

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTÉGRATION INDUSTRIELLE DE LA MÉTHODE D'ÉCRITURE DIRECTE
D'ENCRE POUR LA DISSIPATION THERMIQUE DE COMPOSANTS
ÉLECTRONIQUES

RAMZI BEY-OUESLATI
DEPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INFORMATIQUE)
MAI 2007

© Ramzi Bey-Oueslati, 2007.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-35666-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-35666-1

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

INTÉGRATION INDUSTRIELLE DE LA MÉTHODE D'ÉCRITURE DIRECTE
D'ENCRE POUR LA DISSIPATION THERMIQUE DE COMPOSANTES
ÉLECTRONIQUE

présenté par : BEY-OUESLATI Ramzi

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BOUDREAU YVES, Ph.D., président

M. MARTEL SYLVAIN, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PETER YVES ALAIN, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je suis convaincu que cette maîtrise est le meilleur investissement en temps que j'ai fait dans ma vie, non pas pour le diplôme que j'ai obtenue mais pour tout ce que j'y ai appris. Alors, comment ne pas commencer par remercier la personne qui m'a confié ce projet, le directeur de notre laboratoire Sylvain Martel. Un homme et un chercheur hors de l'ordinaire, toujours positif, débordant d'imagination et qui se donne à fond pour son école, son laboratoire et ses étudiants. Pour ta confiance, tes encouragements et ton support, merci Sylvain.

J'aimerais aussi remercier mon co-directeur, enfin... mon co-directeur virtuel. Daniel Therriault, j'ai toujours eu l'impression de faire partie de ton équipe, aussi bien durant nos discussions dans ton bureau que dans ton laboratoire. Merci pour ton aide, ton support et tes conseils.

Les membres du jury méritent également ma reconnaissance, soit M. Yves Boudreault et M. Yves Alain Peter pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je me dois de remercier ma famille pour avoir toujours été là lorsque j'en avais besoin. Merci à ma petite sœur, à mes frères et évidemment à mes parents qui ont toujours souhaité mon bonheur quelque soit mes choix. Pour votre compréhension, particulièrement ces deux dernières années et pour n'avoir jamais questionné mes horaires de travail, merci.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mes collègues et amis du Laboratoire de NanoRobotique tout d'abord pour leur disponibilité permanente qui permet le partage

des expertises si utile dans les projets multidisciplinaires mais aussi pour le plaisir de travailler avec des personnes aussi formidables. Je tiens particulièrement à remercier certains d'entre eux. Ouajdi Felfoul, mon ami qui m'a entraîné dans cette aventure. Merci pour ton écoute et l'aide que tu m'as apportés ces dernières années. Jean-baptiste Mathieu, mon voisin de bureau et celui qui m'a tout appris dans l'art de l'usinage. Je ne peux qu'exprimer mes regrets pour toutes les pièces que j'ai brisées et aussi d'avoir repeint notre machine shop. Merci à Arnaud Chanu pour toutes ces discussions franche, amicale et réciproque qui ont su détendre notre atmosphère de travail. À Mahmoud Mohammadi, Neila Kaou, Kwang Soo Kim, Charles C. Tremblay, Martin Mankiewicz , Pascal Hannoyer, Éric Abousayan, Zhao Lu, Pierre Pouponneau, Samer Tamaz, Jawad El-Fouladi, Béchara Moufarrej, Maud El-Hachem ainsi que mes collègues de nuit Walder André et Anh Tuan Nguyen merci à vous tous, pour votre professionnalisme et aussi pour avoir su installer une ambiance de travail dynamique et agréable.

J'ai également eu la chance durant ce projet de travailler en étroite collaboration avec de nombreux étudiants d'autres laboratoires de recherche. Le travail d'équipe est un aspect essentiel de la recherche et permet également de se sentir moins seul à affronter les problèmes du monde. C'est pourquoi je voudrais sincèrement remercier tous mes collaborateurs du laboratoire d'écriture directe et du laboratoire de matériaux composites de McGill. Je tiens particulièrement à exprimer ma gratitude à Samy Joseph Palm pour avoir toujours pris le temps de m'aider et pour le transfert de connaissance et d'expertise qu'il n'a jamais hésité à faire tout au long de ma maîtrise.

Je ne voulais pas au départ remercier chacun de mes amis, mais tant pis. C'est probablement la seule section de ce document que vous allez lire et comprendre, et si il y a quelque chose d'important après la famille c'est bien les amis qu'on a choisis. Merci à Mohamed Kawssan, Mohamed Nasser et Rabih Saleh les trois autres étudiants restant dans le groupe et également les principaux acteurs de Wasaga 2003. Étudier ces dernières années avec vous aura rendu l'activité moins pénible. À Kalil, mon mécano semi retraité de 27 ans, merci d'avoir mis un peu d'aventure dans ma vie ces deux dernière années. Tu m'aura appris que le meilleur moment de faire disparaître quelque chose c'est en plein jour et non pas au milieu de la nuit. Mike, mon ami et comptable, au-delà de mes rapports d'impôts, tu aura toujours su tourner au ridicule les situations de la vie si bien que je ne sais plus si ça se "maîtrise" vraiment. À Hassoun, d'aussi longtemps que je me souviens tu as toujours été là pour moi, ça fait plus de 20 ans que tu m'encourages et me conseille, merci vieux. Ted, le pire coéquipier de "rough" avec qui j'ai jamais joué, j'ai souvent envisagé de devenir joueur professionnel mais grâce à toi et à nos cuisante défaites j'ai plutôt opté pour l'ingénierie. À Chak, cet homme énigmatique que l'on craint et respecte, merci grand frère pour ton support toutes ces années. Merci à tous mes amis du DD University, spécialement Carlo qui a passé plusieurs heures à m'aider dans mes rédactions en anglais. À Rami, Rocky, Ania, Dom, Shady, Khaled, Heba, Nice, Jamal, Suhana, Nadine et à ceux que j'oublie, encore mille fois merci.

RÉSUMÉ

Le présent mémoire de maîtrise porte sur l'intégration d'une technique de fabrication de microcanaux cylindriques par écriture directe à des fins industrielles. Cette technique consiste à extruder une encre fugitive organique à travers l'embout d'une aiguille sous pression constante. Cette extrusion est combinée à une déposition robotisée multi-niveaux sur un substrat. L'encre ainsi déposée permet la création de structures de formes géométriques complexes. Une plateforme de déplacement de haute performance a été développée afin d'adapter cette technique de microfabrication aux cadences de production de l'industrie électronique. Cette plateforme et l'architecture logicielle développée qui l'accompagne permettent l'écriture de réseau bidimensionnel (2D) et tridimensionnel (3D) de micro canaux à haute vitesse tout en conservant de bonnes précisions de positionnement. Considérant les facteurs de déposition géométrique, le diamètre interne de l'aiguille et la viscosité de l'encre, ce processus d'écriture directe est habituellement effectué à des vitesses variant de 1 à 10 mm/s. La plateforme robotisée développée a permis la fabrication de structures 3D (200 μm de diamètre) à des vitesses atteignant 88 mm/s. Pour démontrer le potentiel de cette plateforme, les micro-filaments déposés ont été caractérisés par profilomètre laser et microscopie optique. De plus, ces structures ont été infiltrées avec une résine époxy et l'encre a été retirée pour créer des composantes micro-fluidiques 3D.

La première application visée par cette méthode est l'utilisation des microcanaux pour la dissipation de chaleur des composantes microélectronique. L'intégration des

microsystèmes de refroidissement à de réels composants microélectronique reste problématique étant donné l'incompatibilité des procédés de fabrication et des matériaux utilisés. La minimisation de la résistance thermique entre la source de chaleur et le système de refroidissement est le plus grand enjeu dans ce domaine de recherche. Ce nouveau procédé de fabrication qu'est l'écriture directe d'encre permet quant à lui une intégration directement sur la région à refroidir. De ce fait, un système de positionnement laser a été intégré à la plateforme de déposition. Ce système permet d'acquérir la topologie d'une surface pour ensuite effectuer la déposition en trois dimensions. Ainsi, l'intégration de cette technologie sur les circuits intégrés ou sur les cartes de circuits imprimées devient possible et permet la minimisation de la résistance thermique.

Par la suite, l'intégration de cette technique de microfabrication à l'intérieur des cartes de circuits imprimées (PCB) a été explorée. Des microcanaux de diamètre hydraulique de 200 μ m à 500 μ m ont été fabriqués à l'intérieur de cartes de circuits imprimés de quatre couches de cuivre. Des circuits internes ont été gravés et des vias thermiques et électriques ont été ajoutés aux prototypes par électrodéposition. Des microtubes ont été ajoutés aux PCB afin de tester ces systèmes en tant que microéchangeur de chaleur. Ces tests thermiques sur les canaux de 500 μ m montrent une dissipation de chaleur jusqu'à 6W avec des débits de quelques millilitres par minute.

Les résultats montrent que cette technique de microfabrication et la plateforme de déposition développées sont prometteuses pour la fabrication rapide de dispositifs microfluidiques 3D et son intégration pour les applications de dissipation de chaleur.

ABSTRACT

The present report relates to the adaptation of a microfabrication technique for industrial purposes. This technique enables the fabrication of cylindrical microchannels by directed assembly. The directed assembly consists of the extrusion of a fugitive organic ink through a micro nozzle under constant pressure combined with a layer-by-layer robotic deposition on a substrate. The deposited ink network enables the creation of geometrically complex structures. A multi-axis motion platform has been developed in order to adapt this technique to rapid fabrication. This platform and custom-made software enable the writing of two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) ink networks at a high velocity and accurate positioning. Considering the deposition pattern, nozzle diameter and ink viscosity, the process of direct writing is usually accomplished at speeds ranging from 1mm/s to 10mm/s. The high-speed robotic platform presented here enhanced the deposition speed of three-dimensional microchannels (200 μ m of diameter) structures reaching a velocity of 88mm/s. To demonstrate the potential of this robotic platform, the microfilaments deposited were characterized by laser scanning profilometry and optical microscopy. The ink structures have been embedded in an epoxy and subsequently removed to create 3D microfluidic components.

The first application that is being investigated for this platform is the use of micro heat pipes (MHPs) over printed circuit boards (PCBs). The MHPs are manufactured directly on microelectronic devices for efficient thermal coupling with the heat source. A scanning system has been integrated to the robotic platform to allow the acquisition of

the surface topology prior to the deposition of microchannel networks over populated PCBs.

Another application investigated is the fabrication of micro heat exchangers using directed assembly. This active cooling approach requires the integration of microfluidic structures near the heat sources of the electronic devices. Therefore, cylindrical microchannels of 200 μm and 500 μm in diameter are fabricated inside the printed circuit board layouts. The thermal performance of a device with 500 μm channels was characterized with respect to the fluid flow rate. The results reached a heat dissipation of 5W, with flow rates as low as 3ml/min.

The developed robotic platform and the original fabrication and integration approaches presented here show promise for efficient, compact, and low-cost micro heat solutions for the electronics industry.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vii
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xix
LISTE DES ANNEXES	xx
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	6
1.1 Les microcaloducs	6
1.2 Les microéchangeurs de chaleur	12
1.3 L'écriture directe	14
CHAPITRE 2 PLATEFORME DE DÉPOSITION	17
2.1 Robot manipulateur	18
2.1.1 Contraintes de positionnement	19
2.1.2 Configurations robotiques	21
2.1.3 Mécanisme de déplacement	23
2.1.4 Axes de déplacement et configuration de la plateforme	24
2.2 Structures de support de la plateforme	27

2.3 Système d'extrusion	29
2.4 Système d'acquisition de surface	30
2.5 Support de déposition et d'acquisition	34
2.6 Interconnexion du système	35
CHAPITRE 3 ARCHITECTURE LOGICIELLE ET INTÉGRATION	37
3.1 Description de l'environnement informatique de la plateforme de positionnement	37
3.2 Choix de conception logicielle	39
3.2.1 Langage de programmation	39
3.2.2 Modèle de programmation	39
3.3 Interfaces utilisateur	41
3.3.1 Conception des microstructures	41
3.3.2 Interface de contrôle de la plateforme de déposition	42
3.4 Classes du programme d'acquisition et d'écriture sur des surfaces complexes	46
3.4.1 Classe CMHPDlg	46
3.4.2 Classe CMSFlexGrid	46
3.4.3 Classe C3DModel et COpenGLWnd	47
3.4.4 Classe CBSpline	47
3.4.5 Classe CLaserControl	47
3.4.6 Classe CStageControl	47
3.4.7 Classe CDispenserControl	48

3.5 Diagramme de classe.....	48
3.6 Traitement des trajectoires de déposition et la paramétrisation de courbes.....	49
3.6.1 Algorithme B-Spline	50
3.7 Processus de déposition.....	52
3.8 Processus d'acquisition de surface.....	53
3.9 Validation et tests logiciel	54
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION	56
4.1 L'écriture à haute vitesse	56
4.2 L'écriture sur des surfaces complexes	58
4.3 L'intégration des microcanaux dans les PCB	63
4.4 La fabrication de microcaloducs à section triangulaire.....	64
4.4.1 Procédure de fabrication d'un microcanal de section triangulaire.....	64
4.4.2 Les rangées de microcaloducs triangulaires	66
4.4.3 Procédure de remplissage et de scellage des microcaloducs.....	67
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	69
RÉFÉRENCES.....	72
ANNEXES	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Tableau récapitulatif de quelques géométries de microcaloducs présents dans la littérature et de leur procédé de fabrication.	8
Tableau 2.1 : Tableau récapitulatif des dépositions avec le type d'encre, le diamètre des filaments, l'instrumentation utilisée et les vitesses de dépositions.....	18
Tableau 2.2 : Les axes de positionnement et leur principales spécificité.	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Principe de fonctionnement d'un caloduc.....	6
Figure 1.2 : Schémas d'un réseau de microcaloducs en silicium (tirée de [9]).	9
Figure 1.3 : Étapes de fabrication d'un système de microcaloducs compatible CMOS (tirée de [10]).	10
Figure 1.4 : Illustration du principe de fonctionnement d'un système	11
Figure 1.5 : Diagramme décrivant la structure et la position relative du ventilateur, du radiateur, du système de microcaloducs et du boîtier électronique (tirée de [12]).	12
Figure 1.6 : (a) Schéma d'un microéchangeur de chaleur intégré sur un circuit intégré. (b) Microcanaux en PDMS (gauche) et moule de fabrication (droite) (tirée de [19]).	13
Figure 1.7 : Schéma d'un robot de déposition (tirée de [22]) et illustration des étapes du processus de fabrication de composantes microfluidiques tridimensionnelles périodiques: a) déposition d'une encre organique à travers l'embout d'une microaiguille; b) déposition multi niveaux en incrémentant la position verticale de la seringue; c) infiltration du réseau par une époxy; d) polymérisation de l'époxy; e) extraction de l'encre (tirée de [29]).	16
Figure 2.1 : Plateforme de déposition.	17
Figure 2.2 : J2200, Fisnar. (www.ijfisnar.com)	20

Figure 2.3 : Configuration des robots industriels: (a) Cartésienne; (b) Cylindrique; (c) Sphérique; (d) Articulé; (e) SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm); (f) Portique [32].	21
Figure 2.4 : Déposition d'un filament de 200 μ m de diamètre avec le J2200 de Fisnar à des vitesses de déplacement de : (a) 10mm/s ; (b) 20mm/s ; (c) 30mm/s.	23
Figure 2.5 : (a) Configuration des axes de positionnement horizontaux (X, Y);	25
Figure 2.6 : Erreur de positionnement des trois axes durant un déplacement simultané à 88mm/s.	27
Figure 2.7 : Structure en granit pour le supports des axes de positionnement.	28
Figure 2.8 : Système électropneumatique Ultra 2400 et valve multiplicatrice HP7x (www.efd-inc.com).	30
Figure 2.9 : Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement à triangulation laser.	32
Figure 2.10 : (a)Support des dispositifs de d'écriture et d'acquisition de profil et (b) la détermination du centre de masse de l'ensemble du système déterminé par Catia.	34
Figure 2.11 : Interconnexion du système de dépositions.	35
Figure 3.1 : Architecture matériel et logiciel simplifiée.	38
Figure 3.2 : Interface du logiciel de conception de microstructures tridimensionnelles (développée par Martin Mankiewicz).	41

Figure 3.3 : Interface permettant de commander la plateforme de déposition pour l'acquisition et l'écriture sur une surface complexe.....	43
Figure 3.4 : Diagramme de classes du programme d'acquisition de surface et de déposition.	48
Figure 3.5 : Illustration des fonctions de base définies pour une courbe de degré 3.	51
Figure 3.6 : Code faisant la gestion des points de trajectoire durant la phase de déposition.	53
Figure 3.7 : Diagramme de séquence du processus d'acquisition de surface.....	54
Figure 4.1 : Représentation graphique de l'acquisition (droite) d'une section peuplée d'une carte de circuit imprimé (gauche) employant le capteur laser (tirée de [40]).	59
Figure 4.2 : Déposition en deux dimension de filaments d'encre (diamètre = 250µm) sur un PCB : sur une surface à 90° (a) ; sur une surface à ~45° (b) (tirée de [40]).	60
Figure 4.3 : Réseau microfluidique tridimensionnelle couplé à une composante sur une carte de circuit imprimée. Le réseau est complètement rempli de fluide fluorescent et observé par microscopie optique UV [40].	60
Figure 4.4 : Quatre couches de microcanaux de 200µm de diamètre couplé à un processeur Intel et rempli de fluide fluorescent observé par microscopie optique UV [40].	61
Figure 4.5 : Photo prise au microscope optique de filaments de 200µm de diamètre déposés sur une surface graduelle après une acquisition de surface.	62

Figure 4.6 : Fabrication d'un microcanal à section transversale triangulaire par

écriture directe : a) Déposition de l'encre ; b) Déposition multicouche ; c) Infiltration de la structure ; d) Retrait de la structure (tirée de [31])..... 64

Figure 4.7 : Image à partir d'un microscope UV d'un microcanal à section

triangulaire infiltré par un liquide fluorescent (tirée de [31]). 65

Figure 4.8 : Déposition, infiltration et remplissage de rangés de microcaloducs. 66

Figure 4.9 : Remplissage et scellage d'un microcaloduc fabriqué par écriture

directe : a) Schéma du montage utilisé pour le remplissage à volume fixe ; b) Image de microscopie optique d'un microcaloduc infiltré et scellé [31]. 67

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

cc	Centimètre cube
D_h	Diamètre hydraulique
f	Facteur de friction (Darcy)
K	Kelvin
kg	Kilogramme
kPa	Kilo Pascal
L	Longueur de canal
ΔP	Perte de charge
psi	Livres par pouce carré
Re	Nombre de Reynolds
rpm	Rotations par minute
u	Vitesse moyenne
μm	micromètre
μrad	microradian
W	Watt
η	Viscosité dynamique
ρ	Densité
ν	Viscosité cinématique
°	Degré

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : High speed direct-write for rapid fabrication of three-dimensional microfluidic devices	80
ANNEXE B : PCB-Integrated heat exchangers for cooling electronics using microchannels fabricated with the direct-write method	104
ANNEXE C : Boucle de contrôle et gains des axes de positionnement	124
ANNEXE D : Plans de la structure en granit	125
ANNEXE E : Attributs et méthodes de la classe CStageControl	127

INTRODUCTION

L'augmentation de la résolution dans les procédés de microfabrication des transistors a mené à une augmentation de leur densité et de la puissance nécessaire au fonctionnement des composantes microélectroniques. La densité élevée de puissance générée et les hauts niveaux de température sont des obstacles majeurs à la mise en œuvre de nombreux systèmes électroniques. Les prévisions à court terme quant aux nombres de transistors et aux vitesses d'opérations des futurs microprocesseurs tendent à indiquer que le moyen usuel de dissipation de chaleur, soit un radiateur en aluminium et un ventilateur, ne sera bientôt plus thermiquement viable. Cette problématique combinée à la diminution constante de l'espace disponible pour déployer les dispositifs de dissipation thermique nous oblige à envisager de nouvelles techniques. Une avenue prometteuse est l'utilisation de microcanaux sur le principe des caloducs (heat pipes), un mécanisme passif et efficace de transfert de chaleur par changement de phase d'un fluide.

Le projet Micro Heat Pipe a débuté en octobre 2004 à partir d'une subvention CRSNG (Conseil de la Recherche et des Sciences Naturelles en Génie du Canada) stratégique faite conjointement par les professeurs Sylvain Martel, Daniel Therriault et Pascal Hubert. Ce projet propose la fabrication de microcanaux en utilisant un nouveau procédé, l'écriture d'encre directe, afin de déployer des microcaloducs à proximité des sources de chaleur des composantes microélectroniques. L'écriture directe permet la création de réseaux périodiques complexes tridimensionnels (3D) de microcaloducs à

l'intérieur d'un polymère. La haute densité des microcaloducs incorporés dans le dispositif de dissipation thermique et localisés de façon stratégique près des sources de chaleur, permettra de fournir des taux de transfert de chaleur nettement supérieurs à ceux obtenus par les systèmes actuelles.

Trois laboratoires de recherche sont impliqués activement dans ce projet multidisciplinaire afin de concrétiser les objectifs fixés. Les modèles de simulations thermiques afin d'optimiser les configurations tridimensionnel de microcaloducs ainsi que l'amélioration des propriétés thermiques de la matrice d'encapsulation sont développés par le laboratoire de structures et de matériau composite de l'Université McGill, sous la supervision du professeur Pascal Hubert. Le laboratoire de micro et nano fabrication par écriture directe, sous la supervision du professeur Daniel Therriault, est garant de la microfabrication et des tests thermiques expérimentaux des microcaloducs. Le laboratoire de Nanorobotique est quant lui responsable de l'intégration de la technologie d'écriture directe aux systèmes électroniques.

Différents aspects de cette intégration sont explorés. Les performances en terme de dissipation de chaleur des réseaux de microcaloducs dépendront grandement de leur couplage aux sources de chaleur. Un mauvais couplage entre le mécanisme de dissipation thermique et les composantes électroniques résultera en une résistance thermique élevée à l'interface et à de mauvaises performances globales du système. Deux approches prometteuses d'intégration ont été étudiées par le laboratoire de Nanorobotique soit le profilage de surface et l'intégration dans les couches internes des cartes de circuit imprimées (PCB).

La dissipation thermique de multiples composantes assemblées sur une même carte est un défi technologique puisque l'espace disponible est souvent limité et la topologie de surface est complexe. L'écriture d'encre directe permet la fabrication de réseaux de microcaloducs directement sur les boîtiers d'encapsulation pour fournir un couplage thermique optimal entre le mécanisme de dissipation thermique et les composantes électroniques tout en maximisant la surface de contact. L'acquisition des coordonnées tridimensionnelles de la surface supérieure des cartes de circuits imprimés grâce à une plateforme de positionnement et un capteur de distance permet la reconstitution de la topologie des PCB. Cette acquisition permet ensuite la déposition de l'encre fugitive directement sur la surface des composantes suivie des étapes d'infiltration, de nettoyage, de remplissage et de scellage du réseau.

L'encapsulation des puces dans des boîtiers de type "Exposed Paddle" est parfois utilisée lorsque des hautes dissipations de chaleurs sont nécessaires ou lorsque le déploiement d'un autre mécanisme est impossible. La partie inférieure de la puce est alors découverte et soudée à des vias thermiques sur le PCB. Ces vias sont reliés à des plaques de cuivre à l'intérieur des PCB et le flux thermique est dissipé par conduction. Nous proposons ici de prolonger ce concept en intégrant les réseaux microcanaux dans les couches internes afin d'améliorer de manière significative l'évacuation thermique de tels systèmes.

Un autre aspect exploré par le laboratoire de Nanorobotique dans le cadre de l'intégration de l'écriture d'encre directe au domaine électronique est les vitesses d'écriture envisageables. Les systèmes électroniques sont principalement fabriqués en

masse dans les industries à des cadences allant jusqu'à plusieurs milliers d'exemplaires par jour. Le déploiement d'un mécanisme de dissipation de chaleur doit être conséquent avec ces taux de productions. Les procédés d'écriture directe ont souvent été écartée par les industries de microfabrication car les rythmes de productions était insuffisant et par conséquent non rentable. L'écriture d'encre directe se fait habituellement entre 1mm/s et 10mm/s. La plateforme robotisée développée dans le cadre de ce projet a permis d'augmenter les vitesses d'écriture atteignant une vitesse de 88mm/s pour des réseaux périodiques tridimensionnels tout en conservant des qualités d'écriture comparable.

Le premier chapitre de ce document présente une revue de littérature commençant par les microcaloducs et les microéchangeurs de chaleur. L'écriture d'encre directe et son implémentation pour la fabrication de composantes microfluidiques sont également introduites puisqu'il s'agit de la technique utilisée dans le cadre de ce projet de recherche. Le deuxième chapitre contient la description des composantes et des choix de conception fait lors de l'assemblage de la plateforme d'intégration robotisée. Le développement logiciel mis en œuvre pour contrôler cette plateforme est présenté dans le troisième chapitre de ce mémoire.

Le chapitre 4 résume les résultats de microfabrication obtenue dans le cadre de ce projet. La caractérisation des dépôts d'encre à haute vitesse et la fabrication de composante microfluidique sont d'abord discutées. Comme ce mémoire est présenté sous forme d'articles, le complément de cette section se retrouve en annexe A. Cet

article intitulé "High Speed Direct-Write for Rapid Fabrication of Three-Dimensional Microfluidic Devices" traite de l'écriture directe à haute vitesse pour la fabrication de composantes microfluidiques et du développement matériel et logiciel effectué. Cet article a été présenté au "3rd Microfluidics French Conference" et a été retenue pour publication dans "International Journal of Heat and Technology". Par la suite, le chapitre 4 présente les résultats de microfabrication de microcanaux sur des surfaces complexes. La troisième partie de ce chapitre traite de l'intégration de microcanaux fabriqués par écriture directe dans les couches internes des cartes de circuits imprimés. La deuxième publication intitulé: "PCB-Integrated Heat Exchangers for Cooling Electronics using Microchannels Fabricated with the Direct-Write Method" détail les résultats de cet aspect de l'intégration. Cet article à été soumis pour publication dans "IEEE Transactions on Components and Packaging". La dernière section du chapitre 4 présente les procédures de fabrication de microcaloducs à section triangulaire par écriture directe

Finalement, les différents objectifs atteints ainsi que les travaux futurs seront résumés et discutés dans le chapitre conclusion et recommandations.

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Les microcaloducs

Un caloduc est un système étanche qui permet de transférer de la chaleur d'un endroit à un autre sans apport d'énergie extérieur. Ces systèmes passifs profitent des changements de phase d'un fluide caloporteur afin de mettre en œuvre une circulation perpétuelle de ce même fluide. Un caloduc est constitué d'un tube dont les parois sont recouvertes d'un réseau capillaire, saturé de liquide et d'un espace rempli de vapeur saturante de ce même liquide [1]. La figure 1.1 présente le principe de fonctionnement d'un caloduc. Il y a évaporation du liquide situé près de la source de chaleur; la vapeur se dirige vers l'autre extrémité où la température est inférieure et s'y condense. La phase liquide revient ensuite vers la zone d'évaporation grâce au réseau capillaire et le cycle peut alors se répéter perpétuellement.

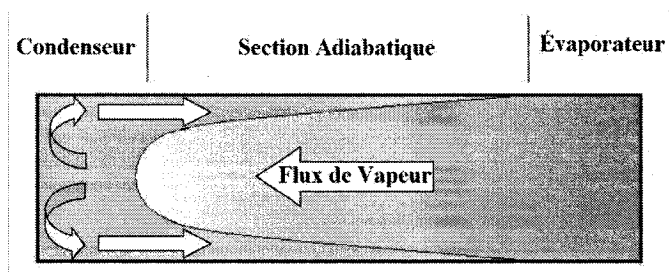


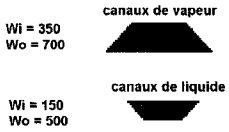
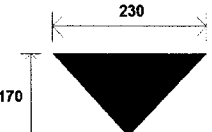
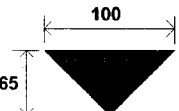
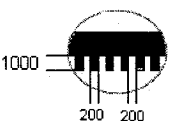
Figure 1.1 : Principe de fonctionnement d'un caloduc.

Une caractéristique importante d'un caloduc est sa capacité de transporter une grande quantité d'énergie entre la zone d'évaporation et la zone de condensation avec une faible diminution de température. Cette propriété quasi-isothermique de la zone

adiabatique permet aux caloducs d'atteindre des conductivités thermiques cent fois plus élevées que le cuivre [2]. Ce potentiel de conductivité thermique rend les caloducs attrayants pour l'industrie électronique. Ce genre de système permettrait de retirer efficacement la chaleur située à des endroits difficilement accessible pour la diriger vers un échangeur de chaleur. Évidemment, la transposition de ces systèmes de l'échelle macrométrique à l'échelle micrométrique pose des défis technologiques importants à relever.

Cotter [3] fut le premier à reprendre le principe des caloducs et à l'appliquer à plus petite échelle. Il est reconnu que la dimension transversale d'un microcaloduc est de l'ordre de $10\mu\text{m}$ à 1mm et que la longueur est limitée à quelques centimètres [4]. Puisque le diamètre hydraulique des tubes est de beaucoup réduit, il est difficile d'introduire un réseau capillaire pour le retour du fluide. Dans le cas des caloducs, ce réseau capillaire est typiquement une mèche, une paroi poreuse ou des rainures. Cotter opta pour l'utilisation de section non circulaire pour les microcaloducs afin d'introduire des coins permettant le retour du fluide. Des travaux de recherches plus récents ont permis d'améliorer les structures des minicaloducs pour permettre un meilleur retour du fluide. L'incorporation de parois poreuses [5] ou de mèches [6] dans des conduits de rayon hydraulique de 3mm à 5.7mm permet d'améliorer l'efficacité des minicaloducs. Toutefois, les technologies de microfabrication actuelle ne permettent pas la réalisation de ce type de structure dans des conduits de diamètre inférieur à 1mm . C'est pourquoi l'approche qui consiste à optimiser la section des microcanaux demeure la plus populaire.

Tableau 1.1 : Tableau récapitulatif de quelques géométries de microcaloducs présents dans la littérature et de leurs procédés de fabrication.

Prototypes	Formes/dimensions	Procédure de fabrication	Références
MHP radial de 140 canaux en silicium		Photolithographie Gravure anisotrope Fusion eutectique	[11]
Rangée de 55 MHP triangulaire en silicium		Photolithographie Gravure anisotrope Fusion directe	[9]
Rangée de 4 MHP triangulaire en silicium Compatible CMOS		Photolithographie Gravure anisotrope Scellage au nitrure	[10]
MHP rectangulaire continue		LIGA	[13]

Le tableau 1.1 répertorie quelques microcaloducs rapportés dans la littérature. Bien que des procédés tels que le procédé LIGA est présent, on observe que les procédés de photolithographie du silicium est le plus utilisé pour la fabrication de microcaloducs. La conductivité thermique du silicium (148W/mK), la maîtrise de son usinage et sa compatibilité possible avec les circuits intégrés sont les principaux avantages qui rendent cette approche attrayante. Au niveau de l'usinage, il est en effet possible de concevoir des microcanaux avec des sections aussi complexes que des losanges ou des étoiles [7]. Mais la forme triangulaire est la plus utilisé car on obtient facilement trois angles aigus. La figure 1.2 présente des microcaloducs en silicium dans lesquels l'accroissement des tensions de surface aux extrémités du triangle facilite l'écoulement du fluide. La performance de ce type de structure a été étudiée et s'est révélée modérée. Une rangée

de 55 microcaloducs de 20mm de long et de 120 μ m de diamètre hydraulique, par exemple, permettent d'augmenter la conductivité de 7% pour des puissances de 0.5W à 5W [8].

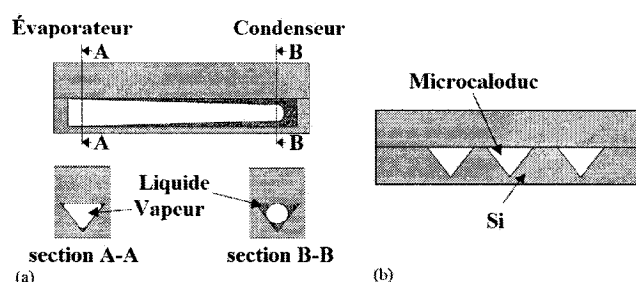


Figure 1.2 : Schémas d'un réseau de microcaloducs en silicium (tirée de [9]).

Les procédures de microfabrication utilisées pour construire les microcaloducs triangulaires avec du silicium sont bien connues et bien maîtrisées. La forme triangulaire est obtenue avec une gravure chimique anisotrope en utilisant une solution de KOH ou de TMAH sur une plaquette orientée (100) jusqu'à ce que les deux plans (111) se rejoignent pour former des angles 54.74°, 54.74° et 70.52°. Tel que présenté à la figure 1.2b, le réseau de microcanaux est scellé avec une autre gaufre de silicium grâce à un procédé de fusion [9] impliquant des températures avoisinant 1100°C. Le Pyrex est également utilisé pour sceller les réseaux de microcaloducs et ainsi permettre une visualisation des phénomènes thermodynamiques.

Une autre approche dans la fabrication de microcaloducs triangulaire consiste à recouvrir la gravure avec une fine membrane de nitrure [10] comme présenté à la figure

1.3. Ce procédé permet ainsi d'isoler électriquement les canaux et d'ajouter une autre gaufre sur laquelle seront fabriqués les circuits.

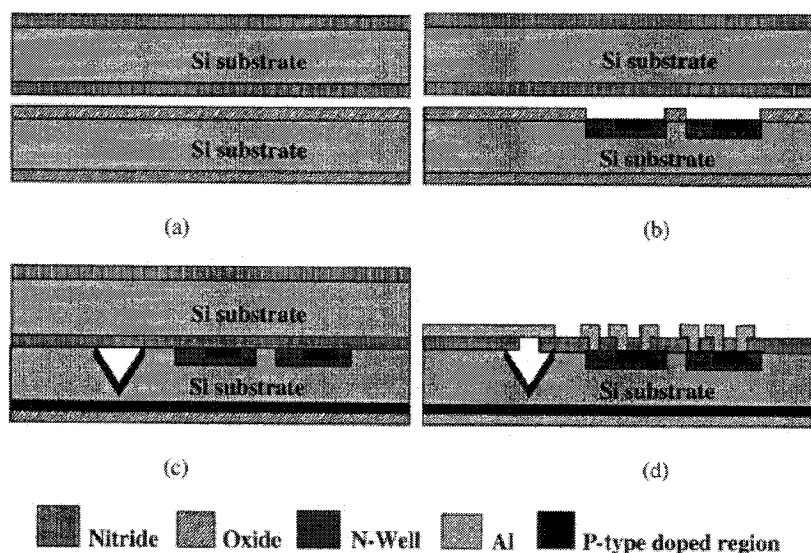


Figure 1.3 : Étapes de fabrication d'un système de microcaloducs compatible CMOS (tirée de [10]).

Les plus grandes difficultés rapportées au niveau de la mise en œuvre des microcaloducs en silicium ne sont pas la fabrication des microcanaux en tant que tel. La difficulté se présente lors du dégazage, du remplissage et du scellage des microcanaux étant donné la taille de ceux-ci. Il est à noter que pour plusieurs prototypes présents dans la littérature, le système de microcaloducs n'est pas scellé et que le dispositif de remplissage reste connecté au réseaux durant la caractérisation thermique.

Les configurations bidimensionnelles montrent une augmentation de la conductivité thermique mais cette augmentation n'est pas significative dû à la superficie et au volume occupés par les microcanaux. C'est pourquoi les configurations tridimensionnelles sont

investiguées afin de d'augmenter le volume occupées par les canaux et l'efficacité thermique des systèmes. Dans le cas de système tridimensionnel, l'approche consiste à séparer les deux phases non pas dans le même canal mais dans différents canaux comme présenté dans la figure 1.4.

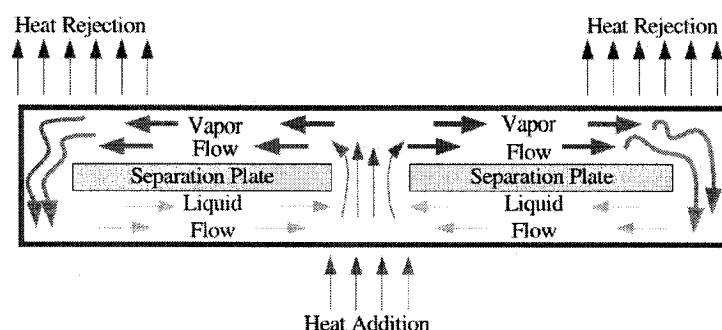


Figure 1.4 : Illustration du principe de fonctionnement d'un système de microcaloducs radial (tirée de [11]).

Ce type de système a été fabriqué dans un premier temps avec du silicium [11] et ensuite avec du cuivre [12] qui a une conductivité thermique de 400W/mK . Ce dernier a démontré une capacité de réduire la résistance thermique de 30% lorsque le fluide est chargé dans le système. L'approche de ce dernier travail de recherche n'était pas d'intégrer ce système dans le circuit mais plutôt au dessus du boîtier afin d'uniformiser la température à la surface pour éliminer les points chauds. Comme présenté à la figure 1.5, ce type de système ne nécessite aucune modification des procédures de microfabrication des circuits intégrés ou de leur encapsulation.

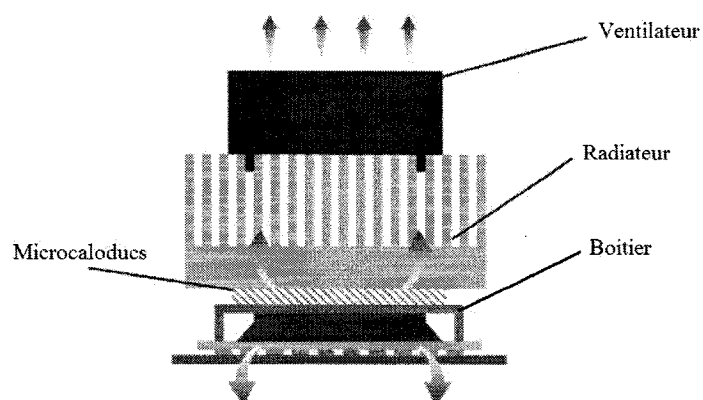


Figure 1.5 : Diagramme décrivant la structure et la position relative du ventilateur, du radiateur, du système de microcaloducs et du boîtier électronique (tirée de [12]).

1.2 Les microéchangeurs de chaleur

Un microéchangeur de chaleur est un système actif où la chaleur est transférée à un fluide circulant à l'intérieur des canaux dont le diamètre hydraulique est plus petit que 1 millimètre. Le système se compose habituellement d'une pompe pour la circulation du liquide, d'une source de chaleur, d'un radiateur et de microcanaux.

Le refroidissement liquide, utilisant l'eau par exemple, offre une conductivité thermique et une capacité de chaleur spécifique respectivement de 25 et 4 fois supérieures à l'air. Ce type de système liquide est déjà déployé dans des systèmes à haute dissipation de chaleur mais avec des diamètres de conduits de plusieurs centimètres. La circulation liquide a l'avantage de pouvoir transférer la chaleur à partir d'un endroit spécifique à un autre endroit où la dissipation thermique est plus efficace. Aussi, la chaleur produite par toutes composantes électroniques d'un ordinateur générant de haute puissance peut être transférée à un fluide et être transportée à un mécanisme simple de

dissipation thermique, réduisant le nombre de ventilateurs et également le niveau de bruit. L'utilisation de ces systèmes est en croissance et l'accessibilité de cette technologie tend à convaincre les industries d'opter pour cette avenue.

Le refroidissement de composantes électroniques employant des microéchangeurs de chaleur est une approche prometteuse et fait l'objet de multiples études [14] - [17]. Avec des microcanaux intégrés, il est possible d'atteindre un meilleur couplage avec les sources de chaleur et ainsi réduire au minimum les résistances thermiques. Les expérimentations démontrent que le refroidissement employant des microéchangeurs de chaleur est très efficace avec une très faible résistance thermique et une capacité de dissipation thermique atteignant 750 W/cm^2 [18]. L'efficacité de ces systèmes dépend fortement des débits de fluide imposés, du diamètre hydraulique des canaux, du type de fluide réfrigérant et du nombre de canaux couvrant la surface à refroidir. Un autre important facteur est l'intégration des systèmes à proximité des sources de chaleur. Un microéchangeur de chaleur tel que présenté à la figure 1.6, même conçu à base de polymères, peut réduire la résistance thermique de 50°C/W à 7°C/W [19].

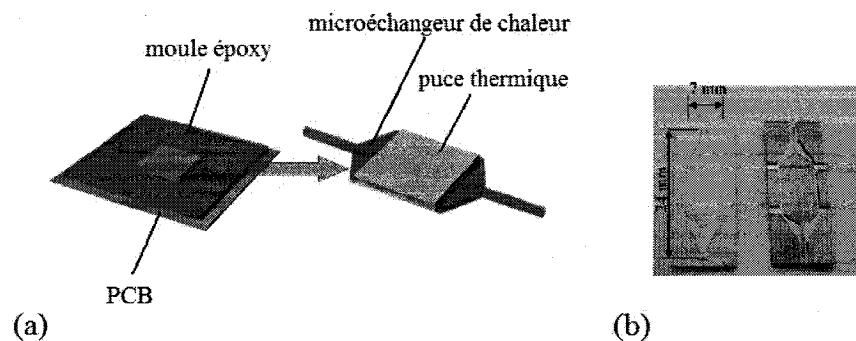


Figure 1.6 : (a) Schéma d'un microéchangeur de chaleur intégré sur un circuit intégré. (b) Microcanaux en PDMS (gauche) et moule de fabrication (droite) (tirée de [19]).

Les cartes de circuits imprimées (PCB), composées de cuivre (Cu) et de polymère (FR4), peuvent être perfectionnées pour contribuer à l'effort thermique des dispositifs électroniques de haute puissance. Les principaux processus de fabrication ayant été appliqués à la conception de microéchangeurs de chaleur sont le processus Liga, la gravure chimique, la stereolithographie et le micromachinage [20]. Comme pour les microcaloducs, la gravure chimique de silicium est la méthode la plus répandue pour fabriquer des microcanaux avec des sections transversales rectangulaires, trapézoïdales ou triangulaires pour les microéchangeurs de chaleur. Cependant, la compatibilité de la gravure chimique, du processus Liga, et de la stereolithographie avec les procédés de fabrication des PCB est difficilement concevable. Les obstacles sont liés aux matériaux employés et au processus de liaison pour coupler les microéchangeurs aux dispositifs électroniques. Le micromachinage du cuivre a néanmoins été employé dans le passé [21] pour intégrer des canaux de Cu/FR4 et ce genre d'implémentation est parfois employés dans l'industrie pour les systèmes à haute dissipation de chaleur.

1.3 L'écriture directe

L'écriture d'encre directe est un procédé de microfabrication permettant la création de microstructures composées de canaux de section circulaire. Elle permet de créer différentes géométries bidimensionnelles (2D) ou tridimensionnelles (3D) périodiques sans l'utilisation de masques de microfabrication et en une seule itération. Cette technique consiste principalement à la déposition robotisée 2D ou 3D d'encre sur un

substrat en suivant une trajectoire préétablie [22]-[27]. La déposition robotisée continue ou "robocasting" est un procédé breveté [28] d'abord utilisé dans le domaine des céramiques et des matériaux composites avec des diamètres autour de 1mm. Des structures mésoscopiques [24][25] ont également été fabriquées en utilisant des encres colloïdaux avec des diamètres variant de 100 μ m à 1mm. Une encre à base de polyamide a plus récemment été utilisée [27] pour la fabrication de structure avec des diamètres de filaments de 1 μ m. Le développement de microaiguilles de diverses formes [26] permet finalement à cette technique de ne pas se limiter à la déposition de filaments cylindriques.

L'utilisation d'encre organique [29] composée de cire microcristalline et de gelée de pétrole a permis d'utiliser le "robocasting" pour déposer l'empreinte négative de composantes microfluidiques avec des diamètres de 10 μ m à 250 μ m. Ce procédé de fabrication a été utilisé pour créer un micromélangeur 3D avec des canaux de 200 μ m de diamètre.

Le processus complet pour la fabrication de composantes microfluidiques est présenté à la figure 1.7. D'abord, une encre fugitive est éjectée à travers l'embout d'une microaiguille sous pression constante ajustée pour obtenir le diamètre de microcanaux voulu. La plateforme robotisée effectue simultanément un déplacement à vitesse constante. La distance entre l'aiguille et le substrat est ajustée pour être à ~85% du diamètre des canaux afin que l'encre adhère à la surface immédiatement après avoir été éjectée de l'aiguille. Lors d'une déposition 3D, l'incrément en hauteur est également fixé à ~85% du diamètre pour imbriquer les filaments et assurer une intégrité structurelle. La

structure ainsi déposée est ensuite infiltrée avec un époxy de moindre viscosité que l'encre fugitive. Après la polymérisation de l'époxy, la composante est chauffée entre 60°C et 70°C selon la composition de l'encre. L'encre fondue est ensuite aspirée et les canaux sont nettoyés avec de l'eau chaude pour obtenir un réseau 2D ou 3D de microcanaux à l'intérieur d'un bloc d'époxy [29].

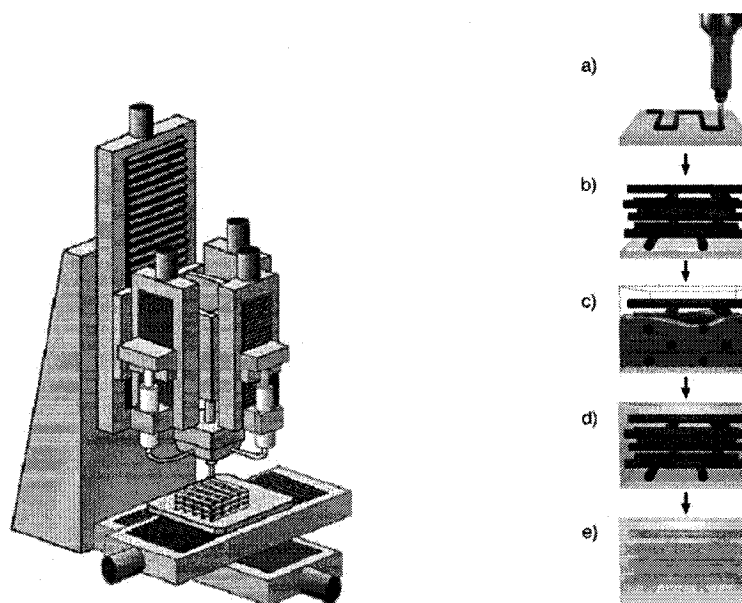


Figure 1.7 : Schéma d'un robot de déposition (tirée de [22]) et illustration des étapes du processus de fabrication de composants microfluidiques tridimensionnelles périodiques: a) déposition d'une encre organique à travers l'embout d'une microaiguille; b) déposition multi niveaux en incrémentant la position verticale de la seringue; c) infiltration du réseau par une époxy; d) polymérisation de l'époxy; e) extraction de l'encre (tirée de [29]).

CHAPITRE 2 PLATEFORME DE DÉPOSITION

Ce chapitre présente les choix de conception ainsi que les spécifications des composantes de la plateforme de déposition (figure 2.1). Cette plateforme doit permettre d'augmenter les vitesses de déposition des microfilaments afin de démontrer l'intégration possible de la technique d'écriture d'encre directe au secteur manufacturier. La plateforme doit également permettre d'acquérir la topologie des surfaces de déposition. La modélisation tridimensionnelle ainsi obtenue permettra par la suite l'écriture en suivant le profil du substrat.

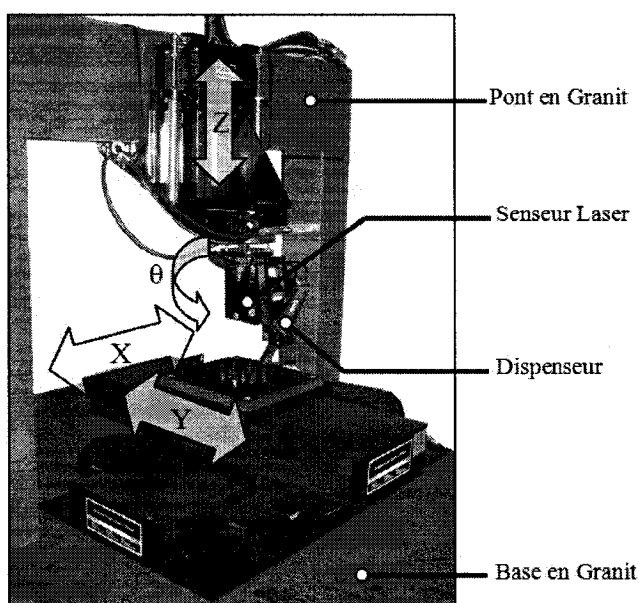


Figure 2.1 : Plateforme de déposition.

Les contraintes minimales sont basées sur les plateformes de déposition existante ainsi que les géométries et diamètres présentement utilisés. Les objectifs de performances ne sont quant à eux pas clairement définis mais elles sont plutôt à évaluer.

En effet, le rythme de production des cartes de circuits imprimés dépend de la taille et de la complexité des circuits. Il n'est donc pas possible de fixer un temps de production pour chaque unité. Aussi, la géométrie, le nombre de couches et la dimension des microcaloducs tridimensionnels ne sont pas non plus définis et ne le seront sans doute pas de manière statique.

2.1 Robot manipulateur

Dans cette section, le terme robot est utilisé pour parler des parties en mouvement de la plateforme. La "Robotic Industries Association" (RIA), définit un robot comme étant un manipulateur conçu pour déplacer du matériel, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés, par des mouvements programmés variables pour l'exécution de tâches.

Tableau 2.1 : Tableau récapitulatif des dépositions avec le type d'encre, le diamètre des filaments, l'instrumentation utilisée et les vitesses de dépositions.

Encre	Diamètre	Instrumentation	Vitesses de déposition	Références
Colloïdal	100µm à 1mm	Robocaster, Sandia National	2mm/s à 8mm/s	[24][25]
Colloïdal	560µm	JL2000, Robocasting Ent.	2mm/s	[26]
Polyamide	1µm	ABL9000, Aerotech	40µm/s	[27]
Organique	200µm	JL2000, Robocasting Ent.	6mm/s à 8mm/s	[30]
Organique	100µm	J2200, Fisnar	10mm/s	[31]

Le "robocasting" a, jusqu'à aujourd'hui, été utilisée seulement comme outil d'expérimentation et de prototypage. Le tableau 2.1 résume quelques une des expérimentations effectuées avec des vitesses d'écriture qui n'ont jamais été rapportées au-delà de 10mm/s. Les robots de déposition assemblés, acquis ou modifiés avaient comme objectif d'effectuer des dépositions précises dans le respect des diamètres de filaments et non de maximiser les vitesses d'écriture. Mais l'optimisation des procédés de "robocasting" et des autres méthodes d'écriture directe constitue la prochaine étape en vue de leur possible industrialisation [22].

2.1.1 Contraintes de positionnement

L'objectif de la plateforme développé est d'être en mesure de déposer des microfilaments de tailles minimales de 100 μ m de diamètre avec la plus grande vélocité possible. Cette déposition doit pouvoir ce faire en 2D, en 3D et sur des surfaces planes ou complexes. Comme la plateforme devra reproduire les configurations de microcanaux fournis par le laboratoire de nano/microfabrication par écriture directe, elle doit pouvoir effectuer les mêmes types de déplacement. La plateforme utilisée par le laboratoire de nano/microfabrication par écriture directe est un modèle J2200 de Fisnar tel que présenté à la figure 2.2. Cette dernière permet un déplacement sur quatre degrés de libertés, soit 200mm $\times$ 200mm sur X Y, 50mm sur Z et 360° sur R, l'axe rotatif. La répétitivité de positionnement de ce système est de 10 μ m pour les axes X, Y, Z et de 0.02° pour R. La répétabilité est définie comme la distance par rapport à un point lorsque celui-ci est commandé de façon répété dans les mêmes conditions.

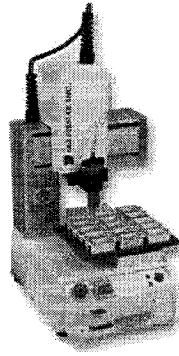


Figure 2.2 : J2200, Fisnar. (www.ijfisnar.com)

Les applications visées en microélectronique exigent l'envoi de commandes de positionnement pour des écritures sur des points spécifiques à refroidir. C'est pourquoi la précision de position est aussi importante que la répétabilité. La précision de positionnement est définie comme la différence entre la position actuelle et la position telle que mesurée par un instrument de mesure. Étant donné la taille du filament minimale de $100\mu\text{m}$, la déposition sur le plan horizontal X-Y doit conserver des valeurs de précision de $10\mu\text{m}$ afin de ne pas avoir une erreur de plus de 10% et ainsi recouvrir en bonne partie les points chauds des composantes électronique. Par contre, le positionnement vertical (Z) demande une précision encore plus importante. La déposition exige une distance en Z à $\sim 85\%$ du diamètre du filament. Pour le cas d'un filament de $100\mu\text{m}$ de diamètre, des dépositions avec une distance entre l'aiguille et le substrat (ou la couche inférieure) de $80\mu\text{m}$ à $90\mu\text{m}$ ont été testés et après observation au microscope la qualité des structures obtenues s'est révélés convenables en terme d'adhérence sur le substrat. Nous en déduisons ainsi qu'il est acceptable d'avoir une

précision de positionnement suivant l'axe Z d'au moins $\pm 5\mu\text{m}$. Le positionnement en R n'est quant à lui pas encore utilisée dans les structures fabriquées et n'exige aucune autre contrainte que celle du robot J2200.

2.1.2 Configurations robotiques

La configuration est la classification fondamentale des robots industriels. La configuration réfère à la géométrie des robots manipulateurs, c'est-à-dire à la façon dont les liens des manipulateurs sont connectés à chaque joint [32]. La configuration d'un robot est une considération importante à prendre en compte dans la sélection d'un manipulateur. Il existe six configurations majeures de robots généralement utilisées dans les industries.

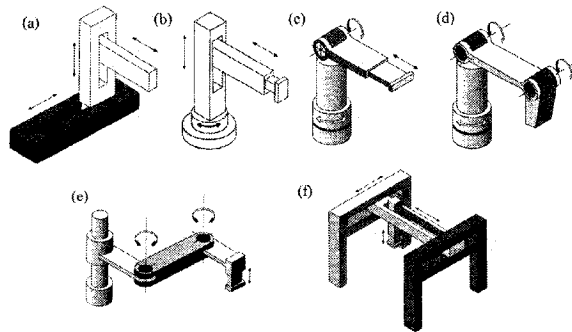


Figure 2.3 : Configuration des robots industriels: (a) Cartésienne; (b) Cylindrique; (c) Sphérique; (d) Articulé; (e) SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm); (f) Portique [32].

La figure 2.3 présente ces six configurations. Les robots de configuration sphériques (c), articulés (d) et SCARA (e) sont très utilisés dans les industries pour concevoir des bras manipulateurs. Ces configurations permettent des déplacements complexes sur 360° à grande vitesse. En effet, l'inertie des moteurs de ce type de système diminue de façon

significative à l'extrémité du bras. Pour des robots industriels à 6 axes capable de petite charge de 3 kg (Motoman's six-axis EA 1400, Expert Arc), la vitesse de déplacement du premier axe est de $140^{\circ}/s$ alors qu'elle est de $520^{\circ}/s$ pour le sixième axe. Il devient donc possible d'effectuer des déplacements à très haute accélération une fois que l'extrémité du bras se trouve dans la région de travail. Ces robots sont très efficaces entre autres lorsque couplé à un système d'acquisition de distance pour la modélisation tridimensionnelle d'objet et c'est pourquoi ils ont été considérés pour ce projet. Cependant, ces bras robotisés sont d'une grande complexité mécanique et électronique et sont aussi très dispendieux. De plus, puisque les axes de ces robots sont rotatifs, ils ne sont pas appropriés pour les mouvements rectilignes continus requis dans le cas des dépositions de microfilaments.

Les robots précédemment utilisés pour l'écriture directe sont des hybrides de configurations cartésiennes (a), cylindriques (b) et portiques (f). Dans le cas du Fisnar J2200, c'est cet hybride qui est implémenté et divisé en deux sections soit l'axe X sur la surface de travail et les axes Y, Z et R qui sont suspendus (figure 2.2). Bien qu'ayant des points faibles, ce genre de configuration est la mieux adapté pour l'écriture directe et l'acquisition facile de la topologie de surface de cartes de circuits imprimées. Nous nous sommes donc inspirés de ce type de configuration robotique pour assembler la plateforme de déposition tout en améliorant les points faibles de celle-ci.

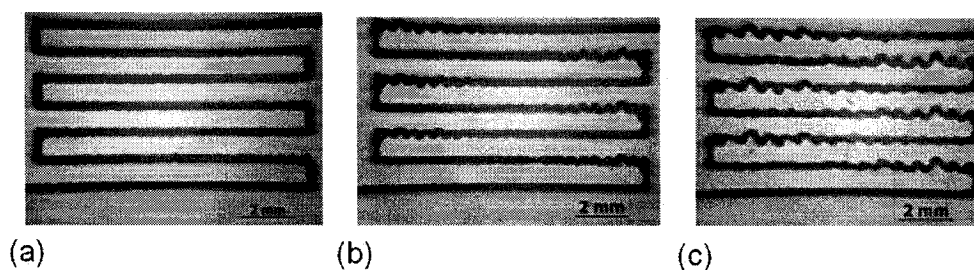


Figure 2.4 : Déposition d'un filament de 200µm de diamètre avec le J2200 de Fisnar à des vitesses de déplacement de : (a) 10mm/s ; (b) 20mm/s ; (c) 30mm/s.

La figure 2.4 présente des dépositions de microfilaments de 200µm réalisées avec le J2200. Nous y observons des déformations à une vitesse d'écriture de seulement 20 mm/s. Ces oscillations sont dues aux moments de forces lors des changements de directions imposés au robot comme le dispositif de déposition a une masse de plus de 150 grammes. De plus, la structure du robot est faite d'aluminium soit un métal malléable. Comme cette plateforme offre des résultats modérés à moindre coût, ces spécifications ne seront pas développés davantage.

2.1.3 Mécanisme de déplacement

Des systèmes à vis sans fin ou des moteurs linaires sans broches sont normalement utilisés pour les axes de translation des robots de haute précision. Dans le cas des axes dirigés par des vis, ils sont normalement utilisés lorsque la précision et la répétabilité sont plus importantes que la force de poussée axial [33]. Lorsque seule la précision est en jeu, il est plus facile d'implémenter cette solution comme dans les cas des micropinces [34]. Mais le système de déposition ne peut pas être limité en force, c'est pourquoi nous avons opté pour des moteurs linéaires sans broches. Un moteur linéaire

est essentiellement un moteur électrique qui a été déroulé de sorte qu'au lieu de produire un couple (rotation), il produise une force linéaire sur sa longueur en installant un champ électromagnétique de déplacement. Toutefois, même avec ces moteurs, il n'est pas possible d'obtenir vitesse et précision. Ces deux dernières sont intimement liées car en augmentant la vitesse, la précision de positionnement diminue. Cela est dû au fait qu'il est nécessaire, pour augmenter la force d'accélération, d'utiliser des moteurs plus puissants et plus lourds. Il s'agit donc de faire un compromis entre la vitesse de déplacement et la précision de positionnement.

2.1.4 Axes de déplacement et configuration de la plateforme

Pour minimiser l'inertie de chacun des quatre axes, ils ont été séparés en deux groupes soit les axes horizontaux (X, Y) montés sur une base en granit et les axes vertical et rotatif (Z, R) montés sur un pont en granit. Comme présenté à la figure 2.5(a), les axes horizontaux, de modèle ALS2500(Aerotech), sont disposés sur la table et ils déplacent le substrat sur lequel l'écriture est effectuée. Cela permet de ne pas imposer de moment de force sur le dispositif d'écriture et ainsi éviter les oscillations du système à haute vitesse. Les spécifications de ces axes sont présentées dans le tableau 2.2, toutefois, ces spécifications sont établies sans contrainte de charge. En effet, l'axe inférieur supporte la masse de l'axe supérieur, du substrat et d'un système pour retenir celui-ci (maximum de 5kg). Avec ces contraintes, la vitesse maximale de cet axe est de 300mm/s avec une accélération de 4.7m/s^2 en employant un amplificateur linéaire (NLDRIVE10-80, Aerotech). Bien qu'un amplificateur PWM (pulse width modulation)

puisse fournir plus de puissance, le courant continue d'un amplificateur linéaire permet un meilleur contrôle de ces deux axes pour des contours serrés (10 μ m-100 μ m).

Tableau 2.2 : Les axes de positionnement et leurs principales spécificités.

	Intervalle de travail	Vitesse maximale	Charge maximale	Précision	Répétitivité
ALS25030 (X, Y)	300 mm	2m/s	70kg	$\pm 1.0\mu\text{m}$	$\pm 0.5\mu\text{m}$
ALS130 (Z)	100mm	0.3m/s	12kg	$\pm 0.3\mu\text{m}$	$\pm 0.1\mu\text{m}$
ADRS100 (R)	360°	1500rpm	Axiale: 7kg	$\pm 29.1\mu\text{rad}$	$\pm 14.6\mu\text{rad}$
			Radial: 3kg		

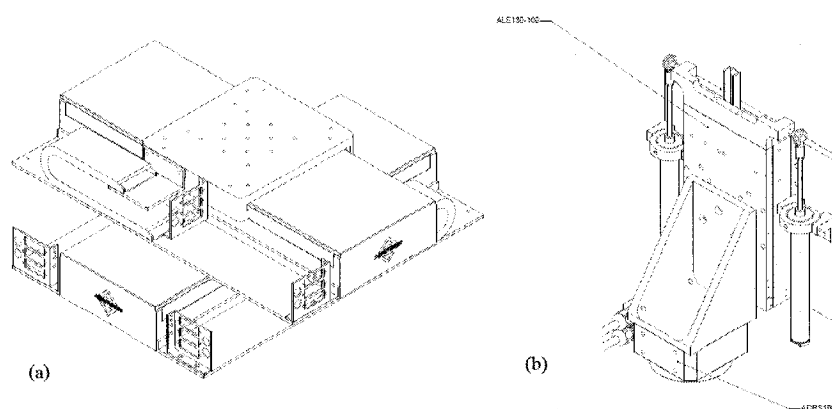


Figure 2.5 : (a) Configuration des axes de positionnement horizontaux (X, Y); (b) Configuration des axes de positionnement vertical et rotatif.

Le système de positionnement rotatif a été placé sous l'axe vertical comme présenté sur la figure 2.5 (b). Comme le moteur rotatif n'a que la charge du dispositif de déposition et du capteur de distance à supporter (~1kg), le plus petit modèle a été sélectionné. Cela permet d'obtenir les meilleures performances en terme de vitesse et de précision tout en minimisant la charge de l'axe vertical, l'ADRS100 ne pesant que 2kg. C'est également un moteur linéaire qui est utilisé pour l'axe vertical c'est pourquoi il est

important de minimiser les charges sur celui-ci. L'emploi de moteur linéaire à la verticale est inhabituel car lors de la mise hors tension du moteur, le plateau n'a plus d'appui. C'est pourquoi des vérins pneumatiques ont été installés de chaque côté de celui-ci afin de contrer la gravité lorsque le moteur n'est pas alimenté. Cependant, ces vérins augmentent le coefficient de friction ainsi que les performances du système. Dans cette configuration, l'axe verticale à une vitesse maximale de 100mm/s avec un amplificateur PWM (NDRIVE20, Aerotech). Il est à noter que les vitesses maximales énoncées sont des indicatifs de déplacement point à point et les performances du système lors de déposition continue dépendent grandement des degrés de courbures des trajectoires.

Le positionnement des plateformes de déplacement est assuré par une boucle de contrôle tel que présenté à l'annexe C. La rétroaction de la position est assurée par un encodeur linéaire sans contact sur chacun des axes. Les différents gains ont été ajustés avec les charges réelles afin d'obtenir le meilleur positionnement possible aux vitesses maximales de déplacement point à point. Les résultats de ces tests ont permis d'établir que l'erreur de positionnement maximal est de $\pm 10\mu\text{m}$ pour les axes X, Y et $\pm 6\mu\text{m}$ pour l'axe Z, ce qui respecte à $1\mu\text{m}$ près les contraintes établies à la section 2.1.1. La stabilité du système peut également être observé à la figure 2.6 durant un déplacement simultanée des trois axes à une vitesse de 88 m/s. La comparaison des commandes de trajectoires et de la rétroaction de position donne une erreur de positionnement d'à peine quelque microns pour chacun des axes.

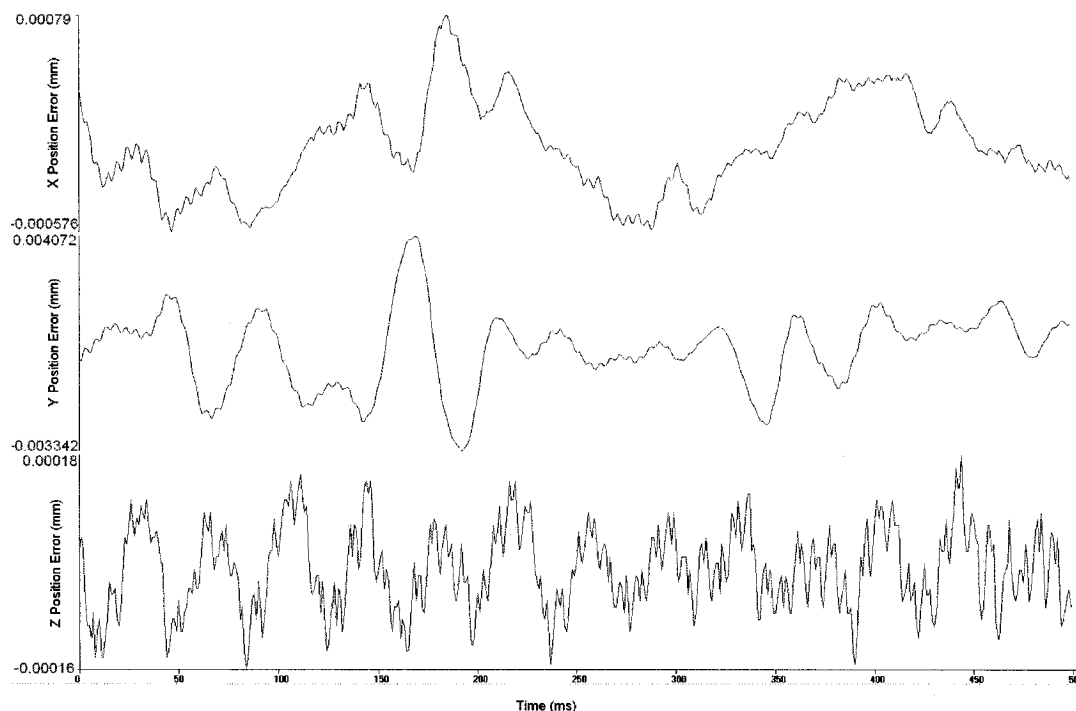


Figure 2.6 : Erreur de positionnement des trois axes durant un déplacement simultané à 88mm/s.

2.2 Structures de support de la plateforme

Les bases sur lesquelles reposent les plateformes de translation linéaire jouent un rôle important dans la performance de ceux-ci. Un axe de translation peut se désaligner sur plusieurs axes selon les contraintes imposées. Ces valeurs sont corrigées en usine par interférométrie et la surface sur laquelle est vissée la plateforme doit être dans le même ordre de planéité que la plateforme afin de ne pas imposer de contrainte sur les chemins de roulement. Du granit ou de l'acier usiné avec précision sont typiquement utilisés comme matériaux pour ces surfaces. Les tables en aciers avec une structure interne en alvéole sont présentement très populaires en raison des filtrages des fréquences de vibration qu'elles offrent. Ces tables permettent également d'avoir une structure très

rigide en minimisant la masse de celle-ci. Toutefois, étant donné les accélérations et les forces de notre système de positionnement, une structure massive est plus appropriée pour notre application.

Une base et un pont en granit ont été désignés (figure 2.7) afin d'assurer la rigidité du système de positionnement qui a été découplé en deux groupes de deux axes. Ce design a été fait sur mesure pour l'attache des axes de positionnement, en maximisant la masse du système et en abaissant le centre de masse de celui-ci (Annexe D). L'usinage du granit (Standridge Granite Corp.) a été réalisé avec une déviation de planéité de $\pm 2\mu\text{m}$ par pied sur la surface de la base et sur le côté d'encrage du pont soit plus de cinq fois les tolérances de planéité des plateformes de translation.

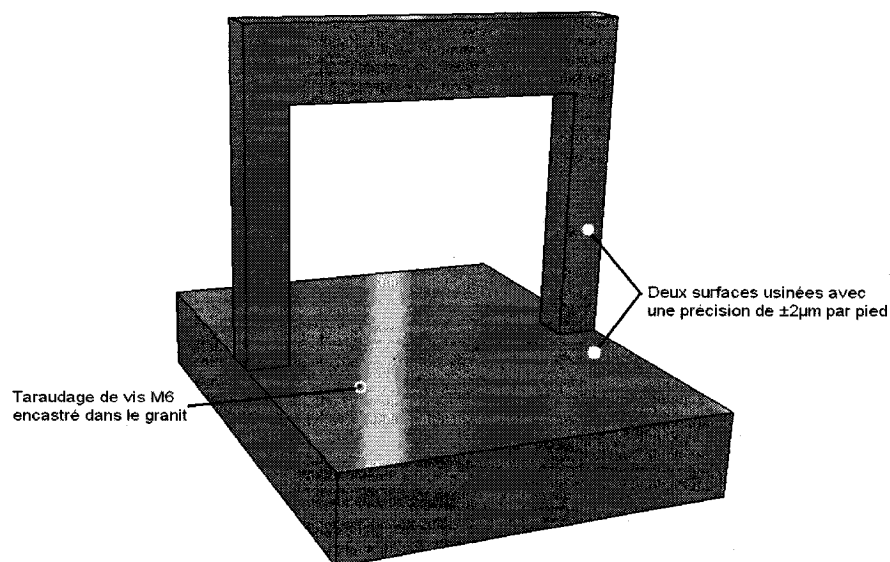


Figure 2.7 : Structure en granit pour le supports des axes de positionnement.

La base en granit à été disposée sur une table à isolation pneumatique passive (68-500, Havard apparatus canada) à haute capacité. Les pistons de la table n'ont pas comme

objectif d'isoler la plateforme des vibrations ambiante mais permettent l'absorption des vibrations de la structure de granite elle-même. La pression des pistons a été ajustée à 80psi afin de stabiliser la plateforme lors de déplacement de grande amplitude.

2.3 Système d'extrusion

L'extrusion s'effectue par un système de contrôle électropneumatique (Ultra 2400 Series, EFD) pouvant contrôler la pression de 0psi à 100psi. Les pressions d'extrusion sont ajustées avant les dépositions et le système n'a pas de contrôle en temps réel sur la valeur de la pression mais agit simplement comme un interrupteur "on/off". Il a été envisagé d'effectuer un contrôle en temps réel de la pression en utilisant un convertisseur D/A et une valve électropneumatique. Cela aurait permis de lire la vitesse d'écriture par la rétroaction des encodeurs linaires de la plateforme de positionnement et de corriger la pression afin que le diamètre du filament reste constant. Cependant, un temps de réponse de ~2 secondes est nécessaire aux valves électropneumatiques pour des pressions excédant 30psi dû à des contraintes mécaniques. L'approche d'utiliser une pression constante a donc été conservée.

Le système de contrôle électropneumatique est connecté à un micro-doseur haute pression (HP7X, EFD) qui permet d'augmenter par 7 la pression en sortie. Cette pression est appliquée sur une seringue de 3cc dans laquelle le mélange d'encre est emmagasiné. Des micro-aiguilles (100µm-500µm) avec des embouts circulaires en "stainless steel" d'un quart de pouce (Precision dispense tips, EFD) sont utilisées pour effectuer les dépositions. Globalement, pour un diamètre de filament donné, il faut trouver un couple

vitesse de déplacement/pression pour obtenir un dépôt d'encre continu. Comme nous voulons maximiser les vitesses de déposition, les limites de pression d'extrusion doivent être investiguées.



Figure 2.8 : Système électropneumatique Ultra 2400 et valve multiplicatrice HP7x (www.efd-inc.com).

Ce système est le même qu'utilisé précédemment [31] et a été retenu puisqu'il permet l'application de pression atteignant 700psi sur une seringue. Des fournisseurs d'équipement (Tenequip) offrent des systèmes industriels pouvant atteindre ces pressions, toutefois ces systèmes sont conçus pour de grande quantité de fluide emmagasinée dans des réservoirs. Ce genre de système serait sans doute à envisager pour de réelles applications industrielles mais n'est pas nécessaire dans le cadre de ce projet pour des raisons de commodité et de coût.

2.4 Système d'acquisition de surface

Une modélisation tridimensionnelle des surfaces de déposition doit être obtenue afin d'effectuer ultérieurement la déposition. Les fichiers CAD des circuits ne peuvent être utilisé avec certitude pour effectuer cette modélisation. Il suffit de consulter les schémas

mécaniques des boîtiers d'encapsulation pour observer que les tolérances vont jusqu'à l'ordre du millimètre. La lecture de la topologie de surface doit donc être faite directement sur des cartes de circuit imprimé. Ce type d'acquisition est très complexe; puisque sur ces cartes, on retrouve des composantes de multiple forme, matériel et couleur. Avec la maîtrise actuelle des technologies de profilométrie, la précision de l'acquisition doit être en dessous du micromètre afin que cette partie du processus n'affecte pas la qualité de la déposition.

Il existe deux approches d'acquisition en profilométrie, soit l'acquisition par contact et l'acquisition sans contact. La plupart des standards de finit de surface sont écrits pour les profilomètres tactiles [35]. Ce type d'acquisition est également très utilisé pour l'inspection de la qualité de surface de pièces mécaniques. Elle consiste généralement en une sonde avec un embout en rubis (stylet) qui est mis en contact et déplacé latéralement sur une surface. Cette technique a l'avantage de ne pas être dépendante des propriétés de couleurs et de rugosités de la surface. Cependant, les profilomètres tactiles ne peuvent être employés pour les surfaces angulaires avec des hauts rapports hauteur / largeur. Les composantes intégrées aux cartes de circuits imprimés peuvent atteindre plusieurs millimètre en hauteur et rend donc cette technique inutilisable pour cette application.

L'acquisition sans contact se fait quant à elle avec des profilomètres optiques qui fournissent la même information que les profilomètres tactiles. Deux technologies de mesure de distances sont particulièrement utilisées qui sont l'interférométrie par décalage de phase et la triangulation par laser. Les techniques d'interférométrie optique utilisent la lumière blanche ou une source monochromatique de lumière afin de comparer le

de faisceau de $70\mu\text{m}$ d'une résolution de $0.2\mu\text{m}$. Pour la lecture de PCB, il est configuré en mode de diffusion et la numérisation du profil se fait durant un balayage en X et Y de la surface avec la plateforme de déplacement. Toujours dans un but industriel, il est important de maximiser les performances du processus d'acquisition. C'est pourquoi cet appareil a été sélectionné puisqu'il est en ce moment un des plus performants avec une cadence d'acquisition pouvant aller jusqu'à 50kHz . Évidemment, pour une meilleure stabilité de mesure étant donné l'hétérogénéité de la surface des PCB, l'acquisition a été configurée pour se faire à toutes les $100\mu\text{s}$. De plus, une moyenne de 64 échantillons de lecture est faite afin qu'une mauvaise lecture ne fausse pas le processus entier d'acquisition. Nous obtenons alors une lecture à toutes les $6,4\text{ms}$ ce qui nous limite à une vitesse de déplacement de 20mm/s pour un délai d'acquisition équivalent à $128\mu\text{m}$ sur le plan XY. Un contrôleur (LK-G3001, Keyence) est utilisé pour commander le capteur. Ce contrôleur dispose d'une interface USB pour la configuration et l'acquisition des lectures. Il est également possible grâce à ce contrôleur d'effectuer la lecture avec des sorties numérique et analogique.

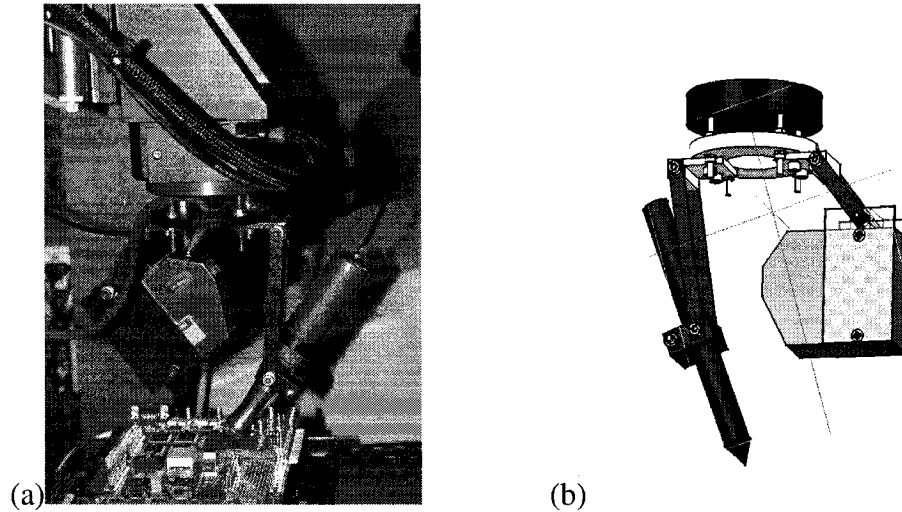


Figure 2.10 : (a)Support des dispositifs de d'écriture et d'acquisition de profil et (b) la détermination du centre de masse de l'ensemble du système déterminé par Catia.

2.5 Support de déposition et d'acquisition

Un support en aluminium, en garolite et en plexiglas a été usiné pour soutenir le distributeur d'encre et le senseur laser. Ce support a été fabriqué de façon à être rigide tout en minimisant sa masse et il est attaché sous le moteur rotatif par quatre vis M4 en acier. Tel que présenté à la figure 2.10(a), deux axes de rotations permettent d'établir la distance ainsi que l'angle de déposition et de lecture. Ce dispositif a été fabriqué à des fins de prototypage pour configurer facilement les possibilités de mesure et de déposition avec des déplacements en X, Y et Z. Le calcul du centre de masse du système, tel qu'illustré à la figure 2.10(b), montre que celui-ci est décalé du côté du senseur de distance même lorsque les deux dispositifs sont à une courte distance l'un de l'autre. La distance entre les deux dispositifs doit normalement être plus grande que la longueur du PCB afin que l'aiguille de déposition n'entre pas en contact avec les

composantes durant les lectures du senseur. Étant donné la vitesse de déplacement d'ADRS100, une rotation en R avec ce support cause un moment de forces radial qui ne permet pas un positionnement avec précision. Mais puisque l'axe R n'a pas été utilisé dans le cadre de ce travail ce support a été conservé. Aussi, l'aiguille et le laser peuvent présenter un décalage observé jusqu'à 800µm. Ce décalage est toutefois corrigé de manière logiciel.

2.6 Interconnexion du système

Le contrôle de la plateforme s'effectue à partir d'un ordinateur standard comme illustré à la figure 2.11. Les contrôleurs des axes de positionnement sont commandés avec une interface firewire (IEEE 1394). Le port firewire du PC est connecté au contrôleur de l'amplificateur linéaire de l'axe X (NLDrive10), qui est à son tour connecté en série aux autres contrôleurs des amplificateurs des axes Y (NLDrive10), Z (NDrive20) et R (NDrive20).

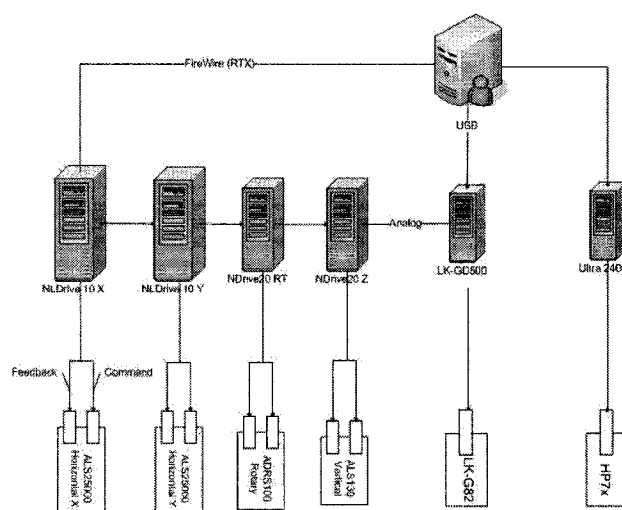


Figure 2.11 : Interconnexion du système de dépôts.

Le contrôleur du capteur laser (LK-G3001) est lié au PC par une interface USB. Cette connexion permet la configuration des options d'acquisition et également d'effectuer des lectures de distance ponctuelles. Par contre, pour une acquisition en temps réel, la sortie analogique du contrôleur est branchée sur l'entrée différentielle analogique du connecteur auxiliaire (J205) du contrôleur de l'axe Z (NDrive20). L'entrée analogique accepte un signal dans l'intervalle ± 10 volts DC sur deux broches (pin#13, #14) convertie en une valeur digital sur 16-bits. Comme la sortie analogique du LK-G3001 fournit une seule sortie non différentielle de $\pm 10.8V$, la broche négative (#14) du contrôleur est mise à la masse et la lecture est faite sur la borne positive. La tension de sortie du LK-G3001 peut être limitée de manière logicielle pour ne pas excéder $\pm 10V$. Toutefois, lors d'une mauvaise lecture ou lorsque aucun objet n'est situé dans l'intervalle de mesure, une tension de 10.8V est générée en sortie ce qui dépasse les spécifications des entrées analogique. Les entrées analogiques sont connectés à un amplificateur différentiel de gain unitaire INA105. Selon les spécifications de ce composant, la valeur de la tension maximale absolu se situe à $\pm 15V$. Un voltage de $\pm 10.8V$ n'a donc pas de risque d'endommager le dispositif et aucun circuit d'interface n'a été nécessaire.

Le contrôleur de pression d'extrusion (Ultra 2400) est commandé par le port parallèle de l'ordinateur. La broche #2 du port, soit le premier registre de données (D0), est mis à une valeur logique 1 pour activer la pression en sortie et la broche #23 a été utilisée pour la mise à la masse de l'interface.

CHAPITRE 3 ARCHITECTURE LOGICIELLE ET INTÉGRATION

L'environnement de développement de ce projet est dicté en grande partie par l'architecture logicielle acquise avec les axes de déplacements et les contrôleurs. Le choix a été fait d'acquérir le logiciel "Automation 3200" afin de programmer à un haut niveau d'abstraction. Les bibliothèques de fonctions et de classes déjà programmées et documentées permettent ainsi de réduire le temps et la complexité de développement. De plus, le développement des logiciels de contrôle de la plateforme avait comme objectifs de fournir aux autres intervenants du projet une interface de contrôle simple et conviviale.

3.1 Description de l'environnement informatique de la plateforme de positionnement.

Le logiciel Automation 3200 inclut plusieurs couches d'exécution. Chaque couche reçoit des instructions des couches supérieures, les traite et renvoie les commandes à effectuer aux couches inférieures. Les commandes nécessitant un traitement en temps réel peuvent ainsi être traitées aux niveaux les plus bas alors que les activités moins critiques comme l'affichage sont assumées par les couches les plus élevées. Évidemment, un traitement temps réel ne pourrait s'effectuer dans l'environnement de Windows. C'est pourquoi l'environnement d'exécution "Real-Time Extension" (RTX) est également installé sur le PC. Ce noyau s'exécute en concurrence avec le noyau de Windows pour fournir un contrôle des requêtes d'interruptions, des accès entrée/sortie et de la mémoire.

Un moteur de contrôle de mouvement synchronisé (SMC) s'exécute dans RTX et ce moteur a la priorité sur tous les processus s'exécutant sur Windows. Cela permet ainsi d'intercepter les requêtes dont les vecteurs d'interruption ont été assignés au SMC.

La figure 4.1 résume le parcours des instructions partant de l'application jusqu'aux contrôleurs des axes de développement. Une partie de la mémoire vive (RAM) est réservée durant l'initialisation aux échanges d'information avec les contrôleurs. Cela permet d'éviter une pagination et une permutation de la mémoire qui serait coûteuse en temps. Le SMC n'a accès qu'à cette espace mémoire où les applications s'exécutant sur Windows envoient les commandes.

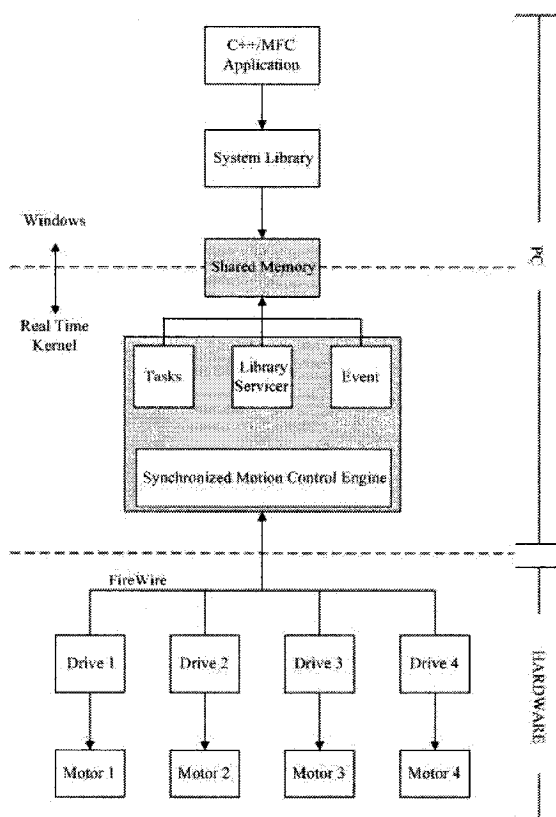


Figure 3.1 : Architecture matériel et logiciel simplifiée.

3.2 Choix de conception logicielle

3.2.1 Langage de programmation

Les langages C et C++ ont été privilégiés aux langages CNC, Visual Basic et LabView. La librairie de fonctions de plus bas niveau accessible aux programmeurs est écrite en langage C et ce choix a été fait par soucis de compatibilité et de performance. Une librairie de classes en C++ est également disponible. Toutefois, cette librairie utilise également la librairie de fonctions en C. Certains arguments et/ou appels de fonction ne sont pas disponibles dans la librairie de classe et c'est pourquoi l'utilisation des deux librairies a été nécessaire.

3.2.2 Modèle de programmation

Le modèle de programmation réfère à la façon dont le programme d'instructions est exécuté par le contrôleur. Il existe trois différents modèles de programmation qui peuvent être mis en œuvre qui sont les modèles par librairie, par commande numérique par ordinateur (CNC) et par file d'attente.

Dans le modèle de programmation par librairie, les commandes sont simplement des appels de fonction gérés par Windows et envoyé à travers la mémoire partagée au SMC qui exécute la commande. Ce modèle de programmation est utilisé lorsque la synchronisation avec d'autres processus Windows s'exécutant en concurrence est nécessaire. Toutefois, il ne peut y avoir de contrôle temps réel avec ce modèle de programmation. Le temps processeur alloué à ce programme s'exécutant sur Windows

est égal aux autres processus. Également, l'architecture du SMC est limitée à une commande par axe à chaque milliseconde. Ce mode est donc le plus facile à programmer et est approprié pour des applications simples mais est limité en temps d'exécution et en capacité de contrôle.

Le modèle CNC utilise des commandes dans le langage G-code / RS-274D pour construire les programmes. Ces programmes sont compilés et téléchargés en code binaire directement dans le contrôleur du SMC profitant ainsi de l'environnement temps réel de RTX.

Le modèle de programmation par file d'attente est un hybride du modèle par librairie et du modèle CNC. C'est ce modèle qui a été utilisé pour les programmes développés pour ce projet. Les commandes sont exécutées dans la tâche du CNC, mais au lieu de compiler et de télécharger un programme entier de commande CNC, l'alimentation de la tâche se fait une ligne à la fois d'un programme Windows. Les commandes sont envoyées sous forme d'appel de fonction plutôt que de code CNC. L'avantage du modèle de file d'attente est que le programmeur peut écrire les commandes en langage C/C++, tout en tirant profit de la vitesse et du traitement en temps réel de l'environnement CNC. Les inconvénients de ce modèle proviennent du fait que la commande numérique par ordinateur s'effectue en temps réel contrairement au programme s'exécutant sur Windows. Un tampon ou une file d'attente doit donc être implémenté pour protéger les commandes fournies par le programme et éviter des problèmes potentiels de latence.

3.3 Interfaces utilisateur

3.3.1 Conception des microstructures

Un premier programme, dont l'interface est présentée à la figure 3.2, permet la génération des coordonnées de trajectoires des déplacements nécessaires à la fabrication des microstructures.

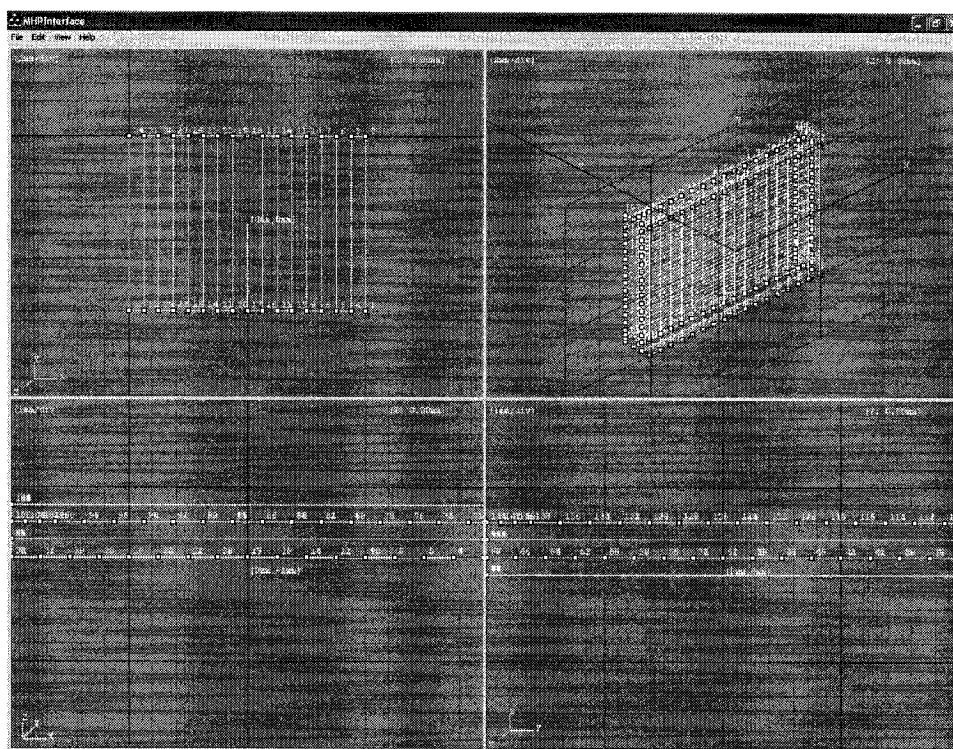


Figure 3.2 : Interface du logiciel de conception de microstructures tridimensionnelles (développée par Martin Mankiewicz).

Cette interface permet de définir les coordonnées sur le plan horizontal (x,y) en micromètres en zoomant lorsque la dimension de positionnement est nécessaire. Il est également possible de construire des configurations tridimensionnelles en sélectionnant

différentes couches sur le plan vertical (z). L'axe z n'est pas défini en micromètres mais plutôt en numéro de couche.

Il suffit de cliquer avec le bouton gauche de la souris pour ajouter des points de trajectoires sur quadrant II (plan (x,y)) de la fenêtre. Les quadrants III (plan (x,z)) et IV (plan (y,z)) permettent de sélectionner la couche sur laquelle les points sont définis et de visualiser les liens entre les couches. Le quadrant I fournit une vue isométrique dans laquelle il est possible de naviguer dans un environnement OpenGL 3D. Il est également possible de sélectionner une série de points, de les déplacer, les copier et de les coller. Cette option s'avère très utile puisque la fabrication de structure tridimensionnelle avec l'écriture directe nécessite que ces structures soient périodiques. Donc pour designer une structure de 40 couches avec deux géométries répétitives, il suffit de concevoir les deux premières couches et de les copier 20 fois. Le programme permet finalement d'exporter les coordonnées dans des fichiers de format excel.

3.3.2 Interface de contrôle de la plateforme de déposition

Plusieurs logiciels ont été développés dans le cadre de ce projet pour contrôler la plateforme de positionnement. Le premier programme développé permet l'écriture sur des surfaces planes. Le défi de ce dernier tel que mentionné dans la section 3.2.2 est la communication en temps réel avec la plateforme. C'est ce logiciel qui fut utilisé pour les tests d'écriture à haute vitesse. Ensuite, une deuxième version de logiciel met l'accent sur la paramétrisation de courbes BSplinaire et la déposition de microcanaux suivant des courbes d'ordre deux. Finalement, un programme permettant l'acquisition de la

topologie des surfaces et l'écriture sur celles-ci fut développée. Les sections suivantes de ce chapitre mettront l'accent sur cette version du logiciel étant le plus complexe et complet de ces trois logiciels. Les autres versions de logiciel sont toutefois toujours employées lorsque la fabrication de microcanaux n'exige pas une acquisition de surface.

MHP: Surface Profiling Deposition

Data Center

Start Data Center Stop Data Center

	Positions	Axis	Offset (mm)
X	0.000		0.34
Y	0.000		-69.769
Z	-0.000		-0.2855
R	0.001		

Task Fault Fault Ack

Status Curve Initialized

Platform Initialization

Initialize SMC Home

Disable Enable

Surface Acquisition

First Acq Point Acquisition

Deposition

First Dep Point Deposition

Parameters

Channel Size (mm) 0.15

Precision (mm) 0.2

Writing Speed (mm/s) 80

Scanning Speed (mm/s) 20

Apply Parameters

Deposition Pattern

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X position	10	10	8.75	8.75	7.5	7.5	6.25	6.25	5	5	3.75	3.75
Y position	-10	10	10	-10	-10	10	10	-10	-10	10	10	-10
Layer	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rotation												

Open File Clear Points Close

Figure 3.3 : Interface permettant de commander la plateforme de déposition pour l'acquisition et l'écriture sur une surface complexe.

La figure 3.3 présente l'interface utilisateur de ce programme permettant l'acquisition d'une surface et la déposition de microfilaments sur cette surface. La fenêtre de dialogue de cette application est divisé en six sections.

La première, le "Data Center" permet de visualiser la rétroaction de positionnement des encodeurs linéaires de chacun des axes. Les erreurs retournées par les contrôleurs, s'il y a lieu, s'affiche dans les champs "Axis" et "Task Fault". Un champ "status" permet également d'informer l'utilisateur sur le résultat des commandes envoyées. Les champs "Offsets" permettent quant à lui à l'utilisateur d'entrer les décalages en x, y et z entre l'extrémité de l'aiguille de déposition et du faisceau du capteur de distance laser.

La section "Parameters" permet d'établir les principaux paramètres de l'acquisition et de la déposition. Le champ "Channel Size" contient le diamètre du filament déposé. Cette valeur sera utilisée pour calculer l'incrément vertical pour la déposition de chacune des couches. Le champ "Precision" contient la distance d'échantillonnage qui permet de déterminer la fréquence d'acquisition de la surface. Les champs "Writing Speed" et "Scanning Speed" permettent de fixer les vitesses de déplacement pour la déposition et pour l'acquisition respectivement.

La section "Platform Initialization" contient les fonctions primaires d'initialisation de la plateforme. Après le démarrage de l'application, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton "Initialise SMC". Cette fonction lance l'exécution d'une instance de moteur de contrôle de déplacement synchronisé sur le noyau RTX et crée un objet de communication avec celui-ci. Les quatre moteurs sont initialisés et effectuent un déplacement pour trouver l'origine de chacun des axes. Les trois autres boutons sont

"Disable", "Enable" et "Home" permettent de réinitialiser le système en cas d'erreurs. Ces erreurs peuvent résulter d'une géométrie impossible à effectuer à la vitesse commandée ou encore à la présence d'objet dans la trajectoire de déplacement. L'utilisateur devra, après avoir réglé le problème, cliquer sur "Fault ack", "Disable", "Enable" puis "Home".

La section "Deposition Pattern" permet soit d'entrer les coordonnées d'écriture manuellement dans la grille ou de les télécharger. Le téléchargement se fait en cliquant sur le bouton "Open File" et en sélectionnant le fichier contenant les coordonnées de trajectoires. Le bouton "Clear Points" sert à effacer les points de la grille d'entrée mais également à réinitialiser les structures de données précédemment créées.

Pour des fins de prototypage, les étapes d'acquisitions et de dépositions ont été segmentées afin de pouvoir suivre pas à pas l'évolution de celles-ci. Dans la section "Surface Acquisition", l'utilisateur doit d'abord cliquer sur le bouton "First Acq Point". Les axes X et Y se positionnent alors sous le capteur laser à la première coordonnée d'écriture. Une boucle de contrôle permet alors la lecture de la distance et le positionnement vertical à la bonne hauteur. Lorsque le positionnement est terminé, l'utilisateur peut cliquer sur "Acquisition" afin de débiter le processus de numérisation de la surface. À la fin de celui-ci, une fenêtre OpenGL affichera le résultat de la numérisation et l'utilisateur pourra inspecter le modèle généré afin de confirmer qu'il n'y a pas d'erreurs observables.

Finalement, la section "Deposition" permet à l'utilisateur de cliquer sur "First Dep Point" et "Deposition" afin d'effectuer la déposition.

3.4 Classes du programme d'acquisition et d'écriture sur des surfaces complexes

Le programme présenté à la section précédente doit désormais être décomposés en classes pour être en mesure de formuler son environnement fonctionnel. Le nombre relativement restreint de classes créées permet la présentation succincte de l'ensemble de celles-ci ainsi que de leurs principales méthodes. Le diagramme d'interaction des classes entre elles est quant à lui présenté à la section 3.5 sous la forme d'un diagramme de classes.

3.4.1 Classe CMHPDlg

La classe CMHPDlg prend en charge les fonctionnalités de la fenêtre de dialogue et c'est à partir de celle-ci que toutes les commandes sont lancées par l'utilisateur. Elle hérite de la classe CDialog et de CWnd comme toutes les fenêtres de dialogue de visual C++/MFC. CWnd donne accès à toutes les fonctions de base que l'on peut faire sur une fenêtre. CMHPDlg hérite également de CAerDataCenter qui permet, grâce à des interruptions, de mettre à jour les informations de positionnement et d'état des axes de positionnement affiché sur la fenêtre.

3.4.2 Classe CMSFlexGrid

MSFlexGrid est une classe activeX de Microsoft qui permet de créer et de définir une grille de données. La grille est alimentée et consultée par les fonctions de cette classe appelée par la classe CMHPDlg.

3.4.3 Classe C3DModel et COpenGLWnd

La classe C3DModel permet de créer une structure de données de points tridimensionnelle. Cette classe fait ensuite appel à COpenGLWnd qui permet d'afficher un environnement OpenGL dans une fenêtre Windows de visual studio.

3.4.4 Classe CBSpline

Cette classe permet la paramétrisation des points de contrôle en courbe BSpline de degré 3, 2 ou 1. Les structures de données de quatre dimensions déjà implémentées dans cette classe sont également utilisées pour stocker les points d'acquisition de surface.

3.4.5 Classe CLaserControl

Comme son nom l'indique cette classe se charge de la communication avec le capteur laser par l'interface USB. La fonction "ReadLaser" permet de lire la valeur du capteur de distance connecté au contrôleur Laser.

3.4.6 Classe CStageControl

Cette classe interagit directement avec les classes CAerQueue et CAerControl qui permettent de commander les contrôleurs des axes de positionnement. Une librairie de fonctions, présenté à l'annexe E, a été codée dans cette classe et permet d'effectuer toutes les opérations nécessaires à ce projet en minimisant le nombre d'arguments à fournir. La classe CStageControl communique également avec la classe CBSpline pour créer ces propres structures de données lors de l'acquisition de surface. Finalement, la lecture du

capteur laser ce fait dans cette classe soit avec la classe CLaserControl soit à travers l'entrée analogique d'un des contrôleurs des axes de positionnement.

3.4.7 Classe CDispenserControl

Cette classe permet la commande du port parallèle utilisé pour le contrôle du système de distribution d'air comprimé lors de l'extrusion d'encre. Les commandes incluent un délai de 500ms dû aux contraintes mécaniques du dispositif.

A3200 Librairies de Classes

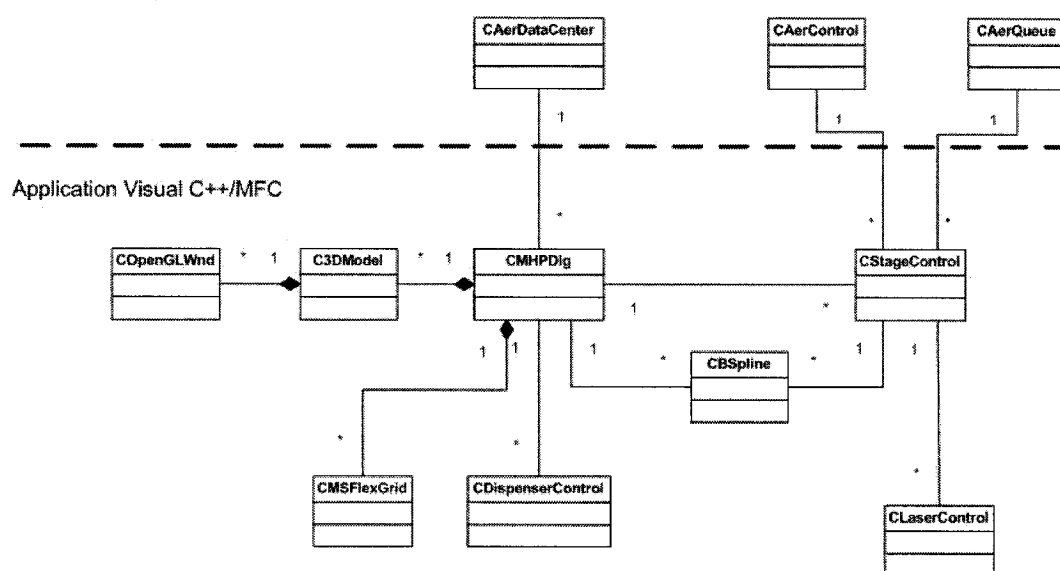


Figure 3.4 : Diagramme de classes du programme d'acquisition de surface et de déposition.

3.5 Diagramme de classe

Le diagramme de classes permet, dans le processus logiciel normal, de donner une vue d'ensemble des interactions entre celles-ci afin d'illustrer les modélisations logicielles d'une façon organisée et hiérarchique. Le diagramme de la figure 3.4 illustre à la fois les

classes du programme d'acquisition et de déposition ainsi que les librairies de classes de l'environnement de développement "A3200". Les deux environnements dans lesquels sont inscrites ces classes sont clairement illustrés également.

La classe CMHPDIg se trouve au centre du diagramme puisque les opérations effectuées dépendent des fonctions lancées par l'utilisateur. Toutes les fonctions de contrôle de la plateforme et d'acquisition de distance sont toutefois gérées par la classe CStageControl ce qui permet une meilleur réutilisation du code pour le développement de d'autres applications.

3.6 Traitement des trajectoires de déposition et la paramétrisation de courbes.

L'algorithme de B-Spline est une première fois appliquée sur la trajectoire définie par l'utilisateur. Cette première courbe est toutefois définie de degré 1. Cette paramétrisation est effectuée pour régulariser la courbe en définissant des points équidistants. Ce traitement est primordial pour plusieurs raisons. Dans un premier temps, cela permet un flux régulier des données de la mémoire tampon puisque la plateforme se déplace à vitesse constante. Ensuite, des points de contrôle à courte distance et équidistant permettent de ne pas dénaturer la courbe définie par l'utilisateur mais seulement de rendre le déplacement plus fluide lors de la définition de B-Spline de degré 2 ou 3. Aussi, les courbes résultantes des algorithmes B-Spline sont dépendantes des rapports de longueur de cordes entre les points de contrôle et la définition du vecteur nodal. Le vecteur nodal est quant à lui défini de manière équidistante. Ainsi la classe CBSpline est

utilisée plus d'une fois pour un raffinement de la courbe avant l'application de l'algorithme B-Spline

3.6.1 Algorithme B-Spline

On cherche ici à obtenir une représentation de la courbe de la forme présentée à l'équation 1:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n f_i(u)P_i \quad (1)$$

où les P_i sont les points de contrôle, et les f_i sont des fonctions polynomiales par morceau qui forment une base de l'espace vectoriel de toutes les fonctions polynomiales par morceau pour un degré p et un niveau de continuité donné (pour une séquence de u_i).

Il suffit donc d'itérer pour chaque valeur de u selon la segmentation voulu à travers le vecteur nodal. La fonction "FindSpan" nous permet de trouver dans quel intervalle nodal se situe un u donné. Le nœud se trouve à être plus petit ou égal à la valeur de u . Nous ne considérons pas les p premiers et les p derniers nœuds. Puisque dans ces cas, les fonctions de base de degré p ne sont pas définies. Il existe une seule exception à cette étape, il s'agit du moment où $u = u_{m-p-1}$, dans ce cas, le nœud sera égale à u_{m-p} .

Ensuite, nous nous devons de calculer les fonctions de base pour le degré voulu. Nous savons, comme il est illustré ci-dessous, que seule la fonction de base du nœud de u de degré 0 sera égale à 1. Les autres fonctions de base doivent être calculées en fonctions des valeurs du vecteur nodal et des fonctions de base de degré inférieur.

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3)$$

Dans la fonction BasisFunctions, nous créons un tableau en 2 dimensions de $p+2$ lignes et de $p+1$ colonnes. Seule la fonction de base i de degré 0 égale à 1, toutes les autres valeurs sont initialisées à zéro. Nous avons ensuite développé un algorithme de calcul qui part de la deuxième colonne et qui calcul les fonctions de base de degré 1 selon la formule présenté plus haut. Ce calcul se poursuit jusqu'à ce que l'on atteigne la colonne p . Bien que la dernière ligne est inutile, elle nous permet de généraliser notre algorithme puisque le calcul de $N_{i,p}$ nécessite le calcul de $N_{i+1, p-1}$. Nous illustrons ci-dessous notre tableau.

$N_{i-3,0}$	$N_{i,1}$	$N_{i,2}$	$N_{i-3,3}$
$N_{i-2,0}$	$N_{i,1}$	$N_{i-2,2}$	$N_{i-2,3}$
$N_{i-1,0}$	$N_{i-1,1}$	$N_{i-1,2}$	$N_{i-1,3}$
$N_{i,0}$	$N_{i,1}$	$N_{i,2}$	$N_{i,3}$

Figure 3.5 : Illustration des fonctions de base définies pour une courbe de degré 3.

Finalement, nous récupérons les fonctions de base de degrés p et nous les multiplions aux points de contrôle correspondant dans la fonction "Evaluate". La fonction "DrawSpline" effectue ce calcul pour chaque valeur possible de u à travers le vecteur nodal et nous obtenons ainsi notre courbe B-Spline de degré p .

3.7 Processus de déposition

Le processus d'écriture est l'opération la plus sensible du programme. La problématique provient du fait de l'envoi de points de trajectoire distant de 100 μ m et exécuté à des vitesses de 40mm/s à 88mm/s avec une taille de mémoire limitée. Si la mémoire se vide, la plateforme s'arrête et attend les prochains points ce qui causera une discontinuité du filament. Également, si la mémoire du contrôleur est pleine, les points de trajectoire envoyés seront perdus. Comme expliqué à section 3.2, l'exécution de ces points de trajectoire est géré en temps réel sur les contrôleurs des axes de positionnement alors que l'envoi des points est fait à partir d'une application Windows. La figure 3.6 présente la section de code de la classe CMHPDlg qui fait la gestion de l'envoi des points au contrôleur. La mémoire tampon est initialisée à sa capacité maximale qui lui permet de contenir 10000 lignes de commande. La boucle présentée permet de conserver le tampon à ~80% de sa capacité en envoyant 100 coordonnées(x,y,z) à la fois et en interrogeant le contrôleur sur l'état de la mémoire. Le délai entre l'interrogation du contrôleur, la réception de sa réponse et l'état actuel de la mémoire empêche l'utilisation complète de la mémoire en boucle fermée.

```

// boucle à travers tous les points d'acquisition
while(loop < (g_BSpline.GetAcqPointNb()-1)){

    // envoie des points en groupe de 100 au contrôleur
    for(i=loop; i<(loop + 100) && i<g_BSpline.GetAcqPointNb(); i++){
        XPos = g_BSpline.GetAcqPoint( i ).x + m_OffsetX; // coordonnée en X + offset du laser
        YPos = g_BSpline.GetAcqPoint( i ).y + m_OffsetY; // coordonnée en Y + offset du laser
        ZPos = Zposition - g_BSpline.GetAcqPoint(i).z + m_OffsetZ; // coordonnée en Z + offset du laser

        // Envoie des points à la mémoire tampon du contrôleur
        szErrorText = m_Stage.FillG1QueueMotionXYZ(XPos, YPos, ZPos, m_WritingSpeedXYZ);
        if (szErrorText != NULL){
            MessageBox(szErrorText);
        }
    }

    // Interrogation du nombre de ligne dans la mémoire
    szErrorText = m_Stage.GetQueueInfo(&QueueLineNumber);
    if (szErrorText != NULL){
        MessageBox(szErrorText);
    }

    // Si plus de 8000 on boucle
    while(QueueLineNumber>8000){
        szErrorText = m_Stage.GetQueueInfo(&QueueLineNumber);
        if (szErrorText != NULL){
            MessageBox(szErrorText);
        }
    }

    loop = loop + 100;
}

```

Figure 3.6 : Code de gestion des points de trajectoire durant la phase de dépôt.

3.8 Processus d'acquisition de surface

Le processus d'acquisition de surface est également critique et susceptible à la latence des différentes composantes de la plateforme. Le diagramme de séquence présenté à la figure 3.7 présente l'interaction des classes mises en œuvre pour atteindre cet objectif. Ce procédé est basé sur un déclencheur programmable directement implanté sur les contrôleurs. Ce déclencheur permet d'acquérir les valeurs des entrées des contrôleurs sans interrompre le mouvement des axes. Ainsi, les valeurs de rétroaction des axes X et Y ainsi que la valeur de l'entrée analogique connectée au capteur laser peuvent être acquis à toutes les millisecondes et emmagasinées. Cette mémoire est limitée à 8000

entrées lorsque programmé pour trois valeurs d'acquisition. L'acquisition et le mouvement des axes doivent donc être interrompus afin de télécharger et convertir les données dans une structure de la classe BSpline. Cette interruption dure moins d'une seconde et une boucle permet d'acquérir tous les points définis par la trajectoire de déposition.

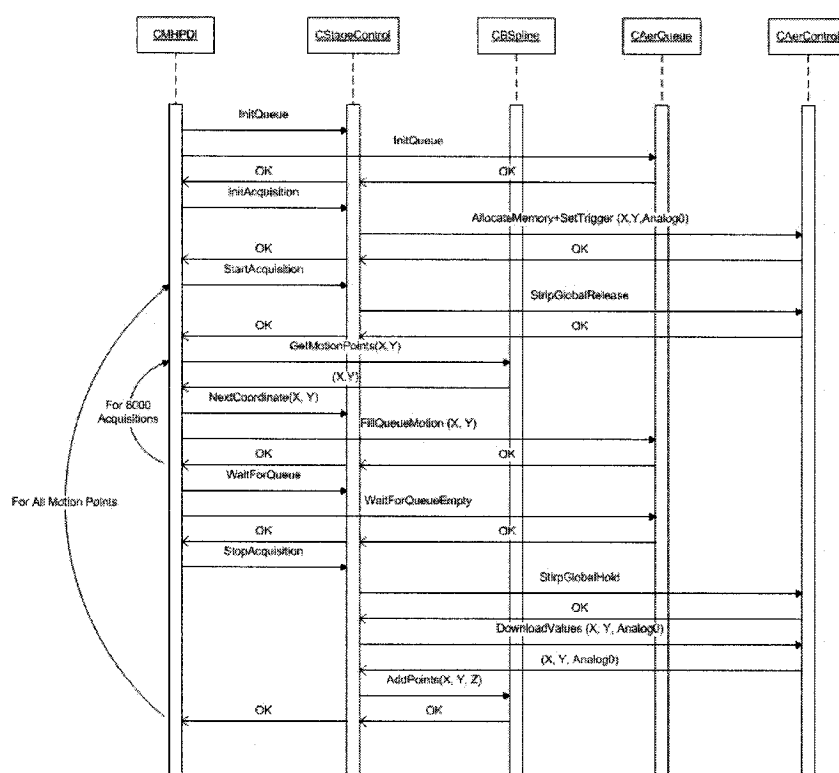


Figure 3.7 : Diagramme de séquence du processus d'acquisition de surface.

3.9 Validation et tests logiciel

Les tests du logiciel ont d'abord été effectués avec une approche "boîte blanche". La validation des structures de données et des différentes classes et fonctions a été faite en utilisant le débogueur de Visual Studio. Une approche "boite noire" a ensuite été utilisée

en fabriquant directement des microstructures pour assurer les fonctionnalités du programme. Ainsi les entrées et sorties ont pu être analysées et les dysfonctionnements corrigés. Les résultats présentés dans le chapitre 4 confirment le bon fonctionnement du logiciel.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats de l'intégration industrielle de la méthode d'écriture d'encre directe. Le premier aspect de cette intégration est l'écriture directe à haute vitesse avec la plateforme de déposition développée. L'article "High speed direct-write for rapid fabrication of three-dimensional microfluidic devices", annexé à ce mémoire, présente de manière détaillée les résultats de cette étude. Le deuxième aspect présenté est l'intégration de microcanaux sur des surfaces complexes. Cette section présente les résultats de microfabrication et les performances de déposition sur des cartes de circuit imprimés avec la plateforme. Le troisième aspect développé est l'intégration des microcanaux dans les couches internes des PCB. L'article "PBC-integrated heat exchanger for cooling electronics using microchannels fabricated with the direct-write method", également annexé à ce mémoire, présente de façon détaillé les étapes d'intégration de cette méthode. Finalement, la technique de fabrication de microcaloducs à section triangulaire est expliquée. Cette technique est l'étape intermédiaire permettant de fabriquer des microcaloducs en deux dimensions par écriture directe. L'objectif ultime de ce projet étant la fabrication de configuration tridimensionnelles de microcaloducs.

4.1 L'écriture à haute vitesse

L'assemblage d'une plateforme robotisée pouvant optimiser les paramètres de déposition, tel que présenté au chapitre 2, constituait la première étape de ce travail.

Ensuite, une interface simple de contrôle a été programmée pour permettre des dépositions sur des surfaces planaires. C'est dans ce contexte que se situe l'article "High speed direct-write for rapid fabrication of three-dimensional microfluidic devices" annexé à ce document. Dans cet article, les limites de vitesse de déposition ainsi que l'influence de ceux-ci sur les structures ont été expérimentalement explorées. Ces tests ont été faits avec des diamètres de filaments de $200\mu\text{m}$ et la limite de vitesse d'écriture pour des structures tridimensionnelles en forme d'échafaudage se situe à 88mm/s . L'axe Z qui permet l'incrément vertical du dispositif d'écriture de $170\mu\text{m}$ à chaque étage ne peut fournir une accélération suffisante pour garder une vitesse constante au-delà de 88mm/s . Cette limite est toutefois fonction de l'incrément à effectuer donc du diamètre du filament mais d'autres diamètres n'ont pas été caractérisés.

L'encre utilisée est un mélange de cire microcristalline et de gelé de pétrole. L'encre démontrant les meilleures propriétés viscoélastiques est celle qui est constituée de 40% en fraction massique de cire [29]. Toutefois ce mélange est très visqueux et la limite du dispositif d'extrusion ne permet pas de dépasser une vitesse d'écriture de 60mm/s pour un diamètre de $200\mu\text{m}$. Des encres de 20% et 30% de cire ont été fabriqués et le capteur de distance laser a été utilisé pour déterminer la rugosité moyenne des filaments déposés à différentes vitesses. Il a d'abord été observé qu'il n'y a aucune relation entre la vitesse de déposition et la rugosité des filaments. Ensuite, il en ressort que la rugosité moyenne augmente de quelques micromètres lorsque la fraction de cire augmente. Le mélange de 30% semble disposer des meilleures propriétés et capacités d'extrusion pour l'écriture à haute vitesse. Toutefois, pour l'écriture de structure tridimensionnelle, nous observons

avec l'encre de 20% un meilleur entrelacement des filaments et une meilleure fluidité d'écoulement de l'encre.

Un algorithme de courbe B-Splinaire a aussi été appliqué aux points de trajectoires d'écriture. Cette partie de l'article tente à démontrer qu'il est possible d'optimiser de manière logicielle la trajectoire d'écriture afin d'améliorer la qualité des canaux. L'écriture à haute vitesse de formes avec des angles autour de 90° cause des changements brusque de direction de la plateforme et peut endommager la qualité des structures. L'application de cet algorithme permet de ne pas dégénérer la forme des canaux, d'effectuer des mouvements fluide avec la plateforme et le temps de calcul de courbes B-Splinaire de deuxième ou troisième degré est négligeable.

Cet article constitue donc un travail exploratoire sur les possibilités d'optimisation de l'écriture d'encre directe a des fins industrielles. Bien que tous les paramètres et diamètres d'écriture n'ont pas été explorés, les résultats montrent qu'il est possible de multiplier par un facteur d'au moins 8 les vitesses actuellement utilisées.

4.2 L'écriture sur des surfaces complexes

La plateforme de déposition a également été testé pour la déposition de microcanaux sur des cartes de circuits imprimés peuplés. Cette implémentation se sert du capteur de distance afin de numériser le profil avant l'écriture. L'acquisition du profil des cartes de circuits imprimés se fait aisément mais dépend également des composantes présentes sur les cartes. En effet, il est important que la lumière réfléchi sur la surface puisse être reflétée sur la composante CCD du capteur. Les vias non couverts, les boîtiers trop hauts

ou les broches des boîtiers qui se situent sur les côtés peuvent empêcher une bonne réflexion de la lumière. Les vias et les connexions apparentes doivent ainsi être scellés avant la numérisation et les procédures d'écriture. La figure 4.1 présente une représentation graphique de la numérisation d'une portion de carte avec un processeur pour la déposition d'une couche de microfilaments.

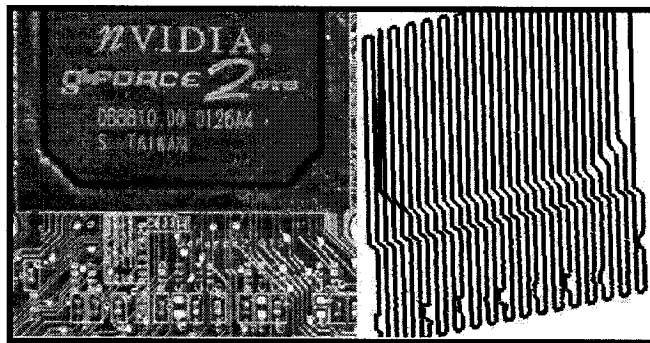


Figure 4.1 : Représentation graphique de l'acquisition (droite) d'une section peuplée d'une carte de circuit imprimé (gauche) employant le capteur laser (tirée de [40]).

La déposition est effectuée subséquemment à la numérisation en suivant la même trajectoire que celle-ci. Une calibration est nécessaire afin de déterminer la distance entre le faisceau laser et l'aiguille à la même hauteur. La figure 4.2 présente une déposition en deux dimensions sur une composante électronique d'un PCB. Cette déposition est faite avec un filament d'encre de 250µm de diamètre avec une distance entre les filaments de 1mm. Le boîtier soudé à la carte à une hauteur de ~2mm. La trajectoire suivie durant la déposition a permis une écriture à une distance constante de la surface puisque le filament déposé adhère à la surface même sur une géométrie à 90°.

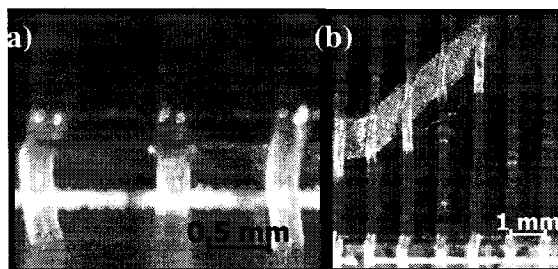


Figure 4.2 : Déposition en deux dimension de filaments d'encre (diamètre = $250\mu\text{m}$) (a) sur un PCB : sur une surface à 90° ; (b) sur une surface à $\sim 45^\circ$ (tirée de [40]).

L'étape critique lors de la fabrication de microstructure tridimensionnelle est la déposition de la première couche, celle qui est directement déposée sur le substrat. Si lors de la déposition sur une surface complexe, l'aiguille entre en contact avec une pièce de la carte, cette aiguille est automatique endommagée. Le processus doit alors être annulé et l'aiguille remplacée. Il est facile, une fois que la première couche a été déposée, d'incrémenter la position verticale et de fabriquer des structures 3D. Une microstructure en échafaudage 3D de deux couches a été fabriquée au-dessus d'une composante électronique de $\sim 2\text{mm}$ de hauteur. Le diamètre des canaux est cette fois de $200\mu\text{m}$ et la distance entre les canaux est de 1mm .

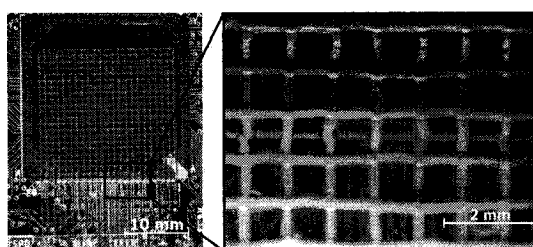


Figure 4.3 : Réseau microfluidique tridimensionnelle couplé à une composante sur une carte de circuit imprimée. Le réseau est complètement rempli de fluide fluorescent et observé par microscopie optique UV [40].

La structure a ensuite été infiltrée à température ambiante à l'aide d'une époxy à faible viscosité (mélange 2.5 :1, Epon-828 (*Shell Chemicals*) et de l'Epicure 3274 (*Shell*

Chemicals). Après une polymérisation de 24 heures, l'encre fugitive a été retirée grâce à une pompe sous vide en plaçant la structure dans un four à 70°C. Deux ouvertures fabriquées avec des points d'encre permettent l'accessibilité à la structure après l'infiltration avec des microtubes. De l'eau chaude (température ~ 55°C) a aussi été injectée dans le réseau pour retirer les traces d'encre organique sur la paroi des canaux. Puis, après avoir fermé une des deux ouvertures du réseau avec de la colle (Colle époxy 5 min, *Permatex*), le vide a été fait dans le réseau. Finalement, le réseau a été rempli de fluide fluorescent en utilisant l'ouverture restante à l'extrémité de la structure.

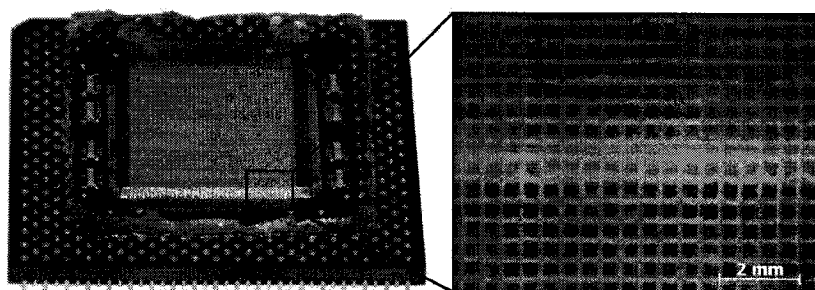


Figure 4.4 : Quatre couches de microcanaux de 200µm de diamètre couplé à un processeur Intel et rempli de fluide fluorescent observé par microscopie optique UV [40].

Un réseau de quatre couches de microcanaux de 200µm de diamètre a également été fabriqué au-dessus d'un boîtier en métal d'un processeur d'Intel. Les canaux ne montrent aucune déformation significative pour une distance de suspension de 500µm et n'ont pas été endommagés dans la procédure d'infiltration de la résine époxy. Ces essais montrent également la compatibilité de la résine époxy aux matériaux de boîtier et de PCB avec une forte adhérence. Il est aussi important pour augmenter l'adhérence de l'époxy qu'une surface significative sans encre soit infiltrée.

Le temps de fabrication est également critique pour la production de masse de composantes. Lors de ces expérimentations, la vitesse d'écriture maximale se situait à 40mm/s et la limitation était due à la limite de la mémoire des contrôleurs. En effet, pour l'écriture sur des surfaces complexes, les coordonnées des trajectoires en X, Y doivent être distante de seulement 100 μ m. Cet échantillonnage nécessite l'envoi des points dans une boucle fermée durant l'exécution des mouvements du robot. Une plus grande allocation de mémoire et une meilleure gestion de la boucle fermée ont toutefois permis d'augmenter la vitesse d'écriture à 60mm/s et d'améliorer la fluidité du mouvement. Ces performances d'écriture ont été expérimentées sur des surfaces en plexyglass graduel tel qu'illustré sur la figure 4.5.

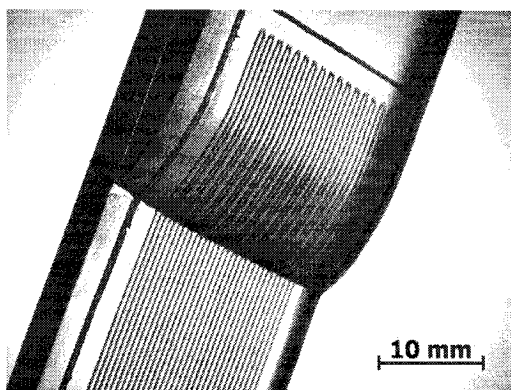


Figure 4.5 : Photo prise au microscope optique de filaments de 200 μ m de diamètre déposés sur une surface graduelle après une acquisition de surface.

Les résultats démontrent qu'il est en effet possible de déposer l'encre sur des surfaces complexes. La procédure de fabrication de microcanaux par écriture directe permet de coupler les microcanaux à une grande quantité de matériaux sans endommager la surface. La possibilité d'écrire sur des surfaces complexes rend cette technologie encore

plus attrayante autant pour des applications de dissipation de chaleur que pour d'autres applications comme le domaine des "lab-on-chip".

4.3 L'intégration des microcanaux dans les PCB

Un des objectifs du projet Micro Heat Pipe est d'intégrer les microcanaux dans les couches internes des cartes de circuits imprimés. Des couches de cuivre sont présentement utilisées dans les PCB afin de dissiper le flux de chaleur provenant des vias thermiques. Une série de microcaloducs stratégiquement placés près de ces vias permettrait d'améliorer les capacités de dissipation des composantes électroniques utilisant cette technologie.

Le but de cette étude est d'investiguer la compatibilité du procédé d'écriture d'encre directe avec la fabrication de PCB de plusieurs couches. Comme la technologie de microcaloducs fabriqués par écriture directe n'est pas à ce jour maîtrisée, la fabrication de microéchangeurs de chaleur a plutôt été privilégiée. C'est ainsi que l'article "PCB-integrated heat exchangers for cooling electronics using microchannels fabricated with the direct-write method" présente cet aspect du projet. Des microcanaux de 200 μm et de 500 μm sont fabriqués et intégrés à l'intérieur de PCB. Les microcanaux ont été intégrés à un circuit et la formation de via thermique et électrique par électrodéposition a été réalisé. Un circuit interne a été utilisé afin de générer un flux thermique et une circulation de fluide a permis de contrôler la température du circuit. Ces tests thermiques ont été effectués uniquement sur les canaux de 500 μm de diamètre comme preuve de

concept. Les résultats démontrent une dissipation de chaleur modérée jusqu'à 0.81 W/cm^2 mais pour un débit d'uniquement 3 ml/min .

4.4 La fabrication de microcaloducs à section triangulaire

Le fonctionnement des microcaloducs fabriqués en deux dimensions nécessite la présence d'angles dans la géométrie de ceux-ci afin d'augmenter les tensions de surface permettant le retour du fluide de l'évaporateur au condenseur. L'écriture directe par déposition robotisée a donc été utilisée dans le cadre de ce projet pour fabriquer des canaux de section triangulaire.

4.4.1 Procédure de fabrication d'un microcanal de section triangulaire

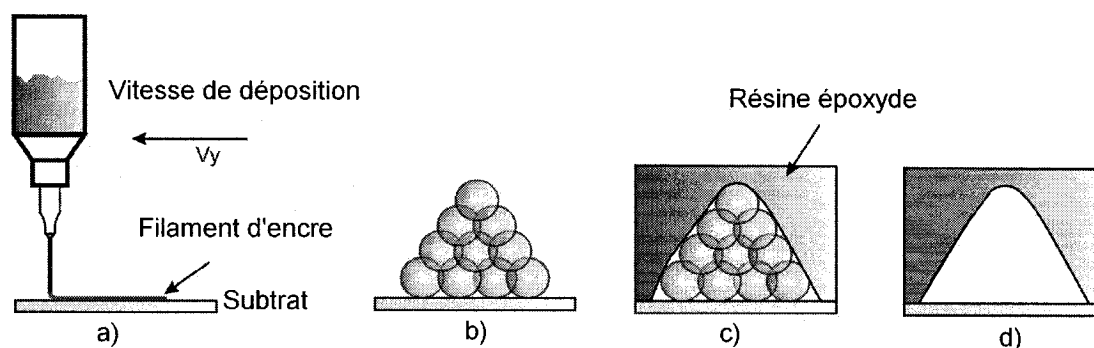


Figure 4.6 : Fabrication d'un microcanal à section transversale triangulaire par écriture directe : a) Déposition de l'encre ; b) Déposition multicouche ; c) Infiltration de la structure ; d) Retrait de la structure (tirée de [31]).

La méthode de fabrication des microcanaux à section triangulaire est illustrée à la figure 4.6. Un filament d'encre cylindrique de $100 \mu\text{m}$ de diamètre est extrudé et déposé sur un substrat. Un microcanal à section transversale triangulaire est obtenu par un empilement de canaux à section circulaire. La première couche consiste à quatre

filaments parallèles à section circulaire de 100 μm dont la distance externe entre les filaments est nulle afin d'avoir une structure solidaire. Cette procédure est répétée pour les couches supérieures en effectuant un incrément de la position verticale de la micro-aiguille (85% du diamètre du filament), une translation des filaments déposés et le décrétement du nombre de filament d'une entité à chaque fois. La déposition est observée à l'aide d'un stéréomicroscope rattaché au montage. L'encre fondue est extraite en appliquant une pression à l'une des ouvertures de la structure. Finalement, le microcanal est nettoyé par la circulation d'eau chaude pendant quelques secondes.

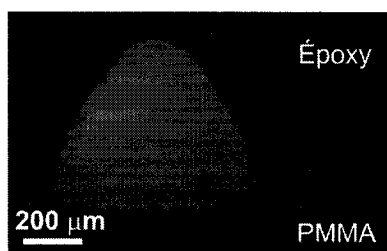


Figure 4.7 : Image à partir d'un microscope UV d'un microcanal à section triangulaire infiltré par un liquide fluorescent (tirée de [31]).

La figure 4.7 présente la forme d'un microcanal à section triangulaire fabriqué par écriture directe après infiltration par un liquide fluorescent. La section transversale est $\sim 450 \mu\text{m}$ de hauteur et $\sim 650 \mu\text{m}$ de largeur à la base et la longueur totale du canal est de 15 mm. Deux coins vifs $\sim 70^\circ$ sont obtenus à la base grâce aux forces de tension de surface entre l'encre et le substrat présentes lors de l'infiltration de la résine. L'encre utilisée est un mélange de cire microcristalline et de gelée de pétrole de proportion 10% et 90% respectivement. L'utilisation d'encre de moindre viscosité permet également de favoriser la déformation du filament. Cependant, un coin arrondi est obtenu au sommet

supérieur de la section puisque la géométrie est obtenue à partir d'un assemblage de filaments cylindriques.

4.4.2 Les rangées de microcaloducs triangulaires

Pour une meilleure efficacité thermique en deux dimensions, la distance entre les microcaloducs doit être optimisée. La modélisation des performances thermiques des microcaloducs triangulaire fabriqués dans une matrice d'époxy [42] a permis de déterminer la séparation optimum de ceux-ci. En effet, selon les résultats de simulations, la distance entre deux microcaloducs parallèles doit être le double de la largeur de la base du triangle. Bien que la résine epoxy soit un isolant, la haute conductivité thermique des microcaloducs permet un transfert de chaleur dans la matrice. De plus, la conductivité thermique des matériaux diélectriques augmente avec l'augmentation de la température. Il est donc inutile d'augmenter de manière démesurée la densité des canaux. La fabrication de rangées de microcaloducs par écriture directe en respectant ces contraintes a été validée tel que présenté à la figure 4.8. Puisque la déposition est continue, les microcaloducs sont tous inter reliés aux extrémités. Cela permet d'avoir un réservoir aux sections d'évaporation et de condensation.

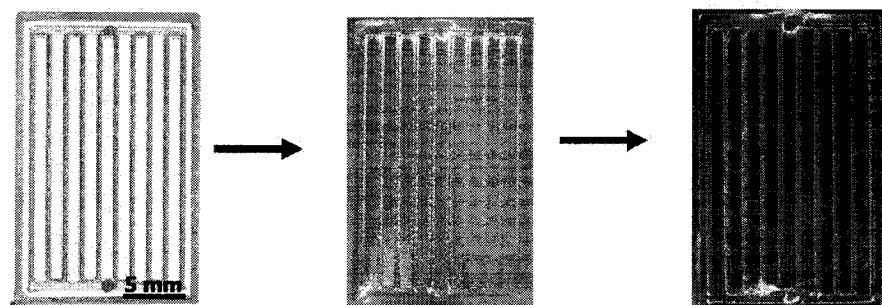


Figure 4.8 : Dépôt, infiltration et remplissage de rangées de microcaloducs.

4.4.3 Procédure de remplissage et de scellage des microcaloducs

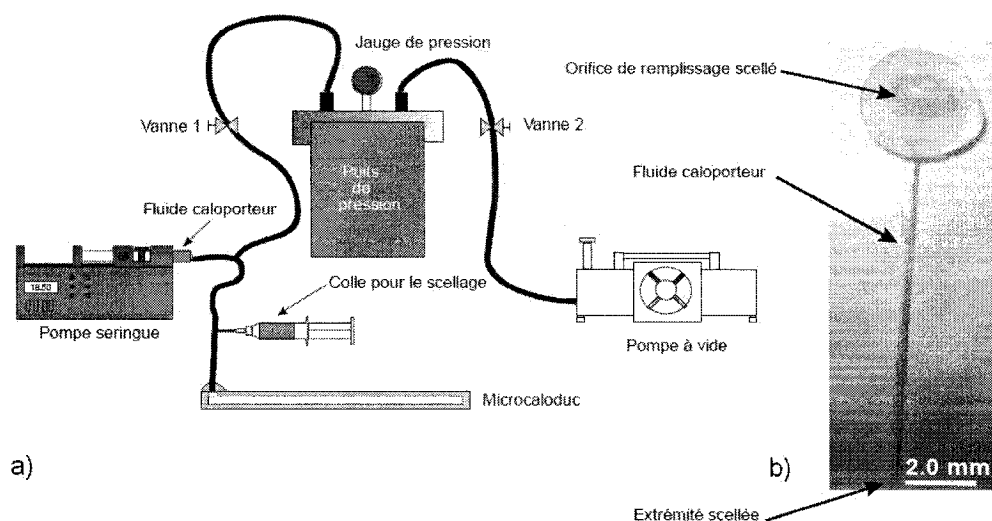


Figure 4.9 : Remplissage et scellage d'un microcaloduc fabriqué par écriture directe : a) Schéma du montage utilisé pour le remplissage à volume fixe ; b) Image de microscopie optique d'un microcaloduc infiltré et scellé (tirée de [31]).

Dans la grande majorité des microcaloducs caractérisés dans la littérature, le dispositif de remplissage reste attaché au système. La procédure de dégazage, de remplissage et de scellage élaboré dans ce projet permet d'obtenir un microcaloduc indépendant. Avant de procéder à l'injection du fluide caloporteur, un microtube de polymère (diamètre interne = 1 mm) est collé à l'une des ouvertures du microcanal à section triangulaire. Le montage utilisé pour le remplissage fixe du microcanal présenté à la figure 4.9 est basé sur le dispositif développé par [41] avec l'ajout d'une pompe à seringue permettant de contrôler le volume du fluide injecté. Le processus de remplissage débute par une mise sous vide (pompe à vide, *Brandtech*) de l'échantillon pendant 3h. Cette procédure permet d'éliminer les impuretés et les gaz condensables

présents dans le microcanal. Lorsque le vide désiré est atteint, la vanne 1 est fermée et un volume précis de fluide caloporteur est injecté à l'intérieur du microcanal. Une fois que le taux de remplissage souhaité est obtenu, la colle (Xtreme all temperature, *Loctite*) est manuellement injectée pour sceller l'orifice de remplissage à l'entrée du microcanal. Pour finir, le microtube utilisé pour le remplissage est sectionné près de son extrémité collée au microcaloduc. Le puits de pression présent dans notre dispositif de remplissage sert à éviter tout retour de fluide à l'intérieur de la pompe à vide.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce projet était d'étudier les principaux aspects de l'intégration industrielle de la technique d'écriture directe par déposition robotisée. Une plateforme de déposition a été assemblée et programmée pour permettre l'écriture de canaux au-dessus et également à l'intérieur des cartes de circuits imprimées. De plus, comme les techniques d'écriture directe sont souvent rejetées par les industries sous prétexte des faibles taux de production de celles-ci, la plateforme devait permettre de maximiser les vitesses d'écriture.

La plateforme et les logiciels développés permettent des écritures à des vitesses allant jusqu'à 100mm/s pour des structures en deux dimensions. Des structures tridimensionnelles rapportées dans la littérature ont également été déposées avec une vitesse maximale de 88mm/s. Pour une même géométrie et diamètre de filament (200 μ m), cette vitesse est plus de 10 fois supérieure à celle rapportée. De plus, ces écritures n'ont aucun impact négatif significatif sur la qualité des structures fabriquées sur des surfaces planaires.

L'acquisition de la topologie de surfaces complexe et l'écriture sur celles-ci a également été réalisée dans le cadre de ce projet. Des structures tridimensionnelles avec des diamètres de filaments de 200 μ m et 250 μ m ont été fabriquées sur des cartes de circuits imprimées. Les vitesses d'écriture maximale sur ces surfaces sont limitées entre 40mm/s à 60mm/s avec un échantillonnage de la surface de 100 μ m. Ces structures ont

aussi été infiltrées, nettoyées et remplis de fluide fluorescent afin d'observer leur qualité de fabrication.

L'intégration de microcanaux dans les couches internes des cartes de circuits imprimées a aussi été réalisée. Des canaux de 200 μ m et 500 μ m de diamètre ont été intégrés dans des PCB et la formation de vias thermiques et électriques a été possible. Le couplage des microcanaux de 500 μ m à un circuit interne a permis de réaliser des tests de dissipation thermiques en configuration d'échangeur de chaleur.

Comme ce travail constituait une première investigation de l'intégration de la déposition robotisée d'encre, des améliorations sont bien sûre à envisager. Au point de vue de la plateforme de déposition, le design et la fabrication d'un support fixe et centré pour le dispositif de déposition et le capteur de distance pourraient améliorer la flexibilité du système. Cette structure permettrait d'intégrer le quatrième degré de liberté au processus d'acquisition de surface. Ainsi, une rotation autour du faisceau laser permettrait au capteur de toujours être en mesure de capter la lumière réfléchiée peu importe la forme des composantes de la surface.

La calibration du système pour déterminer la distance entre l'aiguille et la surface se fait actuellement par déposition itérative d'un filament jusqu'à la bonne distance. L'intégration d'un deuxième capteur de distance avec des supports fixes, permettrait de déterminer les distances en trois dimensions entre les deux groupes d'axes de positionnement. Cela permettrait d'augmenter la précision de positionnement du système et d'automatiser le processus de calibration.

Du point de vue logiciel, la numérisation de la surface se fait actuellement en suivant la trajectoire de déposition. Pour des structures tridimensionnelles répétitives, la numérisation de la même surface se fait plusieurs fois. Il serait alors avantageux de définir une matrice d'acquisition avec une routine de balayage optimisée. Ainsi une seule numérisation pourrait être effectuée et projetée sur les trajectoires de déposition.

Malgré les améliorations possibles, le processus de fabrication par écriture d'encre directe reste flexible, n'exige aucun environnement contrôlé et peut être facilement adapté à plusieurs configurations. Dans le cas de la microélectronique, les structures tridimensionnelles fabriquées par cette technique permettraient l'intégration de densité élevée de microcaloducs directement sur les composants électroniques. L'utilisation de cette technique de fabrication permet de réduire au minimum la résistance thermique souvent problématique. Des systèmes complexes comprenant des réservoirs et des échangeurs de chaleur peuvent également être couplés aux cartes de circuits imprimés sans se soucier des étapes de fabrication précédentes. Finalement, les résultats démontrent le potentiel de cette technique pour la production de masse de dispositifs de refroidissement électroniques.

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Avenas, C. Gillot et C. Schaeffer, "Caloducs plats en silicium pour composants électroniques," *Techniques de l'ingénieur*, R16, pp.1-7, Aug 2004.
- [2] Y. Cao, M. Gao and B. Donovan, "Experiments and analyses of flat miniature heat pipes," *Journal of thermophysics and heat transfert*, vol. 11, pp.158-164, Apr-Jun 1997.
- [3] T. P. Cotter, "Principles and prospects for micro heat pipes," *5th International heat pipe conference (Tsukuba-Japan)*, vol. 4, pp. 328-334, 14-18 May 1984.
- [4] M. Lallemand et V. Sartre, "Revue sur la recherche et les développements récents des microcaloducs," *Journées de Thermique*, vol. 1, pp. 1-17, 2001.
- [5] R. Ponnappan, "A novel micro-capillary groove-wick miniature heat pipe," *Proceedings of 35th intersociety energy conversion engineering conference and exhibit*, Jul 24-28, vol. 2, pp. 818-26, 2000.
- [6] S. H. Moon, H. G. Yun, G. Hwang et T. G. Choy, " Experimental study on the performance of miniature heat pipes with woven-wire wick," *IEEE Transaction on components and packaging technologies*, vol. 24, no. 4, pp. 591-595, Dec 2001.
- [7] S. W. Kang et D. Huang, "Fabrication of star grooves and rhombus grooves

- micro heat pipe," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 12, no. 5, pp. 525-531, Sept 2002.
- [8] S. Launay, V. Sartre et M. Lallemand, "Experimental investigation of silicon micro-heat pipe arrays," *Applied thermal engineering*, vol. 24, no. 2-3, pp. 233-243, Feb 2004.
- [9] M. Le Berre, S. Launay, V. Sartre et M. Lallemand, "Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 13, no. 3, pp. 436-441, May 2003.
- [10] M. Lee, M. Wong et Y. Zohar, "Integrated micro-heat-pipe fabrication technology," *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 12, no. 2, pp. 138-146, Apr 2003.
- [11] S. W. Kang, S. H. Tsai et H.-C. Chen, "Fabrication and test of radial grooved micro heat pipes," *Applied thermal engineering*, vol. 22, no. 14, pp. 1559-1568, Oct 2002.
- [12] S. W. Kang, S. H. Tsai et M.-H. Ko, "Metallic micro heat pipe heat spreader fabrication," *Applied thermal engineering*, vol. 24, no. 2-3, pp. 299-309, Sept 2002.
- [13] Y. Cheng, P. P. Ding, T. S. Sheu, B. Y. Shew et P. H. Chen, "High

- performance flat miniature heat pipes fabricated by UD-LIGA process," *Microsystem technologies*, vol. 9, no. 1-2, pp. 23-24, 2003.
- [14] H. Lee, Y. Jeong, J. Shin, J. Baek, M. Kang, and K. Chun, "Package embedded heat exchanger for stacked multi-chip module," *Sensors and Actuators A (physical)*, vol. A114, no. 1-2, pp. 204-211, Sept. 2004.
- [15] V. G. Pastukhov, Yu. F. Maidanik, C. V. Vershinin, and M. A. Korukov, "Miniature loop heat pipes for electronics cooling", *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1125-1135, June 2003.
- [16] S. Mukherjee, and I. Mudawar, "Smart pumpless loop for micro-channel electronic cooling using flat and enhanced surfaces," *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, vol. 26, no. 1, pp. 99-109, March 2003.
- [17] J. Li, and G. P. B. Peterson, "Geometric optimization of a micro heat sink with liquid flow," *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 145-154, March 2006.
- [18] C. C. S. Nicole, R. Dekker, A. Aubry, and R. Pijnenburg, "Integrated micro-channel cooling in industrial applications," *Proceedings of the Second*

international Conference on Microchannels and Minichannels (ICMM2004), pp. 673-677, June 17-19 2004.

- [19] H. Lee, Y. Jeong, J. Shin, J. Baek, M. Kang et K. Chun, "Package embedded heat exchanger for stacked multi-chip module," *Sensors and actuators*, vol. 48, no. 2, pp. 204-211, Jul 2004.
- [20] S. Ashman and G. S. Kandlikar, "A review of manufacturing processes for microchannel heat exchanger fabrication," *Proceedings of the fourth international Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICMM2004)*, pp. 855-860, June 19-21 2006.
- [21] J. Schütze, H. Ilgen, and W. R. Fahrner, "An integrated micro cooling system for electronic circuits," *IEEE Transaction on industrial electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 281-285 Apr 2001.
- [22] J. A. Lewis and G. M. Gratson, "Direct Writing in Three Dimensions," *Materials Today*, vol. 7, pp. 289-293, 2004.
- [23] G. M. Gratson, M. J. Xu, J. A. Lewis, "Microperiodic structures - Direct writing of three-dimensional webs," *Nature*, vol. 428, pp. 386-386, 2004.

- [24] J. E. Smay, J. Cesarano and J. A. Lewis, "Colloidal inks for directed assembly of 3-D periodic structures," *Langmuir*, vol. 18, pp. 5429-2437, 2002.
- [25] J. E. Smay, G. M. Gratson, R. F. Shepherd, J. Cesarano and J. A. Lewis, "Directed Colloidal Assembly of 3D Periodic Structures," *Advanced Materials*, vol. 14, pp. 1279, 2002.
- [26] R. B. Rao, K. L. Krafcik, A. M. Morales and J. A. Lewis, "Microfabricated Deposition Nozzles for Direct-Write Assembly of Three-Dimensional Periodic Structures," *Advanced Materials*, vol. 17, pp. 289-293, 2005.
- [27] M. J. Xu, G. M. Gratson, E. B. Duoss, R. F. Shepherd and J. A. Lewis, "Biomimetic Silicification of 3D polyamine-rich scaffolds assembled by direct ink writing," *Soft. Matter.*, vol. 2, pp. 205-209, 2006.
- [28] J. Cesarano III, P. D. Calvert, US Patent 6027326, 2000.
- [29] D. Therriault, R. Shepherd, S. R. White, and J. A. Lewis, "Fugitive inks for direct-write assembly of three-dimensional microvascular networks," *Advanced Materials*, vol. 17, pp. 395-399, 2005.

- [30] D. Therriault, S. R. White, and J. A. Lewis, "Chaotic Mixing in Three-Dimensional Microvascular Networks Fabricated by Direct-Write Assembly," *Nature Materials*, vol. 2, pp. 265-271, 2003.
- [31] S. Palm, R. Bey-Oueslati, S. Martel et D. Therriault, "Fabrication de microcaloducs à section triangulaire par écriture directe," *Proceeding of SHF – Microfluidics 2006*, toulouse, France, 2006.
- [32] T.A. Lasky, T.C. Hsia, R.L. Tummala, N.G. Odrey, E. Richard and C. Dorf, "Robotics", *The electrical engineering handbook*, Boca Raton, CRC Press LLC, 2000.
- [33] "Positioning systems," *Lintech*, 2003.
- [34] N. Dechev, W.L. Cleghorn et J.K. Mills, "Microassembly of 3-D microstructure using a compliant, passive microgripper," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, no. 2 pp. 176-189, Apr 2004.
- [35] "Profilometer," in Wikipedia, 2006 [en ligne]. Disponible: <http://en.wikipedia.org/wiki/Profilometer>. [Consulté le 16 avril 2007].

- [36] "Optical interferometry," in Wikipedia, 2006 [en ligne]. Disponible: http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_Interferometry. [Consulté le 16 avril 2007].

- [37] "Interferometry," in Wikipedia, 2006 [en ligne]. Disponible: <http://en.wikipedia.org/wiki/Interferometry>. [Consulté le 16 avril 2007].

- [38] H. Tsukahara, "Three-dimensional measurement technologies for advanced manufacturing," *Fujitsu scientific and technical journal*, vol. 43, no. 1, pp. 76-86, Jan 2007.

- [39] "Comparison table between profilometry techniques", [en ligne] Disponible <http://www.microphotonics.com/compare.htm> [Consulté le 17 avril 2007].

- [40] R. Bey-Oueslati, D. Therriault et S. Martel, "Micro heat pipe fabrication: high performance deposition platform for electronic industry," *Proceeding of IWMF06 – 5th International Workshop on Microfactories 2006*, Besançon, France, 2006.

- [41] Y. Cao, M. Gao et E. Pinilla, "Fabrication and test of a filling station for micro/miniature devices," *Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, vol. 2, pp. 1509-1513, 1997.

- [42] M. Rahmat et P. Hubert, "Numerical simulation for the geometrical design of micro heat pipes," *Proceeding of SHF – Microfluidics 2006*, toulouse, France, 2006.

ANNEXE A : High speed direct-write for rapid fabrication of three-dimensional microfluidic devices

HIGH SPEED DIRECT-WRITE FOR RAPID FABRICATION OF THREE-DIMENSIONAL MICROFLUIDIC DEVICES

Ramzi Bey-Oueslati¹, Samy Joseph Palm², Daniel Therriault², Sylvain Martel¹

¹Département de génie informatique, Laboratoire de NanoRobotique

²Département de Génie Mécanique, Centre de recherche en plasturgie et composites (CREPEC)

École Polytechnique de Montréal (EPM), 2500 chemin de Polytechnique, Montréal, QC, Canada H3T 1J4

daniel.therriault, sylvain.martel : @polymtl.ca

ABSTRACT

The objective of this research is to adapt the fabrication of cylindrical microchannels by directed assembly for industrial purposes. The directed assembly consists of the extrusion of a fugitive organic ink through a micro-nozzle under constant pressure combined with a layer-by-layer robotic deposition on a substrate for the creation of geometrically complex structures. A multi-axis motion platform has been developed in order to adapt this technique to rapid fabrication. This platform and custom-made software enable the writing of two-dimensional and three-dimensional (2D and 3D) ink networks at a high velocity and positioning accuracy. Improvements on the hardware, software and communication integration were accomplished on this dedicated platform in order to achieve the fast fabrication of precise 3D microstructures. Under similar deposition conditions, the platform developed allowed maximum deposition velocities of more than 1 order of magnitude superior to the usual writing speeds (i.e., between 1 to 8mm/s). The filaments deposited were characterized by laser scanning profilometry and optical microscopy. The deposition trajectories at high-speed were customized and the smooth roughness of the filament surface was preserved. Finally, the ink structures have been embedded in an epoxy and subsequently removed to create 3D microfluidic networks in order to demonstrate the potential of such platform.

1. INTRODUCTION

Three-dimensional periodic microstructures may find widespread technological applications as sensors [1], composites [2], heat exchangers [3], and in tissue engineering [4]. Current silicon-based technologies require several alignments and bonding processes to create a simple device of a few layers. Eutectic and fusion bonding, for instance, carry the wafer at high temperatures that may not be compatible with the other systems integrated to the device [5]. On the other hand, direct ink and laser writing techniques were used to efficiently produce complex two-dimensional and three-dimensional (2D and 3D) structures with high aspect ratios [6]. Direct ink writing, in particular, is the only microfabrication process capable of creating multilayer periodic structures in a single iteration. However, the integration of microfluidic structures in application devices raises a challenge for the industries. Despite a substantial amount of research invested in microfluidics development, little effort has been devoted to their practical integration. The latter requires attention, and direct ink writing techniques can provide a solution.

The direct-write assembly consists of the robotic deposition of 2D or 3D ink patterns on a substrate [6]-[11]. For the fabrication of microfluidic networks, the process is shown in the Fig. 1. First, an organic ink is extruded through a cylindrical micronozzle under constant pressure. The ink-based pattern is then infiltrated with an epoxy and upon curing, the ink is removed by heating the structure to yield a 2D or 3D microfluidic network comprised of microchannels ($\sim 100\text{-}250\mu\text{m}$ in diameter) [12]. In addition, stronger viscoelastic organic inks composed of a microcrystalline wax were designed in

order to deposit more complex 3D structures on the substrate [13]. The ink deposition is the critical step of this microfluidic fabrication procedure.

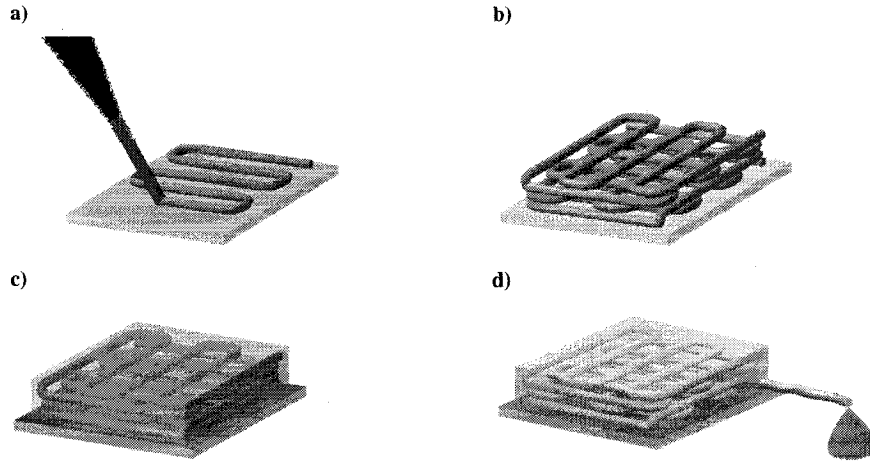


Figure 1: Schematic illustration of the fabrication process for 3D microchannel networks by direct ink writing: a) deposition of the ink through micronozzle; b) layer-by-layer ink deposition; c) epoxy infiltration of network; d) epoxy solidification and removal of fugitive ink.

Previous work on direct ink writing of 3D structures includes mesoscale periodic structures fabricated using a robotic deposition rates varying between 2-8mm/s of colloidal inks filaments of cylindrical diameter varying from 100 μ m to 1mm [8] [9], colloidal ink with a hexagonal shape of vertex-to-vertex diameter of 560 μ m deposited at 2 mm/s to build 3D structures [10], and smaller 3D scaffolds made of polyamide rich were also produced [11] using a more accurate robot (ABL9000, Aerotech) used for wafers microfabrication prototyping. The diameter of the micro-nozzle was 1 μ m and the overall dimension of the structures was between 100 μ m and 200 μ m. The robotic deposition was performed at 40 μ m/s. More specific work on microfluidics components has been achieved using an organic ink [13]. Microfluidic devices with hydraulic diameter of 100 μ m to 250 μ m have been built [11] [14]. The maximum

writing/deposition rates of the channels were between 6mm/s and 8mm/s (JL2000, Robocasting Enterprises, Inc.).

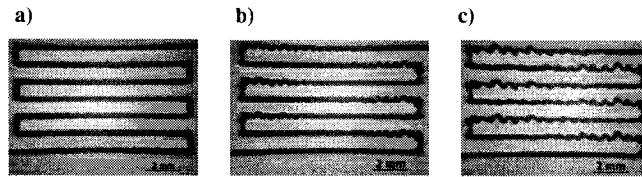


Figure 2: Depositions of 200 μ m of hydraulic diameter ink patterns using the Fisnar J2200 apparatus. Depositions made at the constant speed of (a) 10mm/s, (b) 20mm/s and (c) 30mm/s.

Until now, direct-write techniques are rarely used for industrial mass production mainly because of the slow linear deposition process involved. Although microfluidic devices made using organic ink are of great interest, the writing speeds must be increased in order to demonstrate their viability for high volume production. Commercially available robots such as Cartesian laboratory robots can perform directed assembly technique. Although generally used for non-viscous point-to-point fluid dispensing, these robots can also be used for continuous depositions. These robots are economical (~10000-20000\$), easy to install and usually come with a user-friendly general-purpose software. A typical example is the J2200 Fisnar that enables relatively accurate positioning (repeatability: 10-25 μ m) at moderate deposition speeds (1-15mm/s), which are appropriate for prototyping purposes. However, these cable drive stages cannot perform tight contour deposition (< 500 μ m) at high speed (> 15mm/s). Writing rates experiments have been performed using the J2200 which shows to be effective at moderate speeds as shown in Fig. 2. Figures 2b and 2c illustrate that the

quality of the microstructures is significantly affected at higher speeds. The increase of the deposition speed to 20mm/s, with a non maximum payload, causes the upper structure to oscillate during direction changes. Moreover, despite the speed limitation, these machines have limited memory for waypoints trajectories and external real-time control is not possible. These limitations must be addressed in order to define the real capabilities of this technique.

Here, we present significant advancements for high speed and accurate ink deposition for the creation of 3D microfluidic devices. A new high performance robotic platform with custom coded software was assembled successfully. The high-speed depositions achieved with this platform under different speeds, geometries, ink-viscosities and diameters were characterized by laser scanning profilometry and optical microscopy.

2. EXPERIMENTAL SETUP

The platform designed for high-speed microfabrication by direct-write assembly consists of a four degree of freedom positioning stage that accurately moves the extrusion system and/or the substrate at speeds reaching 88mm/s for continuous three-dimensional motions and up to 100mm/s for two-dimensional patterns. For maximum stage velocity and accuracy, a combination of Cartesian, cylindrical and gantry configurations was selected for the design of the deposition platform, as shown in Fig. 3a. Linear servo motors with linear mechanical bearings were used for the XY and Z positioning. The axes are separated into two groups of two (i.e., axes x and y ; axes z and θ) in order to minimize the system inertia. The two positioning groups are fixed onto a

massive custom-made granite structure (~ 1000 kg, Standridge Granite Corp.) for high dynamic stability of the platform during operation. The flatness of the granite structure was controlled ($\sim 2\mu\text{m}/\text{ft}$) in order to maintain proper alignment between the two positioning groups over the whole traveling range. A high capacity air-piston table (pressure of 652 kPa, 68-500 Series, Harvard Apparatus Canada) ensures the active damping of oscillations caused by the stage motions during depositions.

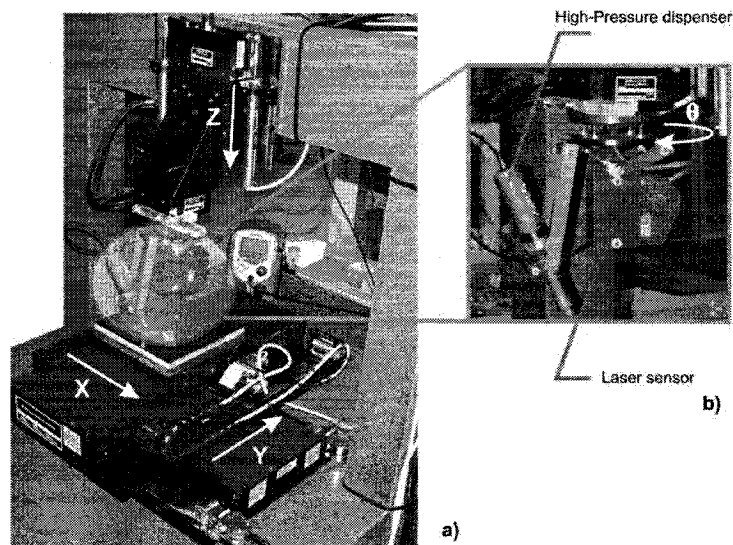


Figure 3: a) Complete experimental setup with four displacement axes placed in gantry configuration, granite structure, air dispenser, mechanical valve and the syringe. The two horizontal displacement robots (ALS25000, Aerotech) place in Cartesian configuration. b) The rotary stage (ADRS150, Aerotech) mounted under the vertical stage (AIS130, Aerotech) in a cylindrical configuration.

The displacement bearings for horizontal motion of Fig. 3a are supported by large cross-sections while still maintaining an overall low profile to decrease deviations in straightness and flatness. The short distance between the bearings combined with a linear DC amplifier enable superior contour-motion profiles. This design has been selected in order to deposit dense parallel microchannels at high speed. A center-driven

linear motor, which is controlled by a pulse width modulation (PWM) digital amplifier, is used for vertical positioning. Two pneumatic counter-balances have been adjusted on both sides of the stage to simulate a zero gravity environment when the motor is not powered. The fourth degree of freedom is provided by a rotary direct-drive brushless servomotor mounted under the vertical axis, which is also controlled by a PWM digital amplifier. The four amplifiers are interconnected, and controlled through a firewire (IEEE-1394) connection to a computer.

A high-pressure dispenser (HP7x, EFD) is mounted on a metallic holder under the rotary motor. This dispensing tool contains a 3cc syringe barrel and a piston that multiplies the input air pressure by a factor of 7. An air-operated dispenser (Ultra 2400, EFD) is used to regulate the air pressure from 0 to 689 kPa via the parallel port of the computer. As shown in Fig. 3b, a laser scanner (LK-G82, Keyence) has been mounted next to the syringe for roughness measurements. This laser system uses a CCD lens to measure the distance by triangulation with a resolution of 0.2 μ m.

3. SOFTWARE ENVIRONMENT

The deployment of any industrial microfabrication platform involves a substantial amount of software development. How the positioning system is programmed, configured and controlled has an important influence on its performance. At the microscale, geometries imposed by the structures may involve millions of waypoints in order to keep a desired level of precision, and to conserve a constant velocity vector among all axes. To obtain conformed structures, the waypoints need to be synchronized

on all positioning axes. Therefore, the need for a hard real-time system (i.e., response time in the order of $\sim\mu\text{s}$) is necessary.

3.1 System architecture

A C/C++ class library combined with a Win32 application programming interface (API) has been developed in order to provide real-time intuitive control of the platform. This interface is running over Windows XP on a standard PC (Intel Pentium 4, 3.2 GHz, 512 MB of RAM). As opposed to programmable logic controllers (PLC), computer-based automations involve real-time responses at the PC level and interruptions in Windows XP/2000 cannot be managed in less than 100 ms. While Windows Embedded products can provide a hard real-time environment on a PC, the drivers' interface hardware needs to be programmed when not provided by manufacturers. Real-time Linux also offers very serviceable performance for real-time processing, yet most component-manufacturers do not provide Linux drivers. As a result, the Real-Time Extension (RTX) runtime environment proved to be the best choice for this platform operating under Windows. Its kernel runs besides Windows kernel to provide precise control of interrupt requests, input/output accesses and memory without interfering with Windows' infrastructure as presented in Fig. 4a. It provides deterministic time-responses to real-time applications, and its typical thread latency service interruptions are less than $1\mu\text{s}$.

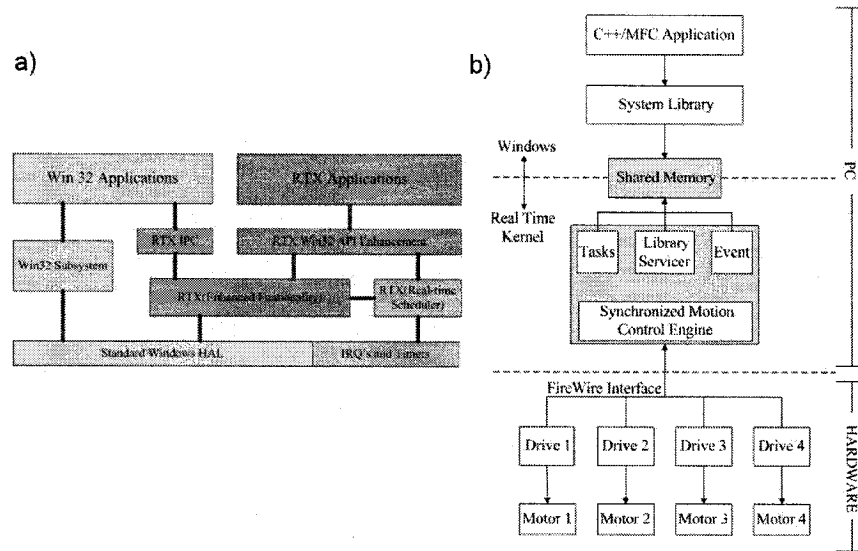


Figure 4: a) RTX software diagram. The hardware abstraction layer (HAL) of RTX provides resources for a real-time clock (shortest period of 100 μ s) and an insulation of the interruptions set by RTX over layers. The Real-Time SubSystem (RTSS), which provides the functions and resources management, is simply a hardware driver installed on Windows. b) Positioning system hardware/software simplified diagram.

Fig. 4b presents the architecture of the motion system used. A part of the RAM is reserved during the initialization for the direct communication with the firewire interface. This procedure avoids the pagination and swapping of that memory that slows down the communication by a factor of approximately one million due to hard drive access. Commands sent by the application through the system library are processed on a first priority fixed by RTX, and queued in that shared memory. The synchronized motion control engine manages the subsequent communication protocols, thus ensuring that the right command is sent to the right microcontroller. The same communication channel is used for the information transmitted from the controllers to the applications. This configuration allows millions of points physically separated by a few tens of

microns to be sent on a limited sized memory, and processed by the stage microcontrollers with acceptable latency delays.

3.2 Curve parameterization

Deposition trajectories such as sharp corners are difficult to deposit at high-speed because of the abrupt changes in direction. The displacement system incorporates a continuous motion option, which allows the platform to keep an apparent constant speed during the whole deposition process. As such, the controller executes a subtle round corner, and increases the current to the motors, thus maximizing the acceleration in the new direction vector. If it exceeds the available or possible current, a flag is asserted and the stage is stopped. Since the filament is deposited at a constant pressure for a given speed, any mismatch between the extrusion linear flow rate and the stage velocity will alter the diameter of the ink filament. This parameter is even more important for multi-layer structures since the integrity of each layer depends on the supporting layers underneath. Thus, we applied and tested a B-Spline algorithm on control points sent by the user in order to reach a maximum and stable velocity for different deposition trajectories. The B-Spline curve is defined over a parameter u , using the following equation [15]:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,p}(u) \quad (1)$$

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 \Rightarrow u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 \Rightarrow otherwise \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (3)$$

where $C(u)$ represents the new curve varying between u_{min} and u_{max} defined as the nodal vector, the $n+1$ control points are denoted P_i , the basic functions are denoted $N_{i,p}$ and p is the degree of the curve. B-Spline curves are defined inside the convex envelopes of the control points, which prevent any unwanted contact between the channels. As shown in Eq. 2, the basic functions are defined only on a limited band depending on the corresponding value on the nodal vector. Higher degree curves are calculated, as shown in Eq. 3, by a recursive algorithm. This local support offered by the B-Spline makes it prompt and easy to use with a standard computer. A third degree parameterized curve of 100,000 three-dimensional points may be computed in 5 minutes.

The applied algorithm does not necessarily degenerate the shape of the desired structure as in Fig. 5a. On the other hand, this structure can be sampled before applying the algorithm, thus isolating the sharp corners as shown on Fig. 5b. The curvatures of the microchannels could also be defined using the B-Spline algorithm. At a given point, the curvature is calculated using Eq. 4 for a parametric curve in a Cartesian plan (x, y):

$$R = \frac{(x'^2 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{(x'y'' - y'x'')} \quad (4)$$

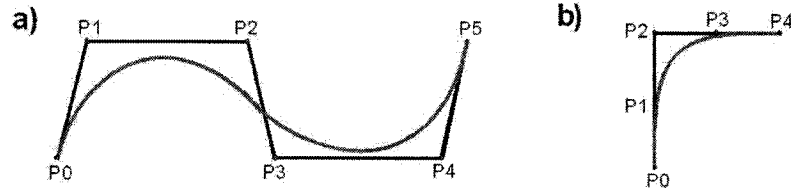


Figure 5: a) B-Spline curve. b) Isolation of a corner using the B-Spline algorithm.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Ink characterization

The organic ink used for the deposition is a binary mixture of microcrystalline wax and a lower molecular weight organic phase (gel petroleum). The ink's elasticity increases linearly with increasing weight fraction of the microcrystalline wax [12]. The ink design is function of three major constraints. First, the cylindrical shape of the extruded ink filament must remain unchanged after the extrusion. Second, the ink mixture must be strong enough to self-support several superimposed layers. Finally, the viscosity of the ink must allow the extrusion through a micronozzle within the maximum applicable pressure available in the experimental setup (4826 kPa in our particular case). Previous work [13] shows that 10 to 40 of weight percent (wt-%) microcrystalline wax exhibits excellent printing behavior under ambient conditions. Using a modest applied pressure, the optimal ink composition is 40wt-%. As shown in Fig. 6, the required pressure for an extrusion that would maintain the proper filament diameter (i.e. 200 μ m) during 2D deposition increases linearly with the deposition speed for an ink with 20wt-%, 30wt-% and 40wt-% microcrystalline waxes. Therefore, the usage of an ink composition of 40wt-% would be limited to a speed of 60mm/s for a nozzle with an

inner diameter of 200 μ m because the required extrusion pressure would reach the maximum capacity of the setup. The less viscous inks allow higher deposition speeds without compromising the integrity of the extruded filament. The applied pressure for the ink at 20wt-% and 30wt-% of wax during 2D depositions at speeds varying from 10 to 100mm/s are presented in Fig. 6. At 100mm/s, the pressure required for the deposition of the organic ink is 4006 kPa and 3354 kPa respectively, which is still below the maximum pressure of 4826 kPa of the dispenser.

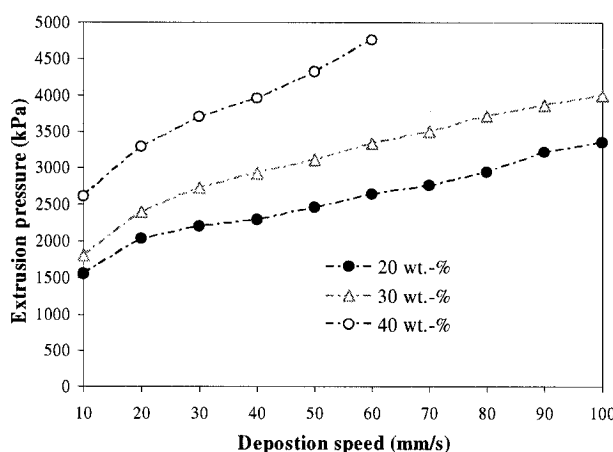


Figure 6: Extrusion pressure required to maintain a 200 μ m ink diameter during the deposition for inks containing 20% and 40% of microcrystalline wax.

The 20wt-% and 30wt-% ink allows a higher deposition velocity while presenting lower shape retention of the filaments compared to the 40wt-% ink. The polymer channel walls were previously measured [12] with a root-mean-square surface roughness of 13.3 ± 6.5 nm using a stylus instrument with high sampling rates. Here, the average roughness of the ink was measured with lower sampling on longer distances in order to determine the deviation of nominal diameter for the different mixtures at different

applied pressures and deposition speeds. The average roughness of the ink filament was measured using the laser system presented in Section 2. The measurements were done on the mid section of straight 200 μm filaments for the three different mixtures (20wt-%, 30wt-%, 40wt-%) at different velocities and are presented in Fig. 7. The average roughness (R_a) is calculated using (ASME B.46.1):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad (7)$$

where L is the length of the measured profile, and y is the distance from the centre line. Surfaces with known roughness have been tested to validate our roughness measurements, and thus, the laser's light intensity was adjusted to properly reflect on the ink which is a half transparent material. The distance measurements were done every 1.1 μm over a length of 8 mm. The extrusion pressure was set according to the values presented in Fig. 6. A small increase of 1 to 3 μm of the filament roughness has been observed when using the 20wt-% and 30wt-% mixture compared to the 40wt-% for writing speeds between 10 to 60mm/s as shown in Fig. 7. The 40wt-% ink presents an average R_a of 6.9 μm through the different speeds and pressures with a standard deviation of 0.62 μm . This average is 7.8 μm for the 20wt-% ink with a standard deviation of 0.47 μm and 7.3 μm for the 30wt-% ink with a standard deviation of 0.43 μm . Although further investigations are required, the ink's slight differences in roughness under different writing speeds may be due to the rheological response of the ink under different pressures. However, the roughness or the shapes of straight-deposited filaments do not restrain the writing speeds.

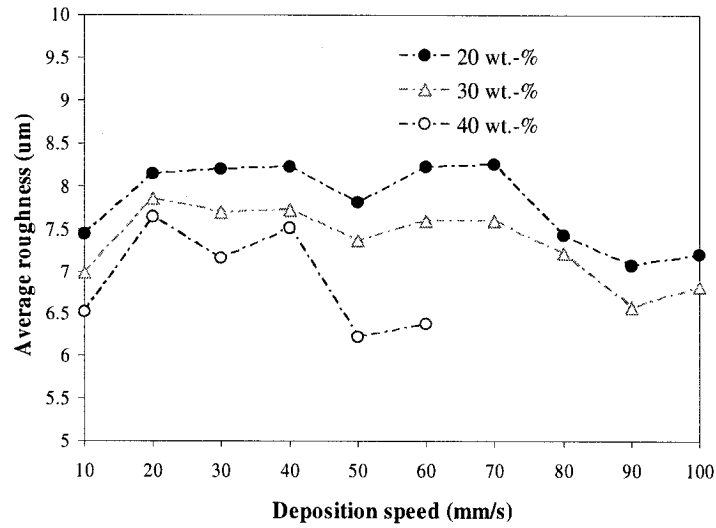


Figure 7: Average roughness of deposited filaments made of binary ink mixtures (20wt-% and 40wt-% microcrystalline waxes) for various speeds.

4.2 Parameterized depositions

The B-Spline algorithm has been tested for the writing of a 90 degree path at 40mm/s using a filament with a diameter of 100μm. As shown in Fig. 8a, the channel does not preserve its shape during the sharp turn. The sudden change of direction and the resulting acceleration are damageable for the quality of the channels. Figure 8b presents a filament written under the same conditions but using a B-Spline parameterization. This third degree curve is defined with a 200μm step and was calculated in less than a second. The resulting deposited filament is smooth, has a regular cross section and adheres well on the substrate surface.

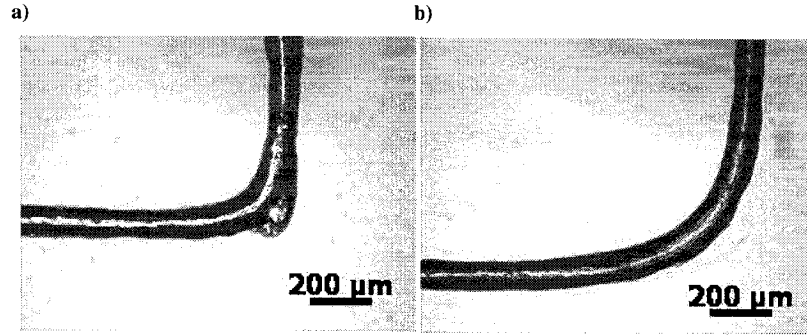


Figure 8: a) 90-degree corner written with a 100 μ m filament. b) Smoothened corner using B-Spline algorithm written with a 100 μ m filament.

The deposition was performed under a constant applied pressure for a given nozzle diameter and a deposition speed as in Fig. 6 for a 200 μ m nozzle. Due to the mechanical time response of the dispensing system used, the applied pressure cannot be rapidly changed in order to maintain a constant filament diameter. Therefore, the goal is to minimize the velocity deviation from the desired value during the writing process even for intense curvature paths. Figure 9a shows the velocity error along the X and Y displacement axes for a 90-degree turn trajectory as shown in Fig. 8a. The absolute maximum velocity error is 72 μ m/s for the X axis and 40 μ m/s for the Y axis. Figure 9b shows the errors when using the parameterization algorithm and reductions to 51 μ m/s for the X axis and 31 μ m/s for the Y axis are observed. It has also been observed that the transition of the motion from the Y axis to the X axis is much more gradual since it involves a higher quantity of control points. The error for the X axis is slightly higher because of the higher inertia due to the mass of the Y axis motor.

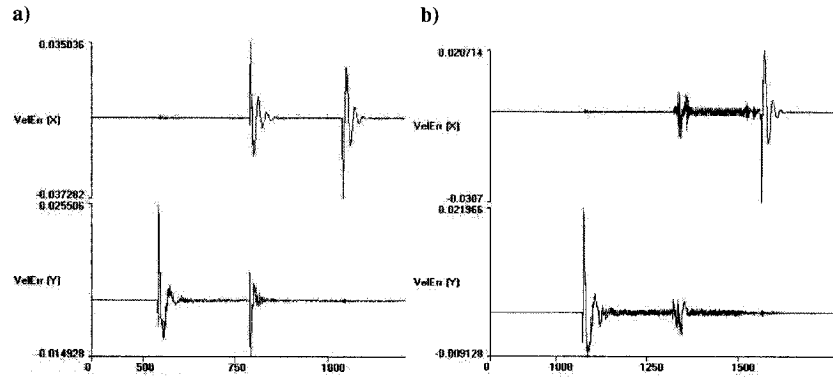


Figure 9: X and Y (horizontal displacements stage) velocity error in mm/s versus time in ms during the deposition of a **a)** 90-degree turn written with a 100 μ m filament. **b)** Smoothened 90-degree turn using a B-Spline algorithm written with a 100 μ m filament.

4.3 Three-dimensional depositions

A high aspect ratio 3D scaffold, presented in Fig. 10, has been fabricated at 88mm/s using the 20wt-% microcrystalline wax mixture. This 3D scaffold consists of a 54-layer structure of parallel cylindrical rods of 200 μ m (d) with an inter-rod separation distance (L) of 1.25 mm ($L/d=6.25$). The resulting 3D network is a 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 9.18 mm structure made of a 19.6m ink filament. The proper alignment of the 54 layers is shown in Fig. 10b. A similar structure of 104 layers was previously produced [13] at a speed of 8mm/s. Even if the writing speed is superior by a factor of more than 10, the 20wt-% microcrystalline wax mixture was not able to support 104 layers. After 54 layers, the structure slowly started to collapse under its own weight. Thus, the preprogrammed routine failed because the superimposed layers have to be written at a specific vertical offset distance of 170 μ m. Also, the binary mixture made of 30wt-% of microcrystalline wax seems to be more appropriate for a high number of superimposed layers. According to the linear relationship between the extrusion pressure and the deposition speed, this mixture would allow high velocity writing with a higher stiffness. However, the less

viscous mixture made of 20wt-% shows a better behavior on continuous dispensing of 3D structures at high velocity.

The 3D scaffold structure has been embedded in an epoxy and cleaned using hot water and high air pressure. Figure 10c shows the resulting microchannel network filled with a fluorescent fluid. The fugitive ink filament (diameter of 200 μ m) made of 20wt-% microcrystalline wax shows no deformation on a spanning distance of 1.25mm and was not damaged during the epoxy infiltration.

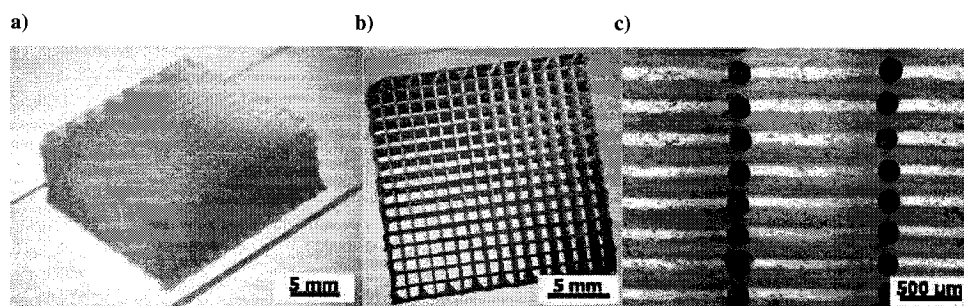


Figure 10: Isometric (a) and top (b) view of a 54-layer scaffold made of binary organic ink (20 wt-% microcrystalline wax) deposited through a 200 μ m nozzle at a speed of 88 mm/s. c) Scaffold filled with a fluorescent fluid after an epoxy infiltration and the removing of the fugitive ink.

4.4 Microfluidic devices

2D and 3D microfluidic networks can easily be produced with this microfabrication technique. As depicted in Fig. 11, the inks filament can intersect for more sophisticated fluidic designs. Figure 12 shows an example of a microvascular network made of two superimposed and intersecting layers of microchannels (250 μ m in diameter) deposited with the high performance platform at the speed of 88mm/s. The geometry of the structure is made of parallel diagonal filaments for which the two axis (X and Y) needs

to move simultaneously. The writing of the ink filament has been done over a polymethyl polymethacrylate (PMMA) substrate. An epoxy is used as adhesive on multilayer PMMA microfluidic components [16]. The adhesion has bond strengths that prevented delamination or leakage during the ink removal process which involves a temperature of 60°C and an air pressure of 620kPa applied inside the microchannels network. The three-dimensional microfluidic component is 2.6mm thick where the epoxy only holds 1mm of thickness. An inlet and an outlet have been incorporated in the component for the cleaning and filling of the network. These inlets/outlets are ink filaments deposited and located outside of the main structure. Finally, micro-tubes (S-54-HL, Tygon) were aligned and fixed to the device in order to allow the filling of the network using a needle of 230µm of outer diameter.

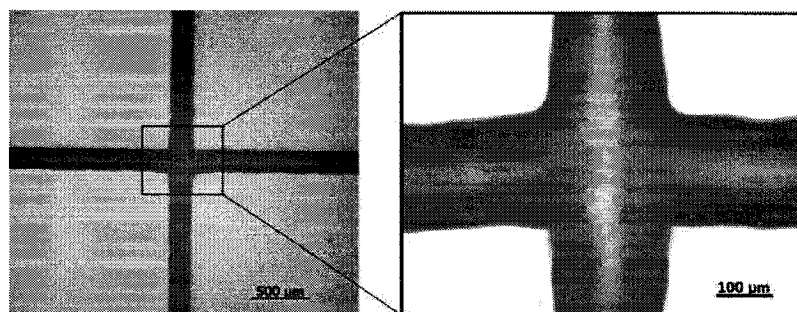


Figure 11: Intersection of filaments of 200µm of diameter made at constant vertical position with a 20wt-% mixture ink.

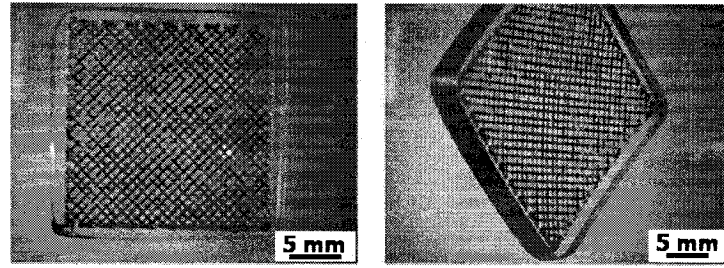


Figure 12: Top (a) and isometric (b) views of a 2 layer microchannel network (250 μ m of diameter) filled with a colored fluid.

5. CONCLUSION

We have adapted the direct ink writing technique for the high-speed fabrication of 2D and 3D microfluidic devices. The fabrication time is critical for high volume production in the industry. The robotic platform and custom-made software presented in this paper have significantly enhanced the deposition performance. Previously performed between 2mm/s to 8mm/s, 2D depositions can now be achieved at a maximum velocity of 100mm/s and high aspect ratio 3D periodic microstructures were fabricated up to 88mm/s while preserving structural integrity. Viscoelastic properties of the 20wt-% microcrystalline wax ink mixture are the most suitable for high velocity depositions due to lower micro-extrusion pressure. This less viscous mixture allowed increasing the deposition speed but restricted the possible amount of superimposed layers (50%) and it also slightly increased the average roughness of the channels (~ 1 -2 μ m) compared to the optimal ink composition (40wt-%). However, this ink was successfully used for the writing of 200 μ m of hydraulic diameter channels to build 3D microfluidic devices. Several other deposition parameters such as ink elasticity, nozzle inner diameter and structure geometry have an important impact on the final microfluidic component

quality and should be fully characterized. Parallel writing is also investigated for a complete optimization of the deposition process. Advances in computer engineering and automation science will eventually enable the integration of direct writing microfabrication to the industry for the mass production of 3D microfluidic devices.

6. ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by a strategic grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and in part by a Canada Research Chair (CRC) in Micro/Nanosystem Development, Fabrication, and Validation, the Canadian Foundation for Innovations (CFI) and the Government of Québec. The authors acknowledge the help of Jean-Baptiste Mathieu and Martin Mankiewicz as well as the team members of the Micro Heat Pipe project.

7. REFERENCES

1. H. Yu, O. Balogun, B. Li, et al. Fabrication of Three-Dimensional Microstructures Based on Singled-Layers SU-8 for Lab-on-Chip Applications. *Sensors and Actuators A-Physical*, vol. 127, no. 2, pp. 228-234, 2006.
2. G. T. Vladisavljevic and R. A. Williams, Recent Developments in Manufacturing Emulsions and Particulate Products Using Membranes. *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 113, no. 1, pp. 1-20, 2005.

3. M. Lee, M. Wong and Y. Zohar, Integrated Micro-Heat-Pipe Fabrication Technology. *Journal of Microelectromechanical Systems*. vol. 12. pp. 138-146, 2003.
4. J. J. Norman and T. A. Desai, Control of Cellular Organization in Three Dimensions Using a Microfabricated Polydimethylsiloxane. *Tissue Engineering*, vol. 11, no. 3-4, pp. 378-386, 2005.
5. M. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, Boca Raton, Flo., chap. 8, 1997.
6. J. A. Lewis and G. M. Gratson, Direct Writing in Three Dimensions. *Materials Today*, 7, 289-293, 2004.
7. G. M. Gratson, M. J. Xu, J. A. Lewis, Microperiodic structures - Direct writing of three-dimensional webs, *Nature*, vol. 428, pp. 386-386, 2004.
8. J. E. Smay, J. Cesarano and J. A. Lewis, Colloidal inks for directed assembly of 3-D periodic structures. *Langmuir*, vol. 18, pp. 5429-2437, 2002.
9. J. E. Smay, G. M. Gratson, R. F. Shepherd, J. Cesarano and J. A. Lewis, Directed Colloidal Assembly of 3D Periodic Structures. *Advanced Materials*, 14, pp. 1279, 2002.

10. R. B. Rao, K. L. Krafcik, A. M. Morales and J. A. Lewis, Microfabricated Deposition Nozzles for Direct-Write Assembly of Three-Dimensional Periodic Structures. *Advanced Materials*, vol. 17, pp. 289-293, 2005.
11. M. J. Xu, G. M. Gratson, E. B. Duoss, R. F. Shepherd and J. A. Lewis, Biomimetic Silicification of 3D polyamine-rich scaffolds assembled by direct ink writing, *Soft Matter.*, vol. 2, pp. 205-209, 2006.
12. D. Therriault, S. R. White, and J. A. Lewis, Chaotic Mixing in Three-Dimensional Microvascular Networks Fabricated by Direct-Write Assembly. *Nature Materials*, vol. 2, pp. 265-271, 2003.
13. D. Therriault, R. Shepherd, S. R. White, and J. A. Lewis, Fugitive inks for direct-write assembly of three-dimensional microvascular networks. *Advanced Materials*, vol. 17, pp. 395-399, 2005.
14. J. B. Mathieu and S. Martel, Magnetic steering of iron oxide microparticles using propulsion gradient coils in MRI, *Proc. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006.
15. W. M. Newman and R. F. Sproul, *Principles of Interactive Computer Graphics*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, pp. 309-331, 1979.
16. B. R. Flashbart, K. Wong, J. M. Iannacone, E. N. Abante et al., Design and fabrication of a multilayered polymer microfluidic chip with nanofluidic interconnects via adhesive contact printing, *Lab Chip*, vol. 6, pp. 667-674, 2006.

ANNEXE B : PCB-Integrated heat exchangers for cooling electronics using microchannels fabricated with the direct-write method

PCB-integrated Heat Exchangers for Cooling Electronics using Microchannels Fabricated with the Direct-write Method

Ramzi Bey-Oueslati, Daniel Therriault and Sylvain Martel, *Senior Member, IEEE*

Abstract—The growing need for efficient heat dissipation mechanisms in the electronic industry have lead to the investigation of micro heat exchangers. This active cooling approach requires the integration of microfluidic structures near the heat sources of the electronic components. Despite the investigation of several micro-cooling system configurations, their commercial utilization by the electronic industry is rather limited due to complex fabrication and integration methods. Here we present the integration of cylindrical microchannels fabricated by direct-write assemblies in printed circuit boards for micro heat exchanger applications. The thermal performance of the device was characterized with respect to the fluid flow rate. The original fabrication and integration approach presented here show promises for an efficient, compact, and low-cost micro heat exchanger for the electronic industry and can be easily adapted to electronic packaging.

Index Terms— Direct-write assembly, micro heat exchanger, cooling, printed circuit board

Nomenclature

D_h	Hydraulic diameter
f	Darcy friction factor
K	Kelvin
L	Length of channel
ΔP	Pressure drop
Re	Reynolds number
T	Temperature
u	Average velocity
W	Watt
η	Dynamic viscosity
ρ	Density
ν	Kinematic viscosity

Introduction

Thermal management has become a major limitation for the electronic industry. The higher density of transistors and the increased operating frequencies lead to superior heat density not manageable by conventional cooling means. This lack of heat dissipation efficiency brings higher operating temperatures that increase the risk of damaging valuable devices. These concerns are not only problematic for the electronic industries [1] but also for other applications such as the development of miniature robots [2] and aerospace structures [3], to name but only two examples. For several applications, air cooling mechanisms are not possible and other technologies need to be considered. Fluid cooling, for instance water, offers thermal conductivity and specific heat capacity 25 and 4 times superior than air, respectively. The passive or active circulation of liquid could be used to transfer the heat from a specific location to another location where heat dissipation is more effective. For example, the heat generated by all the main electronic components of a computer could be transferred to a fluid and transported to a simple heat dissipation mechanism, reducing the number of fans as well as the noise level. Thus, electronic manufacturers and others have an increasing interest in passive micro heat pipe [4]-[5] and active micro heat exchanger technologies. These microtechnologies are of great interest since they enable the development of compact systems that can be located very close to the heat source.

The cooling of electronic components using micro heat exchangers is a promising approach under investigation [6]-[9]. A micro heat exchanger is an active system where the heat is transferred to a fluid circulating inside channels with a hydraulic diameter

smaller than 1 mm. The system is usually composed of a pump for fluid circulation, a heat source, a heat sink and a set of microchannels. Previous work showed that micro heat exchanger cooling is very efficient with a low thermal resistance and a high heat dissipation capacity reaching 750 W/cm^2 [10]. The efficiency of these systems depends strongly on the flow rates imposed, the hydraulic diameter of the channels, the coolant fluid and the number of channels covering the heated surface. The thermal performance of the system also depends strongly on its integration and proximity of the heat sources. However, with integrated microchannels, it is possible to reach a better coupling with the heat sources and minimize thermal resistance.

Micro heat exchangers could be integrated on top of packages to replace currently used heat sinks. On the other hand, the integration of the cooling system to the exposed paddles technology should also be considered. Exposed paddles packages already exhibits better thermal characteristics, but the heat flux send to the ground planes is not removed. Consequently, temperature increases over time and can lead to a malfunction or failure. This aspect of thermal electronic design must be addressed. Conventional copper/FR4 printed circuit board (PCB) technology needs enhancement to contribute to the thermal effort of high power electronic devices.

The reported manufacturing processes to build microchannels for micro heat exchangers are Liga, chemical etching, stereolithography and micromachining [11]. Silicon etching is the most reported method and it is used to build microchannels with rectangular, trapezoidal or triangular cross-sections. But, the integration of chemical etching, Liga, and stereolithography with FR4 PCBs manufacturing is hardly

conceivable. The challenges are related to the materials used and the bonding process to couple the micro heat exchanger to the electronic devices. Micromachining of copper has been used successfully in the past [12] to integrate copper/FR4 channels and this type of design is sometimes used in the industry. Though, a machined copper approach limits the cross-section geometry to rectangles leading to possible turbulent flows.

This paper presents the fabrication of circular cross-section microchannels ($\sim 200\text{-}500\mu\text{m}$ in diameter) and their integration inside the layers of a PCB for micro heat exchanger applications. The fabrication of the microchannels by direct-write assembly inside the PCBs is an approach that allows a tight thermal coupling to the heat sources. This customizable approach can use the Gerber files created by PCB layout software packages to define the microchannel paths and hence, avoiding the vias used to provide electrical interconnects through the various layers of the PCB. Here, the thermal efficiency of a prototype using microchannels with a hydraulic diameter of $500\mu\text{m}$ has been experimentally verified and promising performances are expected at high flow rates.

Experimental Procedure and Materials

A. Substrate preparation

A double layered Cu/FR4 sheet of $350\mu\text{m}$ thickness ($\text{Cu} = 75\mu\text{m}$, $\text{FR4} = 200\mu\text{m}$) was used for the prototype fabrication. Copper was etched from the substrate on one side of the sheet using PCB milling (Protomat S95, LPKF) to form heating circuits. Two prototypes were made with line widths of $200\mu\text{m}$ and $500\mu\text{m}$ respectively. A thin resin

film (~40-200 μm) was then deposited and polished on the circuit to provide electrical insulation. This insulation layer is not necessary when the microchannels are built directly over a ground plane, the different channels are not crossing electrical lines, or the cooling fluid used is a dielectric.

B. Microchannel fabrication

Microchannels were built directly over the traces of copper using the direct-write assembly. This approach consists of the robotic deposition of ink for the freeform fabrication of various structures such as periodic ceramics structures [13] or fluidic 3D micromixers [14]. The direct-writing procedure for the creation of microchannels is illustrated in Fig. 1 and is based on the robotic deposition of a fugitive organic ink [15] on a substrate (Fig.1a). The ink is a mixture of microcrystalline wax and petroleum jelly (40% of weight and 60% of weight, respectively) contained in a syringe barrel. The paste-like material was extruded through a cylindrical micronozzle (~200-500 μm in diameter, Stainless-steel precision tips, EFD) under constant pressure. The ink deposition pattern was performed at a constant velocity according to the circuit drawing files. Alignment marks were etched on the copper to position the tip of the nozzle relative to the circuit prior to the deposition process. The deposited ink pattern was then infiltrated (Fig. 1b) with a low-viscosity resin (mix 2.5:1, Epon-828 and Epi-cure 3274, Shell Chemicals) at ambient condition.

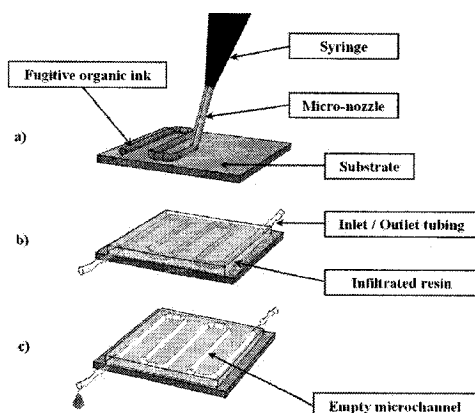


Fig. 1. Schematic illustration of the fabrication process of a two dimensional microchannel by direct-write assembly: a) extrusion of ink through micro-nozzle and robotic deposition on substrate; b) fluidic connection and epoxy infiltration; c) epoxy solidification and removal of fugitive organic ink.

C. Micro heat exchanger assembly

Upon curing, a second laminated sheet of Cu/FR4 was glued to the circuit with the same epoxy resin used for the assembly of the multilayer PCB (Fig. 2). Holes of 300 μ m and 2mm in diameter were drilled on the board to form thermal and electrical vias. A chemical electroplating (Contact II, LPKF) was performed for a successful coating of copper over the resin/FR4 layers as shown in Fig. 3d. The fully-assembled micro heat exchanger is presented in Fig. 3e.

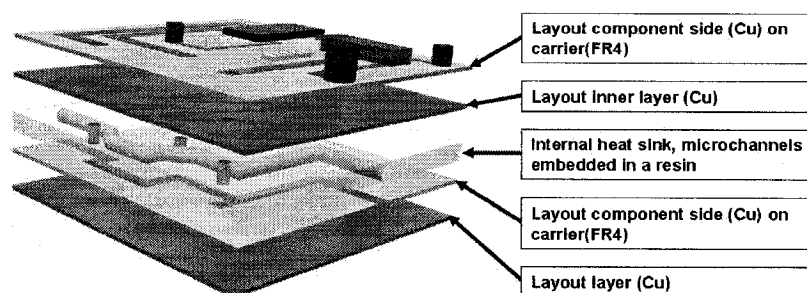


Fig. 2. Exploded view of a four layer printed circuit board with embedded microchannels.

D. Fluidic connections

After the board assembly, the two extremities of the encapsulated ink pattern were connected to micro-tubes (S-54-HL, Tygon) with 200 μ m and 500 μ m inner diameters. The flexible micro-tubes used can tolerate temperatures up to 366°K making them suitable for this application. Each end of the ink pattern and the micro-tubes were aligned using copper wires which was subsequently removed after the connections were glued. Then, the board was heated at moderate temperature ($\sim$ 348°K) and the melted ink was removed by applying vacuum at one end of the micro-tube. Finally, hot water was injected in the channel to ensure that the ink was completely removed in order to obtain a cleaned microchannel embedded into the resin (Fig. 1c).

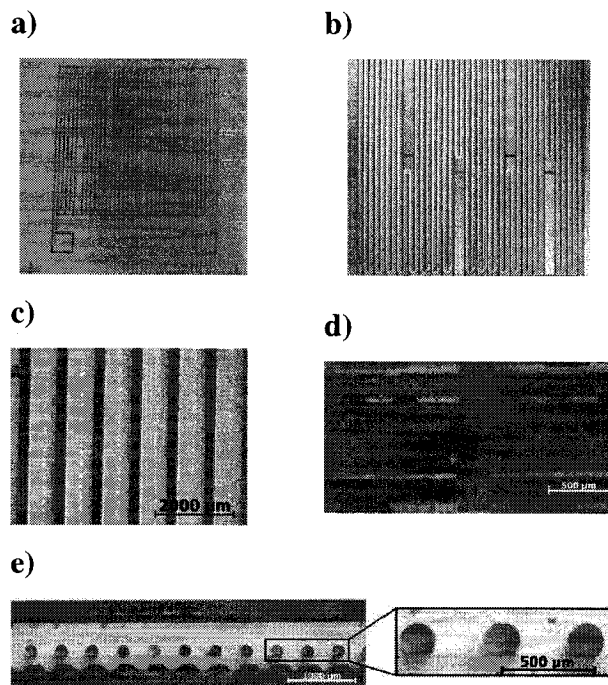


Fig. 3. a) Internal copper layout used for microfabrication and thermal testing of micro heat exchangers; b) 500 μ m diameter ink channel deposited over copper trace following circuit drawings; c) Larger view of the ink filaments over the layout; d) Electroplating of a via of 300 μ m in diameter on a resin/FR4/copper sheet; e) Transversal cut of 200 μ m diameter channels embedded between two FR4/copper sheets.

E. Thermal setup

Thermal experiments were performed on a four layer PCB containing a $500\mu\text{m}$ diameter microchannel in order to demonstrate the fabrication process of our micro heat exchanger and to estimate its thermal efficiency.

Fig. 3a presents the type of outlines etched on the internal layout of the PCBs. The channel used was 1.45m long and covered an area of 7.25cm^2 . The experimental setup is shown in Fig. 4. The inside etched copper layer is electrically connected through vias and is used to generate the heat flux. In the present case, distilled water is used. De-ionized water may seem advantageous initially because of its poor electrical conductivity and therefore, it would not cause much damage if a leak would occur. However, water is an excellent solvent, and with time, it will corrode the copper to get its ions back. The circuit has been embedded in a polymer matrix to minimize the heat dissipated by convection during the experiment.

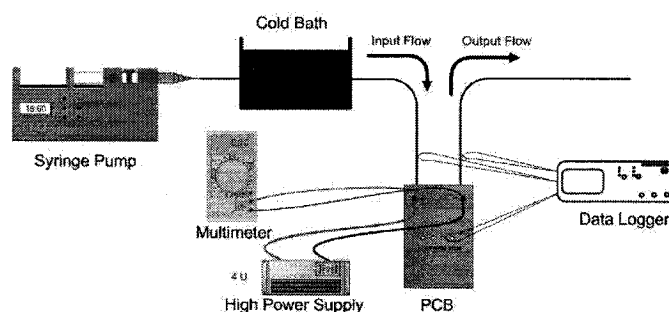


Fig. 4. Schematic illustration of the thermal setup used to measure the flow rate needed to dissipate the imposed power.

The temperature reading was done with type-T thermocouples connected to the inlet/outlet of the channel and to a via located at the middle point of the circuit to acquire the average temperature of the circuit. The water was injected at a temperature of

284±1°K to reach the desired gradients between the circuit and the input fluid temperature.

The following procedure was used for the thermal experiments. First, a high electrical current (DCS12-250E, Sorensen) was applied while the voltage was monitored at the terminals of the circuit. A syringe pump (NE-1000, Pump Systems Inc.) was used to flow the cooling water at a desired rate. Then, the temperatures were monitored and recorded using type-T thermocouples linked to a data acquisition system (HH506R, Omega). As mentioned earlier, the temperatures measured by the thermocouples were the fluid temperature at the entrance and exit of the embedded microchannel, and the temperature of the circuit located at the middle of the board. Finally, the flow rate imposed by the syringe pump was manually adjusted in order to achieve the specific temperature gradient between the input fluid temperature and the circuit (ΔT). Temperature gradients of 15°K, 20°K and 25°K were evaluated with an accuracy estimated at $\pm 0.2^\circ\text{K}$.

Results and Discussion

A. Thermal results

The current of the power supply was set to generate a power of 3W, 4W, 5W and 6W in the internal circuit. Fig. 5 shows the coolant flow rates needed to keep a temperature differential of 15°K, 20°K and 25°K between the circuit and the input coolant. Water flow rates from 0.75ml/min to 3ml/min were necessary to reach the different temperature gradients. A maximum heat dissipation of 0.81W/cm² may seem ineffective

but this result is for only one microchannel and for a flow rate of only 3ml/min. The coolant flow rate is linearly dependant upon the dissipated power since the R-squared value of the linear regression of the three curves are all higher than 0.99. The results could be extrapolated if the behavior of the liquid does not change. The kinematic viscosity of water is known for liquid temperatures by using the Reynolds number defined by :

$$\text{Re} = \frac{\rho D_h u}{\eta} = \frac{D_h u}{\nu} , \quad (1)$$

where D_h is the hydraulic diameter, u is the average velocity of the fluid inside the channel, ρ is the density of the fluid, η is the dynamic viscosity, and ν is the kinematic viscosity of the fluid.

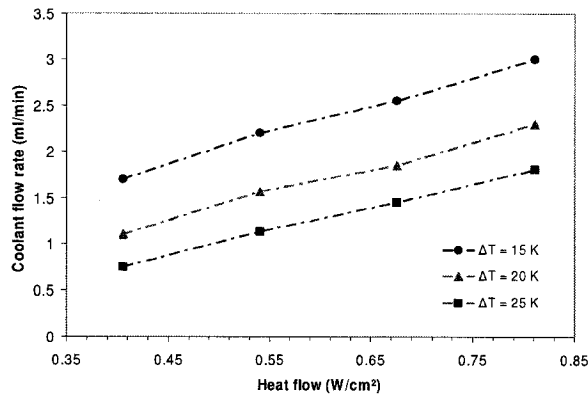


Fig. 5. Experimental results of water flow rates needed to dissipate heat flux for different temperature gradients in a 500μm diameter channel.

For the highest flow rate used in the experiment, which is 3ml/min, the Reynolds number reaches a value of only 178 as presented in Fig. 6. These values are also

influenced by the walls roughness of the microchannel, which have been characterized with a root-mean-square of $13.3 \pm 6.5 \text{ nm}$ [14]. With this soft surface, we can conclude that an analytic estimation gives us a prediction of the liquid behavior. That flow rate could be increased to 17 ml/min before a transition to turbulent flows which are expected to occur in the range of 1000 to 2000 for most situations [16]. Applying a flow rate of 17 ml/min to the temperature gradient of 25°K gives a heat flow dissipation of 6.73 W/cm^2 using the relation found from the experiments (Fig. 5). With a laminar limit flow rate of 20 ml/min and a temperature gradient of 15°K , the system enables heat dissipation of 6.23 W/cm^2 . Obviously, using the highest temperature gradient in a cooling device is suitable to dissipate more heat at lower coolant flow rate. On the other hand, operating at a higher temperature would also increase the Reynolds number and the risk of a turbulent flow. These parameters need to be considered and also depends on the performance of the heat sink deployed with the cooling system.

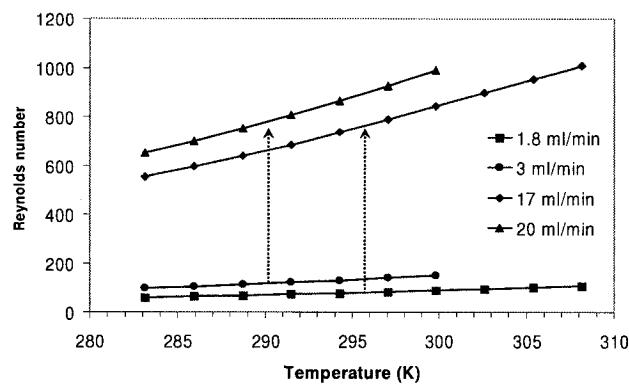


Fig. 6. Modeling of Reynolds number versus temperature in a $500 \mu\text{m}$ diameter channel for a flow rate of 1.8 ml/min ($\Delta 25^\circ\text{K}$) and 3 ml/min ($\Delta 15^\circ\text{K}$) and their extrapolation for maximum flow rates before turbulent behavior.

B. Pressure drop

The pressure drop along a channel needs to be considered with the specification of the micro-pump that will be used with the system. Because of the pressure loss of the channel, leakage has been observed for high flow rates (>6ml/min) in the experimental setup. Considering the operating temperature range and the desired flow rate for a given heat dissipation, the pressure drop can be analytically evaluated (Fig. 6). For circular microchannels the pressure drop is defined as

$$\Delta P = \text{Re} f \frac{\eta L}{2 D_h^2} u, \quad (2)$$

where L is the length of the channel and f is the Darcy friction factor where for laminar flows it is defined as

$$f = 64 / \text{Re}, \quad (3)$$

Substituting (3) into (2) give us

$$\Delta P = 32 \frac{\eta L}{D_h^2} u, \quad (4)$$

As described by (1), the pressure drop is a function of the length of the channel, its hydraulic diameter, the dynamic viscosity and the velocity of the fluid. At constant temperature, the pressure drop increases linearly along a channel and the slope depends on the flow rate imposed to the fluid. For a flow rate of 3ml/min, at a temperature of 298°K, the pressure drop reaches a value as high as ~42kN/m² at the end of the 500µm diameter channel, although the dynamic viscosity of water is inversely proportional to its temperature [17]. The change in viscosity of the fluid with the increase of the temperature greatly affects the pressure drop along a channel as presented in Fig. 7. For

a gradient of 15°K , the pressure drop at the end of the channel was $\sim 41\text{kN/m}^2$ as opposed to $\sim 33\text{kN/m}^2$ for a gradient of 25°K . It is also shown in Fig. 7 that the length of the channel has less effect on the pressure as the temperature increases.

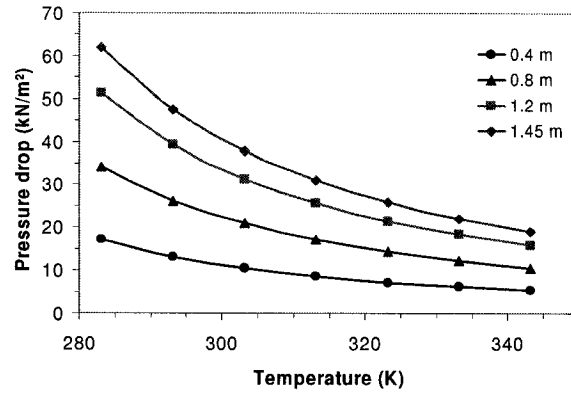


Fig. 7. Modeling of pressure drop considering the fluid temperature at different locations within the channel with water as a working fluid at a flow rate of 3ml/min.

This diminution of the pressure drop promotes the operation of the cooling system at the highest possible temperature while staying below junction and turbulent flow transition temperatures. A maximum temperature of 320°K for instance, which is below the junction temperature of most electronic components, would lower the pressure drop to $\sim 27\text{kN/m}^2$.

An additional aspect to consider for a proper micro heat exchanger design is the increase of the temperature inside the channel. It is expected that the temperature of the coolant will not increase linearly along the heated channel since the axial heat flux cannot be neglected [18], especially in the configuration presented in this paper. Experiments showed that the outlet temperature stays around the average circuit temperature with a deviation of $\pm 2^{\circ}\text{K}$ (only under the wall temperature). However, a

linear increase of the temperature, as depicted in Fig. 8, gives the total pressure drop for the channel while the drop at different locations might be slightly different. For the worst case of the experiment, the pressure drop reaches $\sim 41 \text{ kN/m}^2$. As an example, a commercially available micro pump (Model 7200/7205, Idex Corporation) is capable of a flow rate of 288 ml/min , differential pressure of 8000 kN/m^2 and an inlet pressure of 500 kN/m^2 . But this type of high performance micro pump is not necessary with the decrease of the channel length, the increase of the operation temperature, and the number of channels in a real application.

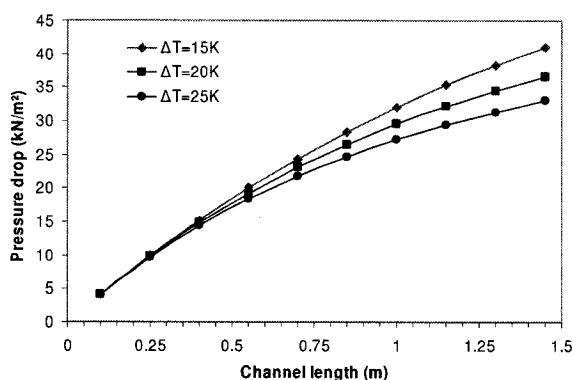


Fig. 8. Modeling of pressure drop versus channel location considering a linear temperature elevation across the channel for a flow rate of 3 ml/min .

Conclusion

We have successfully applied a new microfabrication technique based on directed assembly of a fugitive organic ink, to build circular microchannels inside printed circuit board's layers. The fabrication process is compatible with PCBs manufacturing process, requiring just few minor modifications during manufacturing. This process could be combined to exposed paddles packages, for instance, for higher heat dissipation with

low thermal resistance. The routing of the channels is customizable and can be adjusted to the specifications of a circuit design for best thermal coupling with high power components. Directed writing is a low cost production technique and recent work [19] has already enhanced the manufacturing capability of the direct write process with a writing speed of up to 100mm/s for two dimensional microchannels. Experiments on one channel of 500 μ m in diameter at low flow rates have been conducted. The results show promises for this technique with a heat dissipation of 0.81W/cm² at only 3 ml/min. With a laminar flow, the same channel is capable of a heat dissipation of 6.7W/cm² at a flow rate of 17 ml/min and a temperature gradient of 25°K. Several aspects need to be set for an optimal heat dissipation of an electronic device. These parameters are strongly dependant upon the efficiency of the heat sink, the flow rate, and the differential pressure capability of the micro-pumps commercially available. The diameter, length and number of channels deployed need to be adjusted according to these devices and the operating temperatures needed for efficient cooling.

Acknowledgment

The authors acknowledge the technical support of Charles Tremblay and Samy Joseph Palm.

References

- [1] R. Viswanath, V. Wakharkar, A. Watwe, and V. Lebonheur, "Thermal performance challenges from silicon to systems," *Intel Technology Journal*, Q3, 2000.

- [2] S. Martel, "Cooling strategies for high performance miniature wireless robots designed to operate at the nanoscale," *Proceedings of the third IEEE conference on nanotechnology*, vol. 2, pp. 148-151, August 2003.

- [3] A.J.H. Heresztyn, N.C.D. Okamoto, "Thermal design of microchannel heat sinks for low-orbit micro-satellites," *Proceedings of the third international conference on microchannels and minichannels, Part B*, pp. 159-165, June 2005.

- [4] C. Gillot, Y. Avenas, N. Cezac, G. Poupon, C. Schaeffer and E. Fournier, "Silicon heat pipes used as thermal spreaders," *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, vol. 26, no. 2, pp. 332-339, June 2003

- [5] M. Le Berre, S. Launay, V. Sartre and M. Lallemand, "Fabrication and experimental investigation of silicon micro heat pipes for cooling electronics," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, no. 3, pp. 436-441, May 2003.

- [6] H. Lee, Y. Jeong, J. Shin, J. Baek, M. Kang, and K. Chun, "Package embedded heat exchanger for stacked multi-chip module," *Sensors and Actuators A (physical)*, vol. A114, no. 1-2, pp. 204-211, Sept. 2004.

- [7] V. G. Pastukhov, Yu. F. Maidanik, C. V. Vershinin, and M. A. Korukov, "Miniature loop heat pipes for electronics cooling", *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1125-1135, June 2003.
- [8] S. Mukherjee, and I. Mudawar, "Smart pumpless loop for micro-channel electronic cooling using flat and enhanced surfaces," *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, vol. 26, no. 1, pp. 99-109, March 2003.
- [9] J. Li, and G. P. B. Peterson, "Geometric optimization of a micro heat sink with liquid flow," *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 145-154, March 2006.
- [10] C. C. S. Nicole, R. Dekker, A. Aubry, and R. Pijnenburg, "Integrated micro-channel cooling in industrial applications," *Proceedings of the Second international Conference on Microchannels and Minichannels (ICMM2004)*, pp. 673-677, June 17-19 2004.
- [11] S. Ashman and G. S. Kandlikar, "A review of manufacturing processes for microchannel heat exchanger fabrication," *Proceedings of the fourth international Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels (ICMM2004)*, pp. 855-860, June 19-21 2006.

- [12] J. Schütze, H. Ilgen, and W. R. Fahrner, "An integrated micro cooling system for electronic circuits," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 2, April 2001.
- [13] J. E. Smay, G. M. Gratson, R. F. Shepherd, J. Cesarano, J. A. Lewis, "Directed colloidal assembly of 3D periodic structures," *Advanced Materials*, vol. 14, no. 18, pp. 1279-1283, Sept. 2002.
- [14] D. Therriault, S. R. White, and J. A. Lewis, "Chaotic mixing in three-dimensional microvascular networks fabricated by direct-write assembly," *Nature Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 265-271, April 2003.
- [15] D. Therriault, R. Shepherd, S. R. White, and J. A. Lewis, "Fugitive inks for direct-write assembly of three-dimensional microvascular networks," *Advanced Materials*, vol. 17, no. 4, pp. 395-399, Feb. 2005.
- [16] N.-T. Nguyen, and S. T. Wereley, "Fundamentals and application of microfluidics," Artech House Integrated Microsystems Series, TJ853.N48, Chap. 2, 2006.
- [17] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, "Fundamentals of heat and mass transfer," Wiley, Fourth edition, Appendix A.6, 2006.

- [18] I. Tiselj, G. Hetsroni, B. Mavko, A. Mosyak, E. Pogrebnyak, and Z. Segal, "Effect of axial conduction on the heat transfert in micro-channels," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, pp. 2551-2565, 2004.

- [19] R. Bey-Oueslati, S. Palm, D. Therriault and S. Martel, "High Speed Direct-Write for Rapid Fabrication of Three Dimensional Microfluidic Devices," *Int. J. of Heat and Technology*, under press.

ANNEXE C : Boucle de contrôle et gains des axes de positionnement

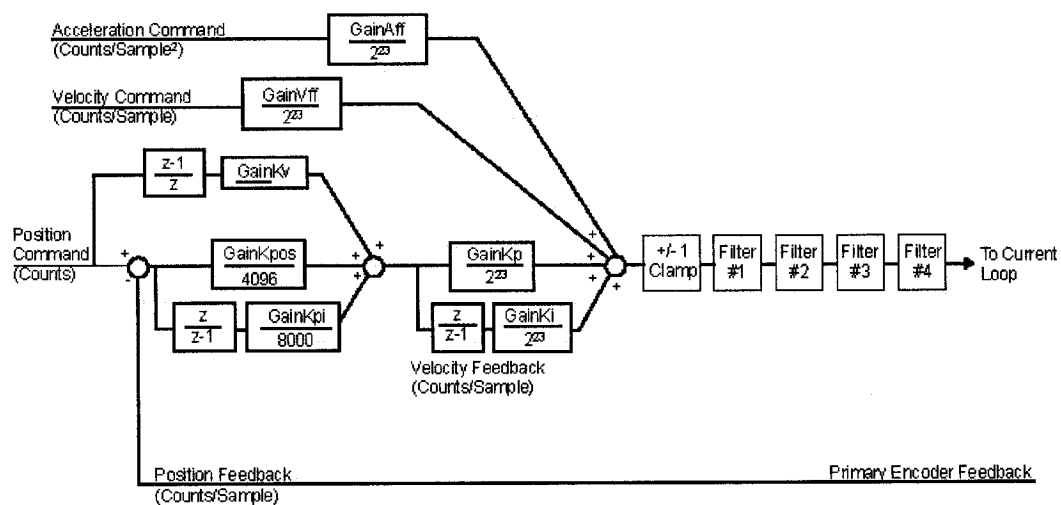
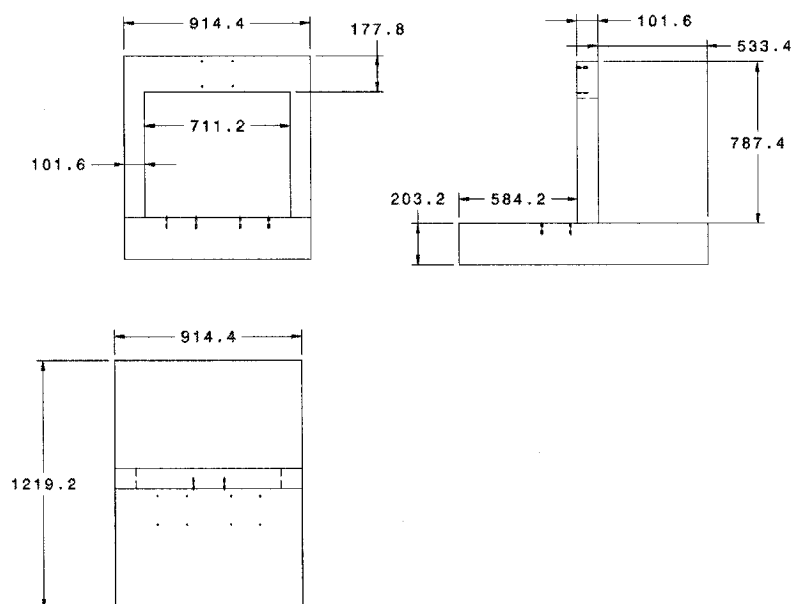


Schéma fonctionnel de la boucle de contrôle de courant (NVIEW help, aerotech).

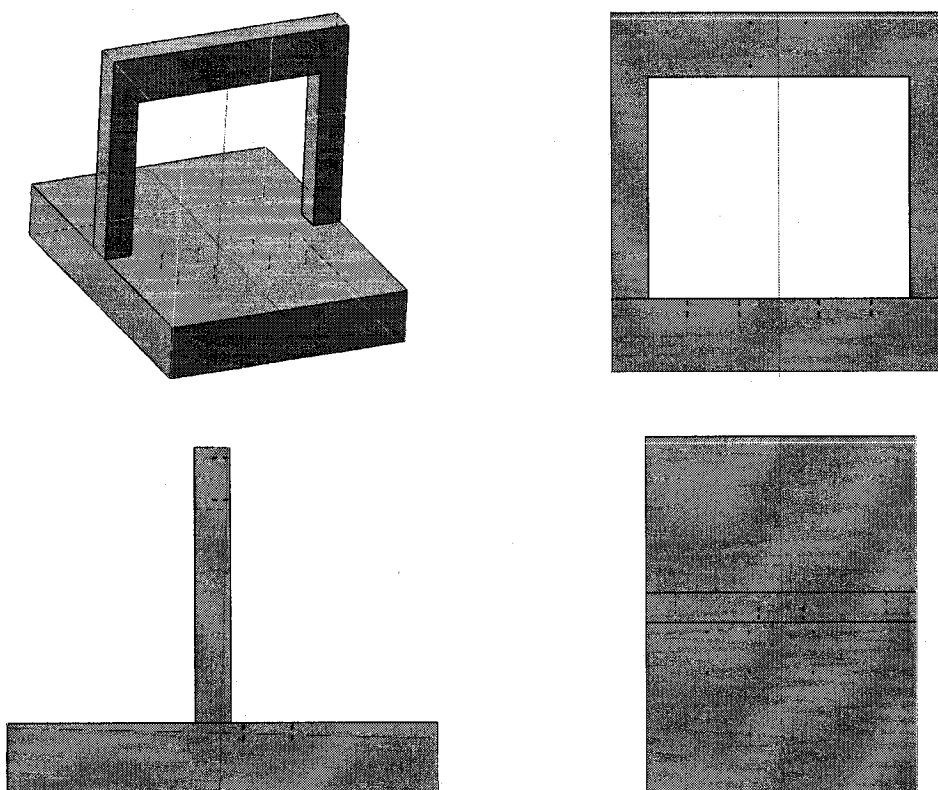
Tableau des gains de la boucle de contrôle de courant pour les axes X, Y, Z et R.

	X	Y	Z	R
GainAff	1100	220	2200	0
GainVff	0	0	0	0
GainKv	1	1	1	1
GainKpos	48	62	115	10
GainKpi	0	0	0	0
GainKp	2000	490	12000	3000
GainKi	72	7.4	340	250

ASSEMBLAGE :



CENTRE DE MASSE :



ANNEXE E : Attributs et méthodes de la classe CStageControl

MHP1: CStageControl
<pre> + hAerCtrl : HAERCTRL + eRc : AERERR_CODE + tQueue : CAerQueue + m_tControl : CAerControl + wStatus : WORD + wNumAllocated : WORD + wNumTotalRequested : WORD + wNum960CollectedSoFar : WORD + wNumPointsTriggered : WORD + szInBytes : DWORD + iAxis : DWORD + nNumberOfBytesToWrite : DWORD + dwNumberOfBytesWritten : DWORD + iPointsAllocated : long + StripSamples : AER_GSTRIP_SAMPLE + bSucceed : DWORD + iPoint : LONG + m_BSpline : BSpline + m_Laser : CKeyenceLaser + bEnable : BOOL + mAxesZ : TASKAXISMASK + dDist[MAX_AXES] : double + dOffsetUj[MAX_AXES] : double + dFeedRate : double + dG0FeedRate[MAX_AXES] : double + StageControl() + ~StageControl() + InitializeSmc() : TCHAR * + FillG1QueueMotionXYZ(in XPosition : double, in YPosition : double, in ZPosition : double, in Speed : double) : TCHAR * + FillG1QueueMotionXY(in XPosition : double, in YPosition : double, in Speed : double) : TCHAR * + WaitForQueue() : TCHAR * + InitXYZR() : TCHAR * + HomeXYZR() : TCHAR * + HomeXY() : TCHAR * + HomeZR() : TCHAR * + XYZMovePTP(in XPosition : double, in XSpeed : double, in YPosition : double, in YSpeed : double, in ZPosition : double, in ZSpeed : double) : TCHAR * + XYMovePTP(in XPosition : double, in XSpeed : double, in YPosition : double, in YSpeed : double) : TCHAR * + EnableXYZR() : TCHAR * + DisableXYZR() : TCHAR * + FaultAck() : TCHAR * + MoveZAxisToZero(in offset : double, in speed : double) : TCHAR * + MovePTPOneAxis(in dwIndex : DWORD, in position : double, in speed : double) : TCHAR * + InitQueue(in mAxes : TASKAXISMASK) : TCHAR * + RestartQueue() : TCHAR * + FreeQueue(in mAxes : TASKAXISMASK) : TCHAR * + GetAxisPosition(in dwIndex : DWORD, in position : double) : TCHAR * + GetErrorMessage(in eRc : AERERR_CODE) : TCHAR * + InitializeAcqQueue(in wBufferSize : long, in wTriggerRate : WORD) : TCHAR * + StartAcqQueue() : TCHAR * + StopAcqQueue(in AcqPath : BSpline*, in Layer : float, in ChannelDiam : float) : TCHAR * + GetQueueInfo(in Parameter1 : PDWORD) : TCHAR * </pre>