de recherches non-publiées et programmée pour utilisation dans des opérations SACE (Wüthrich & Hof, 2018).

1.5.5 Avenues de recherche

Cette section explore certains aspects du procédé SACE dont la compréhension n'est pas complète. Ceux-ci pourront servir de point de départ à des recherches futures.

1.5.5.1 Amélioration de la répétabilité du procédé

On a vu que les recherches actuelles tentent de faire passer le SACE d'un procédé académique à un procédé industriel. Dans ce but, il est nécessaire d'améliorer sa répétabilité pour le rendre viable. (Hof & Wüthrich, 2018) ont fait des pas dans cette direction en obtenant des états de surface adéquats. Il est aussi nécessaire de mieux comprendre le mécanisme d'usinage, qui est encore nébuleux (D. Abou Ziki *et al.*, 2015). En général, l'obtention de plus de données expérimentales sera un atout simplement pour établir et renforcer des relations entre les paramètres d'usinage.

1.5.5.2 Expansion des stratégies d'usinage

Les stratégies d'usinage SACE actuelles sont actuellement peu développées, et aucune théorie unificatrice n'existe comme il est le cas pour l'usinage conventionnel par outil coupant, par exemple. Il y a certainement une occasion d'étendre le savoir en ce sens. La génération des parcours d'outil (angles de plongée, entrées, sorties) ne sont pas très bien définies en SACE.

1.5.5.3 Signaux de rétroaction

Un enjeu important en SACE est le manque d'informations pouvant être obtenues en temps réel sur l'état de l'usinage. La rétroaction par force amène des éléments de solution, mais n'offre une solution de rétroaction qu'en direction axiale. De plus, l'épaisseur du film gazeux et donc l'enlèvement de matière autour de l'outil n'est pas mesuré.

Le courant électrique passant par l'électrode-outil peut être mesuré et certaines informations peuvent en être déduites. (Wüthrich, Spaelter & Bleuler, 2006) ont démontré que l'aspect du signal de courant indique très bien la présence ou l'absence du film gazeux. Étant donné

que l'enlèvement de matière se produit uniquement lorsque le film gazeux est présent, une information binaire sur si l'usinage a bien lieu est ainsi obtenue. Cependant, aucune relation quantitative n'a pu être déterminée entre le courant mesuré et le taux d'enlèvement de matière. Une telle relation pourrait faciliter l'amélioration de la répétabilité du procédé en offrant une rétroaction non-mécanique.

(Abou Ziki & Wüthrich, 2013) ont trouvé que lorsqu'une force est appliquée sur l'outil lors d'un perçage SACE (indiquant que la vitesse d'usinage est plus lente que la vitesse d'avance et l'outil est en contact avec le verre), le courant moyen augmente d'environ 20 mA. Ceci peut être attribué à l'interaction du verre avec le film gazeux, ce dernier étant poussé vers le haut et créant un pont d'électrolyte direct entre l'outil et la masse de solution. Encore ici, une information binaire peut être obtenue mais pas une relation numérique.

1.5.5.4 Application à d'autres matériaux

Une avenue de recherche potentielle est l'application de ce procédé à d'autres matériaux difficiles à usiner.

Le saphir a plusieurs applications intéressantes en raison de ses excellentes propriétés dont certaines intéressantes sont présentées au tableau 1.4.

Tableau 1.4 Quelques propriétés du saphir
Tiré de Roditi (2022)

Résistance en traction (MPa)	275 à 400
Module d'Young (GPa)	345
Ténacité à la rupture (MPa m ^{1/2})	2
Dureté (Knoop)	1525 à 2000
Conductivité thermique (W/(mK))	46.0
Température de fusion (° C)	2053
Coefficient de dilatation thermique (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	5.8
Bande transparente (nm)	150 à 6000

(Ho & Chen, 2020) Ont percé par SACE des spécimens de saphir. Un jet d'air coaxial à une pression de 0,2 kPa permet de réguler le niveau d'électrolyte. Le tableau 1.5 présente les paramètres de base utilisés. Une électrode en carbure de tungstène et l'électrolyte KOH (5 mol/L) ont été utilisés.

Tableau 1.5 Paramètres utilisés pour le perçage du saphir
Tiré de Ho & Chen (2020)

Tension de l'outil (V)	50-55
Profondeur de l'électrolyte (mm)	1
Pression du jet d'air (kPa)	0.2
Rotation de l'outil (rpm)	3002
Force de perçage (kgf)	0.15

Des trous d'une profondeur de 193 µm ont été percés en 90 s. Le taux d'enlèvement de matière maximal obtenu est de 0,014 mm³/min.

Un résultat principal obtenu dans cette étude est la relation entre tension et profondeur du trou pour une durée donnée. La tension optimale semble être 53 V. L'énergie d'usinage est insuffisante

sous cette valeur, alors que pour les tensions supérieures, l'électrode subit une usure rapide, engendrant une surface trop irrégulière et donc des vitesses d'enlèvement de matière plus faibles.

Le carbure de Silicium est un matériau céramique ayant de nombreuses applications en industrie. Entre autres, sa haute température de sublimation, sa dureté et sa faible réactivité le rendent bien adapté à des applications dans des conditions difficiles telles que des composants de moteurs à réaction, de traitement de produits corrosifs et d'électronique en milieux agressifs (Wright & Horsfall, 2007). En tant que semiconducteur avec de hautes rigidité diélectrique et vitesse de saturation, il est très bien adapté à l'électronique haute-puissance et haute-fréquence (Langpoklakpam *et al.*, 2022).

Présentement, l'usinage du SiC à l'échelle des quelques micromètres présente de nombreux défis. Ses propriétés le rendant très attrayant (dureté, ténacité) le rendent aussi très difficile à usiner (Pawar, Ballav & Kumar, 2017). Les méthodes purement mécaniques, généralement à l'aide d'un outil à pointe de diamant, ont de très lents taux d'enlèvement de matière et de hauts taux d'usure d'outil, en plus d'être très susceptibles à la fissuration (Goel, 2014).

Une méthodes hybride a été utilisée en recherche pour usiner le SiC et semble prometteuse. L'outil sert à la fois de fraiseuse et d'électrode. Le principal mécanisme d'action serait ici l'attaque thermique par les décharges électriques, le fraisage servant à polir la surface affaiblie par les décharges (Ji *et al.*, 2013). La similarité du procédé au SACE ouvre la porte à des recherches futures sur l'applicabilité du SACE au SiC.

1.6 Conclusion

Cette revue de littérature a servi à mieux comprendre les procédés de micro-fabrication de systèmes en verre, et le rôle que pourrait y jouer le procédé SACE. En plus de la compréhension des mécanismes derrière le SACE et des paramètres en jeu, l'état de l'art de ce procédé a été revu et des conclusions en ont été tirées. Les principaux points retenus sont :

- Les procédés actuels de micro-fabrication du verre sont complexes et ne sont économiques qu'en fabrication en très grandes séries
- Le SACE est adapté à une production en petite série ;
- Les éléments limitant l'adoption du SACE par l'industrie sont les coûts élevés et le manque de répétabilité ;
- Le manque de répétabilité du SACE provient d'une compréhension encore incomplète des mécanismes entourant le procédé.

On peut définir une problématique de recherche découlant de ces points. Le SACE pourrait être adopté comme méthode de fabrication en petite série pour le verre si certains éléments étaient améliorés. À la base du problème se trouve le manque de contrôle que nous avons sur le procédé ; une partie de la solution serait d'augmenter la quantité et la qualité de l'information disponible lors de l'usinage afin de pouvoir apporter des correctifs en temps réel. Autrement dit, il faudrait un nouveau signal de rétroaction.

Le courant électrique passant par le circuit SACE a fait l'objet de quelques études, mais n'a jamais été utilisé avec succès comme méthode de rétroaction. Il pourrait y avoir un potentiel de recherche dans cette direction ; le projet de recherche sera défini selon cette hypothèse.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Objectifs

Ce chapitre servira à définir le projet de recherche. À la lumière de la revue de littérature, on sait que le procédé SACE présente un potentiel dans l'industrie s'il peut être mieux développé et ses limitations palliées. Notamment, l'obtention d'un signal de rétroaction en temps réel permettrait un meilleur contrôle du procédé et ainsi une meilleure répétabilité de l'usinage. De plus, sachant que les coûts sont un facteur important limitant le SACE, le développement d'une machine à faible coût pourrait faciliter l'intégration du SACE à l'industrie. On arrive ainsi à la question de recherche suivante :

Quels signaux de rétroaction peuvent améliorer le contrôle sur le procédé SACE ?

À la section 1.5.5.3, le signal de courant électrique a brièvement été examiné comme potentielle source de rétroaction. Très peu de recherche a été faite à ce sujet ; il pourrait y avoir un potentiel de développement. Cette méthode aurait le potentiel d'améliorer la répétabilité et réduire les coûts du procédé en offrant un système simple de rétroaction. Ceci mène à l'hypothèse suivante :

Le courant électrique peut être utilisé comme signal de rétroaction lors du procédé SACE, permettant ainsi de réduire le coût du procédé et améliorer sa répétabilité.

Les sous-objectifs à accomplir pour répondre à la question de recherche sont les suivants :

- Développer et tester une plateforme de recherche flexible et peu coûteuse pour le procédé SACE ;
- Obtenir une meilleure compréhension générale du procédé SACE et des performances de la plateforme conçue ;
- Développer une méthode de rétroaction pour le procédé SACE basée sur la mesure du courant.

2.2 Méthodologie

Le projet de recherche sera complété en trois étapes. Au chapitre 3, une plateforme de recherche permettant d'usiner à l'aide du SACE sera conçue et fabriquée. Ensuite, la plateforme sera testée et évaluée. Finalement, au chapitre 4 une nouvelle approche de rétroaction utilisant la mesure du courant électrique sera développée et présentée dans le cadre d'un article scientifique.

La conception de la plateforme de recherche sera faite en deux parties :

- En premier lieu, le système de commande et certains sous-systèmes d'une machine SACE haute-performance seront conçus, en appliquant les techniques d'usinage SACE discutées dans la revue de littérature. Cette étape inclura la conception d'un boîtier de commande et de logiciels en plusieurs langages informatiques. Un générateur de trajectoires splines interpolées sera programmé en C# sur AutoCAD, permettant la programmation rapide de parcours d'outil à partir de géométrie CAO.
- En second lieu, une machine à faible coût sera conçue et fabriquée pour effectuer des essais rapides. Cette étape consistera surtout en la conception mécanique axée sur la facilité de fabrication. La fabrication additive et les pièces standard seront donc priorisées.

La machine à faible coût sera testée et utilisée pour un usinage SACE de base, dans le but de bien comprendre ses caractéristiques et capacités. Ceci permettra de démontrer qu'un usinage SACE à faible coût est possible.

Finalement, cette même machine servira à développer une méthode de rétroaction par mesure du signal de courant. Des opérations SACE de base (palpage, usinage d'une ligne) seront effectuées en mesurant le courant électrique passant par les électrodes, et ce signal sera ensuite analysé.

CHAPITRE 3

CONCEPTION ET FABRICATION D'UNE PLATEFORME DE RECHERCHE SACE

Ce chapitre décrit le développement de deux machines pour usinage SACE. La première a été conçue pour avoir d'excellentes performances et un contrôle actif et flexible. La seconde a été conçue et fabriquée dans l'optique de pouvoir débiter des expériences rapidement et à faible coût.

L'architecture de base des deux machines reste la même. Des actuateurs linéaires déplacent l'outil en trois axes, une tension est appliquée à l'outil et une pompe assure la circulation de l'électrolyte dans la cellule d'usinage. La figure 3.1 présente les éléments de base.

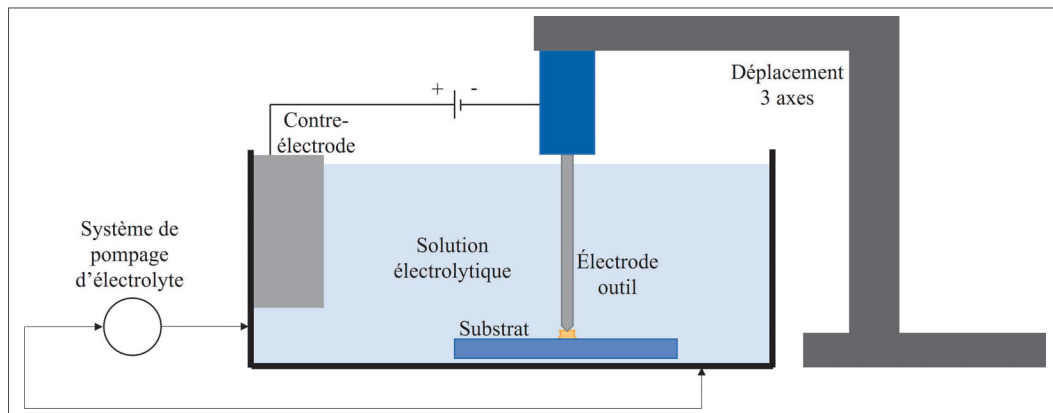


Figure 3.1 Système SACE de base

3.1 Conception électronique et programmation des sous-systèmes d'une machine SACE flexible et de haute précision

3.1.1 Introduction

L'étape initiale du projet a été la conception d'une plateforme de recherche pour le procédé SACE. Le robot cartésien à trois axes haute-précision en question est présenté à la figure 3.2. La conception mécanique de cette machine a été accomplie dans le cadre du projet de stage

à l'ÉTS (Falise, 2020). Les éléments restant à concevoir étaient le système de contrôle des divers sous-systèmes composant la tête d'usinage, ainsi que les fonctions en langage TCL (*Tool Command Language*) permettant la création de programmes d'usinage. Ce chapitre présente brièvement le système mécanique, avant de présenter la conception des sous-systèmes d'usinage SACE. Finalement, les fonctions permettant la création de programmes d'usinage sont montrées.

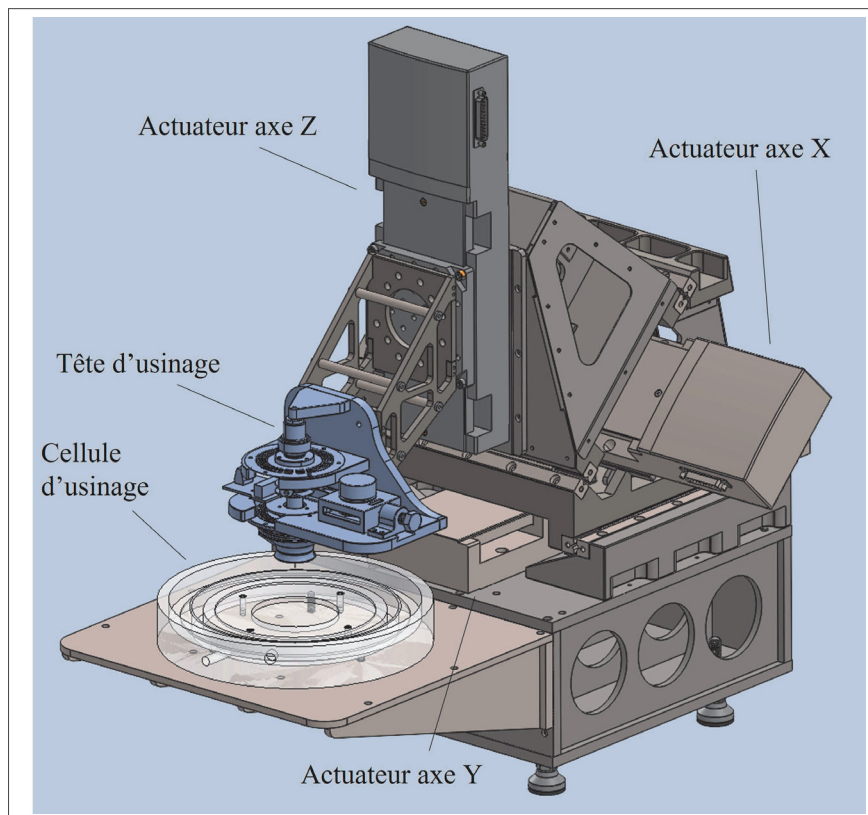


Figure 3.2 Machine SACE haute-précision
Adapté de Falise (2020)

3.1.2 Contrôle

Un contrôleur XPS-D de Newport a été sélectionné pour contrôler les axes et les divers sous-systèmes de la machine. Deux facteurs principaux ont mené à cette décision :

1. La possibilité de contrôler très précisément le déplacement des axes en trois dimensions ;

2. L'interface permettant la programmation de scripts faisant interagir l'exécution de trajectoires et des entrées et sorties système.

Le premier point, la haute précision, est très important en micro-fabrication simplement car l'échelle des pièces fabriquées l'exige. Le second point est nécessaire dans le contexte d'usinage SACE car la nature de l'enlèvement de matière découplé de la position de l'outil exige de pouvoir ajuster en temps réel le parcours d'outil. Par exemple, ayant détecté un contact pièce-outil, il faudrait pouvoir effectuer un retrait et une nouvelle plongée avant de reprendre le parcours d'outil.

Des actuators linéaires ILS150CC (Newport, 2022) assurent le mouvement des axes. Ils ont été sélectionnés en raison de leur compatibilité avec le contrôleur XPS-D et leur bonne performance. Le tableau 3.1 en présente certaines caractéristiques clefs. Notamment, la répétabilité à $\pm 1.0 \mu\text{m}$ permet l'usinage suffisamment répétable de structures à l'échelle de $100 \mu\text{m}$.

Vitesse maximale (mm/s)	100
Déplacement minimal (nm)	1000
Répétabilité (μm)	1
Rétroaction	Encodeur rotatif

Tableau 3.1 Certaines caractéristiques de l'actuateur linéaire ILS-150cc

3.1.3 Sous-systèmes

Les sous-systèmes nécessaires à l'usinage SACE sont présentés dans cette section. Leur contrôle est entièrement automatisé à l'aide des entrées et sorties analogiques et numériques du contrôleur XPS-D. Un boîtier de contrôle comprenant les modules nécessaires a été conçu et assemblé.

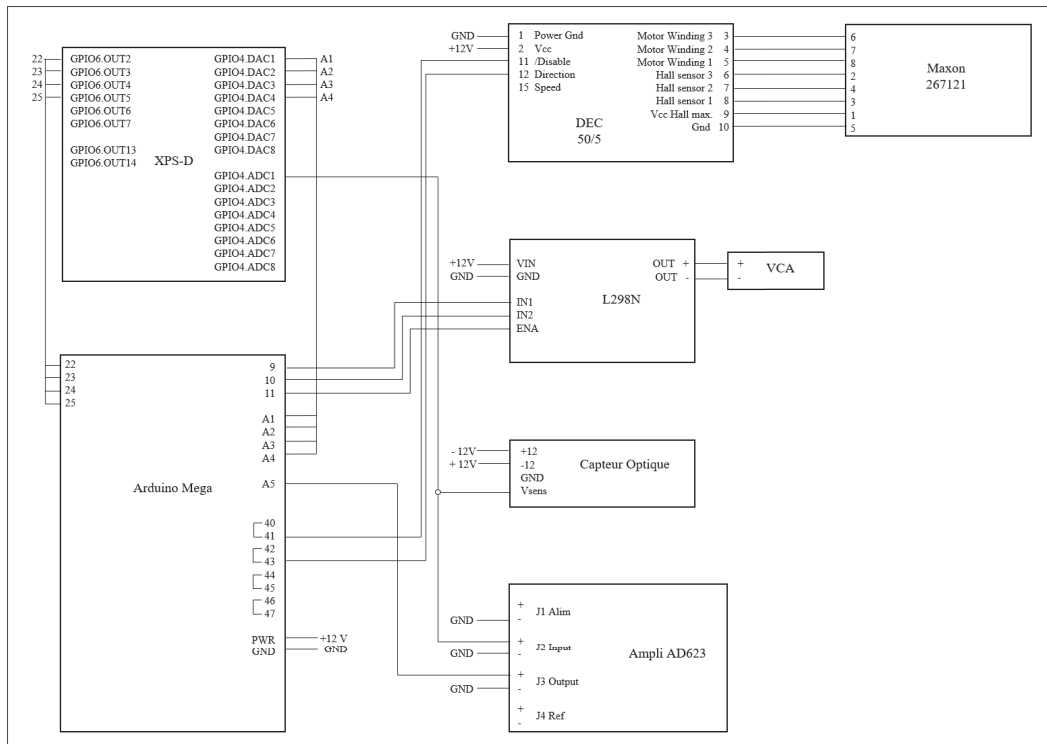


Figure 3.3 Schéma des connexions pour le contrôle de la machine SACE

3.1.3.1 Génération de fonctions de tension

Les fonctions de tension sont générées par un générateur de tension Siglent SDG830 et amplifiées avec un amplificateur AVTech AV-112D-PS-AC03.

3.1.3.2 Pompe à électrolyte

Une pompe péristaltique Masterflex Miniflex MFLA-77920-40 assure l'écoulement de l'électrolyte dans la cellule d'usinage. L'avantage d'une pompe péristaltique est que le seul composant en contact avec la solution corrosive est le tube lui-même, évitant des enjeux de maintenance fréquente. Le désavantage de la constance du courant est éliminé en raison du grand volume de liquide par rapport au flux.

3.1.3.3 Rotation de la broche

La rotation de la broche est assurée par un moteur DC. Afin de réduire la masse devant être déplacée dans l'axe Z auxiliaire, le moteur est lié par une courroie à l'axe de l'outil.

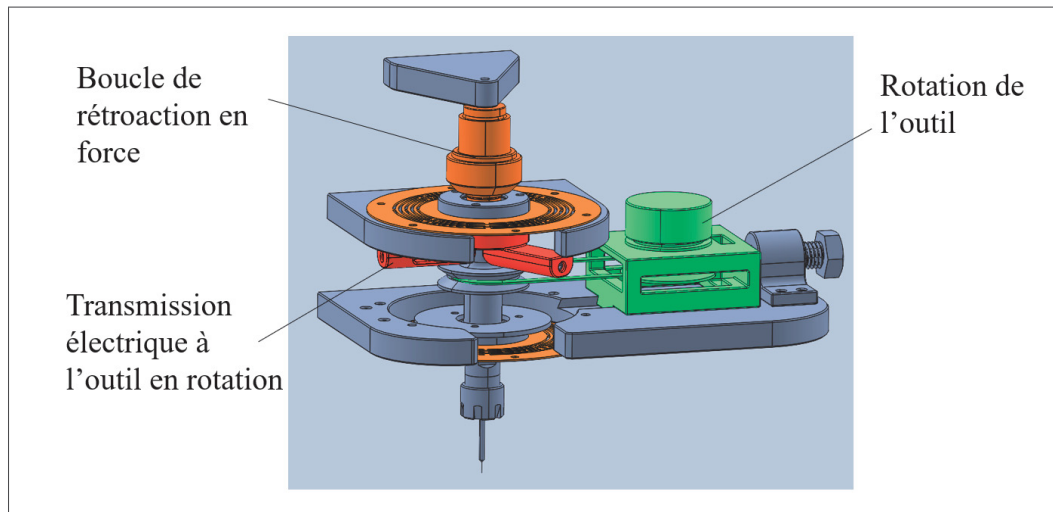


Figure 3.4 Principaux sous-systèmes de la tête d'usinage SACE

3.1.4 Mesure et contrôle de l'axe Z auxiliaire

En plus des trois axes principaux X, Y et Z, l'outil peut se déplacer verticalement (en Z) par rapport à la tête d'usinage ; ce mécanisme a fait l'objet d'un brevet (Wuthrich, Hof, Abou Ziki, Cusanelli & Thibaut, 2016). Ce déplacement dans l'axe Z auxiliaire est restreint par des plaques-ressorts et la commande de force est appliquée avec un actuateur à bobine. La position est mesurée à l'aide d'un capteur optique. Ce système sert à appliquer le palpé et la rétroaction en force telle que discuté à la section 1.5.4.2. Le système est visible à la figure 3.4.

La premier cas d'utilisation de l'axe Z auxiliaire est pour le palpé avec l'outil. L'axe Z principal est déplacé vers le bas à une vitesse constante jusqu'à ce qu'un déplacement de l'axe Z auxiliaire soit détecté ; à ce moment, on utilise la position de l'axe Z principal au moment de la détection d'un déplacement z_d et les lectures au repos et déplacées δ et δ' du capteur de déplacement pour trouver la position z_0 de la surface palpée :

$$z_0 = z_d + (\delta' - \delta) \quad (3.1)$$

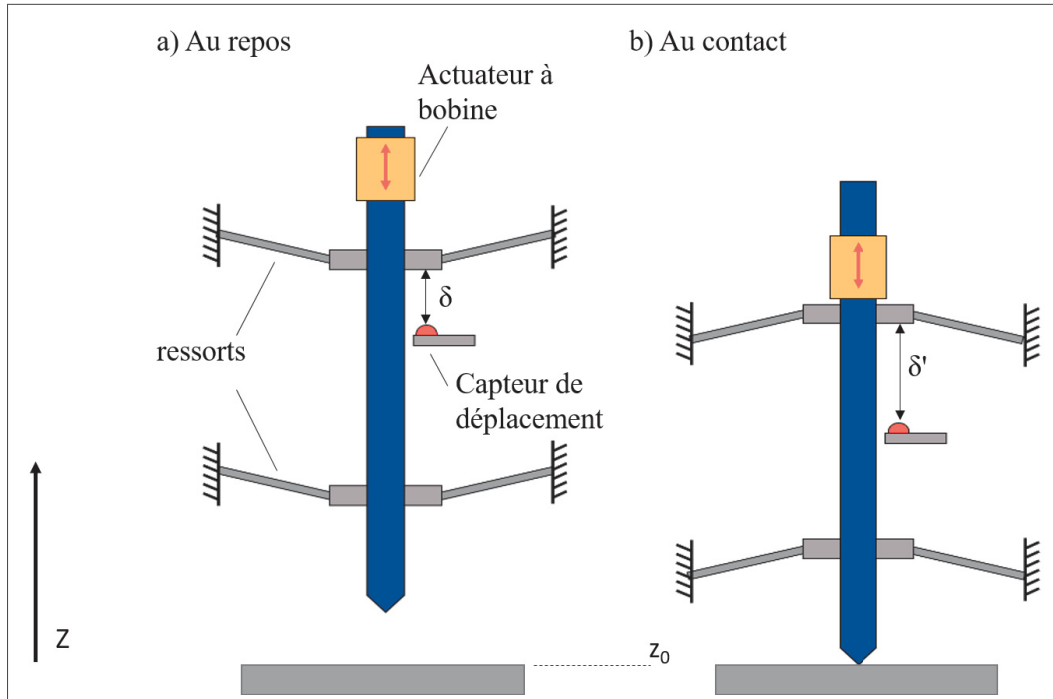


Figure 3.5 Méthode de palpage par détection du déplacement

L'autre utilité de l'axe Z auxiliaire est la détection d'une force verticale sur l'outil lors de l'usinage. Tel que décrit à la section 1.5.4.2, lorsque l'outil fait contact avec la pièce lors d'un perçage à vitesse constante, la force de contact est détectée et une action peut être prise par le système pour corriger la situation. En perçage par gravité, la force est mesurée et la vitesse d'avance corrigée afin de maintenir une force constante de perçage.

Un désavantage du système d'axe Z auxiliaire est que l'outil est flottant ; si aucune compensation n'est appliquée lors de l'usinage, les vibrations provenant de la rotation de l'outil et du déplacement des axes y seront transférées et celui-ci oscillera sous contrainte des ressorts,

rendant l'usinage de précision impossible. Un système de contrôle est donc nécessaire afin de maintenir la position de l'outil dans l'axe Z auxiliaire. La solution utilisée dans la littérature (Wuthrich, 2009) pour stabiliser le mécanisme est une boucle de contrôle actif. Considérons le tableau 3.2, qui donne la dynamique requise pour chaque opération SACE.

Tableau 3.2 Dynamique à imposer à l'outil lors du contrôle actif pour les opérations SACE

Opération SACE	Dynamique de l'outil
Palpage	Libre
Perçage (avance par gravité)	Libre
Perçage (avance constante) ou fraisage	Rigidité maximale

Si l'outil est libre, aucune force n'est appliquée ; il suffit de mesurer le déplacement de l'outil. Si l'on souhaite avoir la rigidité maximale et que l'outil est libre en Z comme il est le cas présentement, il faut maintenir activement la position de l'outil avec une boucle de contrôle. Cependant, nous croyons qu'une solution sans boucle de contrôle existe ; il suffit de constater que l'outil ne subira jamais de force vers le bas qui doive être mesurée. En ajoutant simplement une butée qui maintiendrait l'axe Z auxiliaire au-dessus de sa position d'équilibre, le contrôle pourrait se faire avec une commande binaire : force maximale vers le bas ou bien aucune force.

- Lors du palpation ou du perçage en avance par gravité, aucune force n'est appliquée par l'actuateur et la force verticale due au contact outil-pièce est détectée normalement.
- Lors d'une opération nécessitant une rigidité maximale de l'axe Z auxiliaire, une force maximale vers le bas est appliquée par l'actuateur afin de maintenir l'outil fermement contre la butée. Le maintien actif d'une position n'est pas nécessaire.

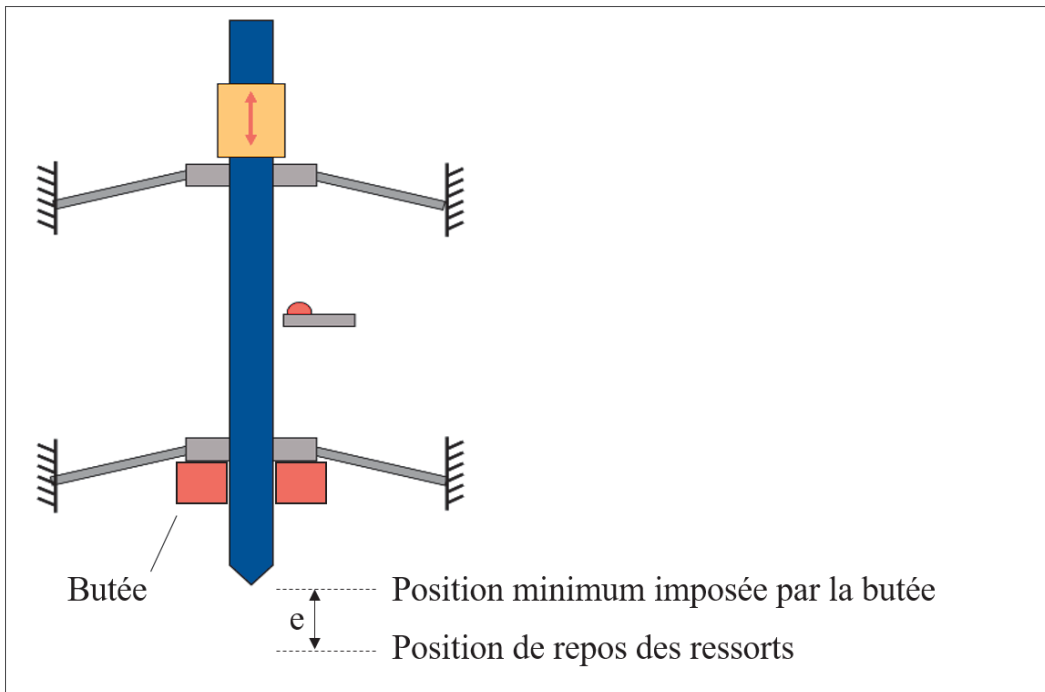


Figure 3.6 Système proposé pour simplifier le contrôle de l'axe Z auxiliaire SACE

3.1.5 Programmation du contrôleur XPS-D en langage TCL

Le contrôleur XPS-D permet le contrôle d'axes linéaires ainsi que la communication avec divers systèmes conçus par l'utilisateur. Une interface de programmation donne une grande liberté dans les algorithmes à implémenter ; l'exécution de trajectoires peut être modifiée en temps réel par des fonctions utilisateur mesurant différentes entrées et sorties. Cela le rend très bien adapté à la conception d'une machine SACE expérimentale, pour laquelle divers paramètres non-traditionnels interagissent avec les commandes de déplacement des axes ; le palpé à l'aide de la boucle de rétroaction en force en est un exemple. Les fonctions principales incluses dans la banque de fonctions incluent :

- Ajustement des paramètres de divers sous-systèmes (pompe, rotation de l'outil, rétroaction en force, ventilation) ;
- Palpé à l'aide du capteur de force de l'outil ;

- Palpage en trois points et création d'un plan interpolé comme nouveau système d'axes ;
- Lecture et exécution de trajectoires splines quelconques avec ajustement pour le nouveau système d'axes ;
- Mouvements rapides avec séparation des mouvements d'axes.

La librairie complète est disponible en dépôt GitHub dont le lien se trouve en annexe.

3.1.6 Programmation d'un Module AutoCAD pour génération des trajectoires d'outil

Contrairement à la majorité des machines à commande numérique, où les instructions de déplacement sont en code G, le contrôleur XPS-D accepte pour les trajectoires 3D uniquement les commandes PVT (Position, Velocity, Time) et sous forme de splines de type Catmull-Rom à vitesse constante. Dans les deux cas, le contrôleur prend en entrée la trajectoire sous forme d'une liste de points de contrôle et y applique une interpolation polynomiale pour commander les axes. Ce second format a été sélectionné pour faciliter la programmation. N'ayant pas trouvé de logiciel capable de fournir ces trajectoires splines à partir de géométrie CAO, il a été nécessaire d'en programmer un. Un module pour le logiciel AutoCAD a été développé. Un article a été soumis à la revue **SoftwareX** (Villeneuve & Hof, 2021) pour donner accès à cet outil à la communauté scientifique utilisant des contrôleurs avec trajectoires splines.

Le module AutoCAD programmé permet de passer rapidement d'une géométrie quelconque à une ou plusieurs trajectoires d'outil sous forme de points de contrôle. La figure 3.7 présente le fonctionnement de base du logiciel. L'utilisateur importe ou dessine la géométrie souhaitée dans le logiciel de CAO AutoCAD auquel le module a été installé. Les courbes pour lesquelles générer un parcours d'outil sont ensuite sélectionnées. Le programme génère ensuite des splines d'interpolation des parcours d'outil sous forme de fichiers texte pouvant être lus par le contrôleur XPS-D.

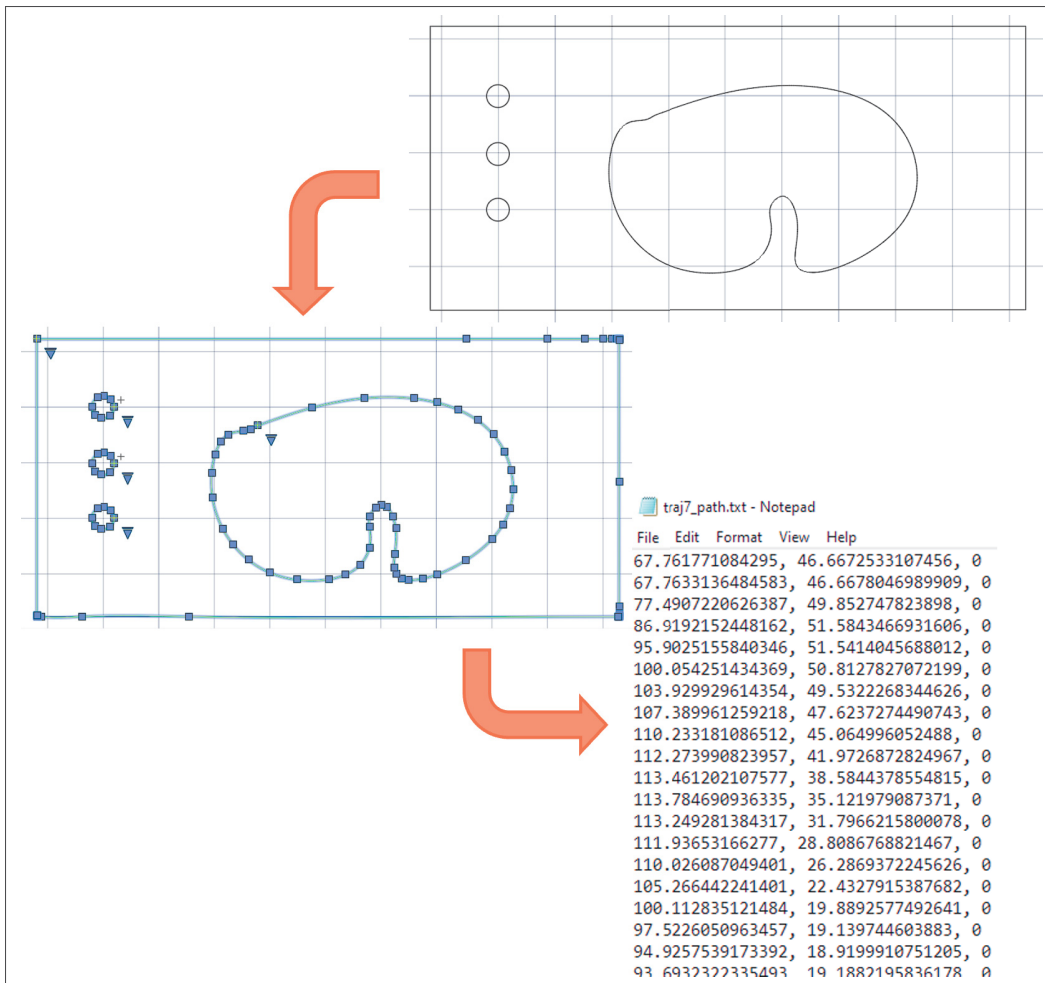


Figure 3.7 Fonctionnement de base du module AutoCAD

3.1.6.1 Les splines Catmull-Rom

Les splines Catmull-Rom (Catmull & Rom, 1973) sont un type de splines cubiques. Leur particularité est le calcul des dérivées aux limites ; ces dernières sont déterminées par les premier et dernier points de contrôle, qui ne sont pas inclus dans la courbe. L'équation 3.2 présente le calcul des points pour une spline Catmull-Rom ; $p(s)$ représente les coordonnées en trois dimensions de la spline interpolée, u est le paramètre de parcours variant de 0 à 1 entre les points de contrôle, et p_i sont les coordonnées des points de contrôle. Le contrôleur XPS-D impose le paramètre $\tau = \frac{1}{2}$.

$$p(s) = \begin{bmatrix} 1 & u & u^2 & u^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\tau & 0 & \tau & 0 \\ 2\tau & \tau - 3 & 3 - 2\tau & -\tau \\ -\tau & 2 - \tau & \tau - 2 & \tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{i-2} \\ p_{i-1} \\ p_i \\ p_{i+1} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

3.1.6.2 Interpolation par spline

Une spline est une fonction définie par un ensemble de points de contrôle, entre lesquels une fonction d'interpolation définit la courbe en fonction des coordonnées des points environnants. Une spline est une fonction polynomiale d'un certain degré; une spline de degré N aura une continuité du même degré N , c'est à dire ses dérivées seront continues jusqu'au degré $N-1$. Lorsqu'on approxime une courbe quelconque (pas nécessairement lisse), une erreur d'approximation résulte. Cette erreur dépend des points de contrôle sélectionnées pour représenter la courbe; généralement, une plus grande densité de points de contrôle résulte en une plus petite erreur d'approximation. La figure 3.8 illustre l'approximation par spline d'une fonction quelconque. Un petit nombre de points a été utilisé pour bine illustrer l'erreur d'approximation.

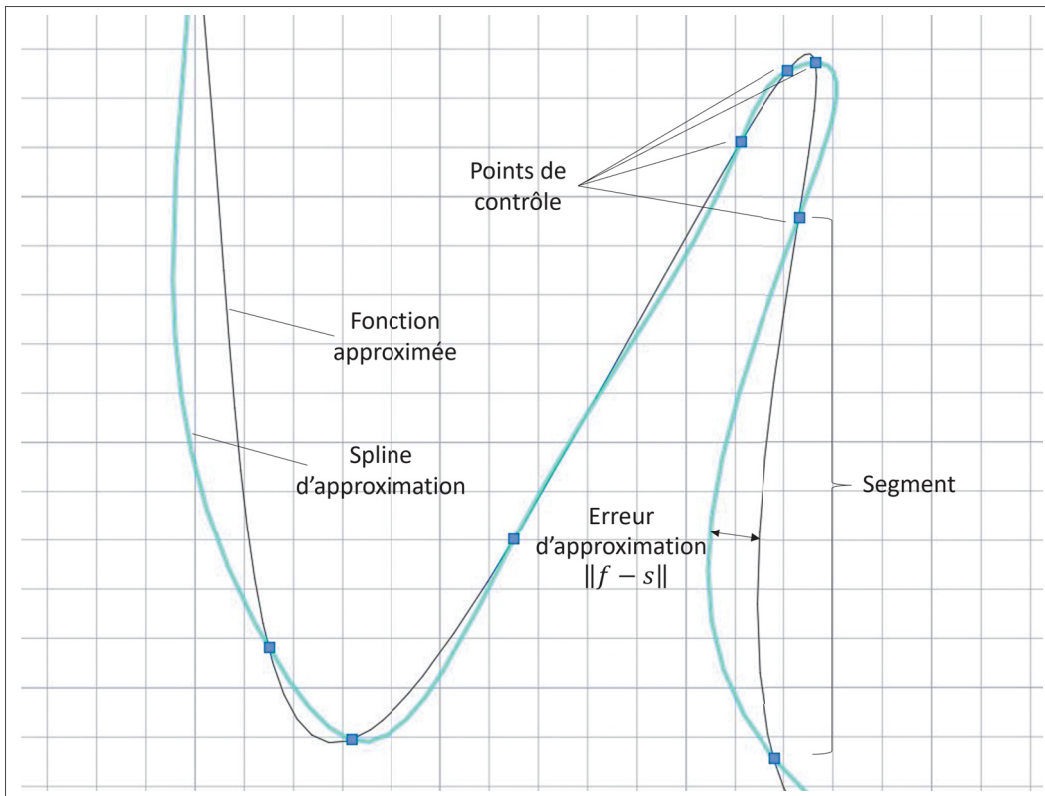


Figure 3.8 Approximation par spline. Une grande tolérance est utilisée afin de mieux illustrer l'erreur.

3.1.6.3 Architecture et programmation

Le langage C# a été sélectionné pour sa facilité d'interface avec les applications telles que AutoCAD avec .NET. La structure du logiciel est composée d'une classe **Liste de trajectoires** contenant chaque objet **Trajectoire** créé par l'utilisateur. Ces objets **Trajectoire** sont liés à l'objet Courbe AutoCAD qui leur est associé et à partir duquel la spline a été générée. La figure 3.9 illustre l'architecture du logiciel. L'objet **Liste de trajectoires** contient les méthodes de création de trajectoires à partir de courbes, appelables par différentes commandes AutoCAD. Ces commandes créent chacune une trajectoire faisant référence à un objet **courbe** existant. Cette trajectoire, dès son initiation, calcule les points de la spline interpolée référençant la courbe AutoCAD.

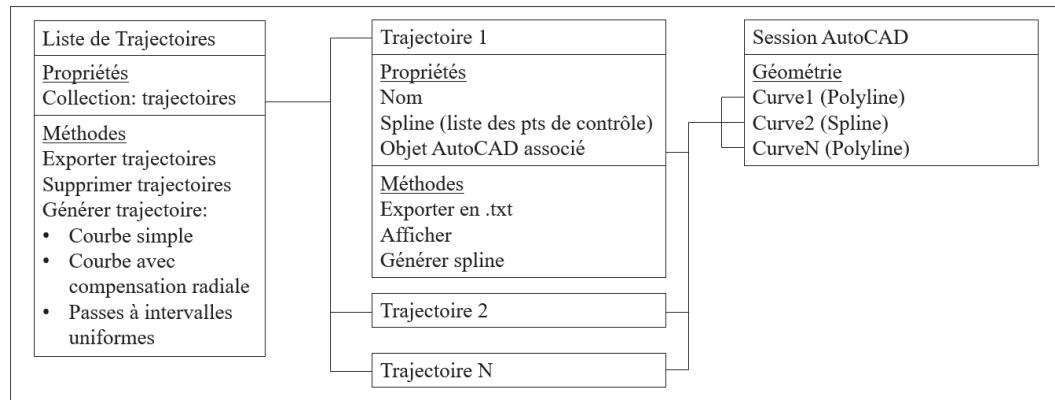


Figure 3.9 Architecture simplifiée du module AutoCAD

L'utilisateur interagit avec le logiciel en utilisant le mot-clé AutoCAD spécifié associé à la commande souhaitée. Il utilise d'abord l'une des différentes commandes permettant de créer une trajectoire à partir d'une courbe, comme **SACECONSTANTOFFSET**, puis sélectionne la géométrie et les paramètres à utiliser. Après avoir créé toutes les trajectoires requises avec les différentes commandes, l'utilisateur exporte ces trajectoires sous forme de fichiers texte contenant les points de contrôle de chaque trajectoire à l'aide de la commande **SACEEXPORT-TRAJECTORIES**. Les trajectoires de la liste peuvent être supprimées avec la commande **SACEDELETELASTTRAJECTORY** ou **SACEDELETEALLTRAJECTORIES**.

Calcul de l'erreur maximale d'un segment

Les splines générées sont dans les limites de l'erreur maximale spécifiée par l'utilisateur avec **SACESETMAXERROR**. L'erreur maximale en fonction de la dérivée seconde maximale et de la longueur de segment peut être calculée (Hall & Meyer, 1976) et l'équation adaptée aux splines cubiques est présentée à l'équation 3.3 ; f étant la courbe approximée, s la spline et l la longueur de segment entre les deux points de contrôle. $\sup\|f - s\|_{seg}$ représente l'erreur maximale d'interpolation sur le segment.

$$\sup\|f - s\|_{seg} = f_{max,seg}^{(2)} \frac{l^2}{24} \quad (3.3)$$

Commandes principales

Les commandes disponibles pour générer des trajectoires à partir d'une courbe sont les suivantes.

- **SACEPATHENGRAVING** : Génère une trajectoire spline unique s'adaptant à la courbe.
- **SACEOFFSETENGRAVING** : Génère une trajectoire spline unique à un décalage spécifié par rapport à la courbe. Sert à appliquer une compensation radiale. Paramètres : offset, direction de l'offset.
- **SACEUNIFORMOFFSET** : Génère une série de trajectoires à des décalages uniformément décroissants de la géométrie sélectionnée. La dernière trajectoire est au décalage du rayon de l'outil. Utile pour les passes d'usinage successives. Paramètres : pas, nombre de passes, direction du décalage.

Algorithme

L'algorithme utilisé pour générer les points de contrôle d'une trajectoire donnée est illustré à la Figure 2. Il accepte en entrée n'importe quel objet courbe AutoCAD. Les commandes permettant de générer différents types de trajectoires créent chacune un objet courbe et le transmettent à la méthode **CurveToTraj**, qui applique l'algorithme et enregistre la trajectoire spline. De cette façon, l'extension du logiciel par l'ajout de nouvelles commandes de création de trajectoires (alésage hélicoïdal, etc.) ne nécessitera que la création de l'objet courbe approprié et son passage à la fonction **CurveToTraj**.

L'algorithme commence par discrétiser la courbe en segments d'une longueur équivalente à un dixième de l'erreur maximale définie par l'utilisateur, p , et calcule les dérivées premières et secondes et la courbure pour les points limitant ces segments. Cette densité d'échantillonnage est considérée comme suffisante pour capturer les variations significatives de la courbure, car le déplacement ne peut évidemment pas être supérieur à la longueur totale du segment. Les courbures localement élevées entre deux points d'échantillonnage sont considérées comme des discontinuités de premier ordre et traitées séparément. Le premier point de la spline est alors enregistré.

Le point suivant est d'essai à une longueur l le long de la courbe. Cette longueur d'essai est initialement estimée à la moitié de la longueur totale de la courbe. Le nouveau sous-segment d'essai entre le point initial et le point d'essai est vérifié pour détecter les discontinuités en s'assurant que le changement de la dérivée première entre deux points d'échantillonnage est toujours accompagné d'une dérivée seconde suffisamment élevée. L'erreur maximale est ensuite calculée. Si ces deux critères sont respectés, le point d'essai est sauvegardé, et la longueur restante de la courbe est utilisée comme prochaine longueur d'essai. Si l'un de ces critères n'est pas respecté, la longueur d'essai l est divisée par deux, et un nouveau point d'essai est essayé. Si la division de l par deux ramène la longueur du segment en dessous de son minimum, cela signifie qu'il y a discontinuité d'ordre 1 (une arête vive). Une courbe du rayon de courbure minimum défini est générée et remplace le segment discontinu. De nouveaux points sont créés comme décrit jusqu'à ce que l'extrémité de la courbe soit atteinte.

Cette méthode présente l'avantage de modifier dynamiquement la densité des points de contrôle et donc de ne disposer d'un nombre élevé de points que lorsque la courbure est importante. Cependant, il pourrait être utile à l'avenir de pouvoir interpoler. Par conséquent, une deuxième méthode de génération de splines a été implémentée et peut être accessible avec la commande **SACETOGGLEDYNAMICDENSITY**. Le nombre de points régulièrement espacés est calculé à partir de la longueur maximale du segment définie avec la commande **SACSETSTATICSEGMENTLENGTH**. Cette deuxième méthode a également une vitesse de calcul beaucoup plus rapide car aucun calcul n'est nécessaire. Cependant, le fichier texte exporté sera très volumineux.

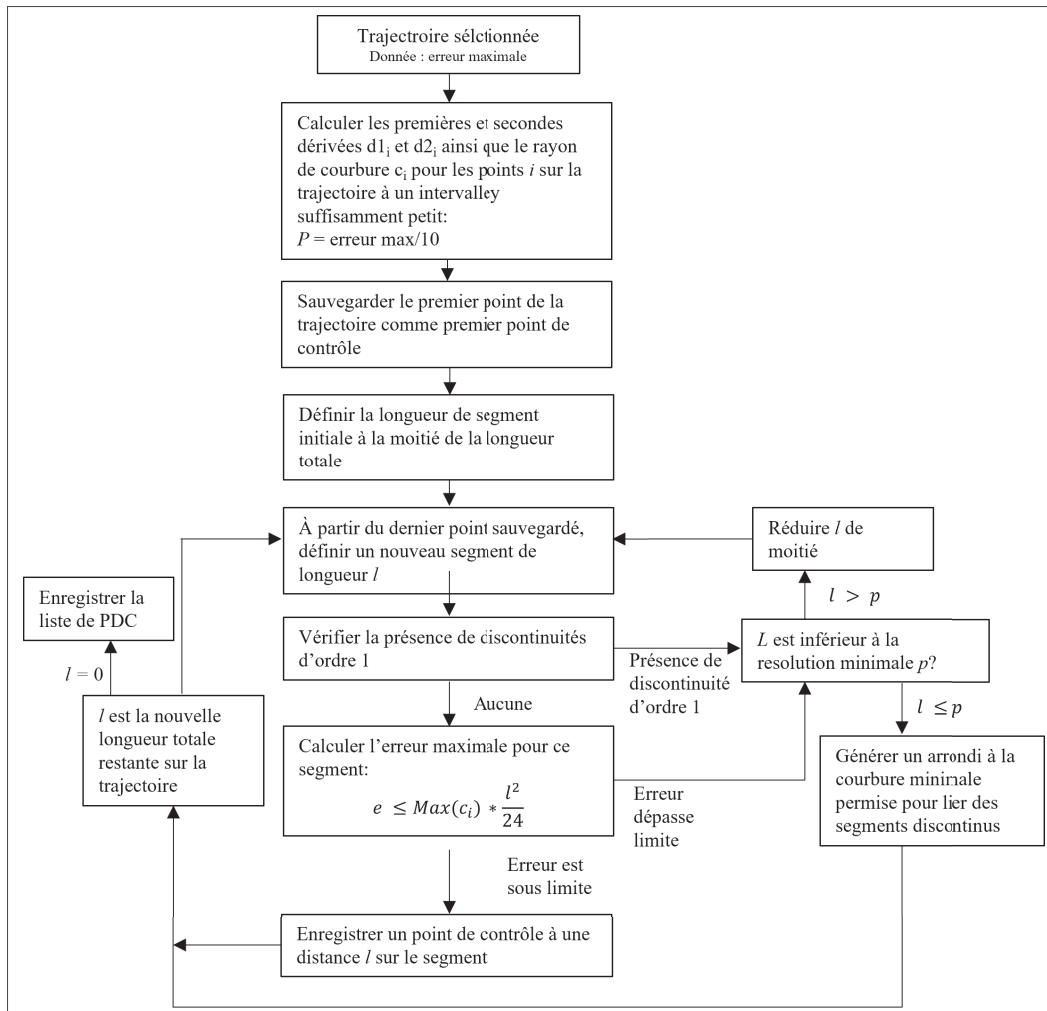


Figure 3.10 Algorithme de génération de points de contrôle pour un spline d'interpolation

Impact de la méthode de longueur dynamique de segments

La figure 3.11 montre les points de contrôle d'une courbe interpolée avec a) la fonction par défaut du programme et b) avec le mode à segments constants. La longueur dynamique de segments fait passer le nombre de points des milliers aux dizaines, allégeant considérablement les fichiers exportés. Les points de contrôle ont précisément la densité requise et non plus.

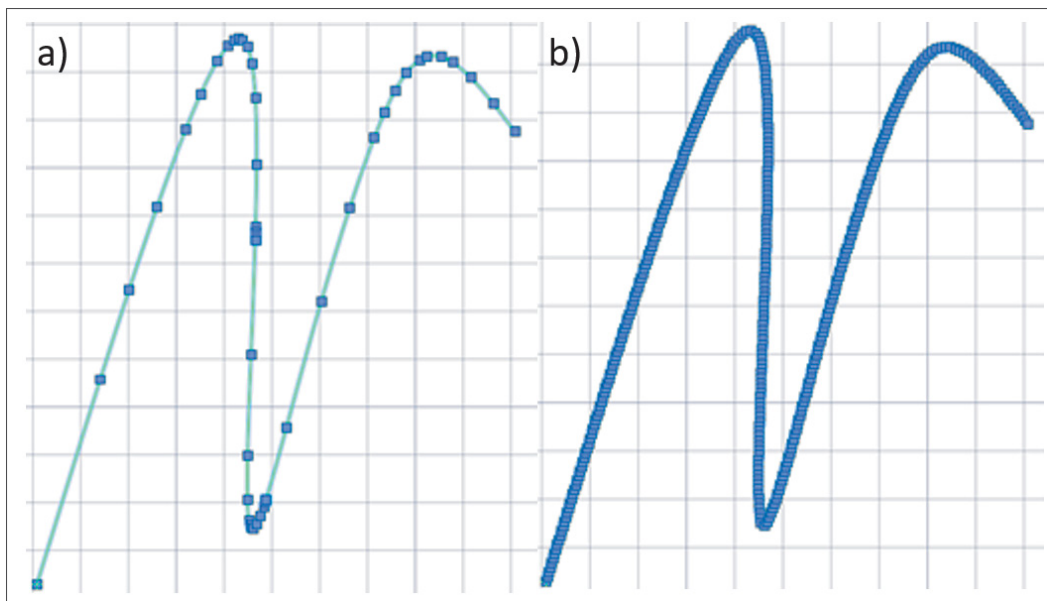


Figure 3.11 Courbes interpolées a) avec longueur de segment dynamique et b) segments constants

3.1.7 Conclusion

La conception d'éléments de commande d'une machine SACE haute-précision a été présentée. La structure mécanique fournie a été présentée. Les divers sous-systèmes nécessaires au procédé SACE ont été conçus et intégrés au système de contrôle. Une banque de fonctions en langage TCL a été programmée afin de contrôler les sous-systèmes en coordination avec le déplacement des axes dans un contexte d'usinage SACE. Finalement, un module AutoCAD servant à générer des points de contrôle pour les trajectoires d'outil de cette machine a été conçu, programmé et présenté.

En parallèle avec la fabrication de la machine présentée ici, qui par sa nature haute-précision et par son inclusion de divers systèmes complexes (la tête d'usinage et la structure mécanique) a fait objet de délais, une seconde machine, celle-ci la plus simple possible, a été conçue et fabriquée. La section 3.2 présente cette machine.

3.2 Conception d'une machine SACE à faible coût

Bien que la machine présentée à la section 3.1 aurait pu être très utile, plusieurs délais dans la livraison de pièces, en partie en raison de la pandémie COVID-19, ont retardé sa complétion à une date encore inconnue. À la lumière de ce fait, et considérant la durée prévue de la recherche, la décision a été prise de réaliser un système plus simple pouvant être rapidement fabriqué et mis en fonction. L'utilisation exclusive de pièces standard ou imprimées 3D a permis d'effectuer le processus entier de la conception à la première utilisation en moins de 6 semaines et en minimisant les coûts. Cette section présente le processus menant à l'obtention de cette machine à faible coût.

3.2.1 Fraiseuse et modifications

La machine SACE à faible coût a été conçue à partir d'une petite fraiseuse conventionnelle 3018-PROVer de Genmitsu. Ce produit offrant une solution complète pour déplacer un outil rotatif selon 3 axes, incluant l'interprétation de code G, il n'a été nécessaire que d'ajouter les sous-systèmes propres au SACE :

1. Générateur de fonctions et amplificateur ;
2. Cellule électrolytique et contre-électrode ;
3. Pompe pour circulation d'électrolyte ;
4. Fixation des brosses de carbone pour appliquer la tension à l'outil ;
5. Aspiration de vapeurs.

La génération de tension, la cellule électrolytique et la pompe de circulation d'électrolyte sont les mêmes qu'avec la machine décrite à la section 3.1. Une pièce fabriquée par impression 3D par dépôt de filament en fusion (FDM) en ABS sert à la fois à fixer les brosses de carbone et de bouche d'aspiration. La figure 3.12 montre la tête d'usinage avec la pièce installée. Le système complet peut être vu à la figure 4.2 au chapitre 4 L'aspiration se fait par un tube entourant l'outil et percé de 5 trous de 3 mm de diamètre symétriquement positionnés. Les vapeurs sont aspirées

par un filtre au carbone vers le couplage à tube, connecté à une pompe à diaphragme. Le débit d'aspiration est de 12 L/min.

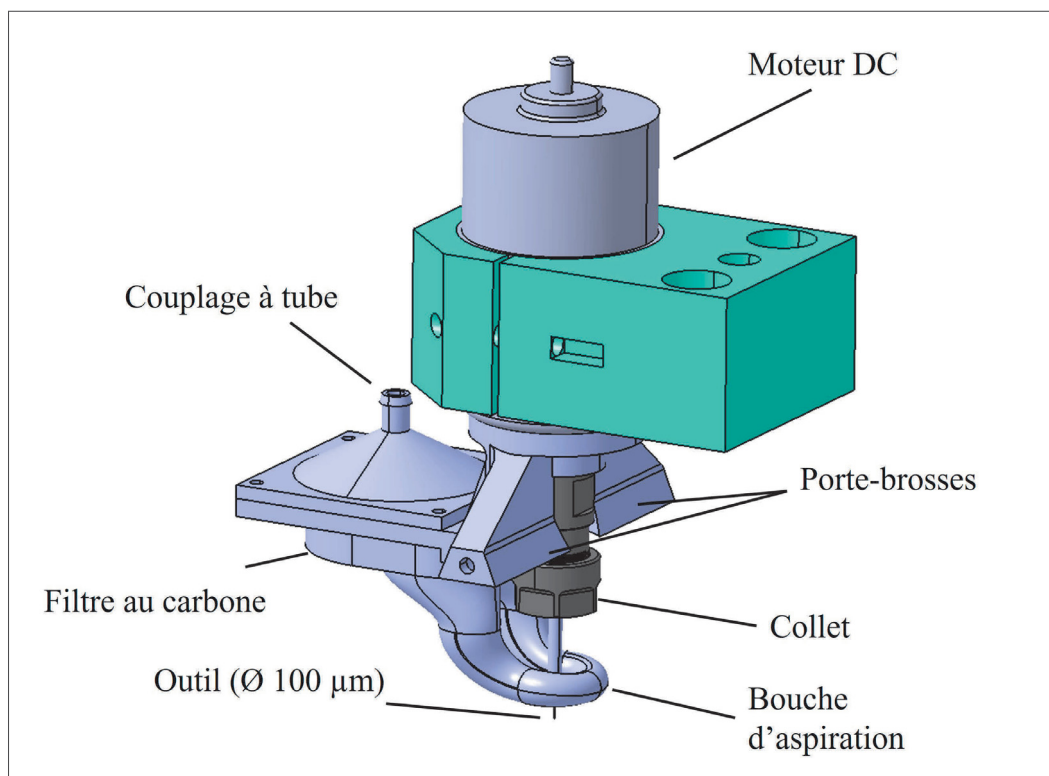


Figure 3.12 Porte-outil SACE

3.2.2 Caractérisation de la précision du positionnement

Considérant le faible coût et la qualité douteuse de la fraiseuse, des tests ont été accomplis pour déterminer la résolution, la précision et répétabilité du positionnement. L'usinage a été accompli par SACE sur des lames de microscope en verre soda-lime. Deux erreurs ont été mesurées :

1. L'erreur de positionnement ;
2. L'erreur provenant du jeu mécanique.

Des droites ont été usinées dans des lamelles de verre soda-lime, puis mesurées à l'aide d'un microscope optique. Les erreurs ont ainsi été caractérisées et, le besoin étant, corrigées.

Premièrement, le pas minimal a été identifié. La résolution des moteurs pas-à-pas contrôlant le déplacement des axes est de 200 pas/tour, et le pas des vis est de 1 mm. On obtient donc :

$\frac{1\text{mm}/\text{tour}}{200\text{pas}/\text{tour}} = 0.005 \frac{\text{mm}}{\text{pas}}$. On pourrait donc commander un déplacement d'au minimum 5 μm .

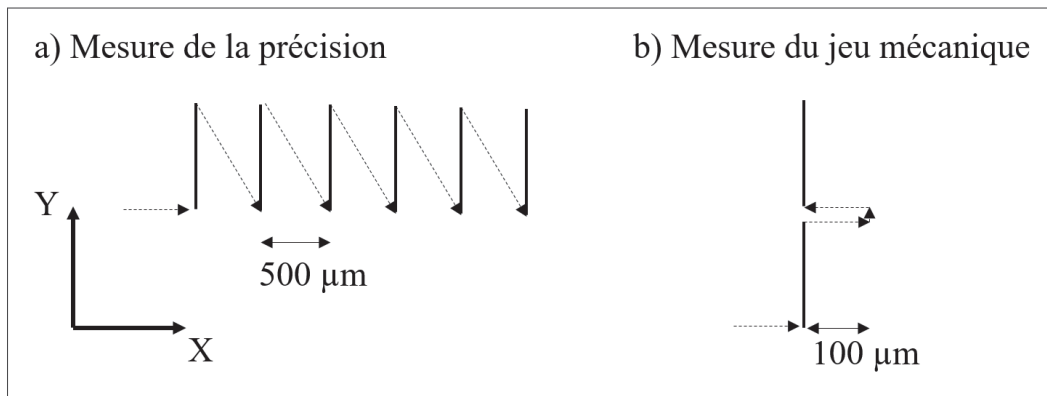


Figure 3.13 Déplacements de l'outil pour mesurer : a) la précision de déplacement et b) le jeu mécanique de la machine SACE à faible coût

Ensuite, la précision de commande des déplacements a été mesurée. Des lamelles de microscope en verre soda-lime ont été utilisées. Des lignes parallèles espacées de 500 μm ont été usinées tel que montré à la figure 3.13.a et leur position réelle a été mesurée à l'aide d'un microscope optique. Trois séries ont été effectuées avec le même point de départ en X. Afin de différencier la véritable précision des axes et le jeu mécanique, les lignes ont été usinées successivement dans un seul sens. La position des lignes a été mesurée à partir de la droite moyenne de la paroi des rainures, observées par microscopie optique. La figure 3.14 illustre la méthode utilisée.

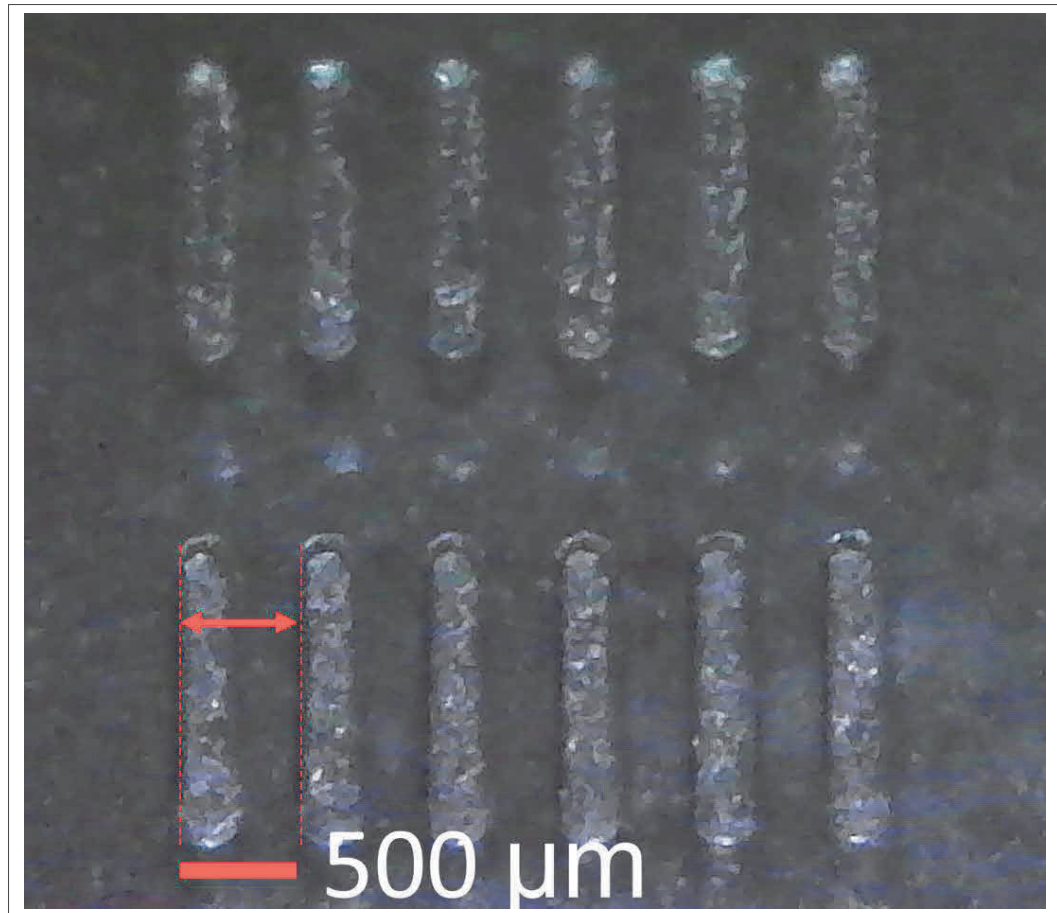


Figure 3.14 Méthode de mesure des formes usinées sur verre soda-lime

La figure 3.15 donne l'erreur sur l'axe X de la position des lignes usinées en fonction de la position commandée. On peut distinguer une erreur systématique pour les trois séries, oscillant avec une amplitude de $10\ \mu\text{m}$ sur une période d'approximativement $1000\ \mu\text{m}$, soit le pas de la vis ; celle-ci peut être attribuée à l'erreur dans la longueur exacte du pas de la vis. On peut estimer l'erreur totale de positionnement pour l'axe x_i E_{x_i} en micromètres avec l'équation 3.4, soit la somme de l'erreur systématique (fonction de la position en x_i) et de l'erreur aléatoire δ .

$$\begin{cases} E_{x_i} = 10 \sin\left(\frac{2\pi}{1000}x_i\right) \pm \delta \\ \delta \in [0, 5]f \end{cases} \quad (3.4)$$

Cependant, faute de mesurer cette erreur sur le domaine de déplacement des deux axes afin d'appliquer une correction (*mapping*), il faudra considérer l'ensemble de l'erreur comme aléatoire. On estime l'erreur de positionnement à $\pm 15 \mu\text{m}$ en X, et le même modèle de vis étant utilisé en Y, on fait la même estimation pour cet axe.

En faisant l'assomption que la vis actionnant l'axe Z a la même précision que celles en X et Y, on obtiendrait une erreur trop grande pour utiliser le procédé SACE, considérant que la distance outil-pièce souhaitée (environ $10 \mu\text{m}$) sera du même ordre de grandeur que l'erreur. Cependant, dans le cas de gravures faites en surface d'une pièce de verre, la position en Z demeure la même. De plus, le palpage est également fait au même niveau en Z (voir la méthode de palpage par détection de décharge, section 3.3.1). On peut donc négliger l'erreur systématique fonction de Z si le déplacement en Z ne dépasse pas une certaine amplitude.

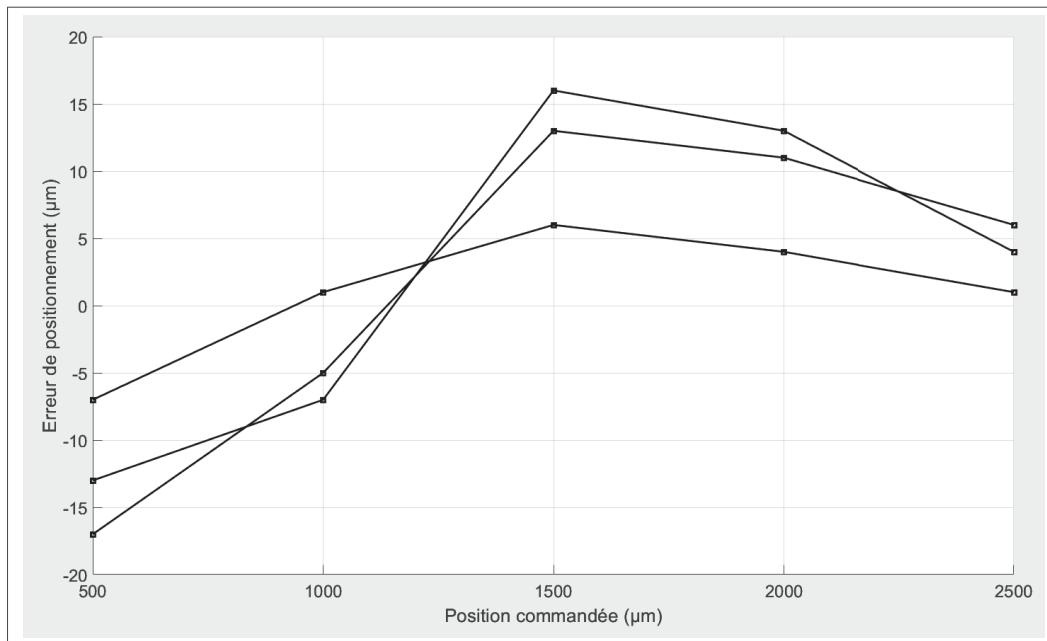


Figure 3.15 Erreur de positionnement en X des lignes, trois séries en même position X

Finalement, l'effet du jeu dans les axes a été mesuré. Deux lignes colinéaires ont été usinées, en approchant chacune perpendiculairement par des directions opposées, comme montré à la figure

3.13.b. Une distance en X de près de 100 μm a été mesurée entre les lignes ; ceci indique un jeu inacceptable. Une inspection rapide a permis d'identifier le problème : l'écrou captif assurant la transmission de la rotation de la vis à un déplacement linéaire de l'axe avait un jeu de près de 20 degrés en rotation. Ceci a été éliminé en imprimant une pièce en PLA qui serre l'écrou captif dans une seule position. Un nouvel essai confirme que l'erreur de positionnement provenant du jeu a été réduite à moins de 5 μm .

Pour conclure, l'incertitude de positionnement des axes X et Y a été estimée à $\pm 15 \mu\text{m}$. Sur l'axe Z, la petite amplitude de déplacement nous permet d'avoir une incertitude de $\pm 5 \mu\text{m}$. Ces valeurs ne sont pas suffisantes pour la majorité des cas d'utilisation du SACE, mais sont suffisantes pour effectuer de la recherche de base en SACE.

3.3 Expérimentation avec le procédé SACE

Ce chapitre décrit les expériences faites à l'aide de la machine à faible-coût décrite à la section 3.2. Une méthode de palpé a premièrement été établie. Ensuite, certains essais de base ont été accomplis afin de valider des éléments de la revue de littérature. Finalement, la mesure du signal de courant est introduite, menant à la publication d'un article scientifique.

3.3.1 Palpage

Il est nécessaire en usinage d'établir la véritable position de la pièce à usiner. Dans le cas de l'usinage conventionnel par outil coupant, un plan de référence peut être usiné comme première étape. Ceci n'est pas possible pour le SACE car une distance précise entre l'outil et la pièce est nécessaire afin de correctement usiner (voir section 1.5.3.1). Lors des expériences SACE effectuées ici, deux méthodes de palpé ont été utilisées : par conduction et par observation de l'étincelle.

Initialement, la méthode utilisée était par conduction, tel que proposée par (Sambathkumar & Arunagirinathan, 2022) et décrite dans la revue de littérature (section 1.5.4.2). Celle-ci était efficace

mais avait certains désavantages. Notamment, si l'outil brisait et devait être changé, un nouveau palpage devait être accompli, impliquant de vider et nettoyer la cellule électrolytique au complet.

Il a été remarqué qu'une décharge lumineuse se produisait à une hauteur d'outil constante lors de l'approche initiale vers la pièce. L'hypothèse que ce phénomène détectable pourrait servir de méthode de palpage a été explorée dans l'article présenté au chapitre 4. Dans certains des essais d'usinage de base, l'observation de l'étincelle a même servi d'unique méthode de palpage. Cette observation est à la base de l'étude du chapitre 4.

3.3.2 Usinage de base

La machine SACE à faible-coût a été testée en usinant des formes de base, soit des lignes, du texte et des poches. Le tableau 3.3 présente les paramètres importants de l'usinage.

Tableau 3.3 Paramètres utilisés lors des essais SACE

Paramètre	Description
Pièce usinée	Lamelle de microscope soda-lime
Électrode-outil	Foret carbure de tungstène, Ø100 µm
Anode	Acier inoxydable 316
Électrolyte	KOH, 30% wt.
Tension pulsée appliquée	33V :18V
Période d'application de la tension	2.5ms :0.1ms
Vitesse d'avance	20 ou 40 mm/min
Rotation de l'outil	120 rpm
Profondeur de la solution électrolyte	1 mm

La figure 3.16 montre certaines des géométries usinées. En 3.16.a, on voit du texte réalisé à 40 mm/min. Les annotations d'un essai SACE peuvent rapidement être écrites directement sur la pièce usinée. En 3.16.b, une poche traversant complètement la pièce d'une épaisseur de 1 mm a été usinée. En 3.16.c, des rainures d'une profondeur de 20 µm et largeur de 250 µm ont été usinées.

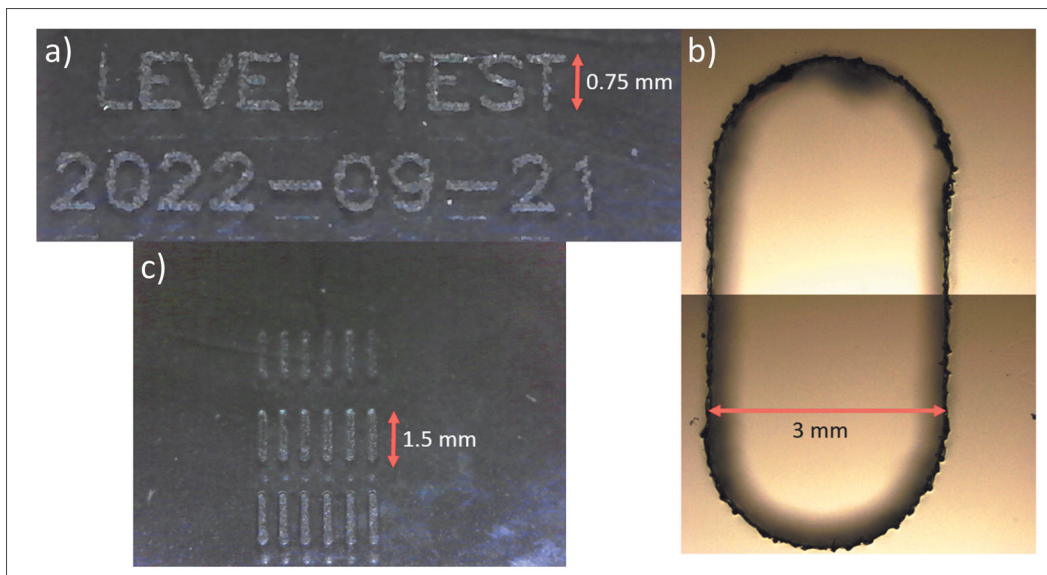


Figure 3.16 Géométries usinées par SACE en essais de base : a) texte, b) poche (profondeur 1 mm) et c) rainure .

Une capacité de la machine à faible coût à usiner cette géométrie étant démontrée, la prise de données de l'étude principale a pu débuter. Cette même géométrie a été usinée dans le cadre de l'étude présentée au chapitre 4. Cette étude, portant sur la mesure du courant électrique pour obtenir des informations sur le procédé, comprend deux expériences :

1. L'identification d'une méthode de palpé par détection d'une variation de courant lors de la descente d'outil ;
2. La détermination de l'état du film gazeux par l'aspect des décharges électriques.

Des opérations de palpé et d'usinage horizontal ont été exécutées, et le signal de courant mesuré afin d'identifier des éléments permettant l'obtention d'informations sur l'état de l'usinage. Un pic de courant à une distance pièce-outil fixe a permis le développement d'une méthode de palpé précise sans contact. Les décharges ont été analysées afin de déterminer l'état du film gazeux et ainsi proposer une méthode de rétroaction et d'ajustement en temps réel du procédé.

CHAPITRE 4

ON THE USE OF THE CURRENT SIGNAL IN SPARK-ASSISTED CHEMICAL ENGRAVING FOR MICROMACHINING PROCESS CONTROL

Guillaume Villeneuve^a, Lucas Hof^a

^a Département de Génie mécanique, École de Technologie Supérieure, 1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis à la revue « Precision Engineering », 7 décembre 2022

4.1 Abstract

Spark-Assisted Chemical Engraving (SACE) is a hybrid manufacturing process used to micromachine glass and other hard-to-machine materials. A tool-electrode is used to generate sparks and locally heat the workpiece surface; material removal is through thermally-promoted etching by an electrolytic solution, generally NaOH or KOH. A challenge in SACE is the precise monitoring of material removal; mechanical solutions exist but are complex. In this study, methods for obtaining information by measuring the current flowing through the electrodes are introduced for both probing and machining SACE operations. During probing operations, a spike in average current observed at a constant height upon the approach of the workpiece by the tool can be used to measure the gap between the tool and workpiece. During machining, a stable gas film around the tool is key to uniform material removal. Three distinct current modes were identified and linked to a different state of the gas film. A method is presented for adjusting the applied voltage to stabilize the gas film based on feedback by the current signal. In this way, more efficient and repeatable SACE machining can be achieved.

keywords : micromachining, glass, micro-electromechanical systems

4.2 Introduction

Glass is a material with many interesting properties leading to applications in a wide variety of domains. Its optical, mechanical, and chemical properties make it well adapted to use in

micro-electromechanical systems (MEMS) (Bourhis, 2014). Glass has seen use as a substrate for silicon devices (Chang & Hsihe, 2016), as interposers for microchip stacks (Chien, 2013), and as base material in emerging lab-on-a-chip technologies (Nielsen *et al.*, 2019). Nevertheless, brittle materials, such as glass, are limited in their capacity to be used in microscale applications as part manufacturing processes are limited, either by cost, low speed, or very large batch size requirements, despite an increasing demand for glass micromachining at lower cost (Singh, 2022). In fact, machining of glass at the micrometer scale presents many challenges due to its high brittleness and chemical stability (Posa & Sundaram, 2020). While different glass micromachining technologies - categorized in mechanical, chemical and thermal processes - have been developed over the past decades, each technology hampers from limitations in either surface finish, processing speed or high costs or a combination thereof (Hof & Abou Ziki, 2017). Moreover, these processes are often applicable only to a specific set of machining operations (e.g. drilling, cutting, engraving or milling) and geometries (e.g. straight lines by dicing techniques), requiring the use of a combination of different processes to obtain a final glass product (Bourhis, 2014), which incurs higher costs, increases the use of resources and generates more waste material. Hybrid machining processes combine two or more processes of each category to solve some of these limitations, increasing flexibility and allowing the lean manufacturing of glass parts in less steps (Hof & Abou Ziki, 2017).

Spark-Assisted Chemical Engraving (SACE), also known as Electro-Chemical Discharge Machining (ECDM) (Basak & Ghosh, 1996), is a hybrid machining process combining thermal and chemical effects to precisely remove material in non-conductive brittle materials, such as glass (Hof & Wuthrich, 2021) and engineering ceramics (Singh & Dvivedi, 2021). It is well-adapted to machining small batch sizes but has not been widely adopted in industry as it still has limitations on speed and process control (Hof & Abou Ziki, 2017). SACE has been successfully used, as laboratory-scale technology, on glass to machine micro-holes (S. K. Jui & Sundaram, 2022), micro-channels (Torabi & Razfar, 2021), and two-and-a-half -dimensional (2.5D) sub-millimeter sized structures (Sambathkumar & Arunagirinathan, 2021), (Hof & Wuthrich, 2021). Current research on SACE focuses on optimization of process parameters to improve machining speed

and feature quality (Soni, Gidwani & Shringi, 2022), (Zhao *et al.*, 2022), and investigation of its applicability to new materials, such as Zircon-based ceramics (Singh & Dvivedi, 2021) and Carbon fiber composites (Yadav, Singh & Debnath, 2022). However, a major challenge in SACE machining remains establishing and maintaining the distance between the tool-electrode and workpiece, known as the machining gap (Ziki & Wüthrich, 2015), typically varying from 0 to 25 μm . Indeed, control of this machining gap is necessary pre-process (through probing) as well as in situ where variations in material removal rate will affect the machining gap and negatively influence process repeatability, unless detected and compensated for. Pre-process methods include visual identification of tool-workpiece contact (Didar, Dolatabadi & Wüthrich, 2008) and use of a metallic feel gauge and a multimeter, similarly to the probing process for conductive materials (Sambathkumar & Arunagirinathan, 2022). Pre-process methods are useful for initial substrate surface referencing (probing) and tool placement; however, they typically cannot be used to monitor the machining gap and material removal during the machining process. Yet, monitoring of material removal during machining is essential as tool breakage due to collision with the workpiece becomes otherwise an issue (Hof, 2018). Force-feedback control strategies have been used to detect tool-workpiece contact and to correct machining in situ, but such an approach increases the mechanical complexity of the machining setup as more sensors, actuators and a flexible tool-head structure are required (Ziki & Wüthrich, 2015). As well, force-feedback strategies have been only developed for axial tool movements (e.g. for drilling operations) and not for lateral (in-plane) tool feed (Wuthrich *et al.*, 2016), and as such not providing accurate process control for regular machining operations, such as milling and cutting. Already two decades ago, (Wuthrich *et al.*, 2006) published the idea of using the current signal to obtain information on the SACE machining process; the presence of the gas film and whether machining was taking place could be determined by the electrochemical discharge process' current waveform. However, no correlation between measured current and material removal rate (MRR) was found and no further research results have been reported so far in literature. Indeed, if a quantitative link between the current signal and MRR can be established, novel SACE control algorithms can be developed to provide feedback and process adjustment in real-time for both axial and lateral tool movements during machining, hence greatly improving

process repeatability. In this study we propose a substrate surface probing method for SACE micromachining using the process' current signal, without requiring any additional tooling or mechanical setup developments. In addition, we present preliminary steps towards a novel approach allowing feedback and correction on the gas film state using a detectable variation in the current signal . These two methods could replace force-feedback mechanisms in SACE machining and in doing so significantly reduce mechanical complexity costs of SACE-capable systems. This will further contribute to the use of this hybrid glass micromachining technology for industrial and academic glass micromachining applications.

4.3 Materials and methods

4.3.1 Spark-Assisted Chemical Engraving principles

Spark-Assisted Chemical Engraving (SACE) is a hybrid machining process combining chemical and thermal effects around a tool-electrode to remove material of non-conductive silicon dioxide-based substrates (e.g. glass) by thermally promoted chemical etching (Kurafuji, 1968). The workpiece is submerged in an electrolytic, alkaline, solution. A voltage (typically around 33V) is applied between a tool-electrode and a counter-electrode, inducing electrolysis of the solution and creation of bubbles on the tool-electrode (Figure 4.1). These bubbles coalesce into a gas film around the tool, increasing resistance of the circuit and limiting the current to electrical discharges through the gas film. These discharges locally heat the workpiece and the electrolytic solution; material removal becomes possible due to an accelerated chemical attack by the alkaline electrolyte (typically potassium or sodium hydroxide) at high temperature (around 500 – 600 °C (D. Abou Ziki *et al.*, 2015)).

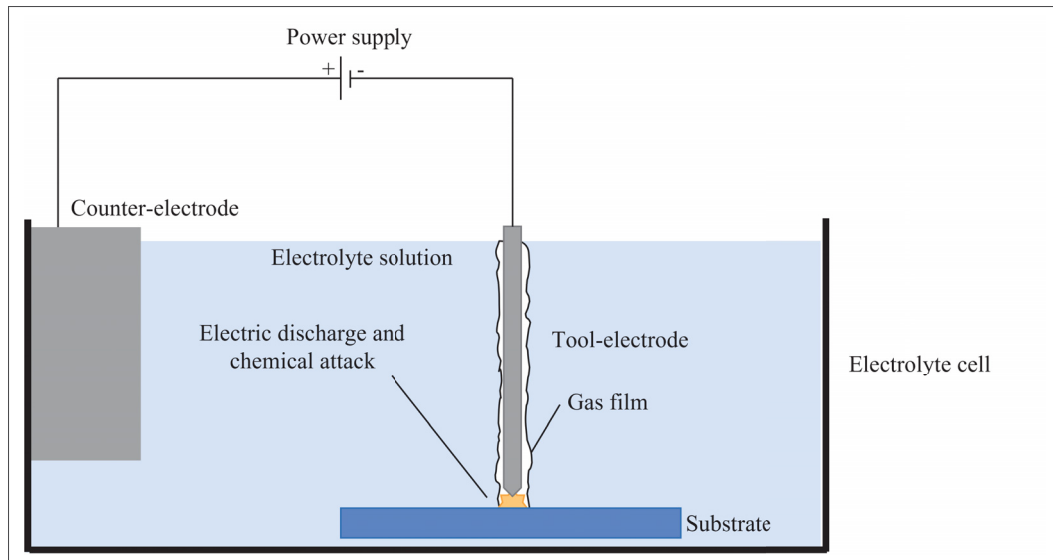


Figure 4.1 Illustration of SACE process principles

4.3.2 Experimental setup

In order to measure and investigate the current signal during SACE probing and micromachining, experiments were performed on a conventional three-axis milling machine (Genmitsu, model 3018-PROV-er) with a resolution of 10 μm in each axis direction. The machine was controlled with the open-source GRBL software (Jeon, 2021) and retrofitted to allow SACE machining. The following SACE process specific elements were developed and added to the conventional milling machine :

- carbon brushes to enable voltage/current supply to the electrodes ;
- an acrylic electrochemical cell, including a peristaltic pump system (Masterflex Miniflex MFLA-77920-40) for electrolytic solution circulation ;
- protective bellows and acrylic panels ;
- a fume exhaust and filtration system adjacent to the tool.

A pulsed voltage was applied to the electrodes using a Siglent SDG830 function generator and an AVTech AV-112D-PS-AC03 amplifier (input signal = 0 - 2V, gain = 25x, and bandwidth = 20

kHz). The current in the electrochemical discharge machining circuit was measured with an Elditest CP6550 current probe measuring at a sampling frequency of 500 kHz (sampling time $t_{\text{sampling}} = 2 \mu\text{s}$) and at a 12-bit (2.4 mV) resolution. Data acquisition was accomplished using a Measurement Computing USB-205 card. Figure 4.2 illustrates these elements of the experimental setup, Figure 4.2 a) presents the modified CNC setup retrofitted for SACE technology, b) shows the tool-electrode, consisting of a 100 μm tungsten carbide drill bit, and c) outlines a diagram of the setup electrical components and its connections.

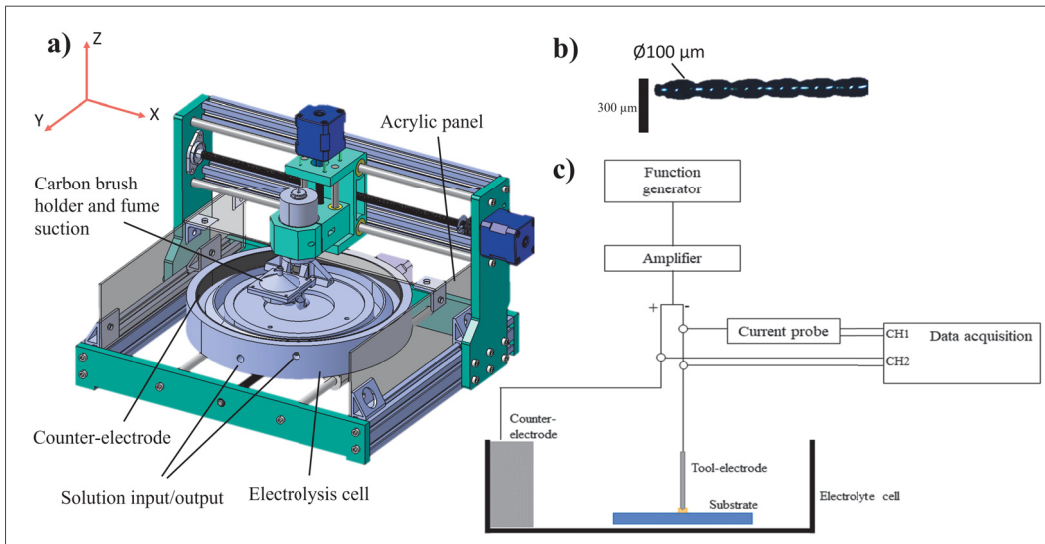


Figure 4.2 Principal elements of the developed experimental setup : a) Modified Genmitsu 3018-PROVER 3-axis milling machine, b) Tool-electrode, c) electrical connections

The deployed process parameters during the glass machining experiments are presented in table 4.1. The workpiece was a 75x25x1 mm soda-lime glass microscope slide (Premier brand). A tool with a diameter of 100 μm was selected, as it was recently revealed that this tool size provides the best SACE machining efficiency (Hof & Wuthrich, 2021). A pulsed voltage was applied since this was proven to stabilize the gas film and reduce randomness of discharges in the SACE process, hence increasing the machining quality (Kim, Ahn, Leeb & Kim, 2006). The electrolytic solution, circulated through the electrochemical cell by the peristaltic pump, was kept at a 1 mm height with respect to the glass substrate (workpiece) surface.

Tableau 4.1 SACE process parameters

Process parameter	Description / value
Workpiece	Soda-lime microscope slide
Tool electrode (Cathode)	Ø100 µm Tungsten Carbide drill bit
Anode	Stainless steel 316 strip
Electrolyte	Potassium Hydroxide (KOH), 30% wt.
Applied pulsed voltage (V _{high} : V _{low})	33V :18V
Pulse duration (t _{high} :t _{low})	2.5ms :0.1ms
Feed rate (descent and advance)	20 mm/min
Tool rotation	120 rpm
Electrolytic solution depth	1 mm

4.3.3 Experimental Design and Methods

In the presented study, a new approach to obtain relevant information from the current signal during the SACE process was developed. Three sets of experiments were conducted with the objective of correlating the current signal to information about the process during the probing and machining steps. In probing, the current signal was analysed to precisely measure the tool-workpiece distance based on the arcing height, which was introduced to define the distance at which a first spark occurs during the downward tool movement to approach the workpiece surface. During machining, information on the gas film and the nature of the electrical current was obtained through the current signal. For each tool movement, the arcing height z_a was initially measured in the vicinity of the machined geometry to ensure the correct tool height, which is discussed in detail in section 4.3.4. In the first set of micromachining experiments (Section 4.3.5), tool descents were executed to varying axial Z-levels to develop a probing method using the current signal. Section 4.3.6 presents the second and third sets of experiments, in which horizontal milling advances were executed at varying Z-levels and feed rates, respectively, with the objective of correlating the current signal to the state of the gas film.

4.3.4 Introduction of the arcing height z_a and its initial measurement

This study introduces the arcing height, z_a , as a new variable for SACE machining. It is used as the origin point for the Z-axis in all presented experiments. We define the arcing height z_a as the highest Z-level where a discharge is observed on lowering the tool towards the workpiece. The initial step in all experiments was to measure z_a according to the position where a discharge could be observed. Figure 4.3 describes the developed and used method. The tool, at a given lateral (X, Y) position, was lowered to the workpiece in 10- μm increments until a spark was visually observed, at which time the corresponding Z-level was defined as the arcing height (z_a). Subsequently, the Z-axis' origin was defined as z_a . This procedure was repeated 10 times at 300- μm intervals in the Y direction; it was found that the arcing height was consistent within a 5 μm uncertainty for all 10 measurements. Hence it was proposed to use this method as an initial tool zeroing method.

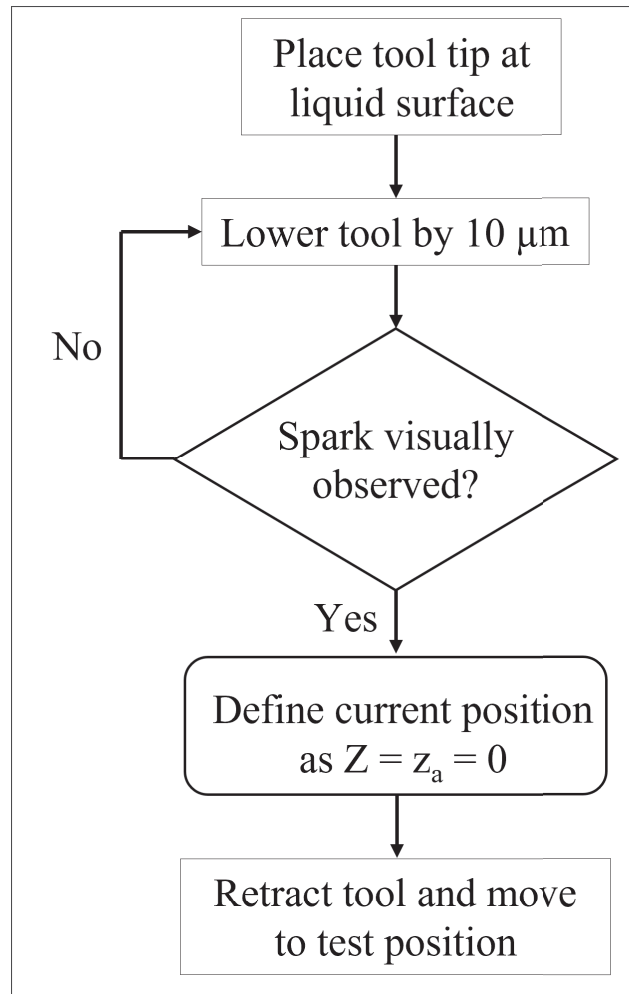


Figure 4.3 Preliminary arcing height measurement procedure

In addition, the tool-workpiece distance (machining gap) was measured in order to relate z_a with the tool-workpiece distance. The method described by (Sambathkumar & Arunagirinathan, 2022) was used to locate the workpiece surface in relation to the working coordinates by detecting electrical contact between the tool and a metallic strip of known thickness on the workpiece. Thereafter, the electrolyte cell was filled with the alkaline solution and a voltage was applied across tool and counter electrode, and then the arcing height was established following the approach as described in Figure 4.3 without moving the tool from its XY-position. In this way,

the tool-workpiece distance and the arcing height were measured in the same working coordinate system.

4.3.5 Tool descents

After determining the arcing height z_a , experiments were conducted to find a detectable change in the current signal that could be used for a new method to probe the workpiece surface before SACE machining. This first set of experiments consisted of tool descents at constant speed to the arcing height or lower vertical positions. In a first step, the arcing height was determined using the method described in section 4.3.4 (see also Figure 4.3). The following steps were then repeated 10 times each for Z-levels z_a , $z_a - 10 \mu\text{m}$ or $z_a - 20 \mu\text{m}$:

1. Position tool at new X-Y coordinates, 1 mm above arcing height ($Z=1000 \mu\text{m}$)
2. Descend to specified Z-level (z_a , $z_a - 10 \mu\text{m}$ or $z_a - 20 \mu\text{m}$) at defined feed rate
3. Pause 0.5 s at bottom of tool path
4. Retract to above liquid surface at rapid speed The descents were positioned in a 6x5 grid as shown in more detail in Figure 4.4 b.

Descents were also executed to the same depths without the workpiece present to isolate the effect of the workpiece presence from tool immersion depth.

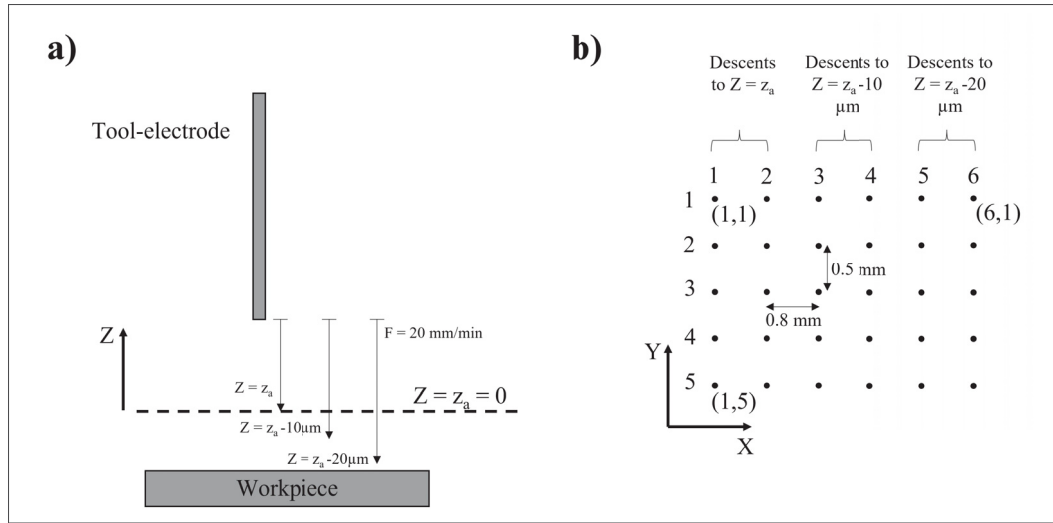


Figure 4.4 Tool descents illustrated in a) vertical and b) horizontal planes. Descents have been numbered by row and column

4.3.6 Tool advances at varying Z-levels and feed rates

The second and third set of experiments' objective was to monitor the current signal during SACE machining operations to determine a relation between information on the gas film, discharge activity and machining process. These experiments consisted of horizontal milling advances, while respectively varying tool Z-level and feed rate F . The current signal was measured and recorded for a period of 0.5 s during each tool advance to establish a correlation between some aspects of the current signal and glass material removal. In the second set of experiments, the tool was advanced in 3-mm long lines at varying Z-levels and constant feed rate, F , of 20 mm/min. The used Z-levels were 20 μm , 10 μm , 0 μm , -10 μm and -20 μm , at arcing height $z_a = 0$. Figure 4.5 illustrates the tool movement at feed rate F and varying tool Z-levels. Six (6) lines were machined for each tool Z-level. In the third set of experiments, tool-electrode advances were executed at $Z = z_a - 10 \mu\text{m}$ at varying feed rates of 5, 10 and 20 mm/min (Fig. 5). Six (6) advances were executed at each feed rate and constant tool height (Z-level).

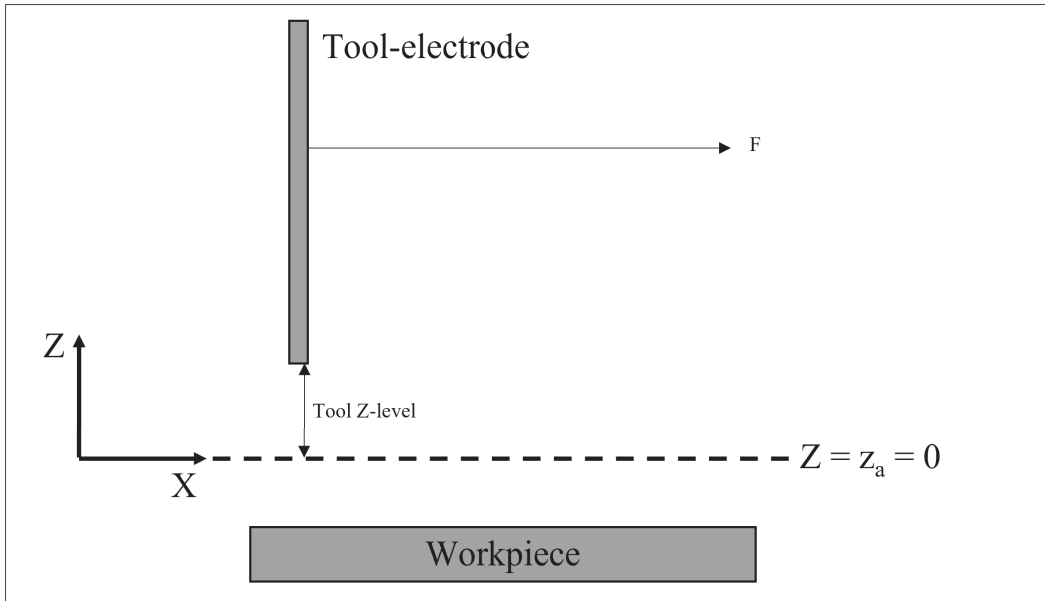


Figure 4.5 Illustration of tool milling advances in second and third sets of experiments

4.4 Results and discussion

The SACE machined geometry on the glass substrate (engraved lines or channels) and the registered process' current signal are examined to find correlations for the tool descents and milling advances for the three conducted experiments (see sections 4.3.5 and 4.3.6). . Section 4.4.1 outlines the experimental results on the use of the current signal during tool descents to propose a novel probing method. Section 4.4.2 presents the results of the experiments conducted on glass lateral movements, which is used to determine the state of the gas film in order to enable the development of a novel SACE process feedback method. Overall experimental results are discussed in section 4.4.3.

4.4.1 Tool descents

4.4.1.1 Glass material removal resulting from tool descents

SACE machining process insight can be gained from the material removed by the tool descents. Notably, whether machining occurred can be correlated to the current signal characteristics (see Section 3.1.2).

A blind hole was machined in the glass workpiece for the tool descents at the defined Z-levels ($Z = z_a$, $Z = z_a - 10 \mu\text{m}$, $Z = z_a - 20 \mu\text{m}$, see figure 4 b), except for the tool positions along column 2 (figure 4 b; $Z = z_a$). I.e., 100% of tool descents to Z-level values below the arcing height ($Z < z_a$) resulted in material removal, while only 50% of tool descends to Z-levels equal to the arcing height ($Z = z_a$) presented machining results. This process variance can be attributed to a positioning error and tool misalignment, indeed, a tool descent to Z-level z_a is in fact represented by a axial downward tool movement to $z_a \pm \epsilon$, with ϵ the uncertainty in the true tool-workpiece distance. In cases where ϵ is positive, no current spike nor material removal would be observed.

Figure 4.6 shows confocal microscopy imaging, by an Olympus LEXT OLS4100 laser confocal microscope, of the holes resulting from the tool descent experiments. Table 4.2 presents the geometrical characteristics of these holes. The difference in dimensions between holes machined at figure 4.6 a) z_a and b) $z_a - 10 \mu\text{m}$ is not significant. The distinct ring shape of the holes is consistent with experiments by D. Abou Ziki *et al.* (2015) in which voltage (33 V) was applied between the electrodes for 100 to 1000 ms.

The holes outlined in figure 4.6 c) and d), machined at $z_a - 20 \mu\text{m}$, do not demonstrate the same ring shape but are rather characterized by a deeper bump in the center, matching the geometry of the tool-electrode. This is similar to what was found in literature (Abou Ziki & Wüthrich, 2013), where the tool was in contact with and applying a force on the workpiece. Smaller holes also appeared in the periphery of the main holes; this may be due to irregular tool shape.

Tableau 4.2 Geometry of holes created by n tool descents

Tool level	Number of holes (n)	Depth (μm)	Diameter (μm)	Shape
z_a	5	37 ± 5	132 ± 10	Ring
$z_a - 10 \mu\text{m}$	10	43 ± 15	130 ± 10	Ring
$z_a - 20 \mu\text{m}$	10	49 ± 14	150 ± 39	Irregular

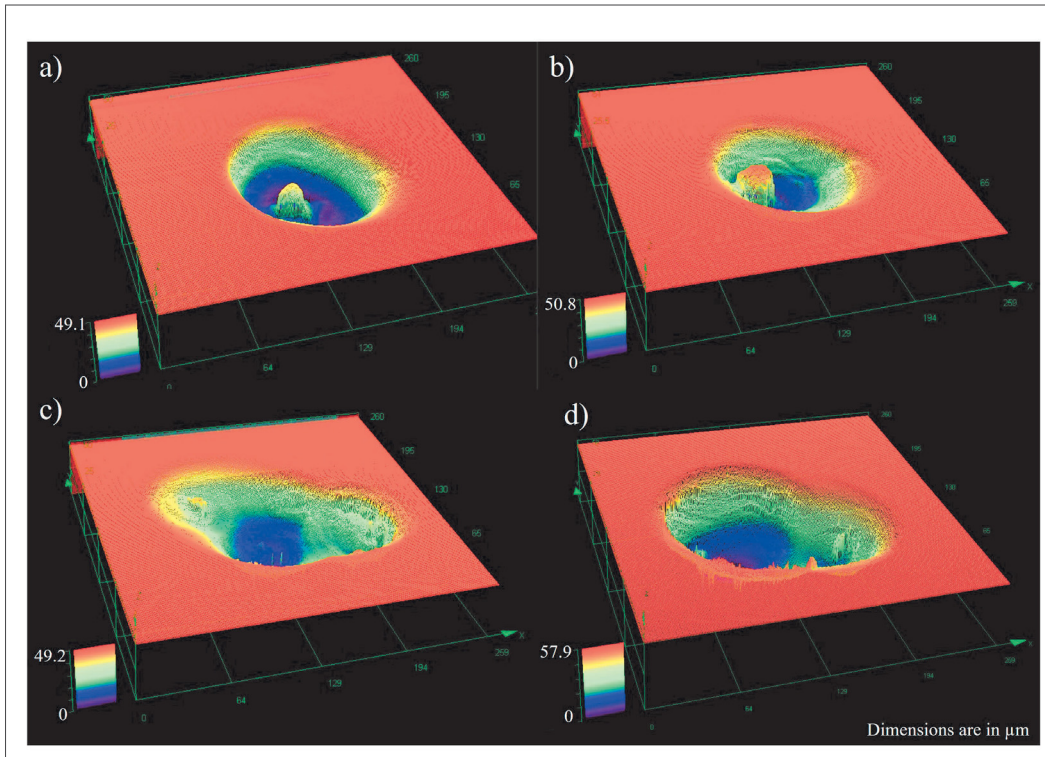


Figure 4.6 Laser confocal microscopy images of holes resulting from descents to depths a) z_a , b) $z_a - 10 \mu\text{m}$, c) and d) $z_a - 20 \mu\text{m}$. a) and b) present the characteristic ring shape of SACE-machined holes while c) and d) are irregular

4.4.1.2 Current signal during tool descents

A spike in the current signal was consistently observed in each tool descent to a level below z_a where the workpiece was present, at the instant when z_a was reached. A visible spark was simultaneously observed. The descents with neither current spike nor visible spark were those in column 2 (see tool descent positions in Figure 4.4 b)), where there was no machining. No

spike in current was observed for the tool descents where the workpiece was absent, for a same tool immersion in the electrolyte. This confirms that the current spike is due to tool proximity to the workpiece and not to tool immersion depth only. Figure 4.7 a) and b) show the SACE process' current signals for tool descents to $Z = z_a$, with an applied running average filter set to 10,000 readings (20 ms). The descents were separated by a) absence or b) presence of current spike. These current signal curves can be divided into four (4) segments. Segments 1 and 4 are associated with the descent and retraction of the tool respectively, where an increase and decrease of submerged surface area explain the changes in current intensity. Segment 2 corresponds to the moment when the tool tip reaches z_a and where a current spike occurs if the tool is in proximity to the workpiece. The depth (Z-levels) at which this occurs is consistent, as is apparent when superimposing the curves. Segment 3 corresponds to the tool being stationary at $Z = z_a$. It is noteworthy that the mean current rises continuously by approximately 50 mA during the 0.5 s pause time; this could be due to increasing temperature of the tool electrode and surrounding electrolyte, resulting in higher electrolyte electrical conductivity, during continuous electrolysis of water as shown in literature (Wuthrich *et al.*, 2006).

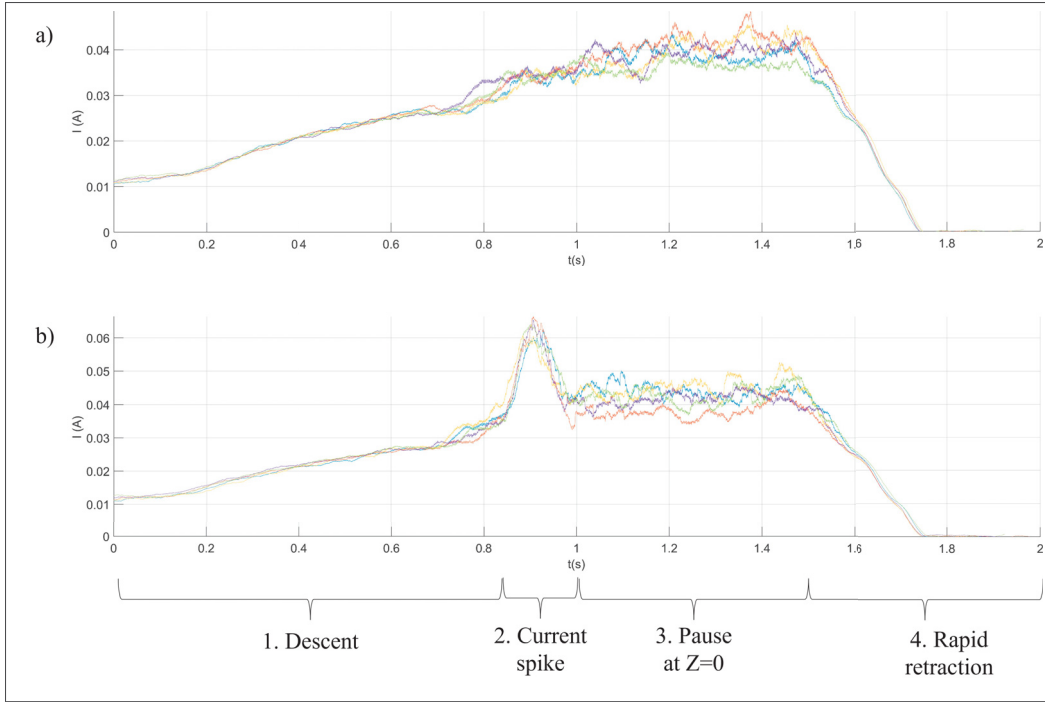


Figure 4.7 Filtered (running average over 20 ms) current during 5 descents to $Z = z_a$ and pause a) without and b) with material removal. Line colors represent individual descents.

Figure 4.8 shows samples of the current signal during the different segments of tool descents. The pulsed supply voltage is shown in red ($V_{\text{high}} = 33\text{V}$; $V_{\text{low}} = 18\text{V}$; $t_{\text{high}} = 2.5\text{ ms}$; $t_{\text{low}} = 0.1\text{ ms}$). In figure 4.8 a), we observe the current signal when the tool is partly submerged and descending. Sparks are present and current is otherwise absent, indicating that the gas film is stable. In figure 4.8 b), during the current spike at tool position $Z = z_a$, periods of high current at longer duration than regular sparks ($300\text{ }\mu\text{s}$ rather than $10\text{ }\mu\text{s}$ for the sparks) are present. These long periods of high current explain the spike in average current despite less spark behaviour being visible in the current signal. The plots in figure 4.8 c) and d) show the current signal either immediately before tool position $Z = z_a$ at the first approach where there was no machining occurring, or during the pause at $Z = z_a$. The current signal corresponding to a stable gas film can be observed in both cases, with a gas film collapse only happening when provoked by low-voltage pulses.

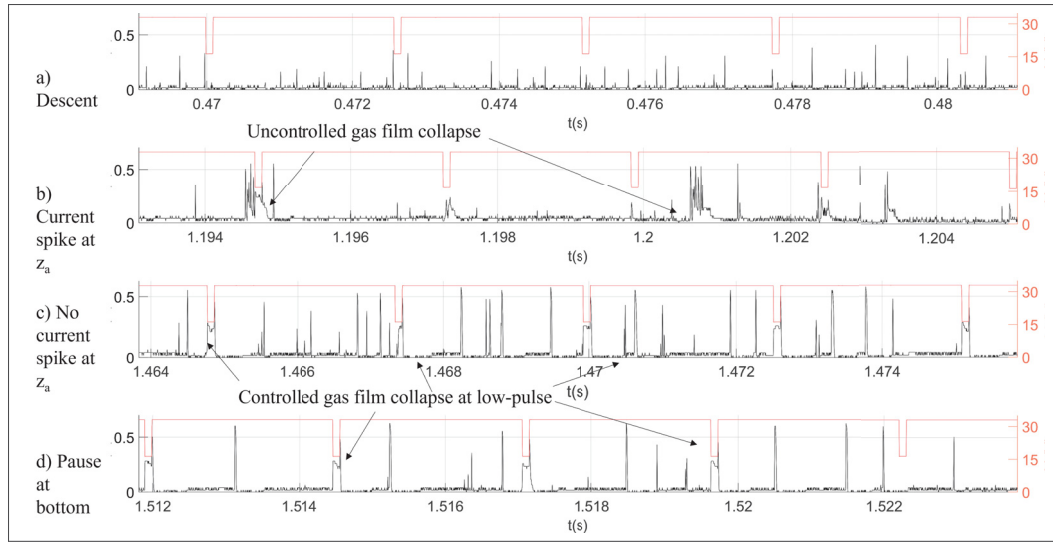


Figure 4.8 Current samples at different stages of tool descents

Figure 4.9 illustrates filtered current signals during tool descents to three different Z-levels ($Z = z_a$, $Z = z_a - 10 \mu\text{m}$, and $Z = z_a - 20 \mu\text{m}$). No effect on the current signal has been found for the different tool descent levels, however it was noted that the current spike is absent when the machining gap is too high, and no machining takes place, which is easily observed in some curves presented in figure 4.9 a.

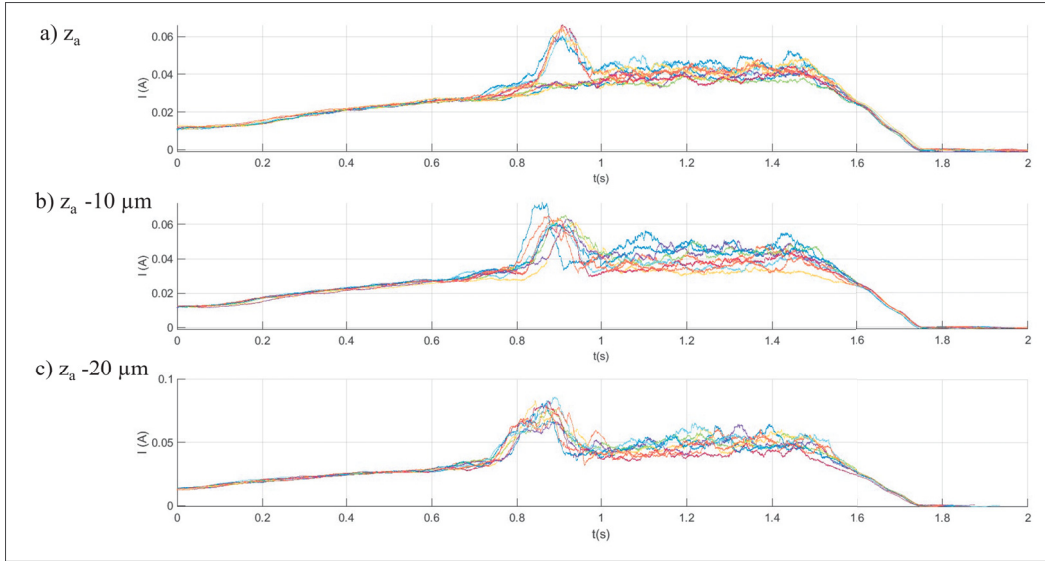


Figure 4.9 Filtered (running average over 20 ms) currents for descents to three depths. Note the absence of current spike in some descents to 0 μm due to uncertainty in true tool position. Line colors represent individual descents.

4.4.1.3 Machining gap – Arcing height relation

The arcing height was consistently measured at $30 \pm 5 \mu\text{m}$ above the workpiece. In other words, no current spike nor material removal was detected above this. This is consistent with the literature, where the maximum machining gap for material removal, corresponding to the thickness of the gas film, is $25 \mu\text{m}$ and typical values for machining are $5\text{--}10 \mu\text{m}$ (Hof & Wuthrich, 2021). We can thus estimate the ideal machining Z-level as $z_a - 15 \mu\text{m}$ to $z_a - 20 \mu\text{m}$.

4.4.1.4 Potential application of the current spike

The repeatability of the current spike during tool descents in SACE process opens up the possibility of using it to precisely measure the tool-workpiece gap during the initial tool approach of the workpiece. As this method would start removing material upon detection of the workpiece, the machining operation would have to be initiated immediately. The procedure for automatically

measuring z_a , adapted from the manual current probing presented in section 2.3.1 and in Figure 4.3 would then be :

1. Begin tool approach at X-Y coordinates of beginning of tool path while measuring the current signal
2. When the current spike is detected (tool is at z_a), adjust the working coordinates accordingly
3. Raise or lower tool to appropriate machining gap for machining
4. Begin machining operation.

This procedure would completely eliminate the need for a surface probing operation as probing would be done directly on the tool approach for machining, reducing setup times and increasing operational efficiency.

4.4.2 Lateral tool movements

4.4.2.1 Material removal from tool advances

Material removal was observed for lateral movements at z_a and below, but not for tool positions at $Z = z_a + 10 \mu\text{m}$ and $Z = z_a + 20 \mu\text{m}$. This is consistent with results in section 3.1, where neither current spikes nor material removal were observed for tool positions above $Z = z_a$.

Figure 4.10 demonstrates SACE machined grooves on the glass substrate by the lateral tool motions for each feed rate F ($F = 20 \text{ mm/min}$, $F = 10 \text{ mm/min}$, and $F = 5 \text{ mm/min}$). The MMR remains invariant at approximately $11.5 \text{ mm}^3/\text{min}$ for the varying tool feed rates, i.e. at higher feed rates machining takes places at lower depth-of-cut, which agrees with previous findings in literature (Hof & Wuthrich, 2021).

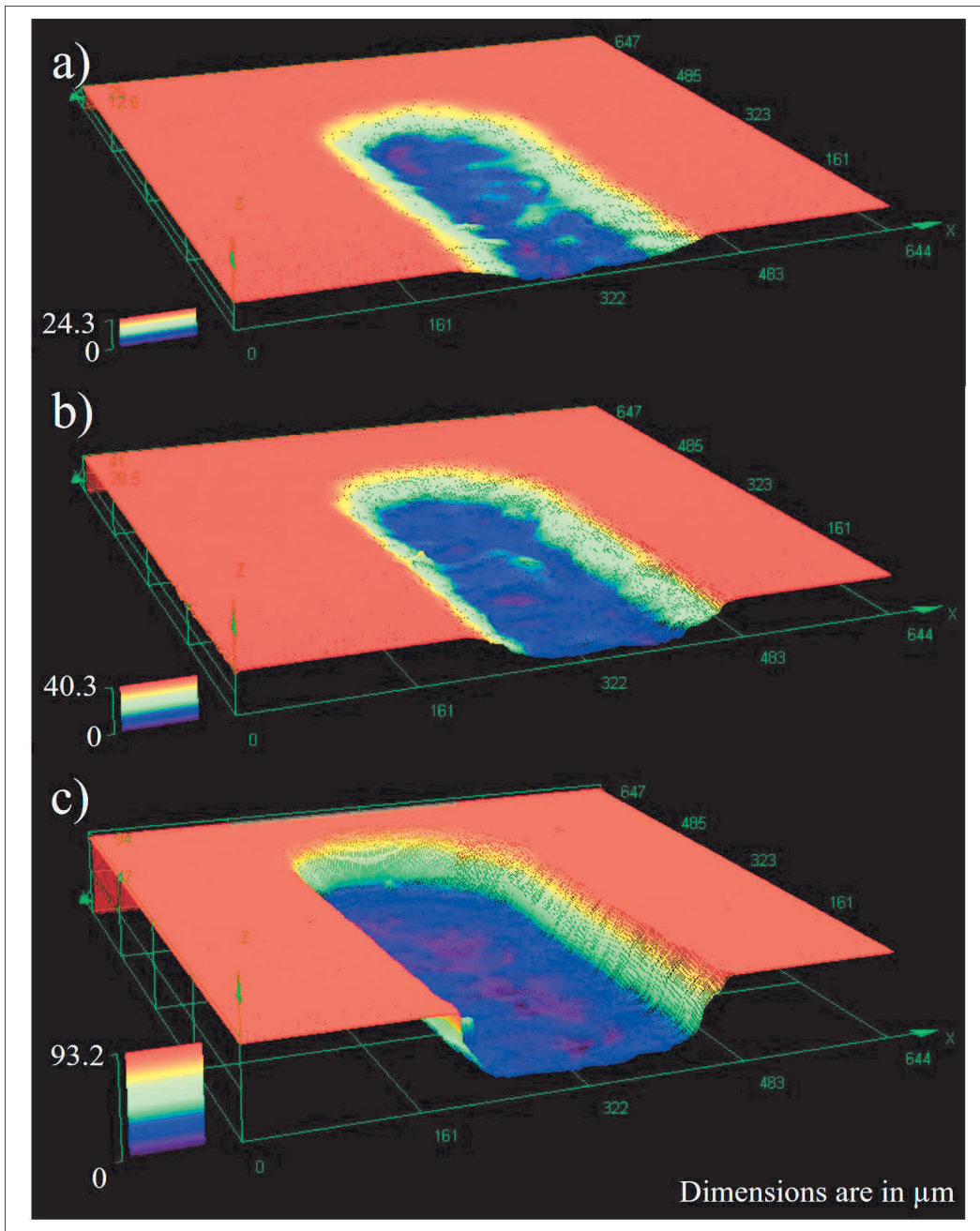


Figure 4.10 Grooves machined at different feed rates with $Z = z_a - 10 \mu\text{m}$, a) 20 mm/min, b) 10 mm/min, c) 5 mm/min

4.4.2.2 Current signal during tool advances at varying Z-levels

The current signal was recorded during the lateral tool motions at constant feed rate of 20 mm/min. Figure 4.11 shows two current signals with a running average filter (1000 readings) : a) at tool position $Z = z_a + 20 \mu\text{m}$, for which no material was removed, and b) at $Z = z_a - 20 \mu\text{m}$, where material removal occurred. In this current signal, three distinct modes of current can be identified :

- Mode 1 : In a) where the tool is too far from the workpiece for machining to take place, with an unstable and high average current (approx. 50 mA)
- Mode 2 : In b), a stable current mode where the average current is low (approx. 25 mA)
- Mode 3 : In b), an unstable current mode where average current is high (approx. 45 mA)

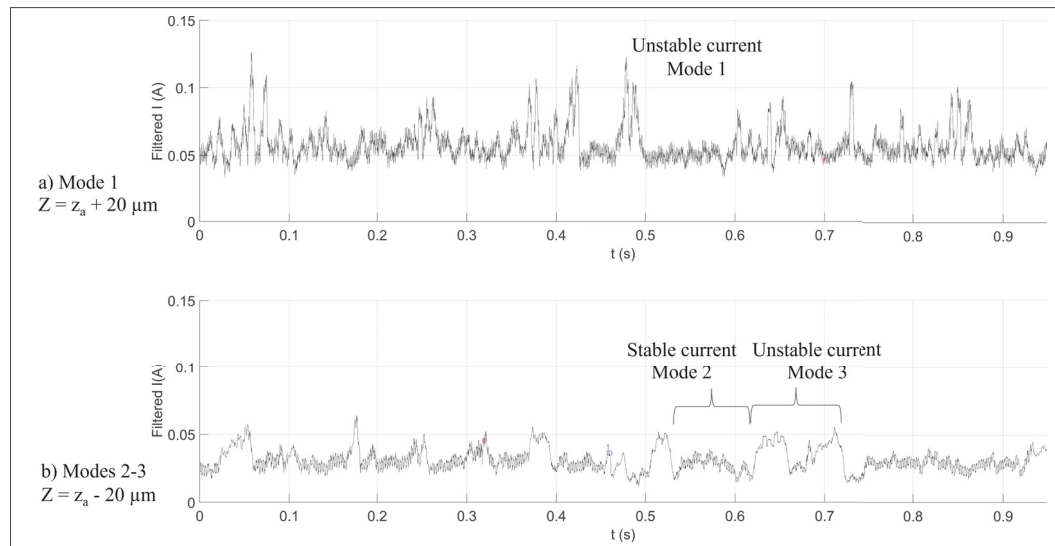


Figure 4.11 Filtered (running average over 2 ms) current during advances at : a) $z_a + 20 \mu\text{m}$ b) $z_a - 20 \mu\text{m}$

Figure 4.12 shows mean currents, including their standard deviations based on $n=6$ experiments for each set, for lateral tool motion at different Z-levels. A clear distinction can be observed between tool positions above z_a , where no machining occurs, and on or below that level ($Z \leq z_a$), where machining occurs ; indeed, a shift of approximately 20 mA can be observed in figure 4.12. The same shift in current of 20 mA also occurs between modes 2 and 3 when machining does

happen, as witnessed in Figure 4.12. This was also observed in literature (Abou Ziki & Wüthrich, 2013) during gravity-feed drilling, where the proposed mechanism for this phenomenon was explained as the occurrence of an upward displacement of the gas film by the tool-workpiece contact (correlated with upward force on the tool), and thus creation of an electrolyte path for current to flow. However, the same phenomenon happens in cases where the tool is not in contact with the workpiece, and in fact too far from it for machining to take place. Hence, it cannot be entirely explained by tool-workpiece contact and further investigation is needed.

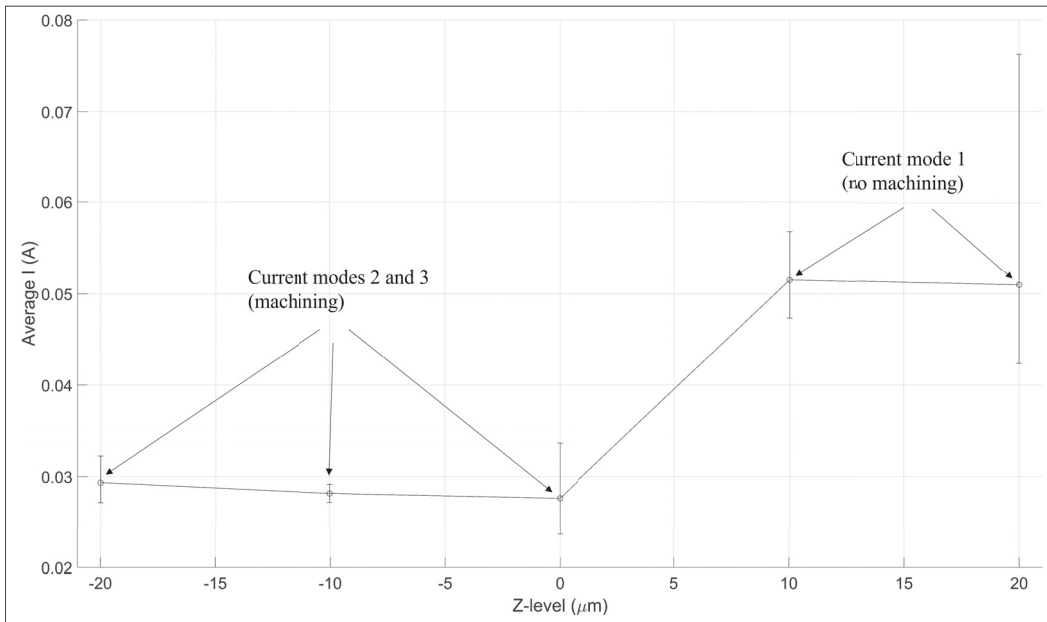


Figure 4.12 Mean current during advances at varying Z-levels around z_a with $F = 20$ mm/min

The calculated durations of modes 2 and 3 were compared for the 18 lateral tool motions (XY-plane) at vertical tool positions $Z \leq z_a$, where machining occurred. Equation 4.1 was used to calculate the mean duration of the current modes, with dm,i the duration of one continuous instance of a specific mode, m the current signal mode (2 or 3) and n the total number of periods of this mode across all lateral tool movements at the given feed rate.

$$\bar{d}_m = \sum_{i=1}^n \frac{d_{m,i}}{n} \quad (4.1)$$

The total percentage of machining that occurred in mode 2 was also calculated. Table 3 presents the results of the introduced variables and specifies the experimental conditions. Despite a much faster alternation between modes at $Z = z_a$, their relative total durations remain very close for a given feed rate. These results suggest that at lower tool Z-levels, the gas film collapses less frequently but takes more time to reform compared to machining at $Z = z_a$. As the relative durations of modes are similar, there is yet no preferred working mode identified.

Tableau 4.3 Average durations of machining modes for different Z-levels during milling at $F = 20$ mm/min

Z-level of tool motion in the X-Y plane	Number of experiments	Mean duration of mode 2	Mean duration of mode 3	Mode 2 duration fraction of total
z_a	6	70	36	66
$z_a - 10$ μ m	6	250	132	65
$z_a - 20$ m	6	207	125	62

4.4.2.3 Current signal during tool advances at varying feed rates

Current signals obtained during SACE experiments for lateral (XY-plane) tool motions at tool position $Z = z_a - 10$ μ m at feed rates $F = 20$ mm/min, $F = 10$ mm/min and $F = 5$ mm/min are presented in Figure 4.13, a, b, and c, respectively. The current modes 2 and 3 can be identified in all signals; however, their relative durations change with feed rate. At $F = 20$ mm/min, approximately 65% of the machining time occurs in mode 2 regardless of Z-level, as shown in Table 3. This ratio decreases to less than 30% at $F = 10$ mm/min and $F = 5$ mm/min; mode 3 is dominant at these lower feed rates. As no direct correlation with MRR could be established so far, further research will be necessary to distinguish the significance of the dominance of one current mode over the other depending on feed rate. It is hypothesized that the SACE process dependence on local solution flow around the tool, influenced by tool velocity, may be a deciding factor for this variation in current mode prevalence depending on feedrate.

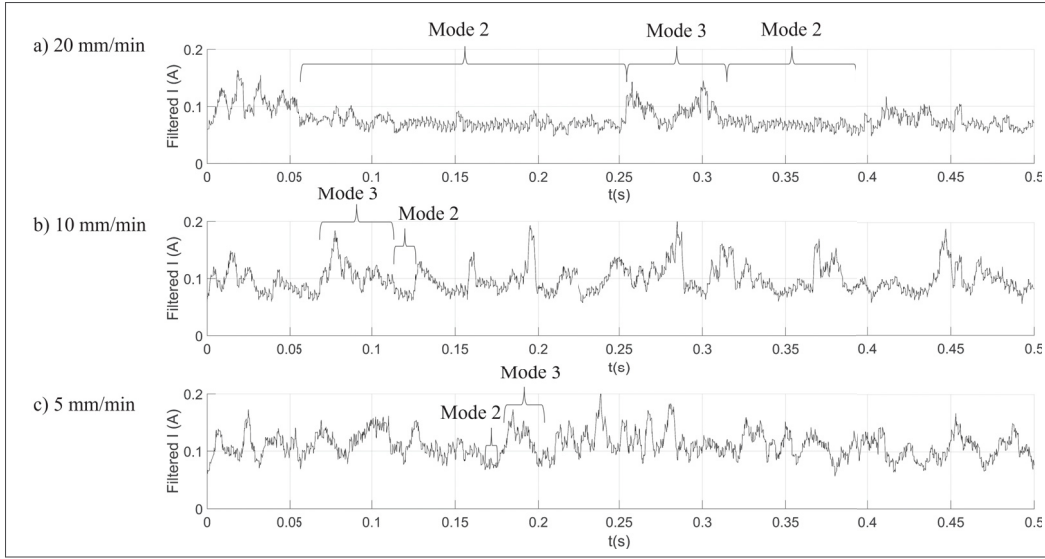


Figure 4.13 Filtered (running average over 2 ms) current signals for milling advances at varying feed rates, tool position $Z = z_a - 10\mu\text{m}$. Some instances of current modes 2 and 3 are indicated

4.4.3 Discussion on current modes in the SACE process

During SACE machining where the tool is within machining distance of the workpiece, i.e. at axial tool positions of $Z \leq z_a$, the current signal alternates between modes 2 and 3. Figure 4.14 shows representative samples of the current signal in these two modes. It can be observed that the signal in mode 2 is uniform, with discharges happening almost exclusively during the applied low-voltage pulses at a duration of $t_{\text{pulse-low}} = 10\mu\text{s}$. In mode 3, uncontrolled wide current spikes with durations of approximately $200\mu\text{s}$ are frequently observed outside the low-voltage pulse durations. The current mode would correspond to the state of the gas film; mode 2 indicates a fully coalesced and stable gas film, where the current flows via arc discharges through the gas provoked by applied low-voltage pulses, while the longer current surges in mode 3 may be due to direct electrical conduction through gaps in the recently collapsed and reforming unstable gas film as described by (Hof & Wüthrich, 2006). (Cheng *et al.*, 2010) showed that the current in the SACE process is composed of electrolysis current and discharge current, with the electrolysis current being undesirable as it does not lead to machining. Current mode 2

could then be described as being mainly composed of discharge current while mode 3 would be mostly electrolysis current as the gas film reforms. That study also revealed that at higher voltages (40V), the gas film is more stable and the current is exclusively due to useful discharges. Considering this finding, a method can be proposed to actively stabilize the gas film by changing the applied voltage, which is discussed in section 4.4.4.

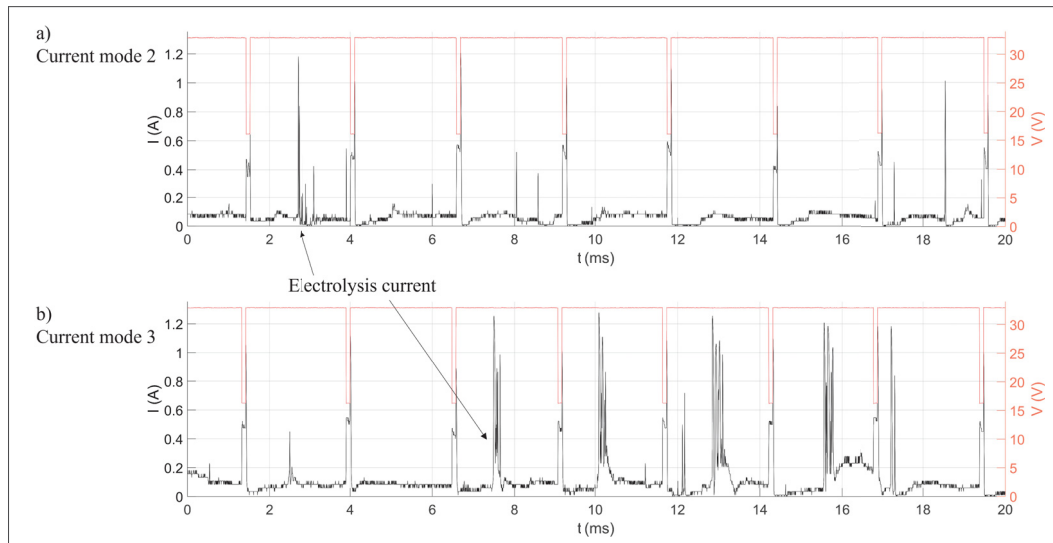


Figure 4.14 Current samples in modes 2 and 3

4.4.4 Towards active control of the gas film with current feedback

It was shown that the current signal can be used to detect the state of the gas film as either stable (mode 2) or unstable (mode 3), with mode 2 being the preferred mode for SACE machining as the discharge current regime is prevalent. It was shown by literature (Cheng *et al.*, 2010) that at higher voltages the gas film forms faster and becomes more stable. However, in other research studies (Hof & Wuthrich, 2021), increasing voltage caused a lower surface quality and a thicker gas film. Considering these SACE process phenomena, a potential method to actively control the gas film is proposed and is illustrated in Figure 4.15. In a first step, while machining at relatively low voltages (e.g., 33V), monitor the process' current signal. When current mode 3 is detected, by a significant rise in the mean filtered current, which indicates a gas film collapse, temporarily

increase the applied voltage (by around 7-10 V) to rapidly reform the gas film and then return to the initial lower machining voltage. In this way, good machining quality can be achieved while having an actively controlled stable gas film.

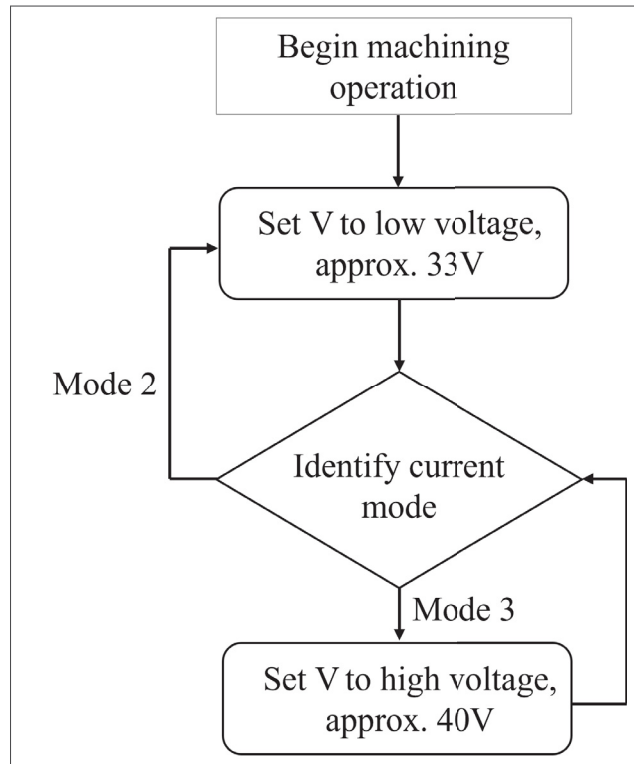


Figure 4.15 Proposed method of stabilizing the gas film through current signal feedback

4.5 Conclusion

An approach for the analysis of current signal during Spark-Assisted Chemical Engraving was presented. The introduction of the arcing height (z_a) as a reference allows no-contact probing of the workpiece with the tool itself, removing the need for lengthy procedures or complex mechanical systems. Possibility for error is reduced as the mechanism for probing is the same as for machining. There is potential for determining initial machining level directly during the tool approach. Methods of characterizing the current signal were identified, paving the way for

future research in active control of the SACE process using the current signal, and reducing complexity of systems required. Findings are, in summary :

1. A characteristic spike in current and visible discharge are consistently observed as the tool approaching the workpiece reaches a certain height, referred to here as the arcing height, z_a , which can be used in probing to define a reference plane. The arcing height is found to be the maximum tool Z-level for which material is machined. A method has been proposed to automatically detect the arcing height during tool approach. Arcing height has been measured to approximately 25 μm above the workpiece surface. Future research concerning probing using the current signal could explore the parameters affecting the arcing height, such as tool geometry, applied voltage and electrolyte concentration.
2. The current signal can exist in 3 different modes depending on sparking activity :
 - Mode 1 is present when the tool is far from the workpiece (above z_a) and is characterized by unstable current and long discharges of more than 500 μs .
 - Mode 2 is very stable, with sparking happening mainly in a controlled manner, synchronous with low-pulses in applied voltage. It is probably indicative of a fully coalesced gas film.
 - Mode 3 can be attributed to instabilities in the gas film and is characterized by long, high average current discharges of approximately 200 μs .
3. During milling, the current alternates between modes 2 and 3 in intervals of 50-300 ms. Duration of mode 2 relative to 3 increases at high feed rate. If this relation can be developed further, it opens up avenues for feedback during the SACE process, the current mode being analysed in real time and corrections applied by either mechanical (e.g. tool retraction) or electrical (e.g. voltage pulses) means. In order for such control to be possible, additional research must be done regarding ways to rapidly influence the current mode.

4.6 References

Les références citées dans cet article sont présentées à la fin de ce mémoire.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce projet de recherche était l'amélioration du procédé SACE par la création d'une méthode de palpation et rétroaction par mesure du courant électrique. Pour ce faire, deux machines capables d'usiner le verre par SACE ont été conçues et fabriquées. Les capacités d'usinage SACE ont été testées. Finalement, des avancées ont été faites dans l'analyse du signal de courant électrique lors du procédé SACE.

Pour la première machine, de haute précision, un boîtier de contrôle a été fabriqué et testé. Une banque de fonctions en langage TCL permettant l'application de diverses stratégies d'usinage a été programmée et validée. Un système de a été implémenté pour contrôler le déplacement vertical auxiliaire de l'électrode-outil. Finalement, un module AutoCAD a été programmé afin de générer des trajectoires d'outil sous forme de splines Catmull-Rom.

La seconde machine a été convertie à partir d'une fraiseuse de bureau à commande numérique. Les sous-systèmes de base ont été ajoutés permettant l'usinage SACE. La précision des déplacements a été testée et améliorée à l'aide de pièces imprimées 3D. Des tests d'usinage de base ont été accomplis.

Finalement, une étude scientifique traitant du signal de courant lors du SACE a été accomplie et soumise à un journal scientifique. Les principales trouvailles de cet article sont :

- Il est possible d'effectuer un palpation sans contact en identifiant un pic dans le courant ;
- Les décharges autour de l'électrode-outil peuvent être analysées afin de déterminer l'état du film gazeux ;
- Il serait possible d'utiliser ce dernier fait pour contrôler en temps réel l'état du film gazeux et ainsi améliorer la répétabilité de l'usinage.

À la lumière de ce dernier point, les étapes suivantes à considérer concernent le développement futur du contrôle du SACE par rétroaction sur le courant électrique. Le phénomène de variation

de l'état du film gazeux pourra être mieux quantifié en relation avec d'autres paramètres. Par la suite, un algorithme de contrôle pourrait être conçu et testé, ce qui fera l'objet d'études futures.

ANNEXE I

BANQUE DE FONCTIONS D'USINAGE SACE POUR LE CONTRÔLEUR XPS-D

La banque de fonctions SACE en langage TCL est disponible sur la plateforme Github :

[https ://github.com/guvil-ets/XPS-D-SACE](https://github.com/guvil-ets/XPS-D-SACE)

BIBLIOGRAPHIE

- About Ziki, J. (2014). *Spark Assisted Chemical Engraving : A Novel Approach for Quantifying the Machining Zone Parameters Using Drilling Forces*. (Thèse de doctorat, Concordia University, Montréal, Québec, Canada).
- About Ziki, J. & Wüthrich, R. (2013). Forces exerted on the tool-electrode during constant-feed glass micro-drilling by spark assisted chemical engraving. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 73, 47-54. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.06.008>.
- About Ziki, J. & Wüthrich, R. (2021). Effect of Machining Limiting Factors on Drilling Progress during Spark Assisted Chemical Engraving (SACE) : General Trends. *Ceramics*, 4, 618-627. doi : 10.3390/ceramics4040044.
- Bagolini, A., Ronchin, S., Bellutti, P., Chistè, M., Verotti, M. & Belfiore, N. P. (2017). Fabrication of Novel MEMS Microgrippers by Deep Reactive Ion Etching With Metal Hard Mask. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(4), 926-934. doi : 10.1109/JMEMS.2017.2696033.
- Basak, I. & Ghosh, A. (1996). Mechanism of spark generation during electrochemical discharge machining : a theoretical model and experimental verification. *Journal of Materials Processing Technology*, 62, 46-53.
- Bourhis, E. L. (2014). *Glass : Mechanics and Technology* (éd. 1). Weinheim, Germany : Wiley-VCH.
- Bovatsek, J. & Patel, R. S. (2022). DPSS Lasers Overcome Glass Process Challenges [En ligne]. Repéré à <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=51733&PID=5&VID=100&IID=631>.
- Brooks, J. (1975). *Glass*. Sampson Low. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=K1sRAQAAMAAJ>.
- Bullen. (2022). ULTRASONIC MACHINING [En ligne]. Repéré à <https://www.bullentech.com/ultrasonic-machining/>.
- Catmull, E. & Rom, R. (1973). A class of local interpolating splines. Dans *Computer Aided Geometric Design* (pp. 317-326). University of Utah, Salt Lake City, USA : Academic Press.
- Chang, W.-Y. & Hsihe, Y.-S. (2016). Multilayer microheater based on glass substrate using MEMS technology. *Microelectronic Engineering*, 149, 25-30.

- Chavoshi, S. Z. & Luo, X. (2015). Hybrid micro-machining processes : A review. *Precision Engineering*, 41, 1-23. doi : <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.03.001>.
- Chen, Q., Fang, J., Hai-Feng, J. & Varahramyan, K. (2008). Isotropic etch for SiO₂ microcantilever release with ICP system. *Microelectronic Engineering*, 80, 500-507.
- Cheng, C.-P., Kun-Ling Wu, Mai, C.-C., Yang, C.-K., Hsu, Y.-S. & Yan, B.-H. (2010). Study of gas film quality in electro chemical discharge machining. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 50, 689-697.
- Chien, C. H. (2013). *Performance and process characteristic of glass interposer with through-glass-via(TGV)*. Communication présentée à 2013 IEEE International 3D Systems Integration Conference (3DIC), San Francisco, CA, USA.
- D. Abou Ziki, J., Hof, L. & Wuthrich, R. (2015). The machining temperature during Spark Assisted Chemical Engraving of glass. *Manufacturing Letters*, 3, 9-13.
- Dae-Jin, K., Yoomin, A., Seoung-Hwan, L. & Yong-Kweon, K. (2006). Voltage pulse frequency and duty ratio effects in an electrochemical discharge microdrilling process of Pyrex glass. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 1064-1067.
- Delmdahl, R. & Paetzel, R. (2014). Laser Drilling of High-Density Through Glass Vias (TGVs) for 2.5D and 3D Packaging. *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 21, 53-57. doi : 10.6117/kmeps.2014.21.2.053.
- Didar, T. F., Dolatabadi, A. & Wüthrich, R. (2008). Characterization and modeling of 2D-glass micro-machining by spark-assisted chemical engraving (SACE) with constant velocity. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18.
- Falise, J. (2020). *Conception d'une plateforme de recherche utilisant le procédé SACE*. (Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Montréal, QC).
- Fascio, V., Wüthrich, R. & Bleuler, H. (2004). Spark assisted chemical engraving in the light of electrochemistry. *Electrochimica Acta*, 49(22), 3997-4003. doi : <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2003.12.062>. The role of electrochemistry in the sustained development of modern societies.
- Goel, S. (2014). The current understanding on the diamond machining of silicon carbide. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 47(24), 243001. doi : 10.1088/0022-3727/47/24/243001.
- Hall, C. A. & Meyer, W. (1976). Optimal error bounds for cubic spline interpolation. *Journal of Approximation Theory*, 16(2), 105-122. doi : [https://doi.org/10.1016/0021-9045\(76\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0021-9045(76)90040-X).

- Ho, C.-C. & Chen, J.-C. (2020). Micro-Drilling of Sapphire Using Electro Chemical Discharge Machining. *Micromachines*, 11. doi : doi.org/10.3390/mi11040377.
- Hof, L. (2018). *High-precision micro-machining of glass for mass-personalization*. (Thèse de doctorat, Concordia University, Montréal, Québec, Canada).
- Hof, L. & Abou Ziki, J. (2017). Micro-Hole Drilling on Glass Substrates—A Review. *Micromachines*, 53(8), 1-23. doi : 10.3390/mi8020053.
- Hof, L. & Wüthrich, R. (2006). The gas film in spark assisted chemical engraving (SACE)—A key element for micro-machining applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 828-835.
- Hof, L. & Wüthrich, R. (2018). Glass micro-cutting by Spark Assisted Chemical Engraving. CSME International Congress.
- Hof, L. A. & Wuthrich, R. (2021). Glass precision micro-cutting using spark assisted chemical engraving. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 3, 100056. doi : <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100056>.
- Hwang, D., Choi, T. & Grigoropoulos, C. (2004). Liquid-assisted femtosecond laser drilling of straight and three-dimensional microchannels in glass. *Appl. Phys. A*, 79, 605-612. doi : <https://doi.org/10.1007/s00339-004-2547-8>.
- Hwang, J., Hak Cho, Y., Park, M. S. & Kim, B. H. (2019). Microchannel Fabrication on Glass Materials for Microfluidic Devices. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20, 479-495. doi : <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00103-2>.
- Iliescu, C., Chena, B. & Miao, J. (2008). On the wet etching of Pyrex glass. *Sensors and Actuators*, (143), 154-161.
- Jain, V., Dixit, P. & Pandey, P. (1999). On the analysis of the electrochemical spark machining process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 165-186.
- Jeon, S. (2021). GRBL [Logiciel]. Repéré à <https://github.com/grbl/grbl>.
- Ji, R., Liu, Y., Zhang, Y., Cai, B., Li, X. & Zheng, C. (2013). Effect of machining parameters on surface integrity of silicon carbide ceramic using end electric discharge milling and mechanical grinding hybrid machining. *J Mech Sci Technol*, 27, 177-183. doi : 10.1007/s12206-012-1215-8.

- Kang, X., Tang, W., Zhao, W., Qian, J. & Lauwers, B. (2021). Experimental and numerical investigations of material removal process in electrochemical discharge machining of glass in discharge regime. *Precision Engineering*, 72, 706-716.
- Kim, D.-J., Ahn, Y., Leeb, S.-H. & Kim, Y.-K. (2006). Voltage pulse frequency and duty ratio effects in an electrochemical discharge microdrilling process of Pyrex glass. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(10), 1064-1067.
- Kolhekar, K. & Sundaram, M. (2019). A multiphase simulation study of electrochemical discharge machining of glass. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 1597–1608. doi : <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04318-5>.
- Kowsari, K., Nouhi, A., Hadavi, V., Spelt, J. & Papini, M. (2017). Prediction of the erosive footprint in the abrasive jet micro-machining of flat and curved glass. *Tribology International*, 106, 101-108.
- Kurafuji, H. (1968). Electrical discharge drilling of glass. *CIRP Ann.*, 16, 415-419.
- Laakso, M. J., Bleiker, S. J., Liljeholm, J., Mårtensson, G. E., Asiatici, M., Fischer, A. C., Stemme, G., Ebefors, T. & Niklaus, F. (2018). Through-Glass Vias for Glass Interposers and MEMS Packaging Applications Fabricated Using Magnetic Assembly of Microscale Metal Wires. *IEEE Access*, 6, 44306-44317. doi : [10.1109/ACCESS.2018.2861886](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2861886).
- Lachhman, S., Zorman, C. & Ko, W. (2012). Multi-layered poly-dimethylsiloxane as a non-hermetic packaging material for medical MEMS. *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 1655-1658. doi : [10.1109/EMBC.2012.6346264](https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6346264).
- Langpoklakpam, C., Liu, A.-C., Chu, K.-H., Hsu, L.-H., Lee, W.-C., Chen, S.-C., Sun, C.-W., Shih, M.-H., Lee, K.-Y. & Kuo, H.-C. (2022). Review of Silicon Carbide Processing for Power MOSFET. *Crystals*, 12(2). doi : [10.3390/cryst12020245](https://doi.org/10.3390/cryst12020245).
- Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A. E., Neugebauer, R. & McIntosh, D. (2014). Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals*, 63(2), 561-583. doi : <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.003>.
- Li, X., Abe, T., Liu, Y. & Esashi, M. (2002). Fabrication of high-density electrical feed-throughs by deep-reactive-ion etching of Pyrex glass. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(6), 154-161.
- Manoharan, V., Tamilperuvalathan, S., Natarajan, E. & Ponnusamy, P. (2022). Experimental Investigation on Electrochemical Discharge Machining of Zirconia. *Recent Advances in Manufacturing, Automation, Design and Energy Technologies*, pp. 27-34.

- Margaryan, A. (1999). *Ligands and Modifiers in Vitreous Materials : Spectroscopy of condensed Systems*. Singapore : World Scientific. doi : <https://doi.org/10.1142/4124>.
- Marposs. (2022). TECHNOLOGIES - TOUCH PROBES [En ligne]. Repéré à <https://www.marposs.com/eng/application/technologies-touch-probes>.
- Matweb. (2022). Matweb : material property data [En ligne]. Repéré à <https://www.matweb.com>.
- Newport. [Accédé le : 2022-11-17]. (2022). Motorized Linear Stage. Repéré à <https://www.newport.com/p/ILS150CC>.
- Nguyen, V. T., Masaya, T. & Takahito, O. (2016). An investigation of processes for Glass Micromachining. *Micromachines*, 51(7).
- Nielsen, J. B., Hanson, R. L., Almughamsi, H. M., Pang, C., Fish, T. R. & Woolley, A. T. (2019). Microfluidics : Innovations in Materials and Their Fabrication and Functionalization. *Analytical Chemistry*, 92, 150-168.
- Okazaki, K. (2011). Sub-wavelength micromachining of silica glass by irradiation of CO2 laser with Fresnel diffractions. *Applied Physics A : Materials Science and Processing*, (104), 593-599.
- OpenStax. (2022). Crystalline vs. amorphous [En ligne]. Repéré à https://cnx.org/contents/RTmuIxzM@9.17:BNqzNiAn@9/The-Solid-State-of-Matter?minimal=true#CNX_Chem_10_05_BoronOxide.
- Park, B., Choi, Y. & Chu, C. (2002). Prevention of exit crack in micro drilling of soda-lime glass. *CIRP Annals*, 51(1), 347-350.
- Parks, G. (1925). *J. Amer. Chem. Soc.*, 47, 338.
- Pawar, P., Ballav, R. & Kumar, A. (2017). Machining Processes of Silicon Carbide : a Review. *Rev.Adv.Mater.Sci.*, 51, 62-76.
- Posa, V. V. & Sundaram, M. (2020). Experimental Study of Micromachining on Borosilicate Glass Using CO2 Laser. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(5). doi : 10.1115/1.4048639. 051007.
- Prime Faraday. (2002). *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)* (Rapport n°ISBN 1-84402-020-7). Loughborough University, Loughborough, Leics LE11 3TU.

- Rajput, V., Goud, M. & Mohan Suri, N. (2020). *Performance Analysis of ECDM Process Using Surfactant Mixed Electrolyte*. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. Springer, Singapore.
- Rashedul, I., Zhang, Y., Zhou, K., Wang, G., Xi, T. & Ji, L. (2021). Influence of Different Tool Electrode Materials on Electrochemical Discharge Machining Performances. 12. doi : doi.org/10.3390/mi12091077.
- Roditi. [Accédé le : 2022-01-16]. (2022). Sapphire Properties. Repéré à <http://www.roditi.com/SingleCrystal/Sapphire/Properties.html>.
- S. K. Jui, A. B. K. & Sundaram, M. M. (2022). High aspect ratio micromachining of glass by electrochemical discharge machining (ECDM). *Journal of Manufacturing Processes*, 15, 460-466.
- Sambathkumar, S. & Arunagirinathan, R. S. (2021). Fabrication of micro-mechanical planar cantilever beam-mass structures on quartz substrates using an ECDM process. *Journal of Engineering Manufacture*, 236, 1-12.
- Sambathkumar, S. & Arunagirinathan, R. S. (2022). A Simple Technique for the Precise Establishment of the Working Gap in an Electrochemical Discharge Machining Process and Some Experimental Results Thereof. *micromachines*, 13(9), 1367.
- Schmelzer, J., Gutzow, I., Mazurin, O., Priven, A., Todorova, S. & Petroff, B. (2011). *Glasses and the Glass Transition*. doi : 10.1002/9783527636532.refs.
- Singh, T. (2022). A review on microholes formation in glass-based substrates by electrochemical discharge drilling for MEMS applications. *Machining Science and Technology*, 26(2), 150-168.
- Singh, T. & Dvivedi, A. (2016). Developments in electrochemical discharge machining : A review on electrochemical discharge machining, process variants and their hybrid methods. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 105, 1-13.
- Singh, T. & Dvivedi, A. (2021). Fabrication of micro holes in Yttria-stabilized zirconia (Y-SZ) by hybrid process of electrochemical discharge machining (ECDM). *Ceramics International*, Corrected proof, Corrected proof. doi : <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04318-5>.
- Soni, D., Gidwani, B. D. & Shringi, R. (2022). *Effect of Different Machining and Non-machining Parameters on Machining Performance of Electrochemical Discharge Machining (ECDM) : A Review*. Communication présentée à Advances in Manufacturing Engineering, Singapore.

- Takahashi, S., Horiuchi, K., Tatsukoshi, K., Ono, M., Imajo, N. & Mobely, T. (2017). Development of through glass via (TGV) formation technology using electrical discharging for 2.5/3D integrated packaging. *2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, pp. 348-352.
- Torabi, A. & Razfar, M. R. (2021). The capability of ECDM in creating effective microchannel on the PDMS. *Precision Engineering*, 68, 10-19.
- Tseng, A. A., Chen, Y.-T., Chao, C.-L., Ma, K.-J. & Chen, T. (2007). Recent developments on microablation of glass materials using excimer lasers. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(10), 975-992. doi : <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.04.003>.
- Villeneuve, G. & Hof, L. (2021). *SACETraj : An AutoCAD Catmull-ROM Spline Trajectory Interpolator*. Manuscript soumis pour publication.
- Wright, N. G. & Horsfall, A. B. (2007). SiC sensors : a review. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 40, 6345. doi : 10.1088/0022-3727/40/20/S17.
- Wuthrich, R., Spaelter, U. & Bleuler, H. (2006). The current signal in spark-assisted chemical engraving (SACE) : what does it tell us ? *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16.
- Wuthrich, R. (2009). *Micromachining Using Electrochemical Discharge Phenomenon : Fundamentals and Application of Spark Assisted Chemical Engraving*. NY, USA : W. Andrew.
- Wuthrich, R., Hof, L. A., Abou Ziki, J., Cusanelli, G. & Thibaut, P. (2016). *Brevet international n°WO2017064583A1*. Rue Fritz-Opplinger 18, 2504 Bienne (CH) : World Intellectual Property Organization.
- Wüthrich, R., Spaelter, U., Wu, Y. & Bleuler, H. (2006). A systematic characterization method for gravity-feed micro-hole drilling in glass with spark assisted chemical engraving (SACE). *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16(9), 1891. doi : 10.1088/0960-1317/16/9/019.
- Wüthrich, R. & Hof, L. (2018). *SACE TCL Library*.
- Yadav, S. K., Singh, A. & Debnath, K. (2022). Investigation of machining characteristics during micro-hole fabrication in CFRP composite by ECDM process. *Engineering Research Express*, 4(3).

- Zhao, D., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, K. X. J., Dai, X. & Huang, L. (2022). Influence of electrochemical discharge machining parameters on machining quality of microstructure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 841-854.
- Zhu, J., Liu, X., Shi, Q., He, T., Sun, Z., Guo, X., Liu, W., Sulaiman, O. B., Dong, B. & Lee, C. (2020). Development Trends and Perspectives of Future Sensors and MEMS/NEMS. *Micromachines*, 11(1). Repéré à <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/1/7>.
- Ziki, J. A. & Wüthrich, R. (2015). The machining gap during constant velocity-feed glass micro-drilling by Spark Assisted Chemical Engraving. *Journal of Manufacturing Processes*, 19, 87-94.